

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

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

Estudo da corrosão de aços utilizados em sede de válvulas gaveta e tubulações de refinaria em meio de águas acres de refinaria de petróleo

Zehbour Panossian^a, Fabiana Yamasaki Martins Vieira^b, Leandro Peres Ferreira^c,
Hélio Sartori Jr.^d, Gutemberg de Souza Pimenta^e

Abstract

In oil refineries, the occurrence of premature failure of internal valve trims made of martensitic stainless steel castings is very common. These failures are due to localized corrosion caused by the action of sour waters, also known in Brazil as acid waters. Refinery sour waters are rich in S^{2-} , NH_4^+ and may contain low concentrations of SO_4^{2-} , Cl^- and CN^- . In oil exploitation, the internal valve trims are made of more corrosion resistant steels, as cast duplex stainless steels. Consequently, the number of failures in valve trims in oil exploitation is much lower. For this reason, a study was carried out to verify the possibility of replacing the cast martensitic internal valve trims used in refineries for cast duplex stainless steels. For this purpose, immersion tests were conducted with the two mentioned stainless steels in refinery sour water samples. To complement the work, cast carbon steel and cast austenitic stainless steels were also tested. The study also included the following wrought materials: carbon steels, ferritic low alloy steels, austenitic stainless steels, duplex stainless steel and ferritic stainless steel. The obtained results confirmed the corrosion susceptibility of the cast martensitic stainless steel in refinery sour waters and pointed the austenitic stainless steels and duplex stainless steels as potential replacement for martensitic stainless steels.

Keywords: corrosion, refinery, sour water, stainless steel, sulfur.

Resumo

Em refinarias de petróleo, é muito comum a ocorrência de falhas prematuras de internos de válvulas tipo gaveta confeccionados em aço inoxidável martensítico fundido. Estas falhas são decorrentes da corrosão localizada provocada pela ação das águas acres, também chamadas, no Brasil, de águas ácidas. As águas acres de refinarias são ricas em S^{2-} , NH_4^+ podendo conter concentrações menores de SO_4^{2-} , CN^- e Cl^- . Na área de exploração de petróleo, os internos das válvulas são confeccionados em aços mais resistentes à corrosão, como os aços inoxidáveis dúplex fundidos. Consequentemente, o número de falhas de internos de válvulas na exploração de petróleo é muito menor. Em face disto, foi desenvolvido um estudo para verificar a possibilidade de substituição dos internos das válvulas usadas em refinarias por aços inoxidáveis dúplex fundidos. Para isto ensaios de imersão em águas acres coletadas de refinarias foram conduzidos com os dois aços de interesse. Para complementar o trabalho,

¹Doutora em Ciências, Responsável pelo Laboratório de Corrosão e Proteção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT e Professora convidada da EPUSP – Departamento de Materiais e Metalurgia

²Bacharel-Pesquisador assistente - Instituto de Pesquisas tecnológicas do Estado de São Paulo

³Técnico-Técnico Metalurgista - Instituto de Pesquisas tecnológicas do Estado de São Paulo

⁴Engenheiro-Inspetor de Equipamentos - Petróleo Brasileiro S.A.

⁵Mestre-Consultor Sênior - Petróleo Brasileiro S.A.

foram também estudados os seguintes materiais fundidos: aço-carbono e aços inoxidáveis austeníticos. Foram incluídos no trabalho, também, os seguintes materiais trabalhados: aço carbono, aços-liga ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos, aço inoxidável dúplex e aço inoxidável ferrítico. Os resultados obtidos confirmaram a susceptibilidade à corrosão do aço inoxidável martensítico fundido nas águas acres de refinarias e apontaram os aços inoxidáveis austeníticos e dúplex como potenciais substitutos do aço inoxidável martensítico.

Palavras-chave: corrosão, refinaria, águas acres, aço inoxidável, enxofre elementar.

Introdução

No setor de petróleo, a corrosão de equipamentos e estruturas confeccionados em materiais metálicos é muito séria, sendo uma constante a procura de materiais cada vez mais resistentes à corrosão. Estes problemas de corrosão são sempre relacionados com a água presente tanto no petróleo como em seus derivados, visto que na ausência desta, não há corrosão. As características da água variam de acordo com a área do setor de petróleo, que basicamente são três: extração (de petróleo e gás), refino (de petróleo) e transporte (petróleo, gás e derivados). A água presente em cada uma destas áreas tem características diferentes. Por exemplo, a água presente na extração de petróleo é rica em cloretos (Cl⁻) e dióxido de carbono (CO₂) e a água presente na área de refino de petróleo, especialmente na unidade de craqueamento catalítico, é rica em sulfetos (S²⁻) e em íons de amônio (NH₄⁺), podendo conter pequenas concentrações de sulfatos (SO₄²⁻), cianetos (CN⁻) e cloretos. Todas estas águas são muito agressivas aos metais. As águas de processo das refinarias são conhecidas como águas acres. No Brasil as águas acres são também conhecidas por águas ácidas, apesar de serem alcalinas.

Dentre os equipamentos usados no setor de petróleo, destacam-se as válvulas, construídas geralmente em aço-carbono com internos de aço inoxidável martensítico. Ao que tudo indica a especificação para o uso deste material está restrita a sua elevada resistência mecânica, pouca atenção sendo dada a sua resistência à corrosão. De fato, nenhum estudo foi localizado, na literatura, envolvendo os aços inoxidáveis martensíticos largamente utilizados em obturadores de válvulas tipo gaveta, em meios que simulam as águas de processo de refinarias. Mas o fato é que muitos danos por corrosão são verificados nas válvulas tipo gaveta utilizadas nas refinarias. Técnicos do setor de recuperação de válvulas consultados declararam que os vazamentos ocorridos nas válvulas são decorrentes da corrosão dos internos, especialmente de obturadores, feitos em aço inoxidável martensíticos fundidos, e que a corrosão se manifesta de maneira localizada com formação de cavidades do tipo pite.

Na área de exploração de petróleo, os internos das válvulas tipo gaveta já são confeccionados em aço inoxidável dúplex, sabidamente mais resistente em meios cloretados, o que têm diminuído as falhas em uso, ao contrário das válvulas utilizadas em refinarias, onde estes aços são raramente usados

Diante do exposto, resolveu-se desenvolver um estudo objetivando verificar a possibilidade do uso de internos de válvulas tipo gaveta confeccionados em aço inoxidável dúplex para serem usados em refinarias de petróleo. Para isto, planejou-se desenvolver o estudo usando amostras de água acres retiradas de diferentes pontos de refinarias, com o intuito de melhor representar as condições de campo. Com estas amostras, foram conduzidos ensaios de imersão em laboratório. Adicionalmente, foram conduzidos também ensaios de imersão em

campo. Para complementar o trabalho, decidiu-se ensaiar outros tipos de aços fundidos (aço-carbono e aço inoxidável austenítico) e alguns aços trabalhados (aço-carbono, aço liga ferrítico, aço inoxidável ferrítico, aço inoxidável austenítico e aço inoxidável dúplex).

O presente trabalho descreve toda a metodologia adotada no referido estudo e apresenta e discute os resultados obtidos.

Metodologia

Foram realizados ensaios em laboratório e em campo.

Materiais utilizados

Fizeram parte do escopo do trabalho os seguintes materiais:

- a. aço-carbono fundido ASTM A216 Gr. WCB;
- b. aço inoxidável martensítico fundido ASTM A217 Grau CA15;
- c. aço inoxidável austenítico fundido ASTM A351 Gr.CF8;
- d. aço inoxidável austenítico fundido ASTM A351 Gr.CF8M;
- e. aço inoxidável dúplex fundido ASTM A995 Grau CD4MCuN.;
- f. aço-carbono trabalhado ASTM A106 Gr. B;
- g. aço inoxidável austenítico trabalhado ASTM A269 Grau TP 304;
- h. aço inoxidável austenítico trabalhado ASTM A269 Gr. TP 316;
- i. aço-liga ferrítico trabalhado ASTM A335 Grau P5;
- j. aço-liga ferrítico trabalhado ASTM A335 Grau P11;
- k. aço inoxidável ferrítico trabalhado ASTM A268 Grau TP430;
- l. aço inoxidável austenítico trabalhado ASTM B668 UNS 08028;
- m. aço inoxidável dúplex trabalhado ASTM A789 UNS 32750;

Meios de ensaio

Fizeram parte do escopo do trabalho os meios de ensaio descritos a seguir. Verificou-se que a aparência dos meios de ensaio variou conforme a data da coleta, apresentando diferenças nas tonalidades e na quantidade de resíduos presentes. A Tabela 1 apresenta exemplos de resultados de análises fornecidas pela refinaria de petróleo dos meios citados.

- i. meio P104F – águas acres não retificadas do fundo do Tanque de Armazenagem de águas acres não tratadas de diversos pontos da refinaria. Estas são águas acres sem tratamento proveniente de diversos pontos da refinaria, sabe-se que possuem altos teores de sulfeto e de amônia. Pelas determinações realizadas de pH e condutividade, estas amostras, possuem, em média, pH 9 e condutividade 5500 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- ii. meio Carga N15 – águas acres não retificadas coletadas antes da entrada da Torre Retificadora de H_2S (*Stripper* de H_2S) – Torre responsável por remover a maior parte

do sulfeto de hidrogênio da água acre em tratamento. Este meio contém, em média, 4000 mg/L de amônia, 4000 mg/L de sulfeto e possui pH por volta de 9.

- iii. meio Fundo N15 – águas acres retificadas coletadas após passagem pela Torre Retificadora de H₂S (*Stripper* de H₂S) – Torre responsável por remover a maior parte do sulfeto de hidrogênio da água acre em tratamento. Águas acres. Este meio contém, em média, 2500 mg/L de amônia, 400 mg/L de sulfeto e possui pH por volta de 10;
- iv. meio Fundo N16 – águas acres retificadas coletadas após passagem pela Torre Retificadora de NH₃ (*Stripper* de NH₃) – torre responsável por remover a maior parte da amônia contida na água acre em tratamento. Este contém, em média, 20 mg/L de amônia, 40 mg/l de sulfeto, 5 mg/L de cianeto e possui pH por volta de 9 e condutividade média de 4500 µS/m.

Ensaio em campo

Os ensaios em campo foram divididos em duas fases, conforme descrito em seguida. Para ambos os ensaios, foram utilizados painéis de corrosão nos quais os corpos de prova ficavam suspensos na posição horizontal, ou seja, com a maior superfície do corpo de prova paralela ao fundo do tanque com o objetivo de que ocorressem depósitos na superfície. Os painéis de corrosão foram instalados no Tanque P104-D da RPBC, tanque cujo meio de ensaio é similar ao descrito no Meio P104F, rente à sua lateral, conforme ilustra o desenho esquemático da Figura 1.

CAMPO FASE 1: foram ensaiados todos os metais do escopo do estudo com exceção do aço inoxidável ferrítico trabalhado ASTM A268 Grau TP 430, do aço inoxidável austenítico trabalhado ASTM B668 UNS 08028 e do aço inoxidável dúplex trabalhado ASTM A789 UNS 32750 no meio de ensaio similar ao meio P104F. Foram instalados, na mesma data, três painéis de corrosão, porém os mesmos foram retirados com tempos de ensaio diferentes, com 89 dias, 172 dias e 313 dias de ensaio. Os corpos de prova foram avaliados por inspeção visual e por Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios X (EDS - *Energy Dispersive X-Ray System*).

CAMPO FASE 2: foram ensaiados todos os metais do escopo do estudo no meio de ensaio similar ao meio P104F. Foram instalados dois painéis, na mesma data e ambos foram retirados com o mesmo tempo de ensaio, após 181 dias de ensaio. Os corpos de prova foram avaliados por inspeção visual, por EDS e por perda de massa.

Ensaio em laboratório

Os ensaios em laboratório foram divididos em três fases, denominadas Fase 1, Fase 2 e Fase 3. A utilização da água de processo da refinaria teve a finalidade de reproduzir, em parte, as condições reais às quais as válvulas estão expostas. No entanto, há outras variáveis reais que não puderam ser simuladas no laboratório, tais como: tipo de escoamento do fluido transportado, temperatura da solução de processo, variação da composição química da solução, geometria dos internos da válvula, posição de instalação da válvula na linha de produção, tensões aplicadas sobre a válvula e ciclagem da válvula. Para este estudo, foram

utilizados como critérios de avaliação a avaliação visual, as taxas de corrosão e os exames e as análises por FEG e EDS.

Inicialmente, foram identificados três pontos de coleta de amostras de águas acres, onde se supunha haver as águas acres mais agressivas da refinaria. Estes três meios de ensaio foram denominados P104F, Fundo N15 e Fundo N16 e foram utilizados nos ensaios da Fase 1. Com o decorrer do estudo, verificou-se que as águas acres da carga da Torre N15, denominada Carga N15, também eram bastante agressivas, assim, incluiu-se este meio de ensaio nas Fases 2 e 3 do estudo. As principais diferenças entre os ensaios das fases 1, 2 e 3 são apresentadas na Tabela 2.

A Figura 2 apresenta os desenhos esquemáticos das células de corrosão utilizadas nos ensaios de laboratório Fases 1 e 2. Para a Fase 3, utilizaram-se células similares às utilizadas nas fases anteriores do estudo, porém foram adaptadas bombas de recirculação de águas, a fim de se manter o meio de ensaio sob agitação, conforme mostra a Figura 3. Cabe informar que não foram utilizados os mesmos modelos de células de corrosão para todos os meios de ensaio. No entanto, o princípio de funcionamento foi o mesmo, não tendo interferido nos resultados.

Resultados e discussão

Ensaio em Campo

Campo Fase 1

No início do estudo conjecturava-se que a corrosão seria predominantemente localizada, assim, a preocupação era em manter a maior área possível na superfície dos corpos de prova, para melhor visualizar os pites esperados. Deste modo, não foram determinadas, no início do ensaio, a área e a massa inicial dos corpos de prova.

As Tabelas 3, Tabela 4 e Tabela 5, apresentam os resultados obtidos após 89 dias, 172 dias e 313 dias de ensaio, respectivamente. Por estas tabelas, verifica-se que se manteve o mesmo comportamento no decorrer do ensaio, ou seja, ocorrência ou não de corrosão. Ocorreram apenas pequenas alterações na aparência física dos materiais. Dos aços fundidos, observou-se a ocorrência de corrosão generalizada apenas no aço-carbono e no aço inoxidável martensítico. Entre os aços trabalhados somente ocorreu corrosão generalizada no aço-liga ferrítico e no aço-carbono. Nos demais casos, observaram-se apenas resíduos do meio de ensaio sobre os corpos de prova e após limpeza criteriosa, a ausência de corrosão.

No caso do aço inoxidável ASTM A217 Grau CA15, houve a ocorrência de corrosão localizada, porém esta se deve à fresta, pois se formou próximo ao furo e sob o fio de náilon utilizado para prender o corpo de prova ao painel de corrosão.

Foram realizadas exames e análises por FEG e EDS em alguns corpos de prova ensaiados por 313 dias. Os exames confirmaram a ocorrência de corrosão generalizada. Verificou-se para o aço-carbono ASTM A106 Grau B que, após o ensaio, o teor de oxigênio era alto e destacava-se a presença de enxofre, além de outros elementos provenientes do meio de ensaio nas manchas escuras (Área 1 da Tabela 6 (a)). Após a decapagem, verificou-se que ocorreu a

remoção da camada oxidada (Região 1 da Tabela 6 (b)), sendo o antimônio presente devido à solução de Clark utilizada na decapagem do corpo de prova.

No caso do aço-liga ferrítico ASTM A335 Grau P11, também se verificou um alto teor de oxigênio e a presença de enxofre, cromo e silício, além de outros elementos em menor quantidade (Tabela 7 (a)). Após a decapagem, foi retirada a maior parte da oxidação do metal (Tabela 7 (b)), sendo o antimônio presente devido à solução de Clark utilizada na decapagem do corpo de prova.

O aço-carbono ASTM A216 Grau WCB também apresentou um teor de oxigênio e enxofre mais elevado na mancha escura (Tabela 8 (a)). Neste caso, não houve a remoção total do enxofre presente mesmo após a decapagem com solução de Clark (responsável pelo antimônio presente na análise).

No caso do aço inoxidável martensítico ASTM A217 Grau CA15 foi realizada a análise no ponto em que ocorreu a corrosão localizada. Verificou-se a presença de diversos contaminantes, inclusive enxofre (Tabela 9 (a)). Verificou-se também o enriquecimento de cromo nesta região. Após a decapagem com solução 10 % de ácido nítrico, constatou-se a remoção da maior parte dos contaminantes (Tabela 9 (b)).

Com os resultados obtidos, verificou-se que é imprescindível a determinação da massa inicial dos corpos de prova, visto que, no tanque estoque de águas acres, a corrosão é predominantemente do tipo generalizada, e não localizada como se supunha no início deste estudo.

Além disso, verificou-se que, independentemente do tempo de ensaio, houve reprodução dos resultados. Sejam eles:

- dentre os aços fundidos, somente o aço-carbono e o aço inoxidável martensítico apresentaram corrosão, sendo esta do tipo generalizada, com exceção do aparecimento de pites devido à fresta formada pelo suporte do corpo de prova. Não foi constatada corrosão nos aços inoxidáveis austeníticos e dúplex;
- dentre os aços trabalhados, verificou-se corrosão no aço-carbono e nos aços-liga ferríticos, não tendo sido verificada a corrosão nos aços inoxidáveis austeníticos.

Finalmente, os resultados por EDS indicam que neste meio, os metais ferrosos estudados formam uma camada de produtos de corrosão ricos em oxigênio e enxofre, indicando que são, provavelmente, constituídos por óxidos e sulfetos, os quais, em alguns casos (aços inoxidáveis austeníticos e dúplex), promovem uma proteção contra corrosão, pois, após a decapagem, visivelmente, a superfície estava pouco atacada. Já nos aços-carbono e nos aços inoxidáveis martensíticos, a camada formada sobre os metais, apesar de ser rico em oxigênio e sulfeto, como os demais, não tinha características muito protetoras, já que se percebeu, após a decapagem, um ataque generalizado (aços-carbono, aços-liga, aços ferríticos) ou localizado (aços inoxidáveis martensíticos) dos metais.

Assim, neste ensaio, verificou-se que os aços inoxidáveis austeníticos e dúplex resistiram à corrosão, não apresentando diferença significativa na aparência física, antes e após o ensaio.

Já o aço-carbono fundido e trabalhado, o aço-liga ferrítico trabalhado e o aço inoxidável martensítico fundido apresentaram corrosão predominantemente generalizada, independentemente do tempo de duração dos ensaios.

Campo Fase 2

Nos ensaios de campo da FASE 2, foram repetidos os ensaios da FASE 1, utilizando-se os treze tipos de materiais definidos no escopo. Neste caso, a massa inicial e a massa final dos corpos de prova foram determinadas e a área dos mesmos foi calculada. Estes dados foram utilizados para a determinação da taxa de corrosão.

A instalação dos corpos de prova foi feita no interior do Tanque estoque de águas acres da RPBC denominado P104D, utilizando dois painéis de corrosão, os mesmos da FASE 1 conforme desenho esquemático apresentado na Figura 1. A remoção dos painéis de corrosão ocorreu 181 dias após a instalação. Uma avaliação visual dos corpos de prova após a retirada do tanque e limpeza simples dos mesmos indicou a ocorrência de corrosão do tipo generalizada nos aços-carbono ASTM A106 Grau B e ASTM A216 Grau WCB e nos aços-liga ferríticos ASTM A335 Graus P5 e P11. Observaram-se também alguns pontos escuros nos corpos de prova de aço inoxidável martensítico ASTM A217 Grau CA15, que, após decapar e observar ao microscópio, verificou-se que eram pites. Os demais corpos de prova não apresentaram alteração significativa na aparência física após o ensaio. Nestes, após a decapagem, verificou-se que as perdas de massa não ultrapassaram 1,0 $\mu\text{m}/\text{ano}$.

As Tabela 10 e Tabela 11 apresentam os resultados dos ensaios em campo obtidos com os materiais trabalhados e a Tabela 12 apresenta os resultados obtidos com os materiais fundidos.

As análises das tabelas apresentadas ratificam o predomínio da ocorrência de corrosão do tipo generalizada nos aços-carbono e nos aços-liga ferríticos, observados na FASE 1. A maior taxa de corrosão encontrada foi do aço-carbono trabalhado ASTM A106 Grau B (6,6 $\mu\text{m}/\text{ano}$). No entanto, o aço-liga ferrítico ASTM A335 Grau P11 teve uma taxa de corrosão próxima da média deste, porém, com uma reprodutibilidade maior entre os dois corpos de prova ensaiados (o desvio padrão entre as medidas de taxa de corrosão do aço-carbono ASTM A106 Grau B foi de 1,3 $\mu\text{m}/\text{ano}$ enquanto que o do aço-liga ASTM A335 Grau P11 foi de apenas 0,3 $\mu\text{m}/\text{ano}$). O aço-carbono fundido ASTM A216 Grau WCB apresentou a menor taxa de corrosão (média de 1,0 $\mu\text{m}/\text{ano}$ e desvio padrão de 0,03 $\mu\text{m}/\text{ano}$), entre os aços-carbono e os aços-liga ferríticos.

O aço inoxidável ferrítico ASTM A268 Grau TP 430 também sofreu corrosão, porém com uma taxa de corrosão mais baixa (em média 0,6 $\mu\text{m}/\text{ano}$). O aço inoxidável martensítico ASTM A217 Grau CA15 apresentou corrosão do tipo generalizada em um dos corpos de prova e pites microscópicos em outro. Os demais aços inoxidáveis formaram uma camada passiva que protegeu o metal base contra a corrosão, sendo esta camada removida no processo de decapagem.

Assim como no ensaio CAMPO FASE 1, os aços inoxidáveis austeníticos e dúplex resistiram à corrosão, não apresentando diferença significativa na aparência física, antes e após o ensaio, sendo que as taxas de corrosão encontradas foram inferiores a 0,5 $\mu\text{m}/\text{ano}$. Já para o aço-

carbono fundido e trabalhado, o aço-liga ferrítico trabalhado e o aço inoxidável martensítico fundido, verificou-se que houve mudança na aparência física, com o escurecimento dos corpos de prova, indicando corrosão predominantemente generalizada. No entanto, as taxas de corrosão foram inferiores a 10 µm/ano

Ensaio em Laboratório

Para facilitar a compreensão, a apresentação dos resultados será feita por desempenho do material, ou seja, primeiramente serão tratados os aços de melhor desempenho, depois os materiais de desempenho intermediário e finalmente os de piores desempenhos.

Os aços inoxidáveis austeníticos e os aços inoxidáveis dúplex, tanto fundidos quanto trabalhados, apresentaram um bom desempenho, todos os corpos de prova ensaiados apresentaram tão somente um leve escurecimento e manchamento superficial, indicando a formação de um filme, provavelmente de sulfetos e óxidos, de caráter protetor. A título de ilustração, a Tabela 13, a Tabela 14 e a Tabela 15 apresentam alguns exemplos. Todos os demais corpos de prova apresentaram aspectos semelhantes.

As Tabela 16 e Tabela 17 apresentam as taxas de corrosão juntamente com os desvios padrões destes aços. Pode-se verificar que, nos aços inoxidáveis austeníticos e dúplex, tanto trabalhado quanto fundido, os valores foram baixos e inferiores a 4,2 µm/ano. Analisando-se estas tabelas, não se consegue apontar com exatidão o meio ou a condição de ensaio mais agressivo. Para ambos os casos há indicadores de que a Fase 3 foi a condição menos agressiva. As condições mais agressivas foram as das Fases 1 e 2, para os aços fundidos e trabalhados, respectivamente.

O aço inoxidável ferrítico apresentou um desempenho um pouco pior do que o dos aços inoxidáveis austeníticos e dúplex. Neste caso, a passivação ocorreu com formação de filme protetor mais espesso na Fase 1 e na Fase 3, conforme pode ser observado na Tabela 18, a qual mostra um corpo de prova de cada um destes meios. Já na Fase 2, o filme formado sobre os corpos de prova era mais escuro e fosco, e, ainda, observou-se a formação de pites no meio Fundo N15 (após retificador de sulfetos) e Fundo N16 (após retificador de amônia). A Tabela 19 apresenta as taxas de corrosão médias e os respectivos desvios padrão para cada meio e condição ensaiada.

Os aços-liga trabalhados apresentaram desempenho intermediário. Neste caso, verificou-se influência da origem das águas acres e das condições de operação. Nas águas acres não tratadas (Tanque P104F e Carga N15), os aços-liga apresentaram corrosão generalizada, sendo as taxas de corrosão maiores nos ensaios da Fase 1. Ver Tabela 20 e Tabela 21. Já nas águas tratadas, os aços liga apresentaram corrosão localizada quando ensaiado com agitação (Fase 3). Além disso, as taxas de corrosão foram muito maiores nas águas acres tratadas, especialmente no Fundo N16, como pode ser constatado na Tabela 21.

Os aços-carbono apresentaram corrosão generalizada na Fase 1 e na Fase 2 (ambas sem agitação), sendo as maiores taxas de corrosão verificadas no meio Fundo N16 (águas acres tratadas). Para este material, os piores resultados foram encontrados nos ensaios com agitação (Fase 3). Neste caso, observou-se, conforme mostra a Tabela 22 e a Tabela 23, corrosão por pite, sendo a pior condição observada para a água do meio Fundo N15.

O aço inoxidável martensítico, material de referência do presente estudo, não apresentou um bom desempenho. Em todas as fases foi observada a ocorrência de corrosão localizada. Na Fase 1 e na Fase 3, os pites apareceram nas águas tratadas Fundo N16 e na Fase 2 nas águas não tratadas do meio P104F (Tanque) (Tabela 24). As taxas de corrosão foram baixas nas Fases 2 e 3 e elevadas na Fase 1, como pode ser observado na Tabela 25.

Conclusões

O presente estudo permitiu verificar que o aço inoxidável martensítico, material utilizado atualmente em obturadores de válvulas, sofre corrosão do tipo localizado em águas acres de refinarias com diferentes concentrações de sulfeto e amônia e em diferentes condições de ensaio (com e sem agitação), sendo aconselhável considerar a substituição deste material por outro mais resistente à corrosão.

Dentre os materiais alternativos, os aços inoxidáveis austeníticos e dúplex mostraram-se bastante promissores, pois estes materiais (tanto fundidos quanto trabalhados) não apresentaram sinais de ataque em todos os ensaios realizados, seja em campo, seja em laboratório. No entanto, deve-se alertar que o presente estudo não levou em consideração a ocorrência de corrosão associada a fatores mecânicos, visto que em válvulas são utilizados materiais de baixa resistência.

Este estudo mostrou ainda que os aços-carbono (ASTM A106 Grau B e ASTM A216 Grau WCB), os aços baixa liga (ASTM A335 Grau P5 e ASTM A335 Grau P11) e o aço inoxidável ferrítico (ASTM A268 Grau TP 430) também são suscetíveis a corrosão por águas acres, não devendo ser considerados para serem usados em contato com águas acres de refinarias.

Figuras e tabelas

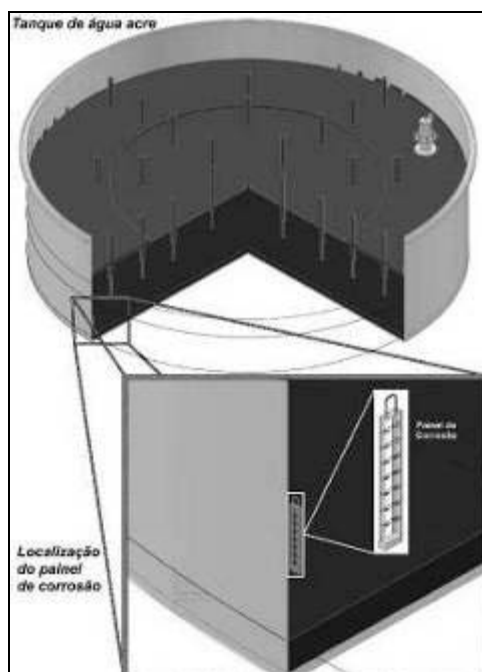


Figura 1 – Desenho esquemático indicando a localização do painel de corrosão no interior do Tanque P104-D.

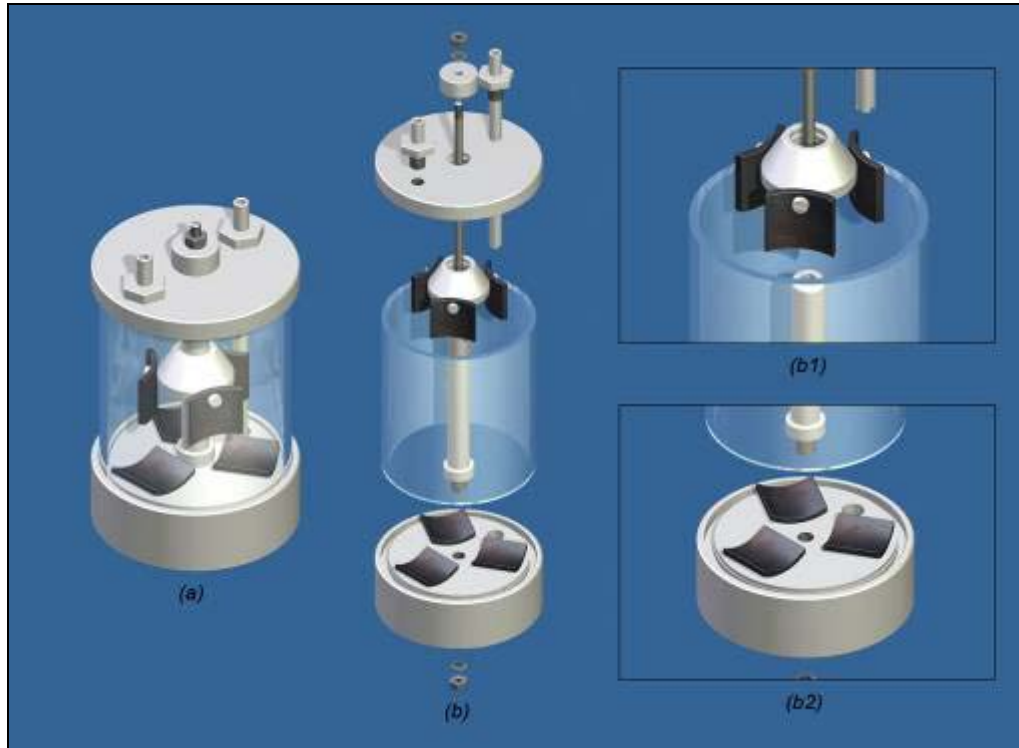


Figura 2 – Desenho em perspectiva da célula de corrosão: (a) célula de corrosão montada, (b) vista explodida da célula de corrosão, (b1) detalhe dos corpos de prova na vertical e (b2) detalhe dos corpos de prova na horizontal.

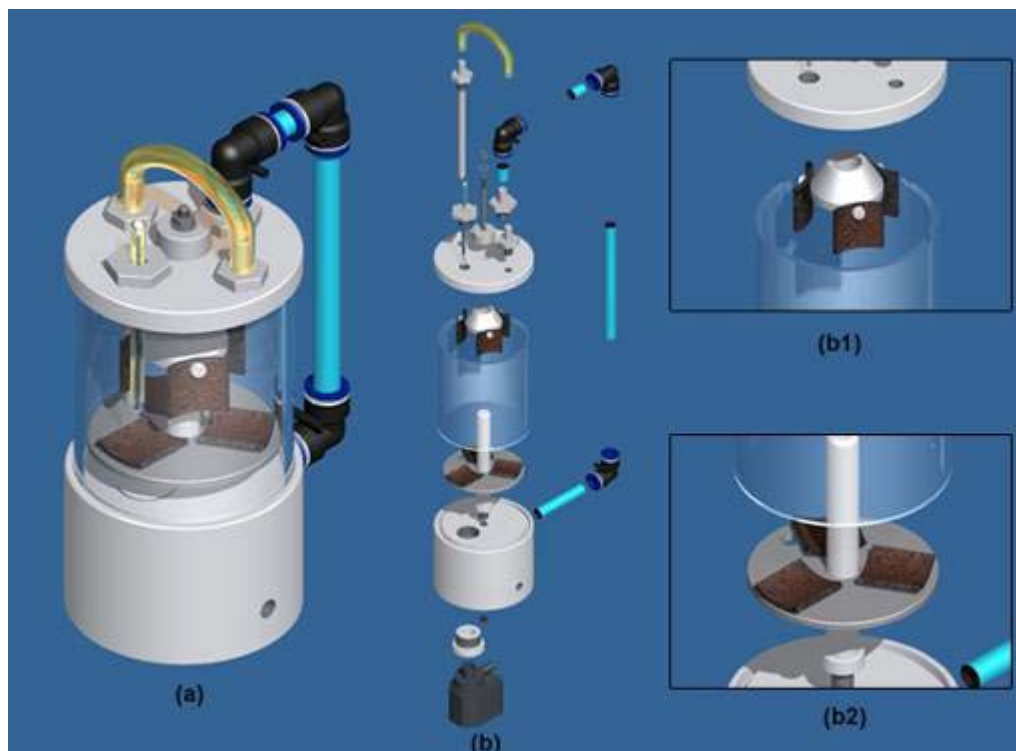






Figura 3 – Desenho em perspectiva da célula de corrosão com agitação: (a) célula de corrosão montada, (b) vista explodida da célula de corrosão, (b1) detalhe dos corpos de prova na vertical e (b2) detalhe dos corpos de prova na horizontal.

Tabela 1 – Exemplos de resultados das análises das águas acres utilizadas como meios de ensaio. As análises foram fornecidas e efetuadas pela refinaria de petróleo.

Parâmetro \ Data	P104F	Carga N15	Fundo N15	Fundo N16
pH	9,2	8,2	10,6	11,6
Sulfeto (mg/L)	6.412	6.412	561	164
Amônia (mg/L)	4.063	3.362	1.706	4,6
Cloreto (mg/L)	Análise não fornecida	Análise não fornecida	Análise não fornecida	Análise não fornecida
Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	63,3*	2.880*	6.270*	7,070*
Aparência				






















*Obs.: análise executada pelo IPT

Obs.2: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos meios de ensaio.

Tabela 2 – Principais diferenças entre os ensaios de laboratório realizados







Ensaio	Condição do ensaio	Meios de ensaio	Metais ensaiados
Fase 1	Com fase vapor Sem agitação Ligado a lavador de gases Sem troca de meio 21 dias de ensaio	P104F	Todos, exceto ASTM A268 Grau TP 430
		Fundo N15	Todos, exceto ASTM A268 Grau TP 430
		Fundo N16	Todos
Fase 2	Sem fase vapor Sem agitação Hermético Troca de meio a cada 14 dias 56 dias de ensaio	P104F	Todos
		Carga N15	
		Fundo N15	
		Fundo N16	
Fase 3	Sem fase vapor Com agitação Hermético Troca de meio a cada 14 dias 56 dias de ensaio	P104F	Todos
		Carga N15	
		Fundo N15	
		Fundo N16	

Tabela 3 – Aspecto dos corpos de prova antes e após 89 dias de exposição em campo (Fase 1)

Material	Aparência inicial		Aparência após 89 dias		Observações	
	Lado 1	Lado 2	Lado 1	Lado 2	Corrosão	Descrição da aparência física
Aço-carbono ASTM A106 Gr. B					Generalizada	Tom avermelhado sobre toda a superfície do corpo-de-prova e algumas manchas escuras.
Aço inoxidável austenítico ASTM A269 Grau TP 304					Não houve corrosão	Poucas manchas pretas e dispersas sobre a superfície do corpo-de-prova.
Aço inoxidável austenítico ASTM A269 Gr. TP316					Não houve corrosão	Mancha avermelhada provocada pelo contato do metal com o náilon.
Aço-liga ferrítico ASTM A335 Grau P5					Generalizada	Presença de manchas de tonalidades escuras e avermelhadas dispersas sobre a superfície do corpo-de-prova.
Aço-liga ferrítico ASTM A335 Grau P11					Generalizada	Presença de manchas de tonalidades escuras e avermelhadas dispersas sobre a superfície do corpo-de-prova.
Aço-carbono ASTM A216 Gr. WCB					Generalizada	Tom avermelhado e escuro sobre toda a superfície do corpo-de-prova.
Aço inoxidável martensítico ASTM A217 Grau CA15					Generalizada	Apresenta manchas de tonalidades escuras dispersas sobre a superfície do corpo-de-prova.
Aço inoxidável austenítico ASTM A351 Gr.CF8					Não houve corrosão	Escurecimento da superfície do corpo-de-prova devido ao contato com o petróleo do meio de ensaio.
Aço inoxidável austenítico ASTM A351 Gr.CF8M					Não houve corrosão	Manchas pretas provenientes do meio (devido ao contato com petróleo) dispersas sobre toda a superfície do corpo-de-prova.
Aço inoxidável dúplex ASTM A995 Grau CD4MCuN					Não houve corrosão	Manchas pretas provenientes do meio (devido ao contato com petróleo) dispersas sobre toda a superfície do corpo-de-prova.
					Não houve corrosão	Escurecimento da superfície do corpo-de-prova.

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 4 – Aspecto dos corpos de prova antes e após 172 dias de exposição em campo (Fase 1).

Material	Aparência inicial		Aparência após 172 dias		Observações	
	Lado 1	Lado 2	Lado 1	Lado 2	Corrosão	Descrição da aparência física
Aço-carbono ASTM A106 Gr. B					Generalizada	Tom escuro sobre toda a superfície do corpo-de-prova e algumas manchas escuras.
Aço inoxidável austenítico ASTM A269 Grau TP 304					Não houve corrosão	Não houve alteração significativa na aparência física do metal.
Aço inoxidável austenítico ASTM A269 Gr. TP316					Não houve corrosão	Não houve alteração significativa na aparência física do metal.
Aço-liga ferrítico ASTM A335 Grau P5					Generalizada	Presença de manchas avermelhadas sobre a superfície do corpo-de-prova.
Aço-liga ferrítico ASTM A335 Grau P11					Generalizada	Presença de manchas de tonalidades escuras dispersas sobre a superfície do corpo-de-prova.
Aço-carbono ASTM A216 Gr. WCB					Generalizada	Tom escuro e manchas avermelhadas sobre a superfície do corpo-de-prova.
Aço inoxidável martensítico ASTM A217 Grau CA15					Generalizada	Escurecimento da superfície do metal.
Aço inoxidável austenítico ASTM A351 Gr.CF8					Não houve corrosão	Não houve alteração significativa na aparência física do metal.
Aço inoxidável austenítico ASTM A351 Gr.CF8M					Não houve corrosão	Escurecimento da superfície do corpo-de-prova.
Aço inoxidável dúplex ASTM A995 Grau CD4MCuN					Não houve corrosão	Não houve alteração significativa na aparência física do metal.
					Não houve corrosão	Não houve alteração significativa na aparência física do metal.

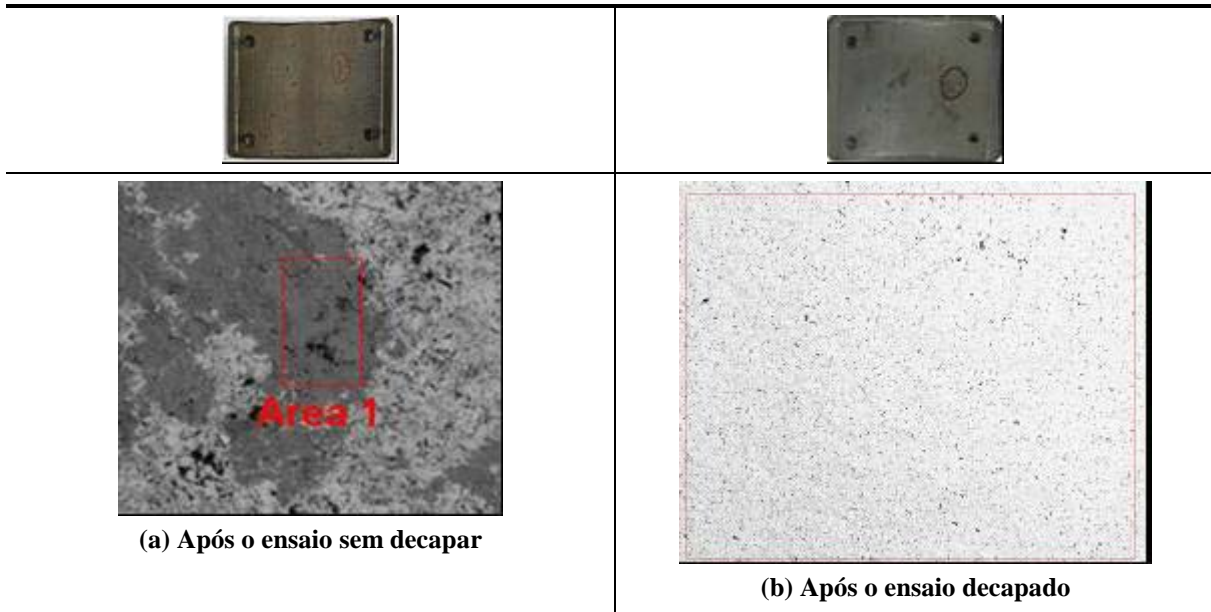
Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 5 – Aspecto dos corpos de prova antes e após 313 dias de exposição em campo (Fase 1).

Material	Aparência inicial		Aparência após 313 dias		Observações	
	Lado 1	Lado 2	Lado 1	Lado 2	Corrosão	Descrição da aparência física
Aço-carbono ASTM A106 Gr. B					Generalizada	Tom escuro sobre toda a superfície do corpo-de-prova e algumas manchas escuras.
Aço inoxidável austenítico ASTM A269 Grau TP 304					Não houve corrosão	Presença de algumas manchas mais escuras sobre o corpo-de-prova.
Aço inoxidável austenítico ASTM A269 Gr. TP316					Não houve corrosão	Marca escura provocada pelo contato do metal com o náilon.
Aço-liga ferrítico ASTM A335 Grau P5					Generalizada	Tom avermelhado com manchas avermelhadas mais escuras sobre a superfície do corpo-de-prova.
Aço-liga ferrítico ASTM A335 Grau P11					Generalizada	Tom azulado com manchas avermelhadas sobre a superfície do corpo-de-prova.
Aço-carbono ASTM A216 Gr. WCB					Generalizada	Escurecimento da superfície, com manchas escuras e marca escura provocada pelo contato do metal com o náilon.
Aço inoxidável martensítico ASTM A217 Grau CA15					Generalizada e localizada por fresta	Escurecimento da superfície além de pites e marcas escuras provocados pelo contato do metal com o náilon.
Aço inoxidável austenítico ASTM A351 Gr.CF8					Não houve corrosão	Escurecimento da superfície, com manchas escuras e marca escura provocada pelo contato do metal com o náilon.
Aço inoxidável austenítico ASTM A351 Gr.CF8M					Não houve corrosão	Escurecimento da superfície, com manchas escuras e marca escura provocada pelo contato do metal com o náilon.
Aço inoxidável dúplex ASTM A995 Grau CD4MCuN					Não houve corrosão	Escurecimento da superfície, com manchas escuras e marca escura provocada pelo contato do metal com o náilon.
					Não houve corrosão	Escurecimento da superfície, com manchas escuras e marca escura provocada pelo contato do metal com o náilon.

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

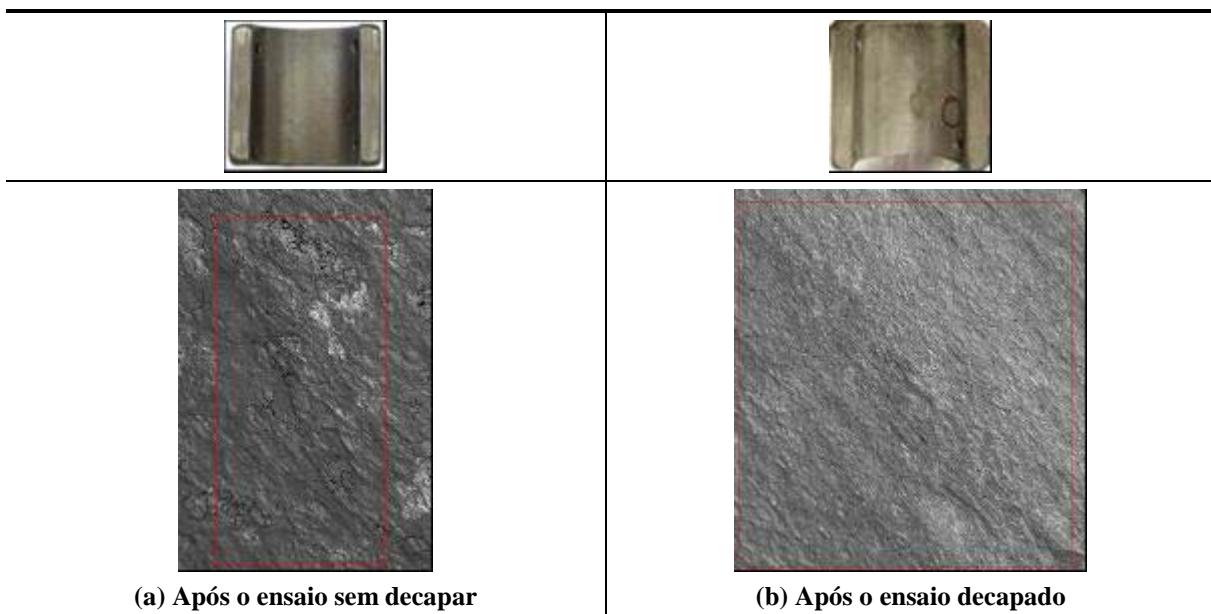
Tabela 6 – Exames e análises por FEG e EDS em um corpo de prova de aço-carbono segundo a norma ASTM A106 Grau B após o ensaio (a) e após a decapagem (b)



Análise semiquantitativa: (a) sem decapar: C: 13,4 %; O: 28,0 %; Na: 0,2 %; Al: 0,2 %; Si: 0,8 %; S: 1,0 %; Cl: 0,1 %; K: 0,1 %; Ca: 0,4 %; Mn: 0,3 %; Fe: 55,5 %. (b) decapado: C: 2,4 %; O: 4,4 %; Si: 1,4 %; Mn: 0,6 %; Fe: 89,0 %; Sb: 2,2 %.

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

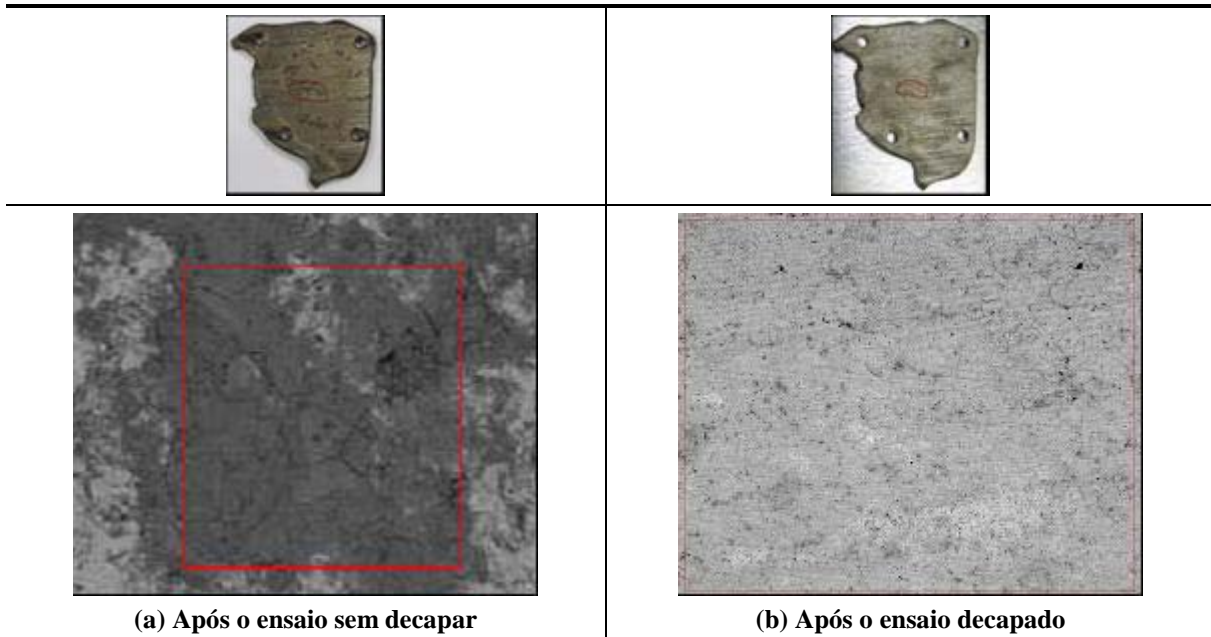
Tabela 7 – Exames e análises por FEG e EDS em um corpo de prova de aço-liga ferrítico segundo a norma ASTM A335 Grau P11 após o ensaio (a) e após a decapagem (b)



Análise semiquantitativa: (a) sem decapar: C: 13,1 %; O: 30,2 %; Na: 0,3 %; Al: 0,2 %; Si: 0,9 %; S: 2,5 %; Cl: 0,2 %; K: 0,1 %; Ca: 0,3 %; Cr: 0,9 %; Mn: 0,3 %; Fe: 51,0 %. (b) decapado: C: 2,7 %; O: 3,6 %; Al: 0,2 %; Si: 0,7 %; Cr: 1,1 %; Mn: 0,4 %; Fe: 88,2 %; Sb: 3,1 %.

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

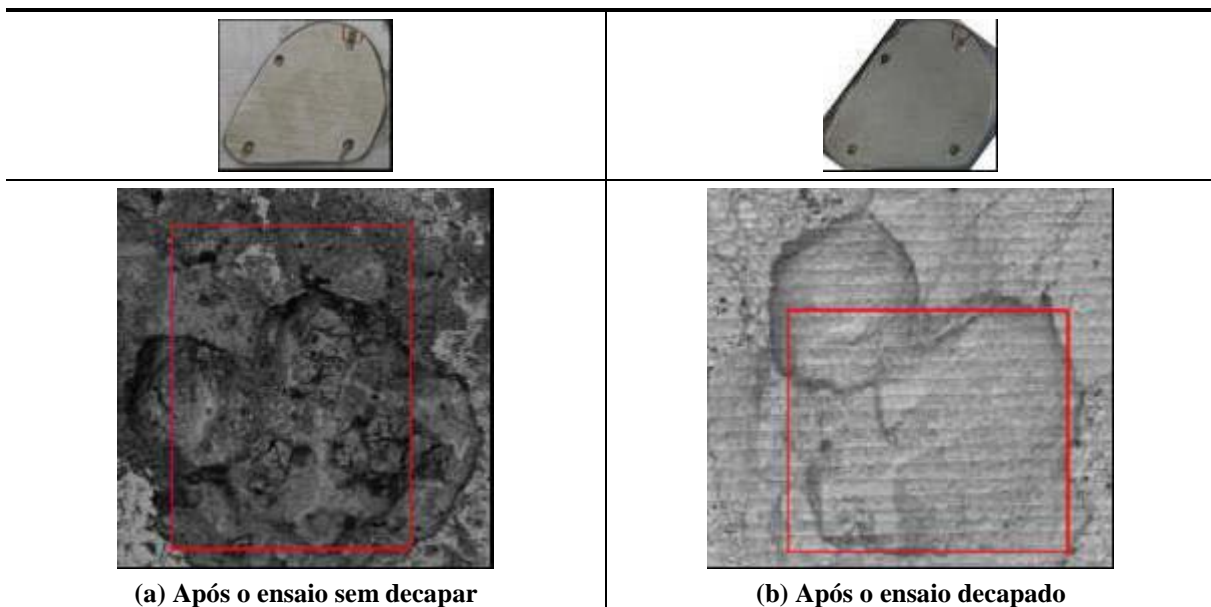
Tabela 8 – Exames e análises por FEG e EDS em um corpo de prova de aço-carbono fundido segundo a norma ASTM A216 Grau WCB após o ensaio (a) e após a decapagem (b)



Análise semiquantitativa: (a) sem decapar: C: 7,7 %; O: 17,0 %; Na: 0,2 %; Al: 0,2 %; Si: 0,9 %; S: 0,9 %; K: 0,2 %; Ca: 0,2 %; Mn: 0,6 %; Fe: 72,1 %. (b) decapado: C: 4,1 %; O: 5,8 %; Si: 0,8 %; S: 0,1 %; Mn: 0,7 %; Fe: 85,4 %; Sb: 3,1 %.

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

















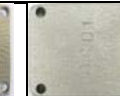














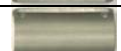




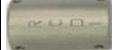





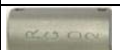





Tabela 9 – Exames e análises por FEG e EDS em um corpo de prova de aço inoxidável martensítico segundo a norma ASTM A217 Grau CA15 após o ensaio (a) e após a decapagem (b)



Análise semiquantitativa: (a) sem decapar: C: 10,9 %; O: 7,7 %; Al: 0,3 %; Si: 1,5 %; S: 2,2 %; Ca: 1,3 %; Cr: 15,2 %; Mn: 0,6 %; Fe: 49,5 %; Ni: 0,8 %. (b) decapado: C: 5,3 %; O: 4,7 %; Si: 1,6 %; S: 0,2 %; Ca: 0,2 %; Cr: 13,4 %; Mn: 1,0 %; Fe: 73,6 %.

















































Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 10 – Aspecto dos corpos de prova trabalhados que passivaram: antes, após 181 dias de exposição em campo e após decapagem.

Material	Antes do ensaio		Após o ensaio		Após decapagem		Perda de massa	Taxa de corrosão (µm/ano)
	Lado 1	Lado 2	Lado 1	Lado 2	Lado 1	Lado 2		
Aço inoxidável austenítico ASTM A269 Grau TP304							4,2 mg	0,35
							4,6 mg	0,38
Tipo de corrosão: Generalizada								
Descrição da aparência física: Poucas manchas pretas e dispersas sobre a superfície do corpo de prova, principalmente nas regiões que inicialmente já continham falhas.								
Aço inoxidável austenítico ASTM A269 Grau TP316							6,4 mg	0,39
							6,0 mg	0,36
Tipo de corrosão: Generalizada								
Descrição da aparência física: Poucos pontos pretos e dispersas sobre a superfície do corpo de prova.								
Sandvik SAF 2507							2,0 mg	0,25
							2,4 mg	0,29
Tipo de corrosão: Generalizada								
Descrição da aparência física: Poucos pontos pretos dispersos sobre a superfície do corpo de prova.								
Sandvik Sanicro 28							2,4 mg	0,29
							2,4 mg	0,29
Tipo de corrosão: Generalizada								
Descrição da aparência física: Leve escurecimento dos corpos de prova.								


















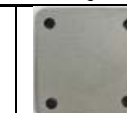












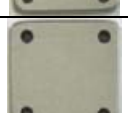









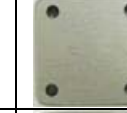











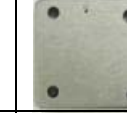






Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 11 – Aspecto dos corpos de prova trabalhados que sofreram corrosão: antes, após 181 dias de exposição em campo e após decapagem.

Material	Antes do ensaio		Após o ensaio		Após decapagem		Perda de massa	Taxa de corrosão (µm/ano)
	Lado 1	Lado 2	Lado 1	Lado 2	Lado 1	Lado 2		
Aço-carbono ASTM A106 Grau B							57 mg	4,7
							82 mg	6,6
	Tipo de corrosão:		Generalizada					
Descrição da aparência física:		Escurecimento generalizado, escurecimento preferencial nas partes do corpos de prova que inicialmente já tinham falhas. Os corpos de prova do Painel 2 ficaram mais escuros que os do Painel 1.						
Aço-liga ferrítico ASTM A335 Grau P5							48 mg	3,8
							42 mg	3,5
	Tipo de corrosão:		Generalizada					
Descrição da aparência física:		Escurecimento generalizado, com regiões mais claras e pontos mais escuros. Após a decapagem verificou-se a coloração ficou similar a antes do ensaio, com manchas claras nas mesmas regiões que já haviam antes do ensaio.						
Aço-liga ferrítico ASTM A335 Grau P11							92 mg	5,5
							85 mg	5,2
	Tipo de corrosão:		Generalizada					
Descrição da aparência física:		Escurecimento generalizado, com algumas regiões mais claras e alguns pontos mais escuros. Após a decapagem verificou-se que a superfície do corpo de prova continuou manchada e mais escura do que antes do ensaio.						
ASTM A268 Grau TP 430							2,3 mg	0,63
							2,1 mg	0,570
	Tipo de corrosão:		Generalizada					
Descrição da aparência física:		Poucos pontos pretos dispersos sobre a superfície do corpo de prova.						

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 12 – Aspecto dos corpos de prova fundidos: antes, após 181 dias de exposição em campo e após decapagem.

Material	Antes do ensaio		Após o ensaio		Após decapagem		Perda de massa	Taxa de corrosão (µm/ano)
	Lado 1	Lado 2	Lado 1	Lado 2	Lado 1	Lado 2		
Aço-carbono ASTM A216 Grau WCB							5,2 mg	1,07
							5,0 mg	1,02
Tipo de corrosão: Generalizada								
Descrição da aparência física: Escurecimento generalizado, com regiões mais claras e pontos mais escuros. Após a decapagem a superfície continuou manchada e mais escura do que antes do ensaio. O corpo de prova do Pannel 2 ficou mais escuro que o do Pannel 1.								
Aço inoxidável martensítico ASTM A217 Grau CA15							2,8 mg	0,58
							3,0 mg	0,62
Tipo de corrosão: Generalizada e localizada								
Descrição da aparência física: Em um dos corpos de prova não houve mudanças significativa na aparência, mas no outro verificou-se a presença de pontos escuros no Lado 2 do corpo de prova. Vizualizaram-se pites preenchidos com produtos de corrosão.								
Aço inoxidável austenítico ASTM A351 Grau CF8							1,6 mg	0,33
							1,4 mg	0,29
Tipo de corrosão: Generalizada								
Descrição da aparência física: Poucos pontos pretos dispersos sobre a superfície do corpo de prova.								
Aço inoxidável austenítico ASTM A351 Grau CF8M							1,3 mg	0,27
							1,5 mg	0,31
Tipo de corrosão: Generalizada								
Descrição da aparência física: Poucos pontos pretos dispersos sobre a superfície do corpo de prova.								
Aço inoxidável dúplex ASTM A995 Grau CD4MCuN							1,6 mg	0,33
							1,6 mg	0,33
Tipo de corrosão: Generalizada								
Descrição da aparência física: Poucos pontos pretos dispersos sobre a superfície do corpo de prova.								

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 10 – Exemplos do aspecto físico dos corpos de prova após o ensaio de acordo com a Fase do ensaio e do meio utilizado para os aços inoxidáveis austeníticos fundidos

Material	Norma	Meio	P104F	Carga N15	Fundo N15	Fundo N16
Aço inoxidável austenítico fundido	ASTM A351 Gr. CF8	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				
	ASTM A351 Gr. CF8M	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				























Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 11 – Exemplos do aspecto físico dos corpos de prova após o ensaio de acordo com a Fase do ensaio e do meio utilizado para os aços inoxidáveis austeníticos trabalhados

Material	Norma	Meio	P104F	Carga N15	Fundo N15	Fundo N16
Aço inoxidável austenítico trabalhado	ASTM A269 Grau TP 304	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				
	ASTM A269 Grau TP 316	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				
Aço inoxidável austenítico trabalhado	SANICRO 28 ASTM B 668 UNS	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 12 – Exemplos do aspecto físico dos corpos de prova após o ensaio de acordo com a Fase do ensaio e do meio utilizado para os aços inoxidáveis dúplex fundidos e trabalhados

Material	Norma	Meio	P104F	Carga N15	Fundo N15	Fundo N16
Aço inoxidável dúplex fundido	ASTM A995 Gr. CD4MCuN	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				
Aço inoxidável dúplex trabalhado	SANDVIK SAF 2507 ASTM A 789 UNS S32750	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.












Tabela 13 – Taxas de corrosão médias e desvios padrões de aços inoxidáveis austeníticos fundidos e dúplex

Material	Norma	Meio	Posição	P104F		Carga N15		Fundo N15		Fundo N16	
				Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão
Aço inoxidável austenítico fundido	ASTM A351 Gr. CF8	Fase 1	Horiz.	2,2	0,4	Ensaio não realizado		1,2	0,1	0,8	0,0
			Vert.	2,3	0,0			1,5	0,2	1,2	1,9
		Fase 2	Horiz.	1,2	0,2	0,8	0,1	1,5	0,1	1,6	0,0
			Vert.	1,2	0,1	0,5	0,1	1,4	0,1	1,6	0,0
		Fase 3	Horiz.	0,7	0,1	0,7	0,1	0,6	0,0	0,5	0,1
			Vert.	0,6	0,0	0,6	0,0	0,6	0,0	0,5	0,0
	ASTM A351 Gr. CF8M	Fase 1	Horiz.	2,4	0,5	Ensaio não realizado		1,4	0,3	0,5	0,2
			Vert.	2,3	1,7			2,8	0,2	0,1	0,0
		Fase 2	Horiz.	1,1	0,0	0,6	0,0	1,5	0,1	1,7	0,1
			Vert.	1,5	0,0	0,5	0,2	1,5	0,1	1,7	0,1
		Fase 3	Horiz.	0,5	0,1	0,9	0,0	0,7	0,0	0,6	0,0
			Vert.	0,6	0,1	0,8	0,0	0,6	0,0	0,6	0,1
Aço inoxidável dúplex fundido	ASTM A995 Gr. CD4MCuN	Fase 1	Horiz.	1,9	0,2	Ensaio não realizado		1,8	0,7	0,3	0,0
			Vert.	1,9	0,1			3,2	0,6	0,6	0,2
		Fase 2	Horiz.	0,9	0,2	0,6	0,1	1,7	0,1	2,0	0,0
			Vert.	1,5	0,1	0,5	0,0	1,7	0,2	2,0	0,1
		Fase 3	Horiz.	0,5	0,1	0,7	0,1	0,8	0,1	0,5	0,2
			Vert.	0,6	0,0	0,6	0,1	0,6	0,0	0,6	0,1
Aço inoxidável dúplex trabalhado	SANDVIK SAF 2507 ASTM A 789 UNS S32750	Fase 1	Horiz.	0,7	0,4	Ensaio não realizado		0,5	0,4	0,1	0,0
			Vert.	0,6	0,0			0,6	0,2	0,5	0,4
		Fase 2	Horiz.	0,8	0,5	0,3	0,0	2,3	0,0	1,9	0,1
			Vert.	1,5	0,1	0,3	0,0	1,8	0,4	5,0	2,6
		Fase 3	Horiz.	0,3	0,0	0,5	0,0	0,4	0,1	0,5	0,0
			Vert.	0,3	0,0	0,6	0,0	0,4	0,0	0,5	0,2

Tabela 14 – Taxas de corrosão médias e desvios padrões de aços inoxidáveis austeníticos

Material	Norma	Meio	Posição	P104F		Carga N15		Fundo N15		Fundo N16	
				Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão
Aço inoxidável austenítico trabalhado	ASTM A269 Grau TP 304	Fase 1	Horiz.	0,2	0,1	Ensaio não realizado		0,1	0,0	0,5	0,2
			Vert.	0,3	0,0			0,1	0,1	0,6	0,0
		Fase 2	Horiz.	0,9	0,6	0,4	0,0	3,9	0,1	4,2	0,1
			Vert.	3,1	0,1	0,4	0,0	3,6	0,1	3,6	0,6
		Fase 3	Horiz.	0,2	0,3	0,8	0,1	0,6	0,0	0,6	0,0
			Vert.	0,4	0,0	0,8	0,0	0,6	0,0	0,5	0,0
	ASTM A269 Grau TP 316	Fase 1	Horiz.	0,9	0,1	Ensaio não realizado		-0,1	0,2	0,1	0,2
			Vert.	0,9	0,3			0,2	0,1	0,4	0,2
		Fase 2	Horiz.	1,1	0,1	0,5	0,0	1,2	0,1	1,5	0,2
			Vert.	1,5	0,7	0,4	0,0	1,3	0,0	1,3	0,1
		Fase 3	Horiz.	0,6	0,0	0,7	0,0	0,7	0,1	0,6	0,0
			Vert.	0,6	0,0	0,8	0,0	0,6	0,1	0,5	0,1
	SANDVIK SANICRO 28 ASTM B 668 UNS 08028	Fase 1	Horiz.	0,7	0,2	Ensaio não realizado		0,6	0,2	0,5	-
			Vert.	0,9	0,2			0,8	-	0,0	0,2
		Fase 2	Horiz.	0,6	0,2	0,2	0,2	2,3	0,3	2,3	0,1
			Vert.	1,5	0,2	0,3	0,1	2,0	0,0	2,3	0,1
		Fase 3	Horiz.	0,4	0,0	0,5	0,1	0,5	0,0	0,6	0,1
			Vert.	0,3	0,1	0,6	0,0	0,6	0,0	0,5	0,0

Tabela 15 – Exemplos do aspecto físico dos corpos de prova após o ensaio de acordo com a Fase do ensaio e do meio utilizado para os aços inoxidáveis ferríticos trabalhados











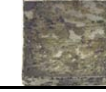











Material	Norma	Meio	P104F	Carga N15	Fundo N15	Fundo N16
Aço inoxidável martensítico fundido	ASTM A217 Gr. CA15	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 16 – Taxas de corrosão médias e desvios padrões de aços inoxidáveis ferríticos trabalhados

Material	Norma	Meio	Posição	P104F		Carga N15		Fundo N15		Fundo N16	
				Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão
Aço inoxidável ferrítico trabalhado	ASTM A268 Grau TP 430	Fase 1	Horiz.	0,7	0,2	Ensaio não realizado		Ensaio não realizado		Ensaio não realizado	
			Vert.	0,9	0,1						
		Fase 2	Horiz.	1,3	0,4	0,9	0,0	2,1	0,1	3,1	1,4
			Vert.	1,6	0,1	0,6	0,1	2,1	0,1	4,4	1,2
		Fase 3	Horiz.	1,0	0,1	1,0	0,2	1,0	0,1	1,0	0,0
			Vert.	0,8	0,0	1,0	0,1	0,8	0,2	0,7	0,0

Tabela 17 – Exemplos do aspecto físico dos corpos de prova após o ensaio de acordo com a Fase do ensaio e do meio utilizado para os aços-liga ferríticos trabalhados

Material	Norma	Meio	P104F	Carga N15	Fundo N15	Fundo N16
Aço-liga ferrítico trabalhado	ASTM A335 Grau P5	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				
	ASTM A335 Grau P11	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				






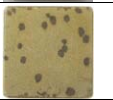

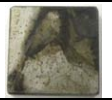
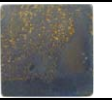










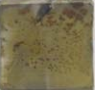


Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 18 – Taxas de corrosão médias e desvios padrões de aços-liga ferríticos trabalhados

Material	Norma	Meio	Posição	P104F		Carga N15		Fundo N15		Fundo N16	
				Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão
Aço-liga ferrítico trabalhado	ASTM A335 Grau P5	Fase 1	Horiz.	8,3	-	Ensaio não realizado		7,9	-	30,0	-
			Vert.	11,6	-	Ensaio não realizado		10,8	-	32,1	-
		Fase 2	Horiz.	4,0	0,3	6,7	4,4	5,4	0,5	8,9	-
			Vert.	4,1	0,7	3,7	0,1	4,0	0,4	9,0	-
		Fase 3	Horiz.	3,1	0,6	2,5	0,2	2,4	0,2	28,9 *	6,0
			Vert.	3,1	0,1	2,7	0,6	2,0	0,5	20,3 *	1,3
	ASTM A335 Grau P11	Fase 1	Horiz.	14,4	-	Ensaio não realizado		16,0	-	41,6	-
			Vert.	16,5	-	Ensaio não realizado		13,9	-	48,4	-
		Fase 2	Horiz.	6,5	0,7	5,0	0,4	5,9	1,1	12,5	-
			Vert.	5,7	0,8	3,7	0,1	5,0	0,8	12,5	-
		Fase 3	Horiz.	4,8	0,3	3,6	0,6	57,9 *	19,1	26,5	1,0
			Vert.	4,7	0,1	3,1	0,0	45,2 *	21,3	22,2	2,3

*É importante salientar que a taxa de corrosão obtida em corpos de prova que apresentaram pites não pode ser utilizada no cálculo de perda de espessura.

Tabela 19 – Exemplos do aspecto físico dos corpos de prova após o ensaio de acordo com a Fase do ensaio e do meio utilizado para os aços-carbono

Material	Norma	Meio	P104F	Carga N15	Fundo N15	Fundo N16
Aço-carbono fundido	ASTM A216 Gr. WCB	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				
Aço-carbono trabalhado	ASTM A106 Gr. B	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				










Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 20 – Taxas de corrosão médias e desvios padrões de aços-liga ferríticos trabalhados

Material	Norma	Meio:	Posição	P104F		Carga N15		Fundo N15		Fundo N16	
				Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão
Aço-carbono fundido	ASTM A216 Gr. WCB	Fase 1	Horiz.	14,4	1,4	Ensaio não realizado		9,6	1,9	40,0	3,7
			Vert.	14,0	0,4			9,2	0,3	70,0	4,2
		Fase 2	Horiz.	6,1	1,5	2,6	0,1	19,9	19,9	19,9	-
			Vert.	3,1	0,3	2,6	0,1	1,0	1,0	1,0	-
		Fase 3	Horiz.	5,0	1,2	2,3	0,2	126,6 *	10,6	47,6	2,5
			Vert.	3,1	0,7	2,6	0,2	5,5	0,1	52,2	7,9
Aço-carbono trabalhado	ASTM A106 Gr. B	Fase 1	Horiz.	12,8	0,3	Ensaio não realizado		8,0	0,8	28,2	1,4
			Vert.	14,8	2,3			8,9	0,4	41,8	3,6
		Fase 2	Horiz.	4,0	0,3	3,9	0,1	8,3	0,3	15,8	-
			Vert.	3,7	0,2	4,2	0,4	5,1	0,4	15,7	-
		Fase 3	Horiz.	18,8 *	2,0	4,4	0,0	133,7 *	2,6	19,9	0,5
			Vert.	18,4 *	2,5	5,4	0,5	33,7 *	13,8	21,5	1,1

*É importante salientar que a taxa de corrosão obtida em corpos de prova que apresentaram pites não pode ser utilizada no cálculo de perda de espessura.

Tabela 21 – Exemplos do aspecto físico dos corpos de prova após o ensaio de acordo com a Fase do ensaio e do meio utilizado para os aços inoxidáveis martensíticos fundidos

Material	Norma	Meio	P104F	Carga N15	Fundo N15	Fundo N16
Aço inoxidável martensítico fundido	ASTM A217 Gr. CA15	Fase 1		Ensaio não realizado		
		Fase 2				
		Fase 3				

Obs.: as configurações do equipamento fotográfico e a iluminação local podem alterar as cores dos corpos de prova.

Tabela 22 – Taxas de corrosão médias e desvios padrões de aços inoxidáveis martensíticos fundidos

Material	Norma	Meio:	Posição	P104F		Carga N15		Fundo N15		Fundo N16	
				Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão	Taxa de corrosão média (µm/ano)	Desvio padrão
Aço inoxidável martensítico fundido	ASTM A217 Gr. CA15	Fase 1	Horiz.	34,1	0,3	Ensaio não realizado		31,6	1,8	29,4	1,5
			Vert.	9,6	0,5			27,9	2,6	49,1	5,5
		Fase 2	Horiz.	3,2	1,6	2,2	0,4	2,1	0,4	3,3 *	1,3
			Vert.	4,6	0,2	1,5	1,8	1,3	0,1	6,1 *	0,3
		Fase 3	Horiz.	3,3 *	2,4	2,4	0,7	1,5	0,4	3,5	0,3
			Vert.	2,2 *	2,9	1,2	0,9	0,4	0,2	0,8	0,4

*É importante salientar que a taxa de corrosão obtida em corpos de prova que apresentaram pites não pode ser utilizada no cálculo de perda de espessura.