

AVALIAÇÃO DA RESISTENCIA A CORROSÃO DE DOIS AÇOS ALTO MANGANÊS E O AÇO 9% NÍQUEL EM SOLUÇÃO DE H₂SO₄*

Mauro Andrés Cerra Flórez¹
Matheus de Lima Vieira²
Thiago César Souza Guedes³
Walney Silva Araújo⁴
Marcelo José Gomes da Silva⁵

Resumo

O presente estudo visa avaliar a resistência à corrosão de dois aços alto manganês com relação ao aço 9% Níquel em solução eletrólito 0,001M de H₂SO₄. Para esta pesquisa foram utilizados dois aços com teores de manganês de 22% e 26%, e a liga de aço 9% Níquel que é amplamente utilizada na indústria petroquímica. Os ensaios realizados para comparação da resistência à corrosão foram o monitoramento do potencial de circuito aberto (OCP) e polarização linear anódica. Foi escolhida a solução de H₂SO₄ pela presença do enxofre, oriundo dos campos de produção como impureza no gás natural. Foram utilizadas as técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) para a caracterização dos produtos de corrosão. Os resultados obtidos mostraram que os aços alto Manganês apresentaram valores similares de resistência à corrosão, mas ainda inferiores em relação ao aço 9% Níquel.

Palavras-chave: Corrosão; Aço Alto Manganês; Aço 9% Níquel.

EVALUATION OF CORROSION RESISTANCE OF TWO HIGH MANGANESE STEELS AND 9% NICKEL STEEL IN SOLUTION OF H₂SO₄

Abstract

The present study aims to evaluate the corrosion resistance of two high Manganese steels in relation to the 9% Nickel steel in electrolyte solution 0.001M of H₂SO₄. For this research, two steels with 22% and 26% of Manganese were used, and the 9% Nickel steel that is widely used in petrochemical industry. The tests carried out to compare the corrosion resistance are: Open Circuit Potential (OCP) and Anodic Linear Polarization. The solution of H₂SO₄ was chosen by the presence of sulphur from the fields of production as impurity in the natural gas. The Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) and Scanning Electron Microscopy (SEM) were used to characterize the corrosion products. The results obtained shown that the high Manganese steels exhibit similar values of resistance to corrosion, but below than the 9% Nickel steel.

Keywords: Corrosion; High Manganese Steel; 9% Nickel Steel.

¹ Mestrando em Engenharia e Ciência de Materiais, Engenheiro Metalúrgico, Bolsista, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil.

² Estudante de Engenharia Metalúrgica, Bolsista, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil.

³ Estudante de Engenharia Metalúrgica, Bolsista, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil.

⁴ Doutor em Engenharia Metalúrgica, Engenheiro Químico, Docente, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil.

⁵ Doutor em Engenharia Nuclear, Engenheiro Mecânico, Docente, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços austeníticos alto Mn tem se mostrado como materiais promissores para aplicações onde se exige alta resistência mecânica em temperaturas criogênicas. O gás natural em temperaturas criogênicas sofre uma drástica redução em seu volume, facilitando sua armazenagem e transporte. De uma forma geral, as ligas utilizadas para fabricação de tanques de GNL necessitam de alta resistência para que a espessura da parede do tanque seja minimizada, e se faz necessário também que essas ligas apresentem alta tenacidade em baixas temperaturas. Entre essas ligas está o aço 9% Ni, aço difundido há alguns anos para essa aplicação. Os aços alto Manganês surgiram como alternativas e têm se tornados atrativos devido ao seu menor custo em relação ao aço 9% Níquel, onde o Mn substitui o Ni como elemento estabilizador da austenita, fase imprescindível para manutenção das propriedades necessárias a baixas temperaturas. Há muitos estudos realizados sobre os aços alto Mn, onde principalmente são avaliadas às propriedades mecânicas, porém menos ou quase nenhuma atenção tem sido dada a resistência à corrosão desses novos aços com altos teores de Mn. Neste trabalho foram utilizadas duas composições do aço alto Manganês e o aço 9% Níquel, com os quais foram realizados ensaios de corrosão para comparar o comportamento das ligas em solução aquosa de H_2SO_4 , simulando a presença do enxofre oriundo dos campos de produção, presente como impureza no gás natural. Através das curvas do monitoramento do potencial de circuito aberto (OCP – *Open Circuit Potential*), das curvas de polarização linear anódica e das análises dos produtos de corrosão após a realização dos ensaios foi possível determinar qual das ligas apresentou melhor comportamento frente aos efeitos corrosivos impostos pelo meio utilizado.

Os aços ao níquel não apresentam um comportamento inoxidável e podem sofrer oxidação em muitos ambientes. No estudo de corrosão realizado em solução de água de mar sintética, as amostras do aço 9%Níquelcom vários tratamentos térmicos apresentaram potenciais de corrosão com resultados similares para todas as condições de tratamentos e foi indicado na polarização anódica um comportamento de dissolução ativa, o que foi evidenciado pelo aumento contínuo da corrente até altas densidades [De SÁ, 2015].Recentemente estão sendo desenvolvidos aços com teores acima de 15% de Manganês para aplicações de baixa permeabilidade magnética, resistência e tenacidade a baixas temperaturas (criogênicas) com a finalidade de serem utilizadas em equipamentos de transporte e armazenamento de gás natural liquefeito. Atualmente, estão sendo realizadas pesquisas sobre a resistência a corrosão de aços alto Manganês com diferentes composições para usos criogênicos que serão usados em ambientes marinhos [CHOI, 2012]. Há alguns trabalhos sobre o comportamento de polarização eletroquímica de ligas Fe-Mn-Al. Os autores reportaram que estes aços não passivam em soluções aquosas de 3,5% NaCl, 10% de HCl ou 10% de HNO_3 e que são susceptíveis a corrosão por pites, mas isso vai depender dos elementos de liga e suas quantidades [HAMADA, 2006]. Foi reportado também que o incremento do conteúdo de manganês acima de 25% diminui a resistência à corrosão da liga em soluções aquosas [ZHANG, 2004]. Foi citado que a adição de alumínio a uma liga com 25% de Manganês teve como resultado o aumento da resistência à corrosão em soluções 1M de Na_2SO_4 , 50% de HNO_3 e 10-50% de NaOH, mas que em soluções de 10% de HCl e NaCl 3,5% este mesmo aço não apresentou passivação [HYUNG, 2014].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais foram fornecidos pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará (UFC). As amostras dos aços alto Manganês foram tratadas termicamente a 1150°C por meia hora e temperadas em água. As amostras do aço 9% Níquel foram tratadas termicamente a 850°C por meia hora e temperadas em água. A composição dos aços 22% Manganês, 26% Manganês e 9% Níquel são mostradas nas Tabelas 1, 2 e 3 respectivamente.

Tabela 1. Composição Química da liga de aço 22% Manganês [%p]. Fonte: Autor.

Fe	Mn	Al	Si	C	Cr	Ni	Cu	Mg	Mo	P	Pb	As
69,65	22,22	3,39	2,51	0,53	0,48	0,26	0,2	0,52	0,05	0,03	0,14	0,02

Tabela 2. Composição Química da liga de aço 26% Manganês [%p]. Fonte: Autor.

Fe	Mn	Al	Si	C	Cr	Ni	Cu	P	S	Ca
71,5	24,97	1,51	1,05	0,32	0,29	0,16	0,12	0,04	0,02	0,02

Tabela 3. Composição Química da liga de aço 9% Níquel [%p]. Fonte: Autor.

Fe	Ni	Mn	Si	C	Cr	Mo	V	P	Ti	S
90,053	8,65	0,65	0,25	0,09	0,1	0,07	0,11	0,02	0,09	0,009

As medidas eletroquímicas foram feitas no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) da Universidade Federal do Ceará (UFC), utilizando o potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT 302N da Metrohm®, controlado pelo programa NOVA®v1.11 para aquisição e tratamento dos dados. Foi utilizada uma célula convencional de três eletrodos, de referência, de trabalho e o contra eletrodo. Onde o eletrodo de referência é de Ag(s)/AgCl(s)/Cl⁻(aq) (KCL saturado), o contra eletrodo é feito com uma placa de platina com área geométrica retangular de 130 mm² aproximadamente, e os eletrodos de trabalho foram feitos com as amostras de cada um dos aços com área aproximada de 30mm². Para a montagem dos eletrodos de trabalho, foram cortadas três amostras retangulares de cada um dos aços, depois foram fixadas a cada amostra um fio de cobre, e esse conjunto foi colocado no interior de um segmento de tubo de PVC para realização do embutimento a frio em resina epóxi. Antes da realização das medidas eletroquímicas, os corpos de prova foram lixados com lixas de carbeto de silício (SiC) com granulação 100, 220, 340, 400 e 600, seguido de lavagem com água destilada, de lavagem com etanol para desengordurar e uso de jato de ar quente para secar a superfície. As medidas foram feitas na temperatura ambiente, os ensaios de OCP foram realizados pela imersão do eletrodo de trabalho na solução durante 1 hora. As curvas de polarização linear anódica foram obtidas em uma faixa de potencial de +300 mV em torno do potencial de circuito aberto e a velocidade de varredura utilizada foi de 1mV/s. A figura 1 mostra a montagem dos equipamentos (computador, potenciostato, célula eletroquímica) que normalmente são usadas para fazer os ensaios de corrosão mencionados anteriormente.

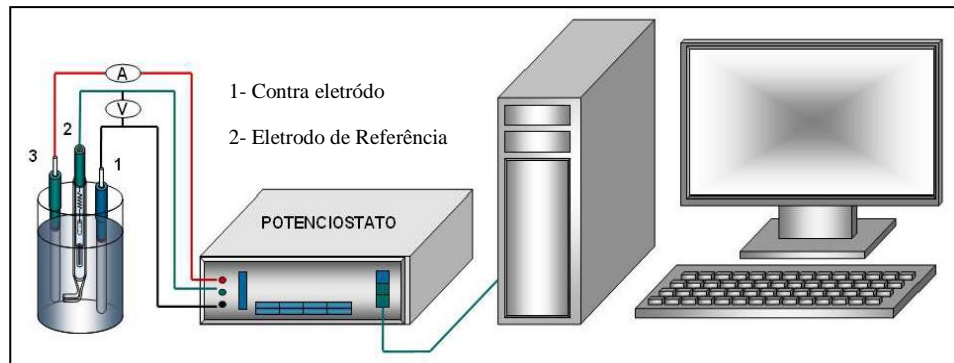


Figura 1. Montagem dos equipamentos a serem empregados nos ensaio eletroquímicos.
Fonte: MARTINEZ (2008).

Após os testes de corrosão, foram feitas micrografias óticas no microscópio Leica DMI 3000 M e o software de edição de imagens Leica Applications Suite V4.9 do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC), também para analisar os detalhes da morfologia dos produtos de corrosão foram realizadas as aquisições de imagens no MEV TESCAN® modelo VEGA XMU do Instituto de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação do Governo do Estado do Ceará (IPDI). No mesmo equipamento também foram realizadas medidas de Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS) utilizando o software Esprit 1.8 para geração dos espectros de difração e quantificação dos elementos químicos presentes nos produtos de corrosão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ensaio de Corrosão

Inicialmente foram feitas medidas de OCP e polarização linear anódica em solução 0,1M e 0,01M de H_2SO_4 , tendo como resultados curvas que não mostraram ser agressivas para os aços, por tanto foi utilizada uma concentração 0,001M de H_2SO_4 onde foram obtidas as curvas esperadas, similares as encontradas na literatura.

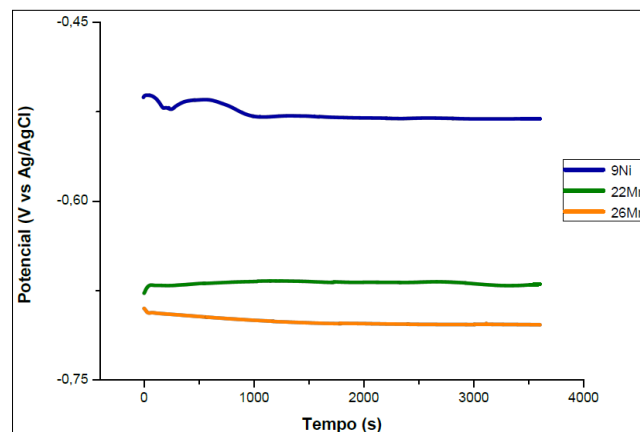


Figura 2. Curvas de OCP do aço 9% Níquel e os aços alto Manganês em solução 0,001M de H_2SO_4 .
Fonte: Autor.

Uma vez definida a concentração da solução em 0,001M de H_2SO_4 foram realizados os ensaios das ligas como indicado na seção de materiais e métodos, e foram feitas medidas do pH da solução antes e depois do ensaio no equipamento TECNAL Tec-5 disponível no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC). Na Figura 2 pode-se

observar os resultados do ensaio de OCP e na Figura 3 pode-se ver os resultados dos ensaios de polarização linear anódica.

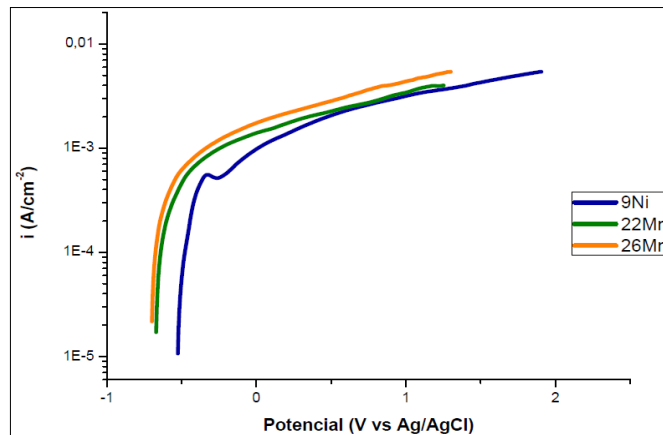


Figura 3. Curvas de OCP do aço 9% Níquel e os aços alto Manganês em solução 0,001M de H₂SO₄.
Fonte: Autor.

De acordo com as curvas de OCP (Figura 2) e de Polarização Linear Anódica (Figura 3), pode-se dizer que o aço 9% Níquel apresentou um comportamento levemente mais nobre do que os aços alto Manganês, isso foi contrastado com a medição do potencial de corrosão (E_{corr}) onde o aço 9% Níquel mostrou um valor menos negativo, o que evidencia uma melhor resistência à corrosão do que os outros aços, como se pode observar na Tabela 4. Também foi observado que nenhum dos aços apresentou comportamento passivante, isso é um indicativo da baixa resistência à corrosão neste meio, tal como foi mencionado por [HAMADA, 2006].

Tabela 4. Potenciais de Corrosão (E_{corr}) dos aços em solução 0,001M de H₂SO₄. Fonte: Autor.

Potencial de Corrosão E_{corr} (V)		
9% Níquel	22% Manganês	26% Manganês
-0,5175	-0,6559	-0,6948

3.2. Análises dos Produtos de Corrosão

A varredura durante os ensaios de polarização linear anódica foi encerrada quando a corrente atingiu 1mA, a fim de para garantir a integridade da amostra, com isso foi possível a caracterização da superfície após os ensaios através das técnicas de MEV e EDS para a obtenção de imagens e composição dos produtos de corrosão. Na Figura 4 se pode observar uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura com aumento de 100X da amostra do aço 9% Níquel após os ensaios de polarização linear anódica. Na imagem é possível observar a superfície da amostra com marcas do lixamento, grande presença de pites em diversos pontos, marcas onde parece ter uma forte dissolução do aço e formações irregulares em diversos pontos da superfície da amostra.

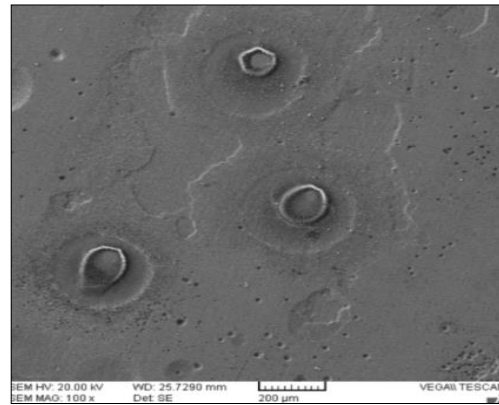


Figura 4. Micrografia eletrônica de varredura a 100X do aço 9% Níquel. Fonte: Autor.

Na Figura 5 tem-se o resultado da medição feita por EDS dos produtos de corrosão do aço 9% de Níquel, onde foi observada sua composição através dos picos dos elementos Fe, Ni, Si, Mn e S. A Tabela 5 mostra a quantificação das medidas feitas na análise EDS dos produtos de corrosão mencionados anteriormente. Pode-se afirmar então, que o aço tem facilidade de reagir com o eletrólito formando óxidos e sulfetos com os elementos de liga que seriam dissolvidos durante a polarização, tais como Fe, Ni, Mn e Si como pode ser observado nos resultados da análise EDS. Pelas imagens pode-se dizer que o aço não apresenta boa resistência à corrosão devido a que a camada de produtos de corrosão (óxidos e sulfetos) apresenta trincas e porosidade, isso não proporciona proteção frente ao ataque da solução. É importante mencionar que foi feita medição de EDS em pontos da superfície da amostra fora dos produtos de corrosão citados, e foi encontrada quase a mesma composição da liga com um teor de enxofre (S) de aproximadamente 0,2 %p, o que indica a formação de uma fina camada de sulfetos na superfície da amostra. Também é importante destacar que foi feita uma revisão dos diagramas de Pourbaix [TAKENO, 2005] levando em consideração os potenciais medidos e o pH da solução, com isso foi estudada a afinidade dos elementos Fe, Mn, Ni e Si em formar sulfetos e óxidos em soluções aquosas com pH aproximado de 3,5.

Tabela 5. Resultado do EDS quantificado por elementos dos produtos de corrosão da liga de aço 9% Níquel em solução 0,001M de H₂SO₄. Fonte: Autor.

Espectro de Aquisição:						
EI	AN	Series	Unn. [%p]	C Norm. [%p]	C Atom. [at.%p]	C Erro [%]
O	8	K - series	10,12	10,10	29,00	3,8
Si	14	K - series	0,76	0,84	1,62	0,1
S	16	K - series	3,08	3,42	5,79	0,2
Mn	25	K - series	1,1	1,23	1,21	0,2
Fe	26	K - series	76,2	74,69	53,3	2,2
Ni	28	K - series	8,83	9,82	9,08	0,4
Total			109,09	100,00	100,00	

Na Figura 6 pode-se observar uma imagem obtida por MEV da amostra do aço 22% Manganês com aumento de 100X após os ensaios de polarização linear anódica, na imagem pode-se observar marcas de lixamento, a formação de uma camada de produtos de corrosão com trincas que cobrem toda a superfície da amostra, e a

formação de nódulos de produtos de corrosão em certos locais isolados com diferentes tamanhos.

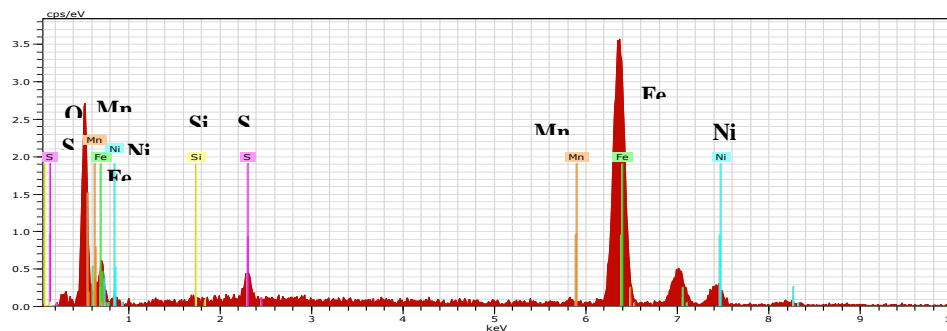


Figura 5.EDS feito a os produtos de corrosão do aço 9% Níquel em solução 0,001M de H₂SO₄.
Fonte: Autor.

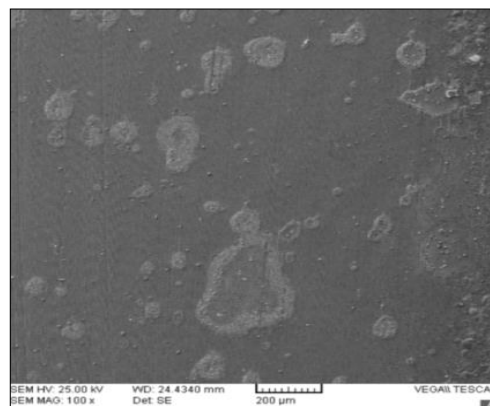


Figura 6.Micrografia eletrônica de varredura a 100X do aço 22% Manganês. Fonte: Autor.

Na Figura 7 é apresentado o resultado da medição feita por EDS dos produtos de corrosão do aço 22% Manganês, onde pode-se observar a composição destes produtos de corrosão através dos picos dos elementos Fe, Mn, Al, Si, O e S. A Tabela 6 mostra a quantificação das medidas feitas na análise EDS dos produtos de corrosão mencionados anteriormente. Analisando as imagens, os resultados da análise EDS e os diagramas de Pourbaix dos elementos do aço, pose-se afirmar que este aço apresenta baixa resistência à corrosão devido a afinidade dos elementos do aço em formar óxidos e sulfetos com os íons da solução 0,001M de H₂SO₄, estes óxidos e sulfetos formam uma camada na superfície da amostra que não oferece uma boa proteção, pois ela não é compacta e apresenta trincas que permitem a entrada dos íons no substrato metálico, continuando assim o processo de dissolução do aço, como foi descrito também por [KANNAN, 2008] e por [ZHANG, 1999].

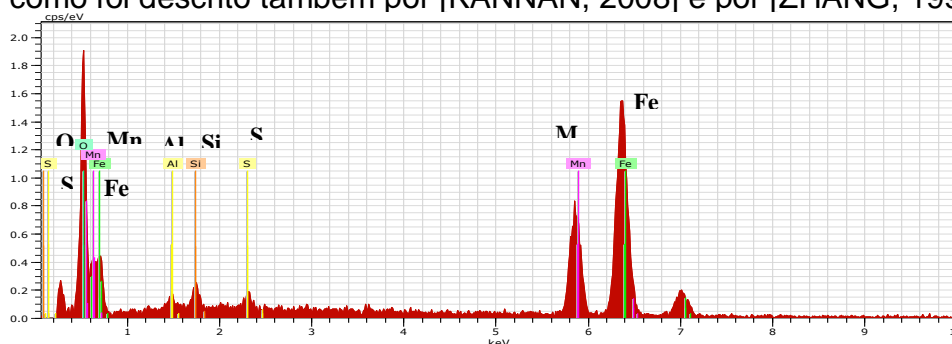


Figura 7.EDS feito a os produtos de corrosão do aço 22% Manganês em solução 0,001M de H₂SO₄.
Fonte: Autor.

Tabela 6.EDS quantificado por elementos dos produtos de corrosão do aço 22% Manganês em solução 0,001M de H₂SO₄.Fonte: Autor.

Espectro de Aquisição:						
El	AN	Series	Unn. [%p]	C Norm. [%p]	C Atom. [at.%p]	C Erro [%]
O	8	K - series	22,09	22,44	49,22	3,7
Al	13	K - series	1,03	1,05	1,37	0,1
Si	14	K - series	1,14	1,16	1,45	0,1
S	16	K - series	0,83	0,84	0,92	0,1
Mn	25	K - series	20,32	20,64	13,19	0,7
Fe	26	K - series	53,02	53,86	33,85	1,6
Total			98,43	100,00	100,00	

Na Figura 20 pode-se observar uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura a 100X da amostra do aço 26% Manganês após os ensaios de polarização linear anódica. Na imagem é possível observar a superfície da amostra onde se pode ver a formação de uma camada em toda a superfície e a formação de estruturas ou nódulos de formas irregulares em diversos pontos da superfície da amostra.

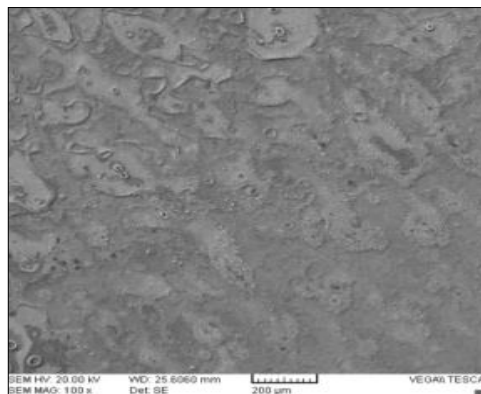


Figura 8. Micrografia eletrônica de varredura a 100X do aço 26% Manganês. Fonte: Autor.

Na figura 9 é apresentado o resultado da medição feita por EDS dos produtos de corrosão do aço 26% Manganês, onde pode-se observar a composição dos produtos de corrosão através dos picos dos elementos Fe, Mn, Al, Si, O e S. A Tabela 7 mostra a quantificação das medidas feitas na análise EDS dos produtos de corrosão mencionados anteriormente. Analisando as imagens, os resultados do EDS e os diagramas de Pourbaix dos elementos do aço pode-se afirmar que esse aço apresenta baixa resistência a corrosão devido a afinidade que os elementos de liga tem em formar principalmente óxidos e sulfetos com os íons da solução 0,001M de H₂SO₄, estes óxidos e sulfetos formam uma camada na superfície da amostra que não oferece uma boa proteção contra a corrosão devido ao fato de que esta não é compacta e apresenta trincas que permitem a entrada dos íons, acelerando o processo de dissolução da liga, semelhante ao que ocorreu com o aço 22% Manganês, como foi descrito por [KANNAN, 2008].

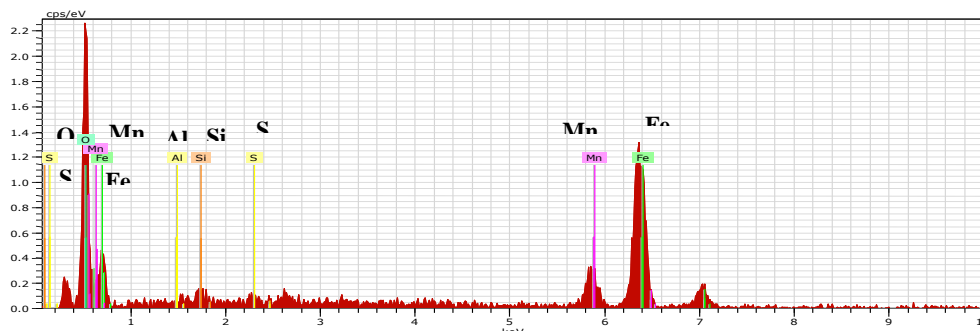


Figura 9. EDS feito a os produtos de corrosão do aço 26% Manganês em solução 0,001M de H₂SO₄.
Fonte: Autor

Tabela 7.EDS quantificado por elementos dos produtos de corrosão da liga de aço 26% Manganês em solução 0,001M de H₂SO₄.Fonte: Autor.

Espectro de Aquisição:						
EI	AN	Series	Unn. [%p]	C Norm. [%p]	C Atom. [at.%p]	C Erro [%]
O	8	K - series	32,30	31,70	60,96	6,1
Al	13	K - series	0,66	0,64	0,74	0,1
Si	14	K - series	1,00	0,98	1,07	0,1
S	16	K - series	1,00	0,99	0,95	0,1
Mn	25	K - series	10,60	10,40	5,83	0,6
Fe	26	K - series	56,32	55,28	30,46	1,9
Total			101,87	100,00	100,00	

4 CONCLUSÃO

A análise comparativa dos resultados dos ensaios de corrosão dos aços estudados em solução 0,001M de H₂SO₄ mostrou que ainda apresentando corrosão por pites e dissolução do material, o aço 9% Níquel possui uma melhor resistência à corrosão do que os aços 22% e 26% Manganês. As ligas de aço alto Manganês apresentaram um desempenho inferior, possivelmente pela presença de maior quantidade de elementos da liga que tem a afinidade de formar óxidos e sulfetos na superfície da amostra quando estão em soluções aquosas. A camada formada na superfície não oferece proteção, devido à presença de trincas e alta porosidade, que permite o passo dos íons da solução até a superfície do metal, acelerando o processo de dissolução da liga. Foi observado também que a liga com teor de 22% de Mn apresentou uma leve melhoria na resistência à corrosão do que a liga com 26% de Mn, isso pode ser associado a que a liga de aço 22% Mn tem um maior conteúdo de silício e alumínio, estes elementos formam óxidos mais estáveis do que os de Ferro e de Manganês.

Também é importante mencionar que se espera que a diferença na resistência a corrosão encontrada entre os aços alto manganês e o aço 9% níquel, pode ser diminuída pelas condições das temperaturas criogênicas onde são utilizados normalmente estes aços; assim, se espera que na medida em que a temperatura diminua a concentração de oxigênio disponível para reagir e corroer os aços venha a se reduzir. Por tanto, dadas as excelentes propriedades mecânicas mencionadas na literatura além do melhor custo benefício em relação ao aço 9% Níquel, os aços alto Manganês podem ser uma alternativa boa para substituir os materiais utilizados pela indústria de armazenamento e transporte de gás natural liquefeito.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) do Estado do Ceará, assim como do Laboratório de Pesquisa em Corrosão e do Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará.

REFERÊNCIAS

- 1 DE SÁ, J. Estudo de Resistência a Corrosão e Fragilização por Hidrogênio em Aço 9% Ni. (Monografia). Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- 2 CHOI, J. K. High Manganese Austenitic Steel for Cryogenic Applications. In: The Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, by the International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), Grecia, 2012.
- 3 HAMADA, A. S. Effect of Anodic Passivation on the Corrosion Behaviour of Fe-Mn-Al Steels in 3.5%NaCl. Passivation of Metals and Semiconductors, and Properties of Thin Oxide Layers, Paper No. 77 of the 9th International Symposium, France, 2006.
- 4 ZHANG, Y. S; ZHU, X. M; LIU, M; CHE, R. X. Effects of Anodic Passivation on the Constitution, Stability and Resistance to Corrosion of Passive Film Formed on Fe-24mn-4al-5cr Alloy. Surface Science 222 (2004) 89–101, China, 2004.
- 5 HYUNG, S; JIN, H; JUN, Y; JONG, G; JEONG, K; KYOO, Y. Electrochemical Corrosion Property of High Mn Steel in Sweet Environment. POSTECH, POSCO Technical Research Laboratories. Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference, Korea, 2014
- 6 MARTINEZ, D. Influencia de las Variables Hidrodinamicas Presion, Temperatura y Velocidad del Fluido en el Proceso de Corrosion del Acero al Carbono AISI 1020 en Presencia de CO₂-Agua-NaCl. (Monografia). Escuela de Ingenieria Quimica de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Colombia, 2008.
- 7 TAKENO, N. Atlas of Eh-pH Diagrams. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. Intercomparison of thermodynamic databases, Geological Survey of Japan Open File Report No.419, 2005.
- 8 KANNAN, M B; Raman, R. K. S; KHODDAM, S. Comparative Studies on the Corrosion Properties of a Fe–Mn–Al–Si Steel and an Interstitial-Free Steel. Corrosion Science 50 (2008) 2879–2884, Australia, 2008.
- 9 ZHANG, Y. S; ZHU, X. M; LIU, M; CHE, R. X. Electrochemical Polarization and Passive Film Analysis of Austenitic Fe-Mn-Al Steels in Aqueous Solutions. Corrosion Science 41 (1999) 1817-1833, China, 1999.