Unisanta Science and Technology, **2021, 1, December**
Published Online 2021 Vol.10 Nº1 (http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Análise de Falhas de Tubos do Aço Inoxidável AISI 304 Empregados no Trocador de Calor de um Aquecedor Elétrico

Adriano Matos Mendes [1], Hector Augusto Siqueira do Rosário [1], Kerginaldo Victor da Silva Filho [1], Ruan Gutierrez Cândido [1], Willy Ank de Morais [1]

[1]**UNISANTA**– Universidade Santa Cecília – Faculdade de Engenharia – Graduação em Engenharia Mecânica
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

E-mail*:* willyank@unisanta.br
Received August, 2021

Resumo: Os fenómenos relacionados com a corrosão são complexos, envolvendo numerosos fatores, alguns dos quais são difíceis de caracterizar com precisão. A adoção do aço inoxidável tem se mostrado uma das principais ferramentas para redução de processos corrosivos em diversas aplicações, diminuindo a manutenção dos equipamentos e liberando mais tempo para produção. No entanto, devido à forte influência dos cloretos e da temperatura, esforços têm sido feitos para estabelecer limites sob condições de trabalho onde a corrosão por *pites* e o trincamento por corrosão sob tensão não ocorram no aço inoxidável. Neste sentido, o presente trabalho utilizou técnicas experimentais para caracterizar os tubos de um trocador de calor fabricado em aço inoxidável AISI 304 proveniente de um aquecedor elétrico enviado para trabalho em uma plataforma de petróleo. Os resultados mostraram deposição de cloretos nas paredes internas dos tubos devido à alta concentração de cloreto no meio, o que acelera o processo corrosivo. Os resultados demonstraram que é recomendável melhorar o controle de qualidade do fluido, evitando a contaminação com água salgada em todas as etapas de limpeza realizadas pelo sistema.

Palavras-chave: Trocador de Calor; Corrosão sob Tensão; Aço Inoxidável; Análise de Falhas.

Failure Analysis of AISI 304 Stainless Steel Tubes Used in the Heat Exchanger of an Electric Heater

Abstract: Corrosion-related phenomena are complex, involving numerous factors, some of which are difficult to characterize precisely. The adoption of stainless steel has proven to be one of the main tools for reducing corrosive processes in various applications, reducing equipment maintenance, and freeing up more time for production. However, due to the strong influence of chlorides and temperature, efforts have been made to establish limits under working conditions where pitting corrosion and stress corrosion cracking do not occur in stainless steel. In this sense, the present work used experimental techniques to characterize the tubes of a heat exchanger made of AISI 304 stainless steel from an electric heater sent for work on an oil platform. The results showed chloride deposition on the internal walls of the tubes due to the high concentration of chloride in the medium, which accelerates the corrosive process. The results demonstrated that improving the quality control of the fluid is recommended, avoiding contamination with salt water throughout all cleaning stages carried out by the system.

Keywords: Heat exchanger; Stress Corrosion; Stainless steel; Failure Analysis.

1. Introdução

O desenvolvimento tecnológico das unidades industriais de processamento de petróleo esteve sempre ligado ao crescente interesse econômico pelos seus derivados. Para se obter gasolina, diesel, querosene, óleos lubrificantes, nafta, GLP, e todos demais subprodutos sintéticos, as plantas de processamento foram adequando seus produtos, à medida em que os

Copyright © 2021 ISESC.

níveis de qualidade e quantidade demandados se tornaram cada vez mais elevados. As crescentes exigências de mercado e, mais recentemente, as ambientais, passaram a definir especificações de produto mais restritas, não somente nas refinarias, como nas unidades de produção, situadas nas proximidades dos poços de petróleo.

Pela necessidade de melhorar a qualidade do petróleo enviando às refinarias, foram desenvolvidos métodos e processos cada vez mais eficientes de separação e tratamento dos fluidos extraídos nas unidades de produção. Um destes métodos é o *WAG* (*Water Alternating Gas*), que é um método de recuperação terciária que vem sendo cada vez mais utilizado mundialmente devido à sua capacidade de promover tanto uma melhoria na eficiência de varrido como na eficiência de deslocamento. O método consiste na injeção alternada de água e gás, que provoca modificação nas curvas de permeabilidades ao se introduzir uma terceira fase no meio poroso. Assim, o fluxo simultâneo de água, gás e óleo resulta no deslocamento do óleo residual, antes imóvel [1].

Neste setor, a interação dos equipamentos com o meio de operação (por exemplo: atmosfera, fluido de processo etc.), têm causado desgastes imprevistos ou prematuros, ou até mesmo, afetar as propriedades de seus materiais construtivos (dureza, resistência mecânica, tenacidade, etc.), tornando-os mais susceptíveis a falhas. Mesmo equipamentos projetados, fabricados, montados e operados de maneira adequada podem vir a falhar por esgotamento de sua vida útil prevista originalmente, daí a importância de seu acompanhamento periódico pelas equipes de inspeção e manutenção [2, 3].

Particularmente, os fenômenos relacionados com a corrosão são muito complexos, envolvendo sempre numerosos fatores, alguns dos quais são de difícil caracterização [4, 5]. Por esse motivo, as simples informações de catálogos e tabelas de fabricantes ou entidades sobre o comportamento dos materiais em meios corrosivos [6], mesmo quando fidedignas, devem ser consideradas com a devida cautela. Muitas vezes tais resultados são extremamente simplificados, não levando em contas várias circunstâncias que podem modificar completamente o comportamento dos materiais quanto à corrosão [3, 7].

A falha de materiais de engenharia é quase sempre um evento indesejável por várias razões, as quais incluem vidas humanas que são colocadas em risco, perdas econômicas e a interferência com a disponibilidade de produtos e serviços. Embora as causas das falhas e o comportamento dos materiais possam ser conhecidos, a prevenção de falhas é difícil de ser garantida. As causas comuns são a seleção e o processamento inadequados de materiais, além do projeto inadequado ou da má utilização de um componente [2, 7, 8].

A Análise de Falhas é uma abordagem da Engenharia que visa determinar como e porque um dado equipamento ou componente veio a falhar [9, 10]. As falhas são comumente causadas por um ou mais dos seguintes fatores: sobrecarga, defeitos pré-existentes, ataque pelo meio ou desgaste natural. O carregamento excessivo, em geral, está associado a um projeto inadequado do equipamento (subdimensionamento) ou a um regime de operação fora das condições originais para o qual foi projetado. Os processos de fabricação ou montagem dos equipamentos, por vezes, induzem a formação de defeitos na estrutura dos materiais, que podem passar despercebidos pelas diferentes etapas de controle da qualidade, vindo a causar falha do componente em uso [8, 10].

O presente trabalho aborda um estudo de caso de falhas de trocadores de calor constituídos por tubos de aço inoxidável empregados em um sistema *WAG*, de extração de petróleo e gás natural. As análises feitas e aqui apresentadas indicam que altos teores de cloretos induziram corrosão localizada prejudicando o desempenho dos componentes avaliados.

1.1. Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são um grupo de materiais de engenharia que se destacam por sua grande resistência à corrosão, oferecida pela presença do elemento cromo. A oxidação do cromo, presente no aço inoxidável em quantidades maiores do que 11% [3, 4, 5, 11], forma uma película de óxidos e hidróxidos passiva (inerte), que protege o material contra diversos meios agressivos e oxidantes.

Existe uma grande variedade de tipos de aços inoxidáveis [11, 12]. As adições de elementos de liga em concentrações significativas produzem mudanças drásticas no diagrama de fases ferro carbono de modo a gerar as diferentes categorias de aços inoxidáveis. Desta forma, os diferentes tipos de aço inoxidável podem ser classificados em cinco famílias básicas [13, 14]:

- ferriticos, apresentam a estrutura Cúbica de Corpo Centrado (CCC), típica dos aços carbono e de fase alfa (α), porém com a sua resistência à corrosão aumentada devido à presença de elementos de liga, especialmente o cromo;
- austeniticos, nestes aços, o campo da fase austenita (ou γ), que apresenta estrutura Cúbica de Faces Centradas (CFC), é estendido até a temperatura ambiente pela presença de alguns elementos de liga específicos, especialmente o níquel, nitrogênio e manganês;

Copyright © 2021 ISESC

- martensíticos, apresentam estrutura Tetragonal de Corpo Centrado (TCC), tendo sido tratados termicamente de tal maneira que a martensita é o principal microconstituinte destes aços;
- dúplex, possuem uma estrutura mista de austenita e ferrita (50% de cada, aproximadamente) e como resultado apresentam características desses dois tipos básicos, por exemplo, são ferromagnéticos e mecanicamente resistentes como os aços ferríticos, mas tem uma boa conformabilidade e soldabilidade, como os aços austeníticos;
- endurecíveis por precipitação, podem apresentar matriz martensítica de baixo carbono endurecida pela precipitação de compostos intermetálicos formados pela adição de elementos precipitantes (como alumínio, cobre, titânio e nióbio), ou de matriz austenítica, que combina a excelente resistência à corrosão dos aços austeníticos e a resistência mecânica oferecida pelo tratamento de precipitação.

A microestrutura tem efeito dominante sobre o desempenho dos aços inoxidáveis e depende diretamente, da composição química e do tratamento térmico realizado. Em vista da complexidade dos sistemas envolvidos buscam-se representações simplificadas das relações de fases em função da composição química, nas quais, em geral, são considerados os efeitos dos elementos cromo, carbono e níquel. A Figura 1 apresenta o diagrama de Schaffler, que ilustra as faixas de composição aproximadas de cada família de aços inoxidáveis indicadas pelos seus respectivos valores de Cromo e Níquel equivalentes [15].

1.2. Corrosão em Aços Inoxidáveis

Corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos [4, 5, 14]. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso.

1.2.1. Corrosão por *Pit*

A corrosão por *pit* se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que seu diâmetro [4, 5].

Neste caso pequenas áreas são atacadas ocasionando a formação de cavidades, defeitos, irregularidades, sulcos, relevos e poros na superfície metálica resultando em falha [16]. Geralmente ocorre em metais que produzem camadas passivas, como alumínio, titânio e nos aços inoxidáveis. Nestes últimos, apresenta um histórico desastroso, em que cerca de 30% das falhas são atribuídas às corrosões por pite e por corrosão sob tensão ou CST [17].

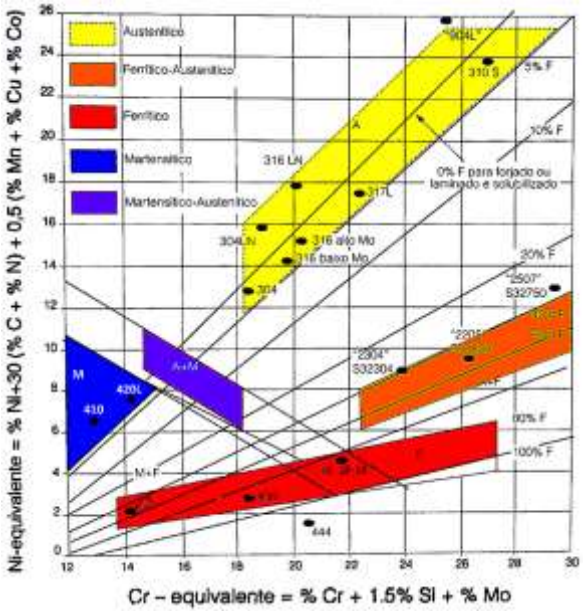

Figura 1. Diagrama de Schaffler ilustrando as regiões de composição química das diferentes famílias de aços inoxidáveis como indicadas (A = austenita, F = ferrita, M = martensita), adaptado de [15].

1.2.2. Corrosão Sob Tensão (CST)

Corresponde à deterioração de materiais pela ação combinada de tensões residuais ou aplicadas e meios corrosivos. Há uma ação sinérgica entre a tensão mecânica e o meio corrosivo, ocasionando fratura em um tempo mais curto do que a soma das ações isoladas de tensão e da corrosão.

A estrutura cristalina também influencia o trincamento por corrosão sob tensão. Assim, o aço inoxidável ferrítico é mais resistente a corrosão sob tensão quando exposto a soluções aquosas de cloreto do que o aço inoxidável austenítico [18]. Em decorrência da forte influência e temperatura, tem-se procurado estabelecer valores limites de concentração de cloreto nos quais não acontecem a corrosão por pite e a fratura por corrosão sob tensão [4, 5].

Copyright © 2021 ISESC

1.3. Sistema Avaliado

O presente trabalho analisa falhas em tubos de troca térmica de aquecedores utilizados em um sistema de limpeza química local (*CIP - cleaning in place*). Este sistema é empregado para a remoção de sais de sulfato (SO_4^{-2}) que se acumulam nas membranas de um sistema tratamento da água de injeção, parte de um processo *WAG*. Tal operação de limpeza evita que seja necessário remover as membranas para executar a manutenção do sistema *WAG*, evitando perdas de produção. Todos os equipamentos estão instalados em uma plataforma *offshore* de produção de petróleo e gás, portanto sujeitos à agressividade dos cloretos presentes no ambiente marinho.

O sistema de tratamento de água em questão é composto por cinco trens de membranas de nanofiltragem, cada qual composto por três bancos de filtragem, conforme ilustrado na Figura 2.a. Conforme ilustrado na Figura 2.b, o sistema é divido em dois estágios, sendo que o primeiro estágio emprega dois bancos em paralelo com 32 membranas cada. Já o segundo estágio é constituído de um banco único de 13 membranas. Para o bom funcionamento do sistema é necessário que todas as 77 membranas estejam em boas condições de uso, com o mínimo de incrustações. A Figura 3 ilustra o diagrama do sistema *CIP* empregado limpar as membranas do sistema de filtragem (Fig. 2) do processo *WAG*, envolvido neste trabalho.

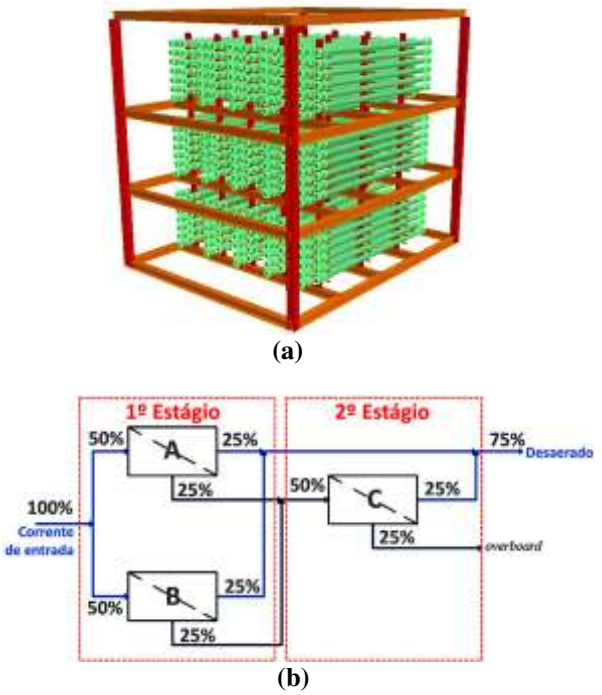

Figura 2. Sistema tratamento da água de injeção: (a) unidade de remoção de sulfato (banco de filtragem) com 32 ou 13 membranas e (b) fluxograma do processo empregando os 3 bancos de filtragem.

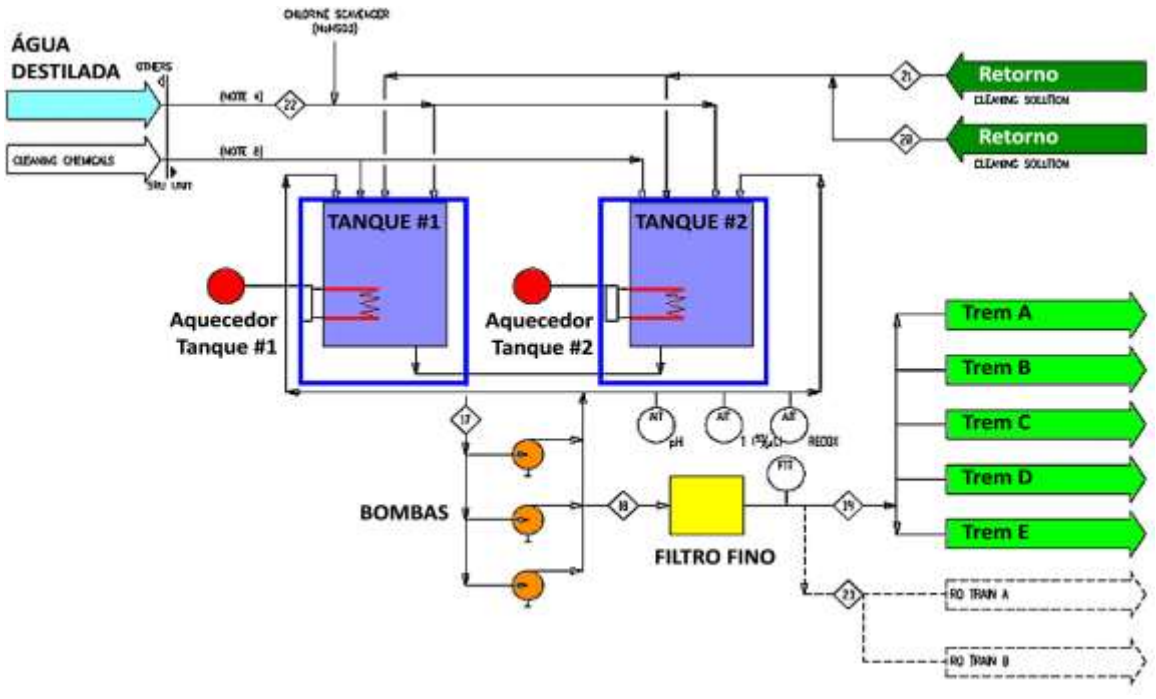

Figura 3. Diagrama de processo do sistema CIP (*cleaning in place*) e a posição dos seus principais elementos.

Copyright © 2021 ISESC

Conforme mostrado na Fig. 3, além de três bombas e de um filtro fino, a unidade *CIP* é composta por dois tanques de 22 m^3, que trabalham sem redundância, fabricados em fibra de vidro. Esses tanques são responsáveis por garantir a diluição da água destilada introduzida no sistema junto com os produtos químicos (alcalino e ácido) empregados para promover a limpeza.

Cada tanque possui três aquecedores elétricos iguais ao representado na Figura 4.a. Cada aquecedor é formado por 60 tubos com costura constituídos do aço AISI 304 (ASTM A32/A32M [19]) e na categoria *schedule* 40, apresentando um diâmetro de 13,72 mm e espessura de 2,24 mm. Conforme ilustrado na Figura 4.b, cada tubo é dobrado no formato de "U" e recebe um elemento aquecedor (resistência elétrica) com 1433 mm de comprimento e 11 mm de diâmetro. Para dar garantia de isolamento elétrico e para promover a condução do aquecimento é empregado um granulado higroscópico de óxido de magnésio entre o tubo de aço e a resistência elétrica. Finalmente, cada aquecedor conta ainda com um tubo central com termopar em seu interior, que permite o monitoramento da temperatura, para proteção do sistema contra superaquecimento.

O procedimento operacional da *CIP* (Fig. 3) ocorre individualmente para cada banco ou estágio, sempre tendo as membranas fora de operação, podendo ser sumarizado em cinco etapas sequenciais e complementares:

1. pré-*flush* (lavagem), consiste no enchimento dos tanques e circulação do sistema com água doce (especificada para o teor de cloro livre de zero ppm e de ferro solúvel máximo de 2 ppm);
2. limpeza alcalina, o sistema é aquecido para temperatura de 40°C, tendo início da limpeza básica com produto Kleen MCT 511 / DORF OG 1007B na concentração de 1,5 a 2% v/v, para a remoção de contaminação biológica e incrustação por sais de sulfato;
3. pós-*flush* (lavagem) da limpeza alcalina, ocorre a drenagem do resíduo básico do tanque;
4. limpeza ácida, realizada com produto Kleen MCT 882 / DORF OG 1005B na concentração de 0,5 a 1% v/v para neutralização e remoção de incrustações inorgânicas de metais pesados, silicatos e carbonatos e

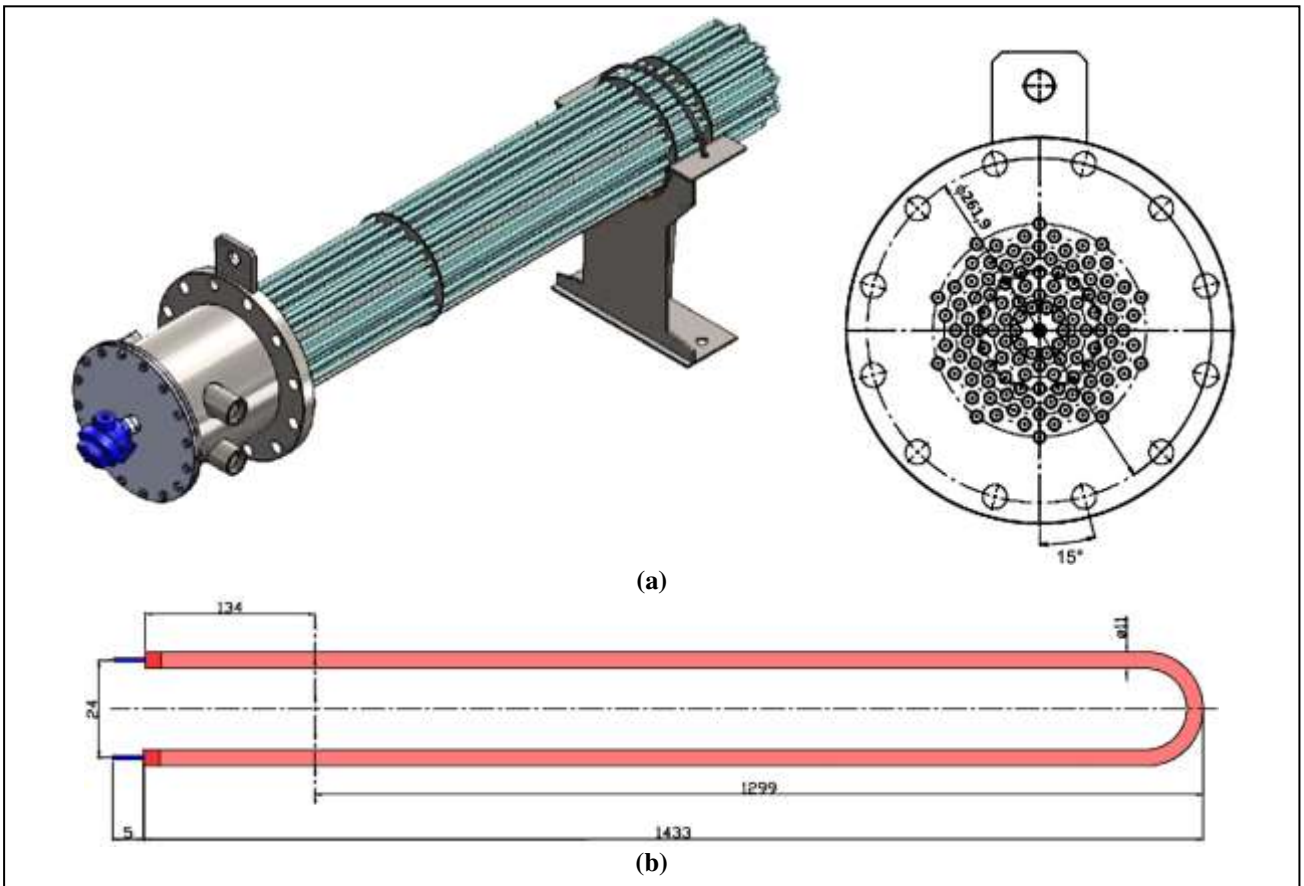

Figura 4. Aquecedor do sistema CIP: (a) geometria dos tubos constituintes e (b) resistência de aquecimento.

Copyright © 2021 ISESC

5. pós-*flush* (lavagem) da limpeza ácida, ocorre a drenagem do inventário ácido restante, podendo ser adicionadas pequenas quantidades de solução de NaOH, caso haja dificuldade para alcançar o pH neutro.

Após este procedimento, o tanque é hibernado e completamente drenado.

2. Desenvolvimento

As amostras foram removidas de um conjunto de aquecedores, que apresentaram falhas, conforme ilustradas na Figura 5. Em uma análise visual preliminar, estão evidentes que diversos componentes dos aquecedores (tubos, chicanas, tirantes, etc.) apresentam defeitos de diversas naturezas, cabendo a análise fractográfica indicar quais foram os prováveis fatores determinantes ao processo de falha [18, 20].

Os principais mecanismos de falha observados nas superfícies das amostras falhadas foram (1) a corrosão sob tensão (CST) na presença de cloretos (*Cl-SCC, Chloride Stress Corrosion Cracking*) com fratura transgranular de dentro para fora dos tubos e (2) aberturas de arco elétrico entre o elemento resistor e a parede dos tubos. Ambos os mecanismos de falha pressupõem a presença do fluido externo aos tubos dentro dos tubos.



Figura 5. Amostras de tubos e chicanas danificadas.

Foram realizadas análises por Espectrometria por Energia Dispersiva (*EDS*, *Energy Dispersive Spectroscopy*) via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-*EDS*) nas superfícies com presença de corrosão.

Também foram empregadas análise metalográficas para caracterizar a presença das trincas e sua relação com a estrutura metalúrgica dos tubos. Após o lixamento e polimento das amostras, as superfícies preparadas foram atacadas quimicamente com solução de Vilella (5 ml de HCl + 2 gramas de ácido pícrico + 100 ml de álcool etílico) e ataques eletroquímicos com solução oxálica (10 gramas de ácido oxálico + 10 ml de H_2O).

A Figura 6.a apresenta em detalhe a corrosão externa por *pites* e alvéolos caracterizados por uma pequena abertura superficial e um grande volume de cavidade interna, com fundos tipicamente arredondados, explicitados pela Figura 6.b e Figura 6.c.

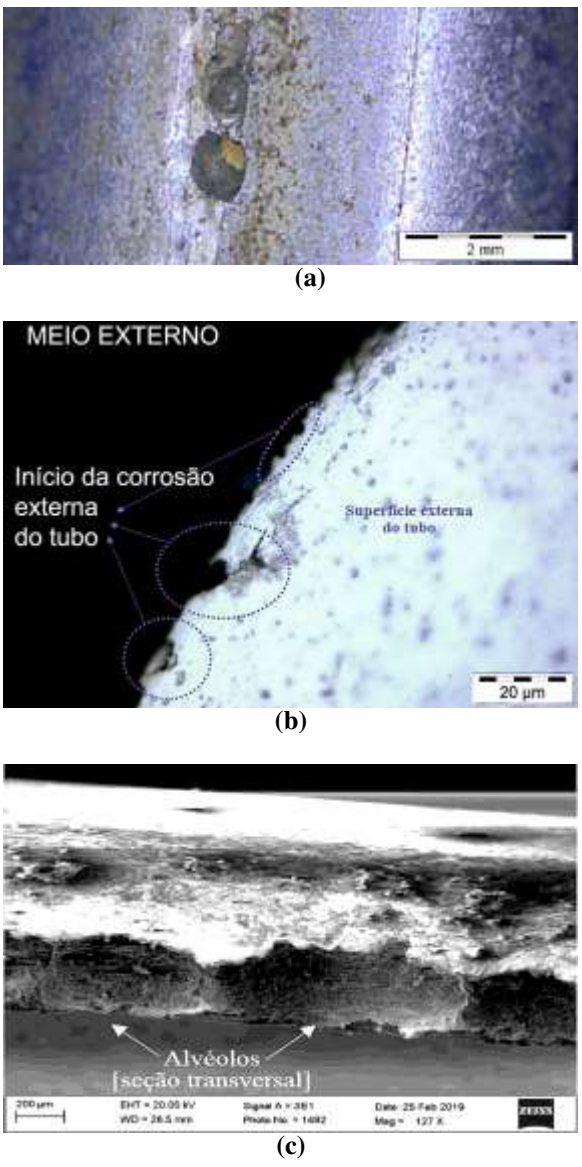

Figura 6. Aspecto da corrosão externa localizada: (a) visual, (b) metalográfico e (c) por MEV.

Copyright © 2021 ISESC

De acordo com os resultados da análise MEV-*EDS* apresentados na Figura 7 e Figura 8, pode-se observar presença de cloro nas amostras dos tubos analisadas, da ordem ou superiores a 1% em peso atômico, tanto nos produtos de corrosão externas, quantos nos internos. Observando os resultados apresentados nos espectros obtidos, nota-se uma maior presença de cloro dentro das cavidades de corrosão, tanto do lado interno (Fig. 7). Adicionalmente, empregando-se a relação entre os sinais obtidos para o cloro e o ferro nos produtos de corrosão dentro e fora das cavidades é possível inferir que os produtos de corrosão dentro da cavidade possuíam teores de cloro superiores aos presentes na região externa.

A superfície externa dos tubos é aquela na qual foi iniciado o processo de falha *Cl-SCC*, o que indica que a água nesta região estava contaminada com cloretos, com mostrado na Figura 9, obtida por análise metalográfica.

Porém, a partir da análise metalográfica também foi constatado a presença de nucleação e propagação das trincas no sentido oposto, de dentro para fora dos tubos, conforme evidenciado na Figura 10. Esta observação contradiz o fato da água, contendo cloro, estar em contato com a superfície externa dos tubos, e, portanto, ser esta superfície na qual deviria iniciar o processo de falhas nos tubos, como mostrado na Figura 9. Esta condição indica que, após a falha localizada dos tubos (perfuração) devido à corrosão, houve infiltração de água com cloro para dentro do tubo. Assim tornando-se possível a ocorrência de trincamento em outras regiões, inclusive com a geração de trincas ramificadas e transgranulares, também nucleadas de dentro para fora dos tubos, como as mostradas na Figura 11. Tal cenário também explica a ocorrência de arcos elétricos, abertos entre o elemento resistor e a parede dos tubos.

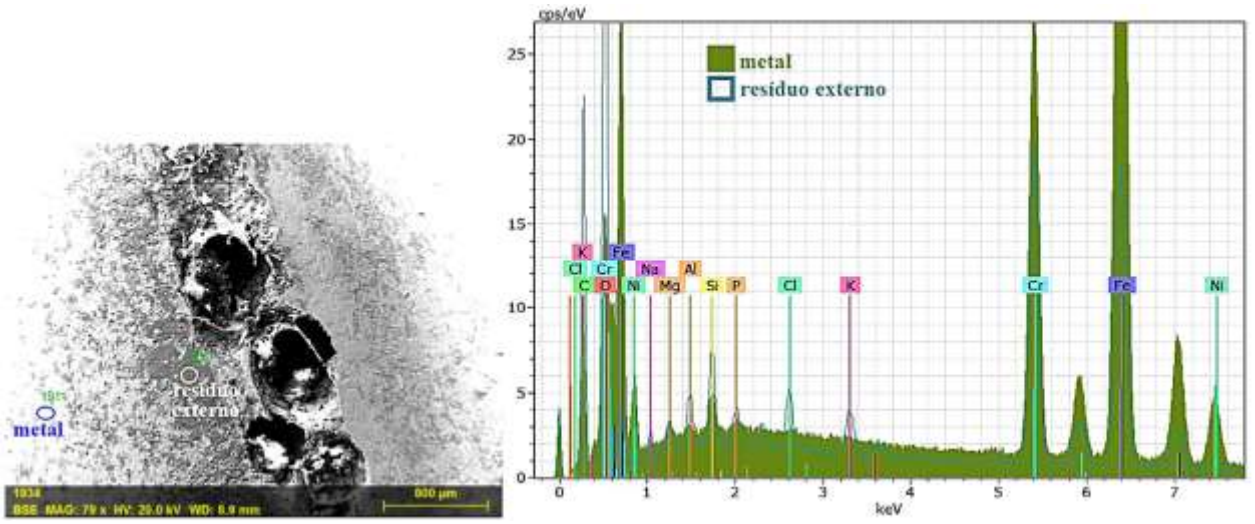

Figura 7. Análise MEV-*EDS* da corrosão na superfície dos tubos.

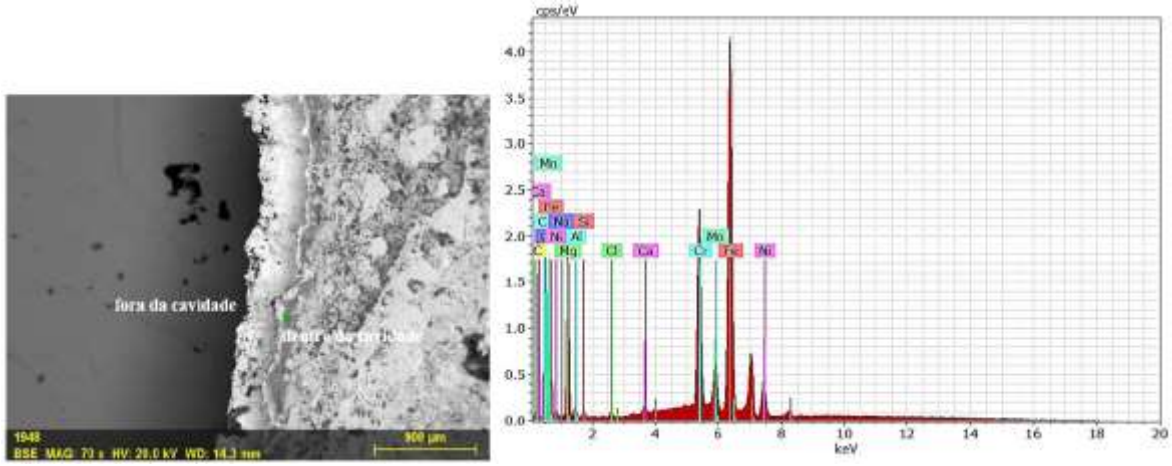

Figura 8. Análise MEV-*EDS* da corrosão dentro de uma trinca.

Copyright © 2021 ISESC

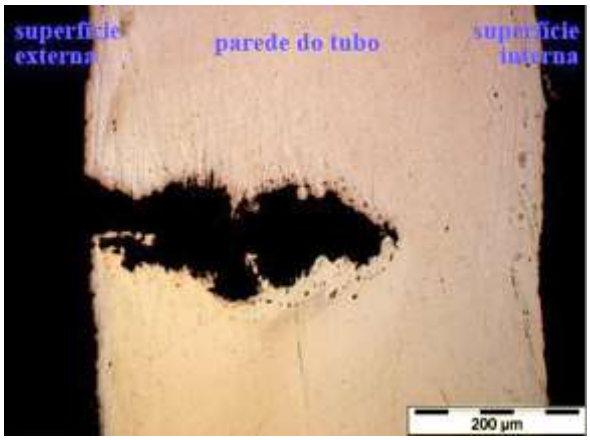

Figura 9. Registro metalográfico do início do processo de falha, a partir da corrosão externa do tubo.

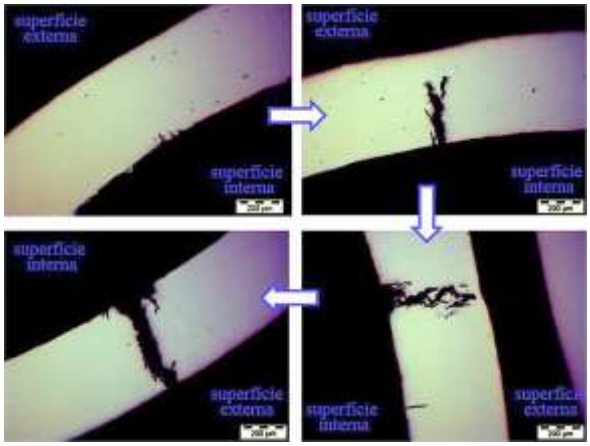

Figura 10. Registro metalográfico evidenciando início de propagação de trincas a partir da superfície interna das tubulações avaliadas.

Trincas ramificadas em aços inoxidáveis austeníticos, como as ilustradas na Fig. 11, são características de modo de falha por corrosão sob tensão, enquanto as fraturas transgranulares indicam que a propagação deva estar de fato correlacionada à processos eletroquímicos extremos conforme Desai [21].

A corrosão sob tensão é caracterizada quando a taxa de propagação da trinca é superior a taxa de corrosão. Em meios contendo cloretos, enquanto o processo de corrosão localizada é fortemente dependente da concentração de cloreto, mas pouco dependente da temperatura, o crescimento da trinca é fortemente dependente da temperatura, apesar de pouco variável com o teor de cloreto e o pH do meio. A despeito de usualmente se estabelecer uma temperatura crítica para ocorrência de corrosão sob tensão de aços inoxidáveis austeníticos em meios contendo cloreto para valores acima de 42°C [22], a literatura mostra que corrosão sob tensão na presença de cloretos muitas vezes ocorre para temperaturas inferiores, tais como as existentes no tanque avaliado do processo avaliado (Fig. 3). Isso pode ocorrrer mediante uma conjuração de outros fatores, tais como encruamento do material, presença de contaminantes de ferro e depósitos com alto teor de cloro [23].

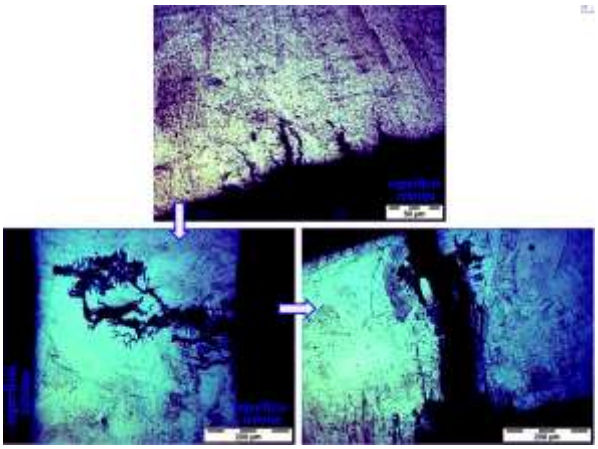

Figura 11. Trincas ramificadas transgranulares comprovando *Cl-SCC* (corrosão sob tensão na presença de cloretos). Trincas visualizadas em regiões distintas das tubulações avaliadas.

3. Conclusões

Os aços inoxidáveis austeníticos são conhecidos por apresentarem baixa resistência à corrosão localizada em meios contendo cloreto, mesmo a partir de concentrações da ordem de unidades de partes por milhão, em um processo no qual após nucleação de um pequeno ponto de corrosão, seu crescimento ocorre por mecanismo autocatalítico, caracterizado pela atração de íons cloreto pelos cátions metálicos dissolvidos, promovendo a hidrólise da água e consequentemente acidificação do eletrólito no interior do ponto corroído. Estas condições foram observadas nas análises apresentadas neste trabalho.

De forma geral, pode-se afirmar que a presença de alto teor de cloreto foi o principal fator causador do processo de degradação da camada passiva no tubo aço inoxidável AISI 304. O processo de corrosão externa localizada, pela presença inadequada de cloreto no fluido, deve ser considerado a causa raiz das falhas. O aprimoramento no controle de qualidade do fluido, evitando quaisquer contaminações com água salgada ao longo de todas as etapas de limpeza executadas pelo

Copyright © 2021 ISESC

sistema CIP é fundamental para que não haja recorrências de falhas neste sistema.

Agradecimentos

Aos autores gostariam de expressar agradecimentos aos colaboradores do setor de inspeção de equipamentos da PETROBRAS.

Referências

1 MARQUES, P. F.; RODRIGUES, L. G.; SANTOS, R. G. **O método WAG-CO2 (Water alternating gas) e sua aplicação nos projetos de EOR (Enhanced oil Recovery)**. In: Encontros universitários 2020, 2021, on-line. Encontros universitários 2020, 2021.

2 SILVA, R. A. F.; MORAIS, W. A. Estudo da Falha em Palheta de uma Turbina a Vapor Sistema Motriz de Compressor de Síntese de Gás Nitroso. **Unisanta Science and Technology**, 2017, V. 6 (1): 27-34. https://periodicos.unisanta.br/index.php/sat/article/view/994.

3 LIMA, J. P.; CRUZ, L. C.; GODOIS, L. A. C.; SANTOS, P. A.; MORAIS, W. A.; FARAH, J. Emprego das Metodologias MASP e PDCA em uma Análise de Falhas de Equipamento Industrial. **Unisanta Science and Technology**, 2018, V. 7 (1): 1-4. https://periodicos.unisanta.br/index.php/sat/article/view/1450.

4 POUSA NETO, A.; FERNANDES, P.; MORAIS, W. A. Investigação da ocorrência de Falhas Prematuras em uma Tubulação Industrial de Aço Inoxidável. **Unisanta Science and Technology**, 2019, V. 8 (2): 49-59. https://periodicos.unisanta.br/index.php/sat/article/view/2223.

5 MORAIS, W. A.; TAVARES, M. M.; FARIAS, E. S. A Análise de falhas - Parte 4: Início de uma Análise de Falhas. **Siderurgia Brasil**, V. 15 (105): 34-39, 2014.

6 PELLICCIONE, A., S; MORAES, M. F.; GALVÃO, J. L. R.; MELLO, L. A.; Silva, E. S. **Análise de Falhas em Equipamentos de Processo: Mecanismos de Danos e Casos Práticos**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013. 416p.

7 TELLES, P. C. S. **Materiais para equipamentos de processo**. 6ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003. 276p.

8 CARVALHO, N. F. **CORROSÃO - Fundamentos e Informações**. 1ª Ed. Santos: Nestor, 2019. v. 1. 368p.

9 GENTIL, V. **Corrosão**. 6ª Ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2011. 376p.

10 NACE **Corrosion Data Survey – Metals Section**, 6th Ed. D. I. GRAVER, Ed., NACE International, 1985.

11 WASHKO, S.D.; AGGEN, G. **Wrought Stainless Steels**, p.2004-2194. In: ASM International; ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. 10. ed. Materials Park (USA): ASM International. 1997. (arquivo eletrônico).

12 SCHRADER, G.F.; ELSHENNAWY, A. **Manufacturing Processes and Materials**. 4th ed. Dearborn (USA): Society of Manufacturing Engineers, 2000. 806p.

13 ABINOX. **Tipos de Aços Inoxidáveis**. São Paulo: Associação Brasileira do Aço Inoxidável, 2022. Disponível em: <https://abinox.org.br/tipos-de-aco-inox/>. Acesso em 4 de Março de 2022.

14 CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G.; **Materials science and engineering**. 8th Ed. Hoboken (USA): John Wiley & Sons Inc., 2009. 992p.

15 SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 4ª Ed. São Paulo: Blucher, 2021. 576p.

16 CODARO, E.N.; NAKAZATO, R.Z.; HOROVISTIZ, A.L.; RIBEIRO, L.M.F.; RIBEIRO, R.B.; HEIN, L.R.O. An image analysis study of pit formation on Ti–6Al–4V. **Materials Science and Engineering: A**, V. 341 (1–2): 202-210, 2003. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00218-6.

17 SHIBATA, T. Passavity breakdown and stress corrosion cracking of stainless steel. **Corrosion Science**, V. 49 (1): 20-30, 2007. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.05.031.

18 ASM Handbook, Volume 11: **Failure Analysis and Prevention**. Materials Park (USA): ASM International, 1992. 800p.

19 ASTM A312/A312M-19. **Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes**. Last Updated: May 28, 2021. West Conshohocken, PA, 2019. https://doi.org/10.1520/A0312_A0312M-21.

20 MORAIS, W. A.; TAVARES, M. M.; FARIAS, E. S. A Análise de falhas - Parte 3: Morfologias das fraturas por mecanismos degradativos. **Siderurgia Brasil**, V. 15 (104): 20-25, 2014.

21 DESAI, V. H. **Mechanistic Differences in Transgranular and Intergranular Cracking of Austenitic Stainless Steels**, Paper n° 192. In: Corrosion 97, New Orleans (US), March 1997.

Copyright © 2021 ISESC

22 CHEN, P. C.-S.; SHINOHARA T.; TSUJIKAWA, S. **Applicability of the Competition Concept in Determining the Stress Corrosion Cracking Behavior of Austenitic Stainless Steels in Chloride Solutions**. Paper n° 191. In: Corrosion 97, New Orleans (US), March 1997.

23 PARROT, R.; PITTS, H. **Chloride Stress Corrosion Cracking in Austenitic Stainless Steel - Assessing Susceptibility and Strutural Integrity**. Derbyshire (UK): Health and Safety Executive (HSE), 2011. 52p.

Copyright © 2021 ISESC