

ANÁLISE DE FALHA E CARACTERIZAÇÃO DE VÁLVULAS DE INJEÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO FABRICADAS EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 316

Josemberg de Assis Severiano, J.A. Severiano, josemberg950@gmail.com^{1,2}

Rebeca Conceição da Silva Reis, rebecareis12@gmail.com²

Abraão Santos Silva, eng.abraao2013@gmail.com²

Sandro Griza, sandro.griza@gmail.com²

¹ Petrobras S/A, josemberg@petrobras.com.br

² Laboratório de Microestruturas e Propriedades Mecânicas (LACEM - UFS), sandro.griza@gmail.com

Resumo: Este estudo se baseia na investigação da falha das válvulas de injeção de água utilizadas na exploração e produção de petróleo. Foi realizado um acompanhamento de amostras de válvulas fabricadas do aço inoxidável AISI 316, a fim de identificar as causas dos danos após certo tempo de uso nos poços injetores de água, as mesmas foram retiradas dos poços para análise dos seus componentes, levando em conta características morfológicas, microestruturais e do tipo de corrosão predominante no material. O trabalho de caracterização envolveu análise química do metal através de espectrometria de emissão ótica, microdureza, metalografia e análise da composição química do fluido de injeção utilizada nos poços injetores. Resultados apontaram que o dano ocorre principalmente devido à corrosão generalizadas por pite em regiões preferenciais favorecida pela estagnação da água em regiões preferenciais da válvula, que é acelerada em decorrência da alta concentração de sais presentes no meio.

Palavras-chave: válvulas; corrosão; AISI 316.

1. INTRODUÇÃO

Válvula de injeção de água é um componente instalado na coluna dos poços injetores de água, em que permite a produção de petróleo nos campos nas áreas terrestres. O material utilizado na fabricação das válvulas é o aço inoxidável AISI 316, mas com o decorrer do tempo esse material passar sofrer danos superficiais.

Os aços inoxidáveis são ligas com características especiais e com ótimas propriedades de resistência à corrosão. Essas ligas podem ser aplicadas em ambientes que possuem alto grau de agressividade, como visto nas indústrias em diferentes aplicações, entre elas, plataformas *on-shore* e *off-shore*, mineração, cimenteiras e na fabricação de máquinas e ferramentas em geral. Estudos realizados por Obadele *et al.* 2016 e Krauss 2006 indicaram que a resistência à corrosão é marcada principalmente pela formação de uma camada passivadora de óxido de cromo, responsável em manter as propriedades inoxidáveis do metal.

Ahmad (2006) mostrou que a corrosão pode ser definida como a deteriorização do material e de suas propriedades pela ação química ou eletroquímica, entre um material e um meio. Quando isto ocorre, o metal passa a perder as suas características originais, afetando suas propriedades mecânicas.

A agressividade do meio é uma das principais causas relacionadas aos danos dos materiais na indústria do petróleo e gás. Trabalho de Vafaeiam e Fattah (2015), demonstra que a exposição dos materiais metálicos a eletrólito com elevadas taxas de salinidade e presença de agentes corrosivos, a exemplo dos íons cloreto, o que faz tornar o meio favorável para a degradação das ligas metálicas. Trabalhos realizados por Atashin *et al.* (2011) e Souza (2010) apontaram que a ação mecânica devido ao escoamento dos fluidos e o ataque químico do meio podem ocasionar danos severos aos aços inoxidáveis e falhas nos equipamentos, assim como perdas econômicas e operacionais para indústria.

Dentre os tipos de corrosão, o pite é uma forma de corrosão agressiva que consiste na formação de pequenas cavidades que penetra no material, provocando a quebra da camada passiva, tornando o material susceptível ao ataque corrosivo do meio. Mariano (2010), mostra que o íon cloreto é um dos principais agentes corrosivos que contribui para formação de pites. Além disso, as inclusões de sulfetos de manganês em regiões empobrecidas de molibdênio podem acelerar o processo da corrosão por pites nos aços inoxidáveis informaram (Ahmad 2006; Fontana e Greene 1978).

Trabalhos de (Fontana e Greene 2006; Colombier e Hochmanm 1967; Mansfeld 2010) demonstraram que a formação da corrosão por aeração diferencial ocorre em ligas que estão expostas em ambientes com fluidos separados por espécies químicas distintas, onde muitas vezes essas áreas por estarem empobrecidas de oxigênio e ricas em

espécies ácidas passam a tornar o metal vulnerável ao ataque corrosivo do meio. Esse efeito pode também ser sentido à medida que a velocidade de circulação do eletrólito encontra-se muito baixa, gerando zonas de estagnação que promovem a adesão de partículas dissolvidas sobre o metal, o que pode favorecer o aparecimento da corrosão por aeração diferencial em ligas inoxidáveis.

Estudo de Ahmad (2006) indicou que o cloreto de sódio contribui para destruição da camada passivadora dos aços inoxidáveis, visto que ele tem o poder de penetrar na película formada de óxido de cromo e destruí-la localmente, gerando a denominada corrosão localizada por pites. Já os sulfatos (SO_4), quando na presença do ferro e do magnésio, provocam a diminuição no valor do pH da água, o que torna o meio ácido.

A adição do molibdênio no aço inoxidável pode beneficiar o aumento da resistência à corrosão, agindo desta forma como uma barreira para penetração dos agentes corrosivos presentes no meio em estudo. Mudanças no projeto construtivo pode dificultar a corrosão, garantindo maior resistência ao componente.

O presente estudo busca identificar os danos ocasionados nas válvulas de injeção fabricadas do aço AISI 316 através do acompanhamento e monitoramento de campo, a fim de correlacionar os resultados dos danos com os aspectos do ambiente agressivo encontrado nos poços injetores de água.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e testes de campo

Para análise de campo foram instaladas 91 amostras de válvulas do aço inoxidável AISI 316 (Figura 1) em poços de injeção no campo de petróleo Carmópolis em Sergipe.

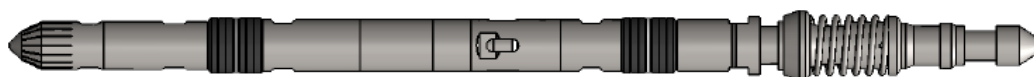


Figura 1. Ilustração da válvula de injeção que foi instalada nos poços.

As válvulas foram monitoradas desde do momento da sua instalação até a sua retirada após falhar quando em operação nos poços, utilizando como critério a variação da vazão. O critério da variação da vazão pode indicar entupimento das válvulas e/ou dano do material. De acordo com a inspeção visual, caso houvesse confirmação de entupimento, a válvula era desobstruída e devolvida para o poço. Nos casos em que havia danos em elementos internos ou na superfície. As válvulas classificadas como inutilizadas foram inspecionadas em laboratório, em seguida as válvulas com defeitos retiradas dos poços foram submetidas a um estudo de análise de falha, envolvendo caracterizações em relação a composição química do material e do meio, assim como, metalografia, microdureza e análise visual dos componentes danificados.

A Figura 2 apresenta esquema do funcionamento dos poços de injeção de água. A pressão de injeção das bombas é controlada através de equipamentos de automação localizados na superfície. É possível observar como as válvulas estão posicionadas no interior do mandril e conectadas aos tubos da coluna de produção dos poços.

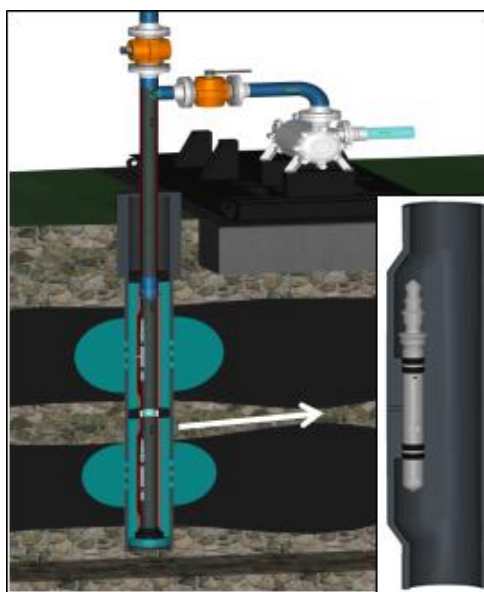


Figura 2. Esquema de um poço injetor de água, detalhe da vista aumentada do mandril com válvula instalada no poço.

A Figura 3 mostra o fluxo de injeção de água pelo mandril, incidindo diretamente no latch da válvula (componente 1), e entrando pela extremidade 2, saindo pelo orifício 4 do mandril para o reservatório de petróleo.

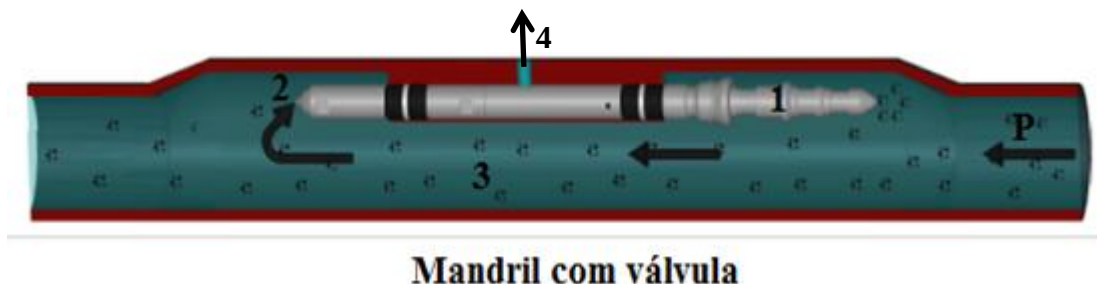


Figura 3. Diagrama do fluxo da água de injeção. A representação está inclinada em 90 graus em relação à montagem no poço. O fluido incide sobre o latch (1) e segue até entrar na válvula pela extremidade (2), saindo pelo orifício (4) do mandril.

2.2 Caracterizações do meio

Esta etapa é de grande importância e está relacionado diretamente à composição da água, que é o único meio em que as válvulas estão em contato nos poços. A composição da água é similar para todos os poços do campo em que as válvulas foram instaladas, pois a água é conduzida por linhas fechadas e não recebendo influências de elementos externos durante o seu escoamento.

Foram coletadas seis amostras de água na saída das bombas, onde estão localizadas as linhas de injeção dos poços injetores do campo de petróleo em estudo. As amostras foram armazenadas em reservatórios plásticos de 1 litro e enviadas para o laboratório. Após a análise, foi possível avaliar as principais características do meio, levando em conta o seu efeito corrosivo com destaque para o valor da alcalinidade (pH), concentração de íons cloretos e de sais dissolvidos, e entre outros.

2.3 Caracterizações do material das amostras

As válvulas retiradas dos poços foram desmontadas, posteriormente realizadas limpeza e análise visual para identificar os danos superficiais nos seus componentes.

A análise da composição química das válvulas foi feito através de espectrometria de emissão ótica, a fim de verificar o enquadramento da liga em relação às normas empregadas na sua composição. Para isto foi utilizado espectrômetro de emissão ótica (OXFORD Instruments model Foundry Master Xpert).

As amostras de ambas as ligas foram submetidas à análise microestrutural em seções transversais, utilizando como reagente químico a água-régia (75% HCl e 25% HNO₃) a fim de revelar a microestrutura das amostras. Foi empregado o microscópio ZEISS modelo SCOPE A1 para a obtenção das micrografias.

Os ensaios de microdureza das amostras foram realizados para verificar a dureza esperada do aço AISI 316. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a norma NBR ISO 6507-1, usando microdurômetro Future Tech modelo FM-800 da série 8085 com penetrador Vickers e carga aplicada de 1 kgf. Foi determinado o valor médio de dureza a partir de 5 leituras por amostra.

Foram realizadas análises visuais de peças extraídas dos poços que apresentaram danos superficiais. Esta análise permitiu identificar os elementos danificados e qual o tipo de mecanismo de dano predominante nos componentes das válvulas.

3. RESULTADOS E DISCURSÕES

3.1 Análises da composição química

O resultado obtido na Tabela 1 mostra a composição química média de seis válvulas fabricadas com aço inoxidáveis AISI 316. Todas as análises apresentaram teores dos elementos dentro dos limites estabelecidos pela norma da composição da liga.

Tabela 1. Análise química das amostras (% em peso).

Material	Fe	C	Cr	Mn	Ni	Mo	Cu	Nb	Si	S
AISI 316	68,90	0,07	16,5	1,60	9,40	2,15	0,42	0,009	0,50	0,050

3.2 Análise metalográfica

A Figura 4 mostra a microestrutura representativa das amostras do aço inoxidável AISI 316. A microestrutura é constituída de grãos de austenita em formato poligonal com a presença de maclas de recozimento (faixas retas no interior dos grãos) e inclusões de sulfeto de manganês (pontos dispersos). Estudos identificaram que a presença de inclusões de sulfetos de manganês na microestrutura e partículas de segunda fase nos aços AISI 316 afetam a resistência à corrosão por pites, pois composições dissimilares privilegia a corrosão preferencial, especialmente quando as partículas de segunda fase possuem composição química que as coloque em posição distante da austenita na série galvânica.

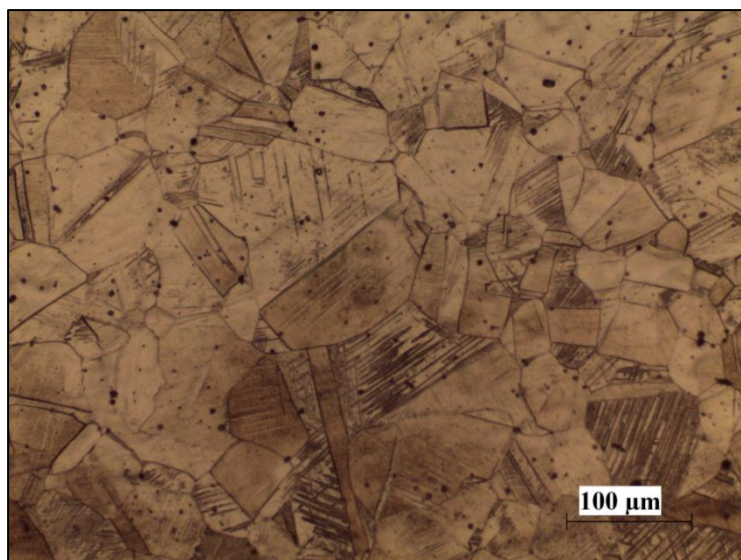


Figura 4. Micrografia de microestrutura austenítica com presença de maclas e de inclusões do aço AISI 316.

Resultados semelhantes da microestrutura do aço AISI 316 foram obtidos nas amostras metalográficas da pesquisa de Souza (2010), que encontrou inclusões dispersas que foram associadas a danos por corrosão em aço inoxidável AISI 316.

3.3 Análises das microdurezas

Foi obtida dureza média de 236 HV, compatível com a microestrutura encontrada para o aço inoxidável AISI 316, indicando que os componentes foram fabricados com material conforme especificado para válvula de injeção.

3.4 Caracterizações do meio

O resultado da análise da composição das amostras de água coletadas nos testes de campo pode ser visualizado na Tabela 2, onde mostra as concentrações médias e desvio padrão das principais espécies constituintes do meio em que as válvulas estão expostas.

O valor médio do pH encontrado nas amostras de água foi de $6,24 \pm 0,21$. Este valor como está abaixo 7, o que pode caracterizar um meio ácido, tornando o aço inoxidável susceptível aos danos por corrosão. Nota-se pelos resultados da Tabela 2 que o teor de salinidade foi da ordem de 135 g/L com desvio de $\pm 26,12$ e concentração de íons cloreto de 80,6 g/L com desvio de $\pm 14,9$, seguido do sódio que obteve $44,3 \pm 14,6$ g/L. Estes teores são os mais representativos para determinar a agressividade do meio em que as válvulas estão instaladas. Verifica-se que as suas concentrações estão muito maiores do que as obtidas nos demais parâmetros observados no resultado da análise da composição da água. Desta maneira, pode-se inferir que os danos ocasionados no aço inoxidável AISI 316 deste trabalho deve estar relacionados principalmente às altas concentrações da salinidade e dos íons cloreto.

Tabela 2. Composição média das análises físico-química das amostras de água de campo.

Parâmetros	Salinidade	Cloreto	Sódio	Sulfato	Bicarbonato	Estrôncio	Bário
Teor Médio	135,00	80,60	44,30	1,20	2,70	0,66	0,84
Desvio padrão	26,12	14,9	14,6	0,11	0,11	0,02	0,01

A concentração da salinidade encontrada é superior em mais de duas vezes o valor encontrado na pesquisa realizada por Singh (1991) e por Shutler (2007) que foi da ordem de 62 g/L e 25 g/L, respectivamente, sendo semelhante à encontrada por Souza (2010), que obteve valores da concentração de salinidade na ordem de 135 g/L. Este último pesquisador também mostrou que a água nessa concentração pode trazer danos corrosivos aos aços inoxidáveis AISI 316. Esses resultados indicam que o meio em que as válvulas estão imersas tem elevado potencial de danos por corrosão.

3.5 Análises da superfície dos danos

De acordo com os resultados de desempenho das válvulas, houve danos superficiais em aproximadamente 30% das válvulas que foram instaladas nos poços, ou seja, 32 válvulas fabricadas do AISI 316 falharam após cinco meses de acompanhamento de campo. As características dos danos nesse material das válvulas apontam para desgastes localizados que ocorrem em áreas específicas que prevalece a estagnação do fluido corrosivo que passa a reagir em detrimento à agressividade do meio em estudo. Nessa condição o projeto construtivo em que a válvula é instalada (mandril) contribui significativamente para o surgimento dessas regiões.

A Figura 5 mostra que o componente da válvula de AISI 316 que mais sofreu dano foi à luva do *latch* que está localizada acima da gaxeta da válvula que durou 56 dias de uso.



Figura 5. Danos em superfície de componente fabricado em aço AISI 316, constituído de marcas longitudinais típicas de reação com eletrólito.

A imagem da amostra na Figura 5 mostra a presença de linhas longitudinais de perda de massa, foi observado que o processo construtivo do sistema favorece a estagnação do fluxo neste local da válvula após ser instalada, sendo que a estagnação de fluido corrosivo em repouso e em contato com o metal tem a tendência de trazer danos localmente por aeração diferencial.

Também foram encontrados pontos de danos no corpo das válvulas do aço AISI 316. As Figuras 6 e 7 mostram danos por corrosão por pites na superfície das válvulas retiradas dos poços, respectivamente com 61 e 44 dias de uso. Esses danos com formação de pites pressupõem efeitos das altas concentrações de sais dissolvidos no meio, a exemplo dos íons cloreto, que ao reagir no ambiente na presença do aço inoxidável favorece para provocar a quebra da película protetora da liga, deixando danos pontuais que passam a se multiplicar com o decorrer do tempo de exposição até penetrar no material pela ação da gravidade.

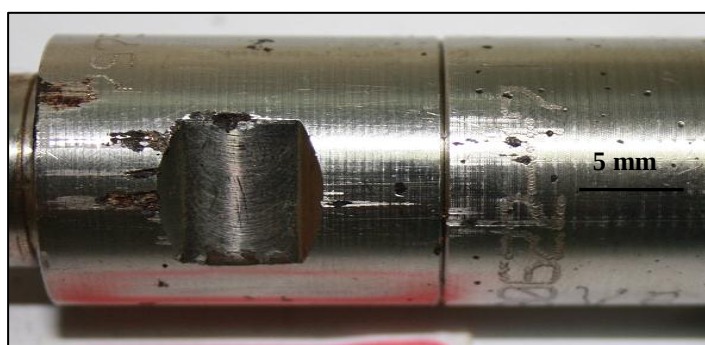


Figura 6. Danos por corrosão localizada (pites) na superfície do corpo da válvula de AISI 316. Válvula extraída do poço após 61 dias de uso.

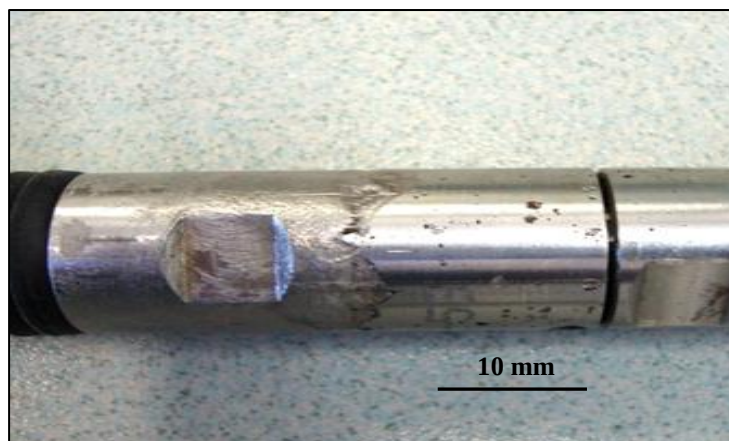


Figura 7. Danos por corrosão localizada (pites) e por perda de massa na região da extremidade da válvula causada pela ação da água corrosiva.

A Figura 8 a seguir indica que houve perda de massa localizada na extremidade da luva do *latch* da válvula, atribuída ao contato com o meio corrosivo, originando uma morfologia com aspecto rugoso, frangeado e com linhas alinhadas longitudinalmente na superfície, que pode indicar que houve dano com característica agressiva de forma localizada na parte inferior da luva do *latch*, logo acima da gaxeta, ou seja, em zona de estagnação. Observou-se que as demais partes da válvula do AISI 316 ficaram preservadas. Estas evidências indicam que ocorreu a corrosão localizada pela aeração diferencial, provocada principalmente pela estagnação da água de injeção que possui altos teores de elementos corrosivos em sua composição.

A hipótese para o motivo da corrosão da extremidade é a estagnação de líquido no espaço (fresta) entre a peça e o chanfro do mandril que estão acima da gaxeta. O líquido que desce até essa região fica estagnado na fresta devido à alta pressão. Com o passar do tempo, os cloretos e outros compostos corrosivos dissolvidos na água podem ser precipitados para esta abertura (fresta), aumentando a agressividade da água localmente no sentido de deteriorar o metal. A redução na aeração preferencial é favorecida embaixo desses produtos corrosivos quando aderidos à superfície metálica. As linhas longitudinais de frangeamento que ocorre nessa extremidade da peça podem ser atribuídas à corrosão preferencial das microestruturas em relação às partículas de segunda fase (por exemplo, as inclusões de sulfeto de manganês) que pode gerar morfologia com esse aspecto no material.



Figura 8. Danos na válvula construída de AISI 316, retirada do poço com aspecto rugoso e perda de material em região específica.

A partir dos resultados da morfologia das válvulas, pode-se inferir que as características dos danos na liga inoxidável AISI 316 ocorre em regiões localizadas devido à corrosão por pites e em áreas favorecidas pela estagnação

de fluido, gerando a corrosão por aeração diferencial, considerando o comportamento e as especificações do meio em estudo (água de injeção). É possível verificar que para este caso em específico o mecanismo de dano predominante é a corrosão.

6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, é possível identificar que a falha nas válvulas do AISI 316 apresentaram desgastes por corrosão atribuída principalmente pelas características morfológicas das amostras. Aproximadamente 30% das válvulas fabricadas de AISI 316 falharam no período de até cinco meses.

Os pites encontrados nas válvulas do AISI 316 podem ser oriundos da reação da quebra da camada passiva com o meio que apresenta elevados teores de íons cloreto e de salinidade.

Foi constatado que houve corrosão severa em pontos específicos das amostras, incentivado pela formação de regiões de estagnação que favoreceu ao aparecimento da corrosão do metal por aeração diferencial.

Os teores dos íons cloreto e da salinidade são os parâmetros dominantes para ocasionar os danos nos componentes das válvulas fabricadas do aço inoxidáveis AISI 316.

Para reduzir a possibilidade de falha nas válvulas, pode-se utilizar uma liga inoxidável com maior teor de molibdênio, esse aumento na concentração possibilita ampliar a resistência do material à corrosão por pites.

Estudos de modificações geométricas para a região de montagem das válvulas no mandril podem reduzir a possibilidade de danos por estagnação do fluido em regiões das frestas.

6. AGRADECIMENTOS

PERTROBRAS, UFS (LAMP, P2CEM, NUPEG).

7. REFERÊNCIAS

- Atashin, S., M. Pakshir, Yazdani, A., 2011, "Synergistic Investigation into the Marine Parameters Effect on the Corrosion Rate of AISI 316 Stainless Steel", *Materials & Designs*, V. 32, pp. 1315 – 1324.
- Colombier, L., Hochmann, J., 1967, "Stainless and Heat Resisting Steel" – Second Edition, França, Edward Arnold.
- Fontana, M. G., Greene, N. D., 1978, "Corrosion Engineering" – Second Edition, New York, McGraw-Hill Book Company.
- Krauss, G., 1997, "Steels - Processing Structure and Performance" - Five5 edition, Ohio, ASM International.
- Mansfeld, F., 2005, "Tafel slopes and corrosion rates obtained in the pre-Tafel region of polarization curves", *Corrosion Science*, V. 47, pp. 3178-3186.
- Mariano, N. A., Pires, A. C., Murolo, J. P., Kuri, S. E., 2005, "Avaliação da Resistência à Corrosão em aço Inoxidável Martensítico do Tipo Cr-Ni em Meio Marinho Sintético Simulando Atividades em Águas profundas", *Revista Escola de Minas - Metalurgia & Materiais*, V. 59, pp. 135-139, Ouro Preto.
- Obadele, A. B., Andrews, A., Shongwe, M. B., Olubambi, P. A., 2016, "Tribocorrosion Behaviours of AISI 310 and AISI 316 Austenitic Stainless Steels in 3.5% NaCl Solution", *Materials Chemistry and Physics*, V. 171, pp. 239-246.
- Souza, E. D., 2010, "Análise de corrosão por meio de perda de massa e espessura em aços pela ação de água produzida de poços petrolíferos", *Dissertação M.Sc.*, P2CEM/ UFS, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.
- Singh, T., Tiwari, S. N., Sundarajan, G., 1991, "Room Temperature Erosion Behaviour of 304, 316 and 410 Stainless Steels", *Wear*, V. 145, pp. 77-100.
- Schluter, H. E. P., 2007, "Caracterização e amostragem da água produzida do campo de Fazenda Belém", *Bacia Potiguar em níveis de potencialidade. Dissertação de M.Sc.*, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Vafaeian, S., Fattah, A., 2015, "Effect of Solution pH on the Electrochemical Behavior of AISI 304 Austenitic and AISI 430 Ferritic Stainless Steels in Concentrated Acidic Media", *Egyptian Journal of Petroleum*, Egypt, V. 24, pp. 333 – 341.

8. RESPONSABILIDADE AUTORMAL

Josemberg de Assis Severiano, Conceição da Silva Reis , Abraão Silva Santos, Sandro Griza.

ANALYSIS OF FAILURE AND CHARACTERIZATION OF INJECTION VALVES OF PETROLEUM WELL MANUFACTURED IN AISI 316 STAINLESS STEEL

Josemberg de Assis Severiano, J.A. Severiano, josemberg950@gmail.com^{1,2}
Rebeca Conceição da Silva Reis, rebecareis12@gmail.com²

Abraão Santos Silva, eng.abraao2013@gmail.com²
Sandro Griza, sandro.griza@gmail.com²

¹ Petrobras S/A, josemberg@petrobras.com.br

² Laboratório de Microestruturas e Propriedades Mecânicas (LACEM - UFS), sandro.griza@gmail.com

Abstract: *This study is based on the investigation of the failure of water injection valves used in oil exploration and production. Samples of valves made of stainless steel AISI 316 were tracked to identify the causes of damages after a certain time of use in the water injectors, which were removed from the wells to analyze their components, taking into account characteristics morphological, microstructural and of the type of corrosion predominant in the material. The characterization work involved chemical analysis of the metal through optical emission spectrometry, microhardness, metallography and analysis of the chemical composition of the injection fluid used in the injector wells. Results indicated that the damage occurs mainly due to the generalized corrosion by pitting in preferential regions caused by the stagnation of water in the superficial region of the valve material, which is accelerated due to the high concentration of salts present in the medium.*

Keywords: valves; corrosion; AISI 316.