

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).

Influência da Renovação de Meio Corrosivo no Comportamento do Aço X65 quanto a Corrosão em Meios de CO₂ e H₂S

Rogaciano M. Moreira^a, Cleison F. C. Nascimento^b, Merlin C. E. Bandeira^c, Oscar R. Mattos^d
LNDC/COPPE/UFRJ
Flávia M. F. Guedes^e, Ilson P. Baptista^f
CENPES/PETROBRAS

Abstract

In oil production and refining chains, AISI X65 carbon steel is widely used in highly aggressive environment. Typically, these materials are laboratory-tested with corrosive medium that simulate future field conditions. There are technical standards for corrosion testing, such as ASTM G31, which establish the minimum V / A ratio to avoid variations in reagent concentrations and thus ensure the corrosivity of the medium. However, according to the material and test variables, even following these technical standards this is not always true. In this work, the X65 steel was evaluated in CO₂ and H₂S media in autoclave with rotating electrode, adapted with devices that allowed the renewal of the corrosive medium. Mass loss, electrochemical impedance and post-test surface analyzes were performed for the characterization of this steel. It was observed that uniform corrosion rates were on average 4 times higher under solution renewal conditions, indicating that the composition of the corrosive medium changes if this medium is not renewed. This behavior were corroborated by the electrochemical impedances. Therefore, if in the field the corrosive medium is frequently renewed, it is of great importance to assess whether the tests that are performed in the laboratory are actually simulating such conditions.

Keywords: X65 Steel; CO₂ and H₂S Corrosion; Corrosive medium renewal; RCE.

Resumo

Nas cadeias de produção e refino de petróleo, o aço carbono AISI X65 é amplamente utilizado em ambientes altamente agressivos. Normalmente, estes materiais são testados em laboratório com meios corrosivos que simulam as futuras condições de campo. Existem normas técnicas para testes de corrosão, como a ASTM G31, que estabelecem a relação V/A mínima para evitar variações nas concentrações dos reagentes e, portanto, garantir a corrosividade do meio. Entretanto, de acordo com o material e variáveis de teste, mesmo obedecendo estas normas isto nem sempre é verdadeiro. Neste trabalho, o aço X65 foi

^a PhD, Químico - LNDC/COPPE/UFRJ

^b Tec. Petróleo e Gás - LNDC/COPPE/UFRJ

^c PhD, Química - LNDC/COPPE/UFRJ

^d PhD, Engenheiro Metalurgista - LNDC/COPPE/UFRJ

^e PhD, Engenheira de Processamento - CENPES/PETROBRAS

^f MSc, Engenheiro de Equipamentos - CENPES/PETROBRAS

avaliado em meios de CO₂ e H₂S em autoclave com eletrodo rotatório, adaptada com dispositivos que permitiram a renovação do meio corrosivo. Ensaio de perda de massa, impedância eletroquímica e análises de superfície pós-testes, foram realizados para a caracterização deste aço. Observou-se que as taxas de corrosão uniforme foram, em média, 4 vezes maiores em condições de renovação de solução, indicando que a composição do meio corrosivo muda caso este meio não seja renovado. Este comportamento foi corroborado pelas impedâncias eletroquímicas. Portanto, se no campo o meio corrosivo é renovado frequentemente, é de grande importância avaliar se os testes que são realizados em laboratório realmente estão simulando tais condições.

Palavras-chave: Aço X65; Corrosão CO₂ e H₂S; Renovação do meio corrosivo; RCE.

Introdução

Durante a extração e transporte, o petróleo entra em contato diretamente com diversos equipamentos confeccionados em aço carbono que compõem a cadeia de produção e refino de petróleo. Dentre estes equipamentos podemos destacar: colunas de produção, dutos de transporte rígidos e flexíveis, vasos de armazenamento, torres de destilação, etc. Do ponto de vista da corrosão, o que torna o petróleo agressivo a estes aços é a fase aquosa presente. Esta fase aquosa, conhecida como Água de Produção, solubiliza gases ácidos, como o CO₂ e o H₂S, ácidos orgânicos, como o ácido fórmico e o acético (mais comuns) e sais (orgânicos e inorgânicos) que afetam diretamente a durabilidade destes aços ao longo do tempo. Não menos agressiva, a água condensada presente nos dutos de transporte de gás de petróleo e também nos dutos dos sistemas de re-injeção de CO₂ torna-se extremamente corrosiva na presença de CO₂ e H₂S. Fatores como temperatura, pressões parciais dos gases e fluxo dos fluidos, também influenciam fortemente a corrosividade da fase aquosa.

Em determinadas temperaturas, a formação de filmes/camadas de FeCO₃ e/ou FeS sobre o metal é bastante favorecida. Este processo é controlado pela solubilidade dos íons envolvidos na composição dos mesmos, no caso Fe²⁺ e CO₃²⁻ para Fe₂CO₃ e Fe²⁺ e S²⁻ para FeS. Quando os produtos das concentrações destes íons na interface metal/solução chega a valores superiores aos produtos de solubilidades dos compostos FeCO₃ e FeS, estes compostos se precipitam, gerando assim camadas sobre o metal. Dependendo da morfologia destas camadas, a estrutura obtida pode conferir uma proteção contra a corrosão do aço carbono ou não, eventualmente contribuindo para diminuição das taxas de corrosão.

Os dados aqui apresentados fazem parte de um amplo estudo em que avaliou-se a influência de diferentes variáveis na corrosão do aço AISI X65 em meios normalmente encontrados na indústria de óleo e gás. Uma destas variáveis foi a renovação do meio corrosivo. Promovendo-se a renovação do meio pode-se garantir constantes todas as variáveis do teste, principalmente pH e concentração das espécies envolvidas na corrosão pelo CO₂ e H₂S, tendo-se assim uma simulação mais precisa da corrosão que ocorre durante a exploração e produção de petróleo. Diante dos vários resultados obtidos, decidiu-se por apresentar alguns dos resultados mais significativos para se discutir a importância desta variável nos testes de laboratório, pois nem sempre, este tipo de procedimento é levado em conta nos estudos da corrosão. Como resultado, as taxas de corrosão do aço AISI X65, obtidas por perda de massa, foram relativamente maiores nos sistemas com renovação de meio que aquelas obtidas em sistemas sem a renovação, mesmo usando uma relação V/A bastante alta, de 223,6 mL/cm².

Estas taxas de corrosão se mostraram condizentes qualitativamente com os dados de impedância eletroquímica e análises de imagens.

Metodologia

Os testes foram realizados em autoclave CORTEST de 5.000 mL fabricada em liga Hastelloy C-276 adaptada com eletrodo de cilindro rotatório (RCE) preso em sua tampa e com temperatura máxima de operação de 300 °C. Para possibilitar a renovação de solução foi desenvolvido pelo LNDC um sensor de nível, associado a uma válvula de descarga eletropneumática que permitiram realizar a renovação do meio corrosivo e garantir o volume constante de solução ao longo de todo o teste. Dois reservatórios de solução foram montados em série com a autoclave e através de bombas específicas o meio corrosivo era transferido destes reservatórios continuamente para o interior da autoclave, com uma vazão controlada de 10 mL/min. Ao atingir o nível de desejado, uma quantidade de solução era automaticamente descartada para um terceiro reservatório de modo a manter o volume de 3100 mL dentro da autoclave. Esta vazão de 10 mL/min foi determinada após a realização de testes preliminares, a partir dos quais se concluiu que esta taxa de alimentação do vaso não provocaria mudanças nas variáveis temperatura, pressão e composição do meio.

Após fechar todo o sistema, e já com os eletrodos montados, a desaeração dos reservatórios de solução, da autoclave contendo os corpos de prova, do reservatório de descarte e de todas as linhas do sistema com N₂ 5.0, era iniciada. Ao alcançar níveis de O₂ dissolvido abaixo de 5 µg/L no sistema, medidos no reservatório 1 de maior volume (figura 1), a solução de teste era bombeada para a autoclave. Esta era então aquecida até a temperatura de teste e pressurizada com a mistura padrão de CO₂/H₂S na pressão desejada. Para cada teste uma concentração específica de mistura CO₂/H₂S foi utilizada de modo a alcançar os teores de H₂S de interesse na pressão total. Através uma válvula agulha colocada após o trocador de calor (figura 1), uma vazão média de 100 mL/min de gás foi mantida ao longo do ensaio de modo a manter uma saturação do meio com a mistura gasosa. Desta forma tanto a renovação do meio corrosivo quanto as concentrações dos gases dissolvidos em solução foram mantidas durante os ensaios. Nos ensaios sem renovação de solução o procedimento foi o mesmo, com a diferença de que o sistema de sensor nível, a válvula eletropneumática e os tanques de abastecimento de solução foram removidos.

O agitador da autoclave era então acionado de modo a gerar uma tensão de cisalhamento de 4Pa nos corpos de prova. Em seguida a aquisição das impedâncias eletroquímicas era acionada e aquisições periódicas eram realizadas até o final do ensaio. Para isto, um Potenciostato/Galvanostato GAMRY REF 600 em conjunto com um Multiplexador de canais EMC8 com interface PC foram utilizados. Os parâmetros das impedâncias foram: faixa de frequências de 1000Hz a 0,002Hz (5 pontos/década), com Amplitude de potencial de 10 mV no potencial de corrosão.

A figura 1 apresenta um desenho esquemático do sistema utilizado e a figura 2 apresenta uma foto deste mesmo sistema.

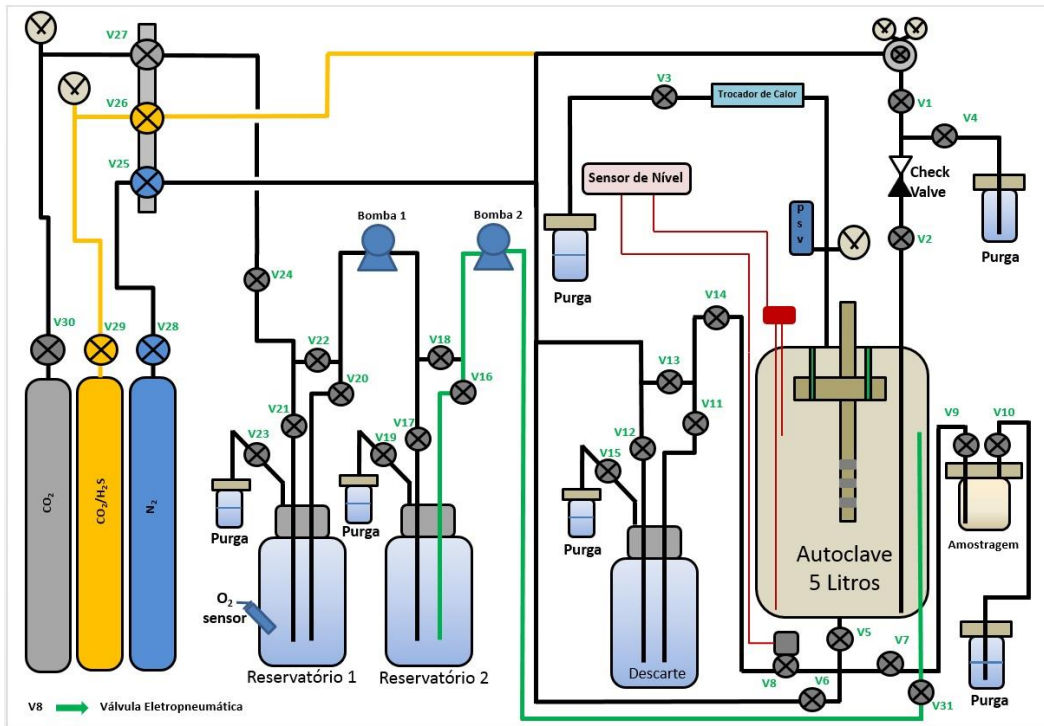


Figura 1 - Esquemático do sistema de teste utilizado

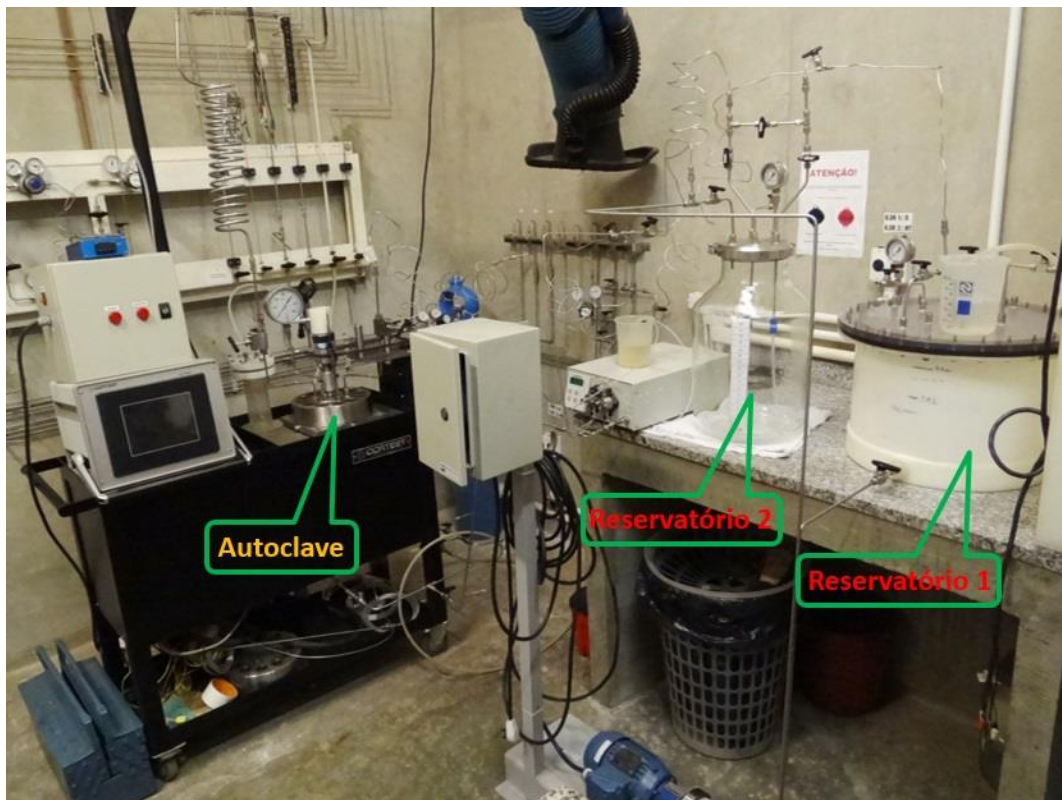


Figura 2 - Sistema utilizado para a realização dos testes

O eletrodo de cilindro rotatório (ASTM G 170) foi montado com corpos de prova (Cps) para o teste eletroquímico e para os ensaios de perda de massa. O Cp eletroquímico foi isolado eletricamente da autoclave e dos Cps perda de massa e teve seu contato elétrico feito através de um sistema de grafite com fio inoxidável preso e levado isoladamente para o exterior da autoclave. O eletrodo de referência foi um fio de platina, que tem seu potencial estável no meio em questão, e o eletrodo auxiliar foi a própria autoclave.

Os corpos de prova cilíndricos foram usinados a partir de um trecho de tubulação do aço carbono AISI X65 com dimensões de 21 mm de diâmetro por 7 mm de altura cada. Em cada amostra foi dado um acabamento de retífica até lixa P800 na face a ser ensaiada. As dimensões dos corpos de prova eram determinadas com auxílio de um paquímetro, e depois eram lavados com detergente neutro Extran MA 02 Merk a 5%, água em abundância, acetona em banho de ultrassom e secos ao ar. Os Cps eram então guardados em dessecador sob vácuo até o momento do teste.

A área exposta de cada corpo de prova do eletrodo de cilindro rotatório era de 4,62 cm² (lateral do cilindro), totalizando 13,86 cm² para os três Cps. Para o volume de solução utilizado, de 3100 mL, a relação V/A foi de 223,6 mL/cm².

Condições de teste

Os ensaios foram realizados expondo o aço X65 a meios encontrados na indústria de óleo e gás. Para tal, uma solução aquosa contendo 600 mg/L de cloreto foi utilizada e a autoclave foi saturada e pressurizada com misturas contendo CO₂ e H₂S na pressão total de 1 MPa. Uma tensão de cisalhamento de 4Pa foi imposta aos Cps pela rotação do eletrodo. A tabela 1 resume as condições dos testes realizados. Para cada condição, testes com e sem renovação de meio corrosivo foram realizados.

Tabela 1 - Ensaios realizados com e sem renovação do meio corrosivo e com tensão de cisalhamento de 4Pa

Condição*	T (°C)	ppH ₂ S** (MPa)	P _{total} (MPa)	Rotação do Eletrodo (rpm)
1	60	0,0017	1	1042
2	90	0,0025	1	1125
3	110	0,0025	1	1175

*pH 3,7 (estimado pelo *software Multicale*)

**Balço CO₂

Avaliações pós-teste

A superfície e seção transversal dos cps foi inspecionada por microscopia ótica, microscopia eletrônica e difração de raios-X para avaliar eventuais filmes de produto de corrosão formados. Após os ensaios de imersão os corpos de prova também foram submetidos a ciclos de decapagem para avaliação de corrosão uniforme de acordo com a norma ASTM G1.

Resultados e discussão

Visto que a autoclave foi adaptada para renovar o meio corrosivo ao longo do teste, sendo assim houve renovação constante do meio. Portanto, as espécies químicas provenientes da corrosão do aço, principalmente o Fe^{2+} , foram removidas do sistema diminuindo assim a tendência à formação dos produtos de corrosão protetores sobre o aço. As taxas de corrosão obtidas por perda de massa para as três diferentes condições são apresentadas na tabela 2. Os itens identificados como RS estão associados aos testes realizados com renovação da solução. Como pode ser observado, para os testes realizados sem a renovação de solução as taxas obtidas são até 4,5 vezes menores que aquelas obtidas com renovação de solução, mesmo utilizando uma relação V/A igual a 223,6 mL/cm², bastante superior aos citados como exemplos em normas técnicas rotineiramente utilizadas como base para a realização de ensaios de corrosão (ASTM G 31).

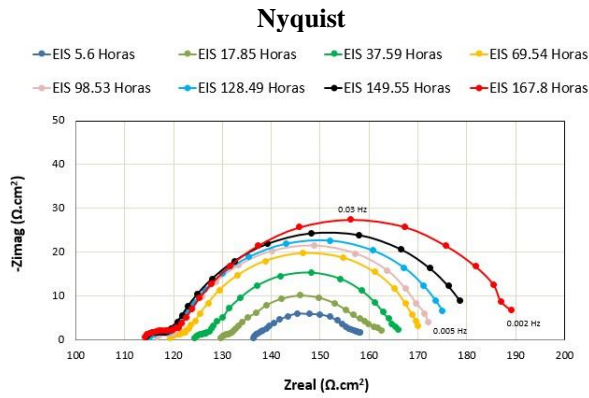
Tabela 2 - Ensaios realizados e respectivas taxas de corrosão uniforme

Condição	t (h)	T (°C)	ppH ₂ S* (MPa)	P _{total} (MPa)	Taxa de Corrosão (mm/ano)
1	170	60	0,0017	1	3,6
1-RS	166	60	0,0017	1	13,0
2	169	90	0,0025	1	1,6
2-RS	70	90	0,0025	1	6,6
2-RS	501	90	0,0025	1	7,3
3	144	110	0,0025	1	2,4
3-RS	501	110	0,0025	1	6,5

*Balanço CO₂

RS=Renovação de Solução

As figuras 3 e 4, apresentam os diagramas de impedância eletroquímica e as imagens de MEV (corte transversal) para os respectivos testes sem e com renovação de solução para a condição 1, a 60 °C. As impedâncias em ambas as condições (A) caracterizam sistemas sob corrosão ativa, com arcos fechados e valores de $Z_{\text{real}} (f \rightarrow 0)$ bastantes baixos, típicos de processo corrosivo intenso. Já as imagens de MEV mostram na figura 3B a presença de um filme irregular que por não proteger o aço geram taxas de corrosão relativamente altas, da ordem de 3,6 mm/ano. Nenhum filme foi observado na condição com renovação do meio, figura 4B, e taxas de corrosão de 13 mm/ano foram obtidas. Isto sugere que ainda que irregular, o filme gerado na condição sem renovação do meio confere alguma proteção. Também, vale lembrar que prováveis alterações no pH e na concentração de Fe^{2+} devido à não renovação do meio podem contribuir para a taxa de corrosão menor nesta condição. As impedâncias eletroquímicas corroboram qualitativamente com o resultado observado na perda de massa, já que há um aumento gradativo nos valores de $Z_{\text{real}} (f \rightarrow 0)$ com o tempo quando não há a renovação, comportamento este que não se observa quando a renovação do meio ocorre. A composição do filme apresentado na figura 3B foi determinada por difração de raios X, sendo basicamente Macknawita (FeS).



Taxa de corrosão **3,6 mm/ano**
(Corrosão ativa – filme em formação)

A

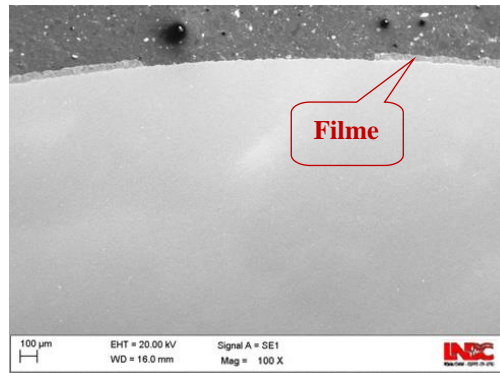
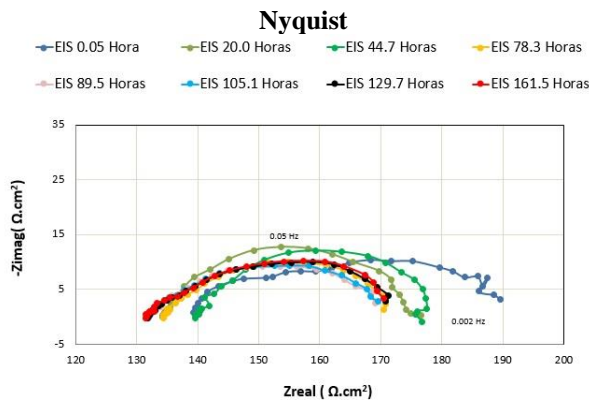


Figura 3 - Impedâncias eletroquímicas A e imagens de MEV vista da seção transversal B (100x), para o teste realizado a 1 MPa, 0,0017 MPa de H₂S, 60 °C (Teste 1), sem renovação do meio



Taxa de corrosão **13,0 mm/ano**
(Corrosão ativa)

A

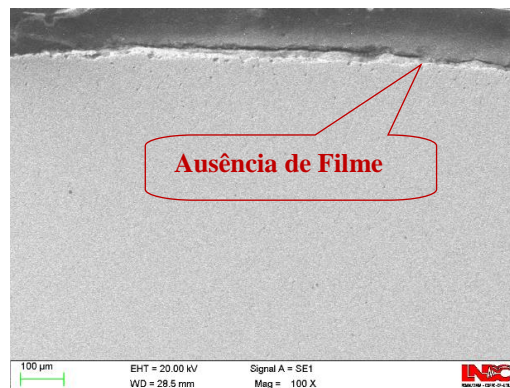


Figura 4 - Impedâncias eletroquímicas A e imagens de MEV vista da seção transversal B (100x), para o teste realizado a 1 MPa, 0,0017 MPa de H₂S, 60 °C, com renovação do meio (Teste 1-RS)

Para 90 °C as taxas de corrosão se comportam de maneira análoga às obtidas a 60 °C. A taxa obtida para a condição sem renovação do meio foi de 1,6 mm/ano, sendo esta até 4,5 vezes menor que as obtidas no meio com renovação (6,6 mm/ano e 7,3 mm/ano). Como pode ser observado na figura 5A, as impedâncias eletroquímicas do sistema sem renovação apresentam um comportamento bastante capacitivo a partir das primeiras 40 h, indicando que a cinética da corrosão inicial do aço é bastante alta e que depois deste período diminui consideravelmente. Este processo corrosivo intenso no início, que está associado à maior temperatura, satura o meio com Fe^{2+} mais rapidamente e assim a cinética de precipitação produtos de corrosão é bastante favorecida, permitindo a formação de filmes mais compactos e protetores em menor espaço de tempo. A figura 5B apresenta um filme protetor com distribuição uniforme na superfície do aço.

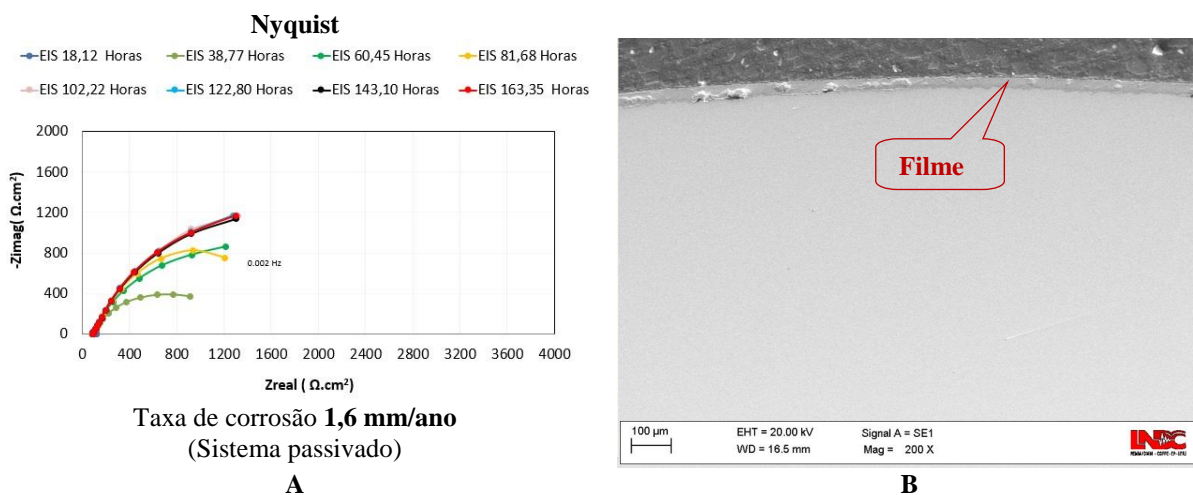


Figura 5 - Impedâncias eletroquímicas A e imagens de MEV segundo vista da seção transversal B (200x), para o teste realizado a 1 MPa, 0,0025 MPa de H_2S , 90 °C, sem renovação do meio (Teste 2)

Já para o sistema com renovação de solução as impedâncias (figura 6A) evidenciam comportamento de corrosão ativa do aço e um filme muito pouco uniforme, com regiões da matriz metálica expostas, foi observado na superfície do mesmo (figuras 6B e 6C). Em 6C, com aumento de 100x, pode-se observar um detalhe de uma região contendo o filme. A taxa de corrosão uniforme obtida foi de 6,6 mm/ano.

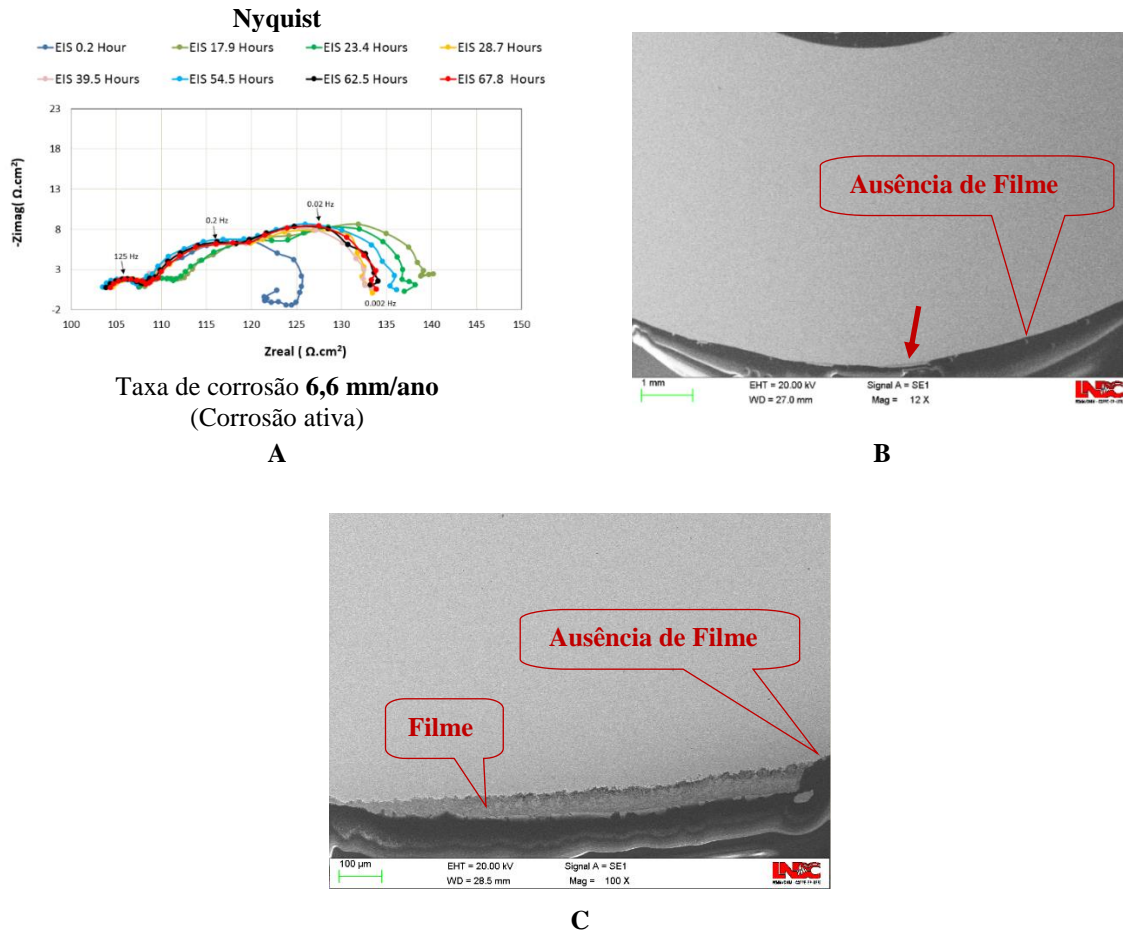


Figura 6 - Impedâncias eletroquímicas A e imagens de MEV segundo vista da seção transversal B (12x) e C (100x), para o teste realizado a 1 MPa, 0,0025 MPa de H₂S, 90 °C, com renovação do meio (Teste 2-RS-70 h)

Um teste análogo ao apresentado na figura 6, mas com duração de 501 h, foi realizado para avaliar se com tempos maiores não haveria a precipitação de filmes com a renovação do meio. Os resultados estão apresentados na figura 7. Apesar do comportamento das impedâncias ter mudado ao longo do tempo (figura 7A), ao final do teste valores de Z_{real} ($f \rightarrow 0$) ainda foram bastante baixos, típicos de sistemas sob corrosão ativa. Este comportamento foi confirmado pela presença de filmes pouco protetores sobre o aço, como pode ser visto nas figuras 7B e 7C (Detalhe). A taxa de corrosão uniforme obtida foi de 7,3 mm/ano, da mesma ordem de grandeza que aquela obtida com 70 h de teste.

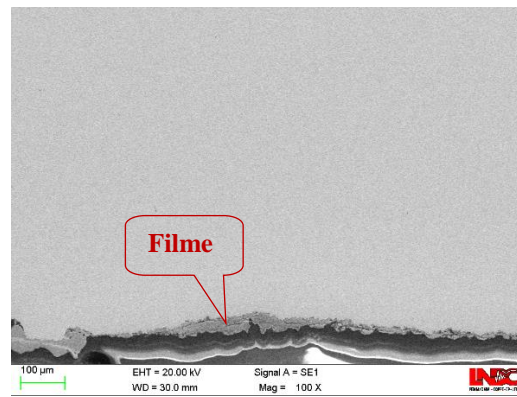
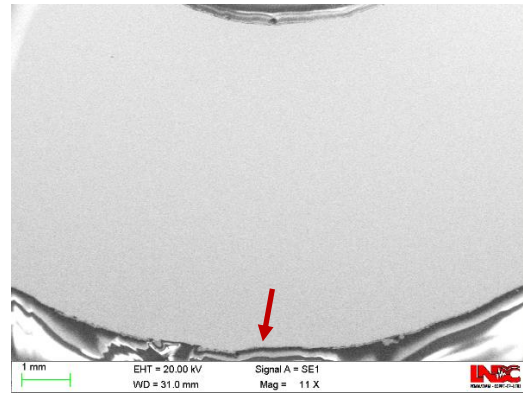
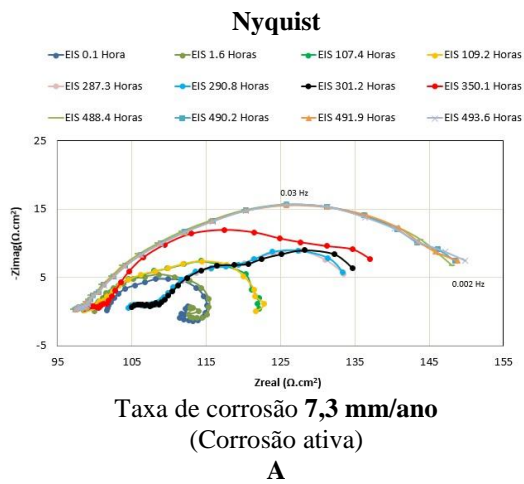
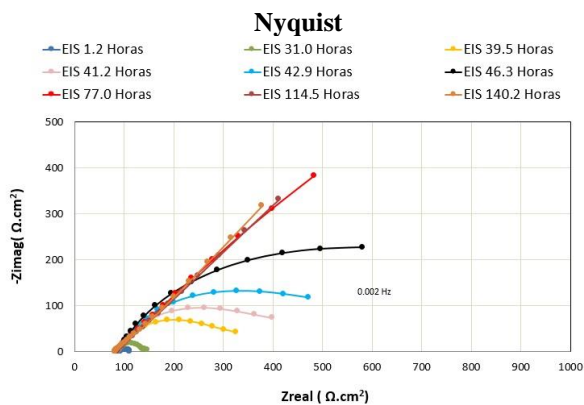


Figura 7 - Impedâncias eletroquímicas A e imagens de MEV segundo vista da seção transversal B (11x) e C (100x), para o teste realizado a 1 MPa, 0,0025 MPa de H₂S, 90 °C, com renovação do meio (Teste 2-RS-501 h)

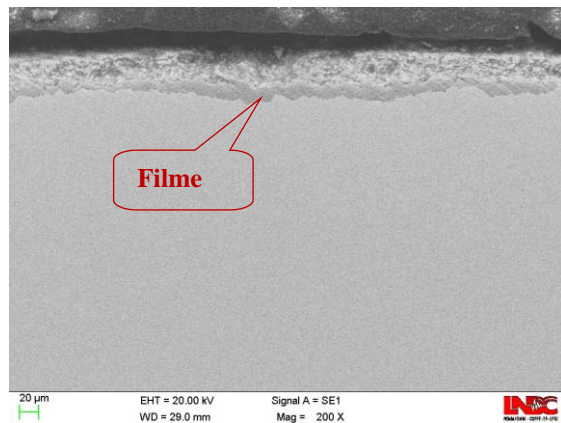
Para a condição de teste 2, a concentração de ferro dissolvido foi medida ao término dos testes de 169 h para a condição sem renovação do meio (teste 2) e de 501 h com renovação do meio (teste 2-RS). As concentrações de ferro dissolvido encontradas foram de 108 mg/L e de 9,6 mg/L respectivamente. Ao menos qualitativamente, estes dados estão bastante coerentes, pois no teste com renovação o teor de Fe²⁺ é significativamente menor. Vale ressaltar que a parte majoritária destes 108 mg/L do teste sem renovação vem da corrosão inicial do aço, ocorrida antes da formação do filme.

A composição do filme apresentado na figura 5B foi determinada por difração de raios X, identificando basicamente FeS e Fe₂CO₃. O FeS foi o composto majoritário, com concentração seis vezes maior que a de Fe₂CO₃.

Para a condição 3, a 110 °C, o ensaio sem renovação de solução também gerou taxa de corrosão menor que aquela obtida para o ensaio com renovação de solução. O sistema sem renovação apresentou taxa de 2,4 mm/ano enquanto que com renovação a taxa foi de 6,5 mm/ano. Os diagramas de impedância apresentados nas figuras 8 e 9 corroboram com suas respectivas imagens de MEV, com arcos capacitivos indicando um processo de passivação do aço pela presença de um filme com caráter mais protetor no sistema sem renovação de solução (figuras 8A e 8B) e arcos capacitivos associados à corrosão ativa, típicos de filmes bastante irregulares no ensaio com renovação de solução (figuras 9A, 9B e 9C).



A



B

Figura 8 - Impedâncias eletroquímicas A e imagens de MEV segundo vista da seção transversal B (200x), para o teste realizado a 1 MPa, 0,0025 MPa de H₂S, 110 °C, sem renovação do meio (Teste 3)

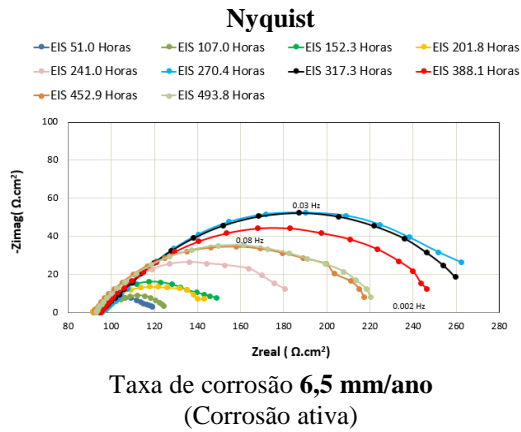
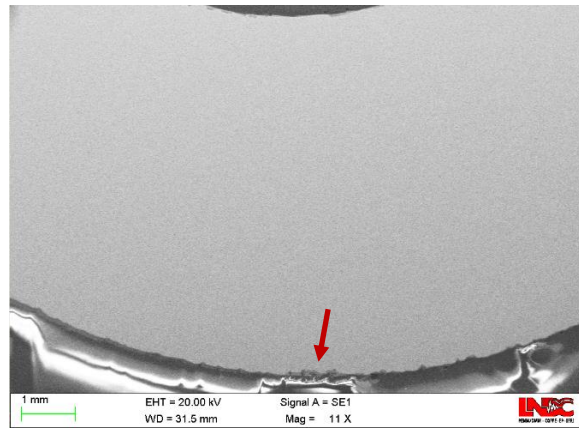
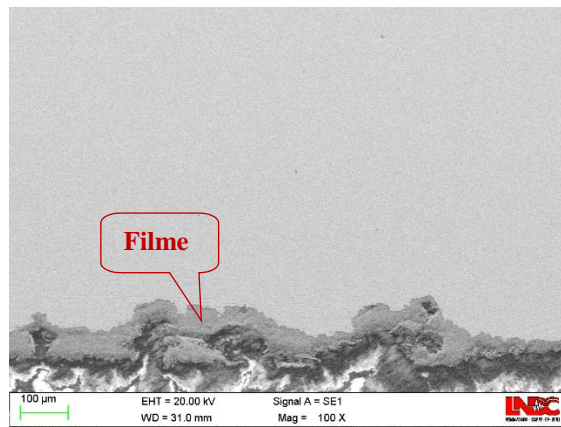
**A****B****C**

Figura 9 - Impedâncias eletroquímicas A e imagens de MEV segundo vista da seção transversal B (11x) e C (100x), para o teste realizado a 1 MPa, 0,0025 MPa de H₂S, 110 °C, com renovação do meio (Teste 3-RS)

Conclusões

- Os testes realizados com a renovação do meio corrosivo apresentaram taxas de corrosão relativamente altas para o aço AISI X65 se comparados com aqueles sem a renovação do meio. Em algumas condições as taxas alcançaram valores até 4,5 vezes maiores que os obtidos sem a renovação do meio;
- Também, nos testes com renovação do meio foi observada a presença de filmes de produtos de corrosão pouco uniformes e incapazes de proteger o aço, independentemente da temperatura e do teor de H₂S;
- Para as condições estudadas, meios de CO₂ e H₂S, mesmo utilizando uma relação V/A de 223,6 mL/cm², valor bem superior àqueles sugeridos por normas típicas para ensaios de corrosão por imersão, isto não foi suficiente para manter a solução estável, ainda que para um teste de apenas 144 h;
- Nos testes realizados com tempos de duração diferentes, o procedimento de renovação do meio não influenciou de maneira significativa nas taxas de corrosão, gerando valores próximos;
- As maiores taxas de corrosão foram obtidas a 60 °C. Nesta temperatura a formação de filme protetor, composta basicamente de FeS (Mackinawita), se mostrou mais lenta segundo os dados de impedância, corroborando com as taxas de corrosão mais altas. Também, o menor teor de H₂S foi um fator relevante para estas taxas de corrosão maiores;
- Nas condições sem renovação do meio, a 90 °C o FeS (Mackinawita) é o componente predominante da camada protetora, enquanto que a 110 °C o Fe₂CO₃ (Siderita) é o componente principal;
- Os testes realizados em laboratório fornecem dados fundamentais sobre o desempenho dos materiais que podem ser utilizados em campo e por isso é de grande importância avaliar se realmente estão simulando tais condições. Se no campo o meio corrosivo é renovado frequentemente, os testes em laboratório devem reproduzir aquele cenário. Em casos mais específicos, principalmente para aços carbonos expostos aos meios de CO₂ e H₂S, as normas técnicas para ensaios de imersão devem ser seguidas de maneiras mais criteriosas, visto que os produtos da corrosão gerados podem alterar o meio corrosivo quando não há renovação de solução.

Referências bibliográficas

1. Zhang, Y.; Pang, X.; Qu, S.; Li, X.; Gao, K.; “Discussion of the CO₂ corrosion mechanism between low partial pressure and supercritical condition” **Corrosion Science** **59** (2012) 186-197.
2. Papavinasam, S.; Doiron, A.; Revie, R. W.; “Effect of Surface Layers on the Initiation of Internal Pitting Corrosion in Oil and Gas Pipelines”; **Corrosion** vol.65; n. 10; 2009; NACE International.
3. Sun, J.B.; Zhang, G.A.; Liu, W.; Lu, M.X.; “The formation mechanism of corrosion scale and electrochemical characteristic of low alloy steel in carbon dioxide-saturated solution” **Corrosion Science** **57** (2012) 131-138.
4. PESSU, F.; HUA, Y.; BARKER, R.; NEVILLE, A.; “An Investigation of the Overall Corrosion Behavior of x65 (UNS k03014) Carbon Steel in Different H₂S-CO₂-Containing Environments”, **Corrosion** **2016**, Paper 7643; NACE International 2016.
5. KANIMOZHI, K.R.; PAPAIVINASAM, S.; SHYAMALA, R.; LI, J.; “Effect of Sodium chloride Concentration on the Corrosion of Carbon Steels and Stainless Steels in CO₂ Environment at Atmospheric Pressure Under Turbulent Flow Condition”, **Corrosion** **2014**, Paper 4074; NACE International 2014.
6. SKAR, J. I.; ANDERSEN, T. R.; BAPTISTA, I. P.; GUEDES, F. M.; HENRIQUES, C. C. D.; MOREIRA, R. M.; “CO₂/H₂S Corrosion Prediction – Laboratory Testing and Interpretation of Data”, **Corrosion** **2012**, Paper 0001522; NACE International 2012.
7. LIU, Z.; GAO, X.; DU, I.; LI, J.; LI, P.; YU, C.; MISRA, R. D. K.; WANG, Y.; “Comparison of Corrosion Behaviour of Low-Alloy Pipeline Steel Exposed to H₂S/CO₂-Saturated Brine and Vapour-Saturated H₂S/CO₂ Environments” – **Electrochimica Acta** **232** (2017), 528-541.
8. Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens, **ASTM G1 – 03**.
9. Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, **ASTM G 31 – 72** (Reapproved 2004).
10. Standard Guide for Evaluating and Qualifying Oilfield and Refinery Corrosion Inhibitors in the Laboratory, **ASTM G 170 – 06**.