Copyright 2010, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Estudo Comparativo da Corrosão Eletroquímica Provocada por Águas de Produção de Petróleo no Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L.

Gabriela O. Pinon[1], Patrícia G. Corradini[2], Nickson Perini[3], Marcos B. J. G. de Freitas [4].

Abstract

The corrosion AISI 316L austenitic stainless steels caused by oil industry produced water was studied. These steels are commonly used oil production pipes and the corrosive effects caused by these waters are still poorly known. The electrochemical characterization of the studied systems was carried out through polarization resistance and electrochemical impedance spectroscopy techniques. Characterization and composition of two samples of water, in relation to concentrations of chlorides and sulfides, were determined by titration method. Other parameters such as pH and conductivity were obtained by direct reading. Through Tafel curves, it was observed that the system with higher amount of chloride presented higher corrosion rates and therefore less polarization resistance. In contrast, a high concentration of sulfide reduced the corrosion rates . Applying a potential 0.5 V for 500 s, determined by means of polarization curves, we observed a decrease in polarization resistance due to formation of localized corrosion or pitting that can be characterized by scanning electron microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy X-ray (EDS).

Resumo

Neste trabalho, estudou-se a corrosão em aços inoxidáveis austeníticos, da classe AISI 316L, provocada pela água de produção da indústria petrolífera. Esses aços são comumente utilizados em tubulações das refinarias de petróleo e os efeitos corrosivos provocados por essas águas ainda são pouco conhecidos. A caracterização eletroquímica dos sistemas foi realizada com medidas da resistência de polarização e de espectroscopia de impedância

[1] Graduanda, Bacharel em Química - UFES
[2] Graduanda, Bacharel em Química - UFES
[3] Mestrando, Química – UFES
[4] Doutor em Química, Professor Universitário – UFES

eletroquímica. A caracterização e composição de duas amostras de água, no que se refere às concentrações de cloretos e sulfetos, foram determinadas por meio de métodos titulométricos. Demais parâmetros como pH e condutividade foram obtidos por leitura direta. Observou-se, a partir das curvas de Tafel, que a amostra com maior quantidade de cloretos apresentou maior taxa de corrosão e, consequentemente, menor resistência de polarização. Em contrapartida, uma concentração elevada de sulfetos reduziu as taxas de corrosão. Aplicando-se um potencial 0,5 V por 500 s, determinado a por meio de curvas de polarização, observou-se a diminuição da resistência à polarização devido à formação de corrosão localizada que podem ser caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS).

Palavras-chave: corrosão, água de produção, aço austenítico.

Introdução

A palavra petróleo tem origem latina e significa *óleo de pedra*. O petróleo também pode ser definido o petróleo como sendo "um combustível líquido natural constituído quase só de hidrocarbonetos, e que se encontra preenchendo os poros de rochas sedimentares, formando depósitos muito extensos"[1].

Segundo a Petrobrás (data) o petróleo é "uma substância oleosa, inflamável, menos denso que a água, com cheiro característico e de odor característico e de cor variando entre o negro e o castanho escuro". As definições técnicas da Lei nº 9478, de 06 de agosto de 1997, no Artigo 6º, parágrafo I estabelece que o petróleo é "todo e qualquer hidrocarboneto líquido em seu estado natural, a exemplo do óleo cru e condensado".

A produção de água ocorre invariavelmente durante a exploração de poços petrolíferos. Portanto, um conhecimento das propriedades da conata, ou água de formação, como é chamada, é importante para o aperfeiçoamento dos processos nas indústrias petroquímicas. As propriedades das águas de petróleo não têm sido estudadas cuidadosa e sistematicamente, como os demais fluidos de petróleo.

O fenômeno da corrosão pode ser caracterizado como a destruição do metal através de uma ação química ou eletroquímica, que, uma vez iniciada, tende a continuar levando à deterioração do metal. Em alguns casos, a película formada pelas reações de oxidação age como uma camada protetora, retardando o processo corrosivo.

A produção de petróleo expõe os materiais ao contato com os meios aquosos corrosivos que eventualmente podem causar falhas dos componentes. Nestes ambientes, a forma e a taxa de corrosão encontradas são influenciadas, entre outros fatores, pelas pressões parciais de CO_2 e H_2S, pelas concentrações de íons bicarbonato e acetato presentes, pela temperatura, pelo pH e pelo teor de cloretos existente na água. Os íons cloreto, de um modo geral, estão relacionados com a ocorrência de corrosão localizada [9].

O objetivo desse trabalho é a caracterização eletroquímica da corrosão provocada pela água de produção de petróleo no aço inoxidável austenítico 316 L.

Revisão bibliográfica

O petróleo é formado a partir da decomposição da matéria orgânica proveniente de animais e plantas que viveram em mares rasos e quentes nas costas dos continentes, e pode ser encontrado em rochas areníticas ou calcáreas de bacias sedimentares existentes em várias partes do mundo [1].

Embora sua composição varie de campo para campo e até entre poços em um mesmo campo, o petróleo é formado essencialmente de hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e aromáticos, e pequenas quantidades de heterocompostos contendo átomos de enxofre, nitrogênio e oxigênio. Alguns compostos inorgânicos estão presentes no petróleo em teores variados sendo considerados como impurezas.

O petróleo apresenta impurezas que podem ser classificadas de oleofílicas e oleofóbicas. As impurezas oleofílicas são solúveis no petróleo, fazendo parte de sua constituição. São consideradas impurezas por se apresentarem em teores minoritários e, também, porque, do ponto de vista do refinador e do consumidor, conferem ao petróleo e derivados propriedades indesejáveis que são o motivo da existência de muitos processos dispendiosos de tratamento. Em certos casos, tais impurezas podem ser recuperadas no processamento, com fins comerciais, como ocorre com os ácidos naftênicos e o enxofre [2].

Toda água de formação contém sais dissolvidos, principalmente, cloreto de sódio. Por isso, esta água é, também, chamada de “salmoura”. No entanto, as águas de formação, ou seja, aquelas existentes nos poços de petróleo apresentam pouca relação com água do mar, tanto na concentração de sólidos como nos íons presentes. Geralmente, a água de petróleo apresenta concentração de sais, em torno de 300.000 ppm, muito maiores que as da água do mar que pode chegar a 35.000 ppm[3].

Os cátions mais comumente encontrados nas águas de formação são: Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}. Ocasionalmente, K^{+}, Ba^{2+}, Li^{+}, Fe^{3+} e Sr^{2+} podem estar presentes. Com relação aos ânions os mais comuns são: Cl^{-}, SO_4^{2-} e HCO_3^{-}. Além disso, CO_3^{2-}, NO_3^{-}, Br^{-}, I^{-}, BO_3^{3-} e S^{2-} são presentes frequentemente. Quantidades traços de outros 30 a 40 íons podem ocorrer nesse complexo sistema. O importante, a saber, é que a água contida em um determinado poço tem composição diferente de qualquer outra, mesmo que a proximidades entre os pontos seja grande [3].

As variações nas composições das águas de formação de diferentes poços podem ser devido a muitos fatores. Dentre as explicações que foram propostas está a do processo de dissolução de sais minerais provenientes de dolomitas, que são rochas carbonáticas de cálcio e magnésio; a precipitação de sulfato e carbonatos de cálcio e magnésio; entre outras. Ela está em contato direto com diversos grãos minerais e, alguns deles apresentam em sua formulação química elementos que podem ser encontrados na água de formação.

Alguns autores [4] sugeriram dois processos de geração de água de formação: a) prolongada lixiviação pela movimentação vagarosa de grandes massas de água das camadas sedimentares ou b) difusão do sal para intervalos superiores, a partir das camadas evaporíticas subjacentes.

Estudos [4] apresentaram dois processos para explicar os altos níveis de salinidades das várias águas de subsuperfície: a) dissolução de evaporitos e/ou soterramento de águas produzidas em ambientes subaquosos; b) mistura difusiva/dispersiva dessas águas salinas com outros fluidos. Entretanto, o autor acredita que esses processos podem ocorrer simultaneamente em várias intensidades.

O pH pode ser considerado uma das variáveis mais importantes e complexas de se interpretar, devido ao grande número de fatores que podem influenciá-lo. Em geral, nas águas naturais, o pH é alterado pela concentração dos íons H^{+} originados da dissolução ao ácido carbônico, que geram valores baixos de pH, e pelas reações de íons de carbonato e bicarbonato com a molécula de água, que elevam os valores de pH para a faixa alcalina [5]. O grau de acidez das águas de petróleo pode ser atribuído não só à presença de dióxido de carbono dissolvido na água, como também à presença e ao teor de H_2S existentes em solução [6].

Os poços petrolíferos são perfurados com base em estudos de estrutura geológica, de modo que a quantidade de água produzida a princípio seja pequena. Em virtude da produção, pode ocorrer o movimento do contato óleo/água inicialmente existente no reservatório. A água começa a alcançar os poços produtores. Deste modo, à medida que os poços vão se tornando velhos ocorre um aumento do percentual de água.

Durante a vida econômica de um campo de produção, o volume de água pode ser maior que dez vezes o volume de hidrocarboneto produzido. Apesar de o descarte de grandes volumes de água produzida já existir há muito tempo, apenas recentemente foram intensificados os estudos para avaliação dos riscos que poderiam estar sendo gerados para as comunidades aquáticas presentes no corpo receptor [5].

Passado algum tempo de produção a água produzida apresentará uma menor concentração destes sais metálicos, e a água injetada, em projetos *offshore* normalmente água do mar, chega ao poço produtor. Deste modo, a água produzida passa a ter características tanto da água de formação quanto da água do mar. Logo, esta água produzida conterá, além dos cátions metálicos, alguns ânions e até mesmo sais dissolvidos. Esta água produzida pode apresentar tendências corrosivas devido à produção de H_2S, além da formação de incrustação no caso em que ela venha a ser reinjetada. Somado a isto, pode possuir alto teor de sólidos devido a uma possível produção de sedimentos finos da formação. Por isso tornam-se necessários tratamentos para adequar o teor de sólidos de modo a não afetar o meio ambiente, em caso de descarte, ou não danificar os equipamentos da planta de reinjeção e da coluna, caso haja reinjeção desta água.

Como esta água é produzida juntamente ao óleo explorado do reservatório, ela apresentará óleo residual implicando em altos teores de óleo e graxas, e isto implicara na necessidade de um tratamento especial desta água sendo essencial a passagem dela por uma planta de tratamento de superfície [8].

O termo corrosão pode ser definido como a reação do metal com os elementos do meio, na qual o metal é convertido a um estado não metálico. Quando isso ocorre, o metal perde suas qualidades essenciais, tais como resistência mecânica, elasticidade, ductilidade e o produto de corrosão formado é extremamente pobre em termos destas propriedades.

De acordo com o meio corrosivo e o material, podem ser apresentados diferentes tipos de mecanismos para os processos corrosivos [6]:

a) *Mecanismo Eletroquímico:* onde ocorrem reações químicas que envolvem transferência de elétrons através de uma interface ou eletrólito.

b) *Mecanismo Químico:* onde ocorrem reações diretas entre o material metálico, ou material não metálico, com o meio corrosivo.

Durante um processo corrosivo, a interface eletrodo/solução adquire estrutura conhecida como dupla camada elétrica; na qual alguns fatores como: i) separação de cargas entre os elementos do metal e os íons da solução, ii) interação entre os íons da solução e moléculas da

água, iii) adsorção dos íons no eletrodo e iv) processos difusionais e migracionais de espécies iônicas; ocorrem de maneira particular e com importância fundamental no entendimento do processo.

A formação da dupla camada elétrica surge de uma diferença de potencial entre o metal e a solução, já que nesta interface há uma distribuição de cargas elétricas. Essa distribuição de cargas elétricas faz com que haja um campo elétrico na interface metal-solução. Após um curto intervalo de tempo, uma condição de equilíbrio é estabelecida e caracterizada pela formação da camada de Helmholtz. Esta contém dois planos: o plano externo de Helmholtz, saturado com íons metálicos, e o plano interno de Helmholtz, formado por íons não solvatados ou parcialmente solvatados que podem ser especificamente adsorvidos. Um metal que forma uma dupla camada elétrica é chamado de eletrodo.

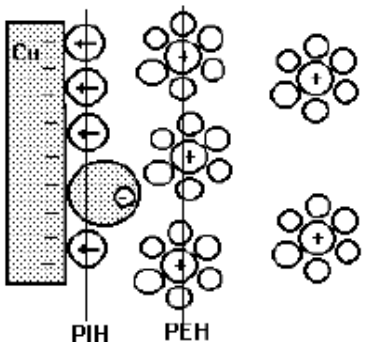

Figura 1- Modelo da Dupla Camada Elétrica.

Dentre os aços utilizados para o estudo em questão estão os aços inoxidáveis austeníticos apresentam uma composição enriquecida com elementos de liga que garante essa maior qualidade ao material e propriedades mais interessantes para a indústria Tabela 1.

Os aços inoxidáveis austeníticos têm excelente resistência à corrosão, excelente ductilidade e excelente soldabilidade. São utilizados em aplicações em temperatura ambiente, em altas temperaturas (até 1.150 ^{o}C) e em baixíssimas temperaturas (condições criogênicas), uma série de alternativas que dificilmente são conseguidas com outros materiais.

Tabela 1- Composição química do aço inoxidável austenítico 316 L [9] (%)

Aço	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
316 L	< 0,03	< 1,00	< 2,00	< 0,005	< 0,045	16,93	10,15	2,09

Materiais e Métodos

1. Caracterização da amostra de água de produção

Foram analisadas cinco amostras de água-livre e caracterizadas inicialmente com medidas de condutividade, pH, cloreto e teor de sulfetos (Tabela 2). O método de determinação de cloreto utilizado foi o método de Mohr [10] e determinação de sulfetos totais foi feita pelo método Iodométrico [10].

Tabela 2 - Caracterização Físico química da água de produção

Amostras	pH	Condutividade (mS x cm^{-1})	$[Cl^-]$ (ppm)	$[S^{2-}]$ (ppm)
A	6,33	136,7	157.736	2,6
B	6,24	136,9	148.973	9,6

2. Preparação da amostra de aço AISI 316L

Os eletrodos foram preparados utilizando aço AISI 316L. Sua superfície recebeu tratamento de forma a remover óxidos, impurezas e irregularidades com uso de lixas de quatro granulometrias diferentes: 100, 320, 400 e 600. Em seguida foram lavados com água destilada, desengordurados com acetona e secados ao ar.

3. Montagem do sistema eletroquímico

Os ensaios eletroquímicos são ferramentas importantes para avaliar o comportamento dos materiais frente à corrosão em diferentes meios. Os ensaios de polarização eletroquímicos realizados neste estudo consistiram em curvas de polarização, resistência à polarização linear e espectroscopia de impedância eletroquímica.

Para a realização dessas medidas foi utilizado o potenciostato/galvanostato acoplado com módulo de impedância AUTOLAB 302N, pertencente do Laboratório de Eletroquímica Aplicada/LabPetro do Departamento de Química da Universidade Federal do Espírito Santo (DQUI/UFES). A célula eletroquímica padrão com três eletrodos onde: o eletrodo de trabalho foi confeccionado com aço AISI 316 L, o eletrodo de referência utilizado foi de Ag/AgCl/Saturado e o eletrodo auxiliar de grafite (Figura 2).

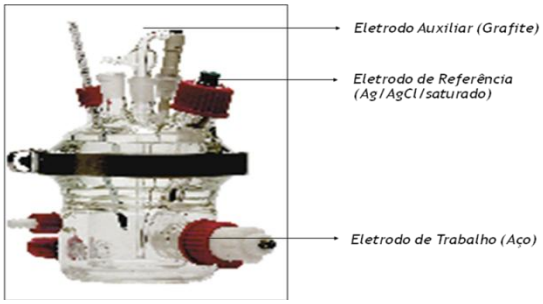

Figura 2 - Célula eletroquímica utilizada.

4. Caracterização Microscópica do aço AISI 316L

As amostras também foram submetidas a medidas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Energia Dispersiva de Raios X (EDS). Essas técnicas foram utilizadas para observar o aço em estudo em dois momentos: após o polimento e após a aplicação de um potencial de 0,5 $V_{Ag/AgCl}$ na amostra de água de produção, uma vez que era necessário caracterizar a corrosão provocada pela mesma. O equipamento utilizado foi o SHIMADZU SSX-550 – *Superscan scanning electron* do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo (DFIS-UFES).

Resultados

Serão abordados a seguir os resultados e a discussão dos dados eletroquímicos e microscópicas obtidas para o aço AISI 316L, amostra de água de produção.

- **Caracterização Eletroquímica**

1. Medidas de ruído eletroquímico

As medidas de ruído eletroquímico foram utilizadas para determinação do potencial de circuito aberto. Mediu-se o potencial e a corrente em função do tempo por 30 minutos. O potencial encontrado foi denominado E_0. Os valores dos potenciais encontrados podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3- Potenciais de circuito aberto para os sistemas analisados.

Amostras	E_0 ($V_{Ag/AgCl}$)
A	-0,04
B	-0,08

2. Polarizações lineares

Após a determinação do E_0, polarizou-se o sistema em ± 200 mV a partir de E_0, a uma taxa de 1,0 mV/s. Com isso, foi possível calcular, com as curvas de Tafel, os parâmetros eletroquímicos: densidade de corrente de corrosão, potencial de corrosão, resistência à polarização e taxa de corrosão (Tabela 4). A Figura 3 apresenta os resultados das curvas de Tafel.

Analisando os resultados da Figura 3, observa-se que não há um aumento expressivo da corrente de modo a caracterizar uma corrosão por pite. A amostra B apresentou uma maior taxa de corrosão se comparada com a amostra A, o que pode estar relacionada com o seu maior teor de sulfetos.

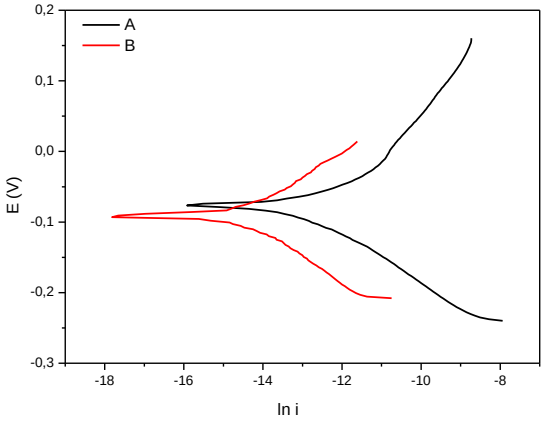

Figura 3 - Curvas de Tafel para as amostras de água de produção.

Nos dados da Tabela 4, observa-se que o aumento expressivo da resistência à polarização diminui o taxa de corrosão e a densidade de corrente de corrosão. A amostra B apresentou o maior valor de resistência à polarização entre as amostras analisadas, indicando serem as menos corrosivas.

Relacionando os parâmetros eletroquímicos (Tabela 4) com a caracterização das águas (Tabela 2) observamos que amostras com elevadas concentrações de cloreto apresentaram taxas de corrosão menores. Do mesmo modo, a concentração elevada de sulfetos, garantiu a redução das taxas de corrosão. Sendo assim, o efeito corrosivo do cloreto presente nas águas de produção está sendo minimizado pelo teor de sulfeto, pois esses últimos formam filmes protetores sobre a superfície do metal, passivando-o [11].

Tabela 4 - Parâmetros eletroquímicos obtidos pelas curvas de Tafel.

Amostras	I_{corr} (A/cm2)	R_p (Ohm)	E_{corr} ($V_{Ag/AgCl}$)	T_{corr} (mm/ano)
A	$0{,}545 \times 10^{-6}$	$7{,}271 \times 10^{3}$	-0,075	$0{,}568 \times 10^{-2}$
B	$0{,}083 \times 10^{-6}$	$32{,}95 \times 10^{3}$	-0,093	$0{,}087 \times 10^{-2}$

3. Cronoamperometria

Foram realizadas medidas amperométricas com finalidade de se obter as correntes estacionárias e a carga transportada pelo sistema nas condições estudadas. Foi escolhido o potencial e 0,5 $V_{Ag/AgCl}$ por limitações experimentais, visto que a potenciais maiores ocorre erros nas leituras da corrente.

Observou-se que a amostra B até então as amostras estavam identificadas como A e B apresentou uma maior corrente estacionária, seguido por A, consequentemente, transporta maior carga no mesmo intervalo de tempo e mesmo potencial. Sendo assim, nas condições avaliadas, a amostra B é a mais corrosiva. Os valores encontrados para as amostras estão na Tabela 6.

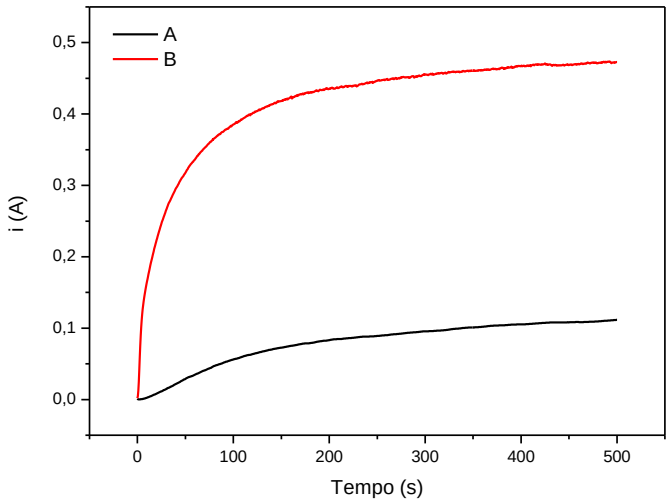

Figura 4 - Cronoamperometrias a 0,5 $V_{Ag/AgCl}$ durante 500 s. Medidas realizadas sem agitação e à temperatura ambiente.

Tabela 5 - Correntes estacionárias, em A, e carga, em C, encontradas para as amostras avaliadas.

Amostras	I (A x cm^2)	Q (C)
A	0,118	42,74
B	0,493	208,34

4. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Com a finalidade de obter informações a cerca do processo de corrosão, realizaram-me medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica. As medidas foram realizadas antes e depois das medidas amperométricas, de modo a caracterizar o filme formado quando se aplica um potencial de 0,5 V por 500 s.

Observou-se através das medidas de impedância que ocorreu um decréscimo da resistência à polarização (R_p), que é a soma da resistência à transferência de carga e a resistência da solução.

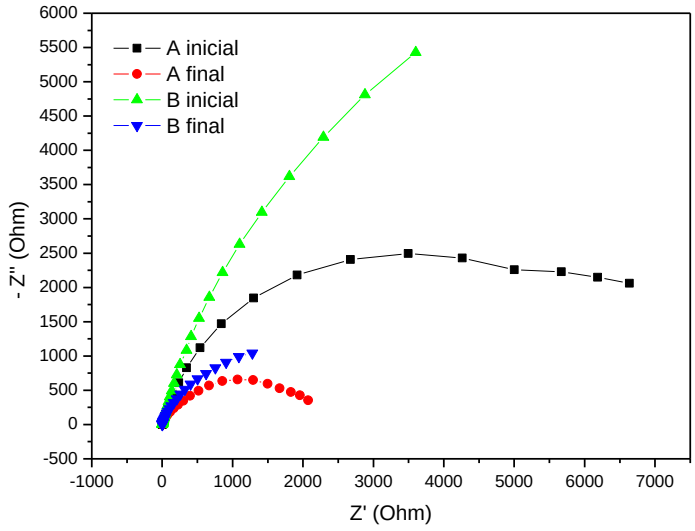

Figura 5 - a) Diagramas de Nyquist das medidas de impedância, b) após a cronoamperometria, na faixa de freqüência de 10^4 Hz até 10^{-3} Hz com um tempo de equilibro de 600 s em E_0.

Analisando, especificamente as medidas finais de impedância, observa-se uma diminuição da resistência à polarização. Sendo que amostra B apresentou uma diminuição bastante significativa da resistência.

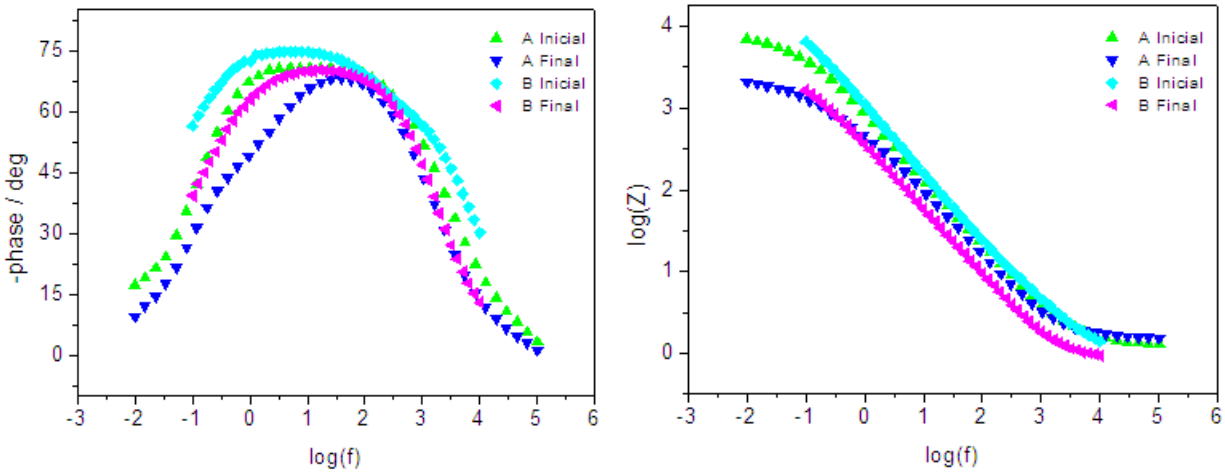

Figura 6 - a) Diagrama de Bode com ângulo de fase, b) Diagrama de Bode com impedância.

Os valores dos componentes simulados dos sistemas analisados estão mostrados nas Tabela 6 e 7. Os valores de resistência à polarização (Tabela 6) estão bem próximos aos encontrados pelas medidas de polarização linear. Indicando uma concordância entre as técnicas utilizadas. Na Tabela 7, observam-se os resultados obtidos após a formação do filme sobre o eletrodo.

Tabela 6 - Valores dos componentes do circuito antes da cronoamperometria.

Amostra A inicial			Amostra B inicial		
Elemento	Valor	Erro (%)	Elemento	Valor	Erro (%)
Rs (Ohm)	2,247	1,592	Rs (Ohm)	1.252	2,98
Rp (kOhm)	12,53	2,144	Rp (kOhm)	27.37	3,304
Q ($x10^{-3}$)	0,1521	1,541	Q ($x10^{-3}$)	0.1104	0,703
n	0,8038	0,338	n	0,8705	0,292
W	-	-	W ($x10^{-2}$)	0.4130	3,69

Tabela 7 - Valores dos componentes do circuito após a cronoamperometria.

Amostra A final			Amostra B final		
Elemento	**Valor**	**Erro (%)**	**Elemento**	**Valor**	**Erro (%)**
Rs (Ohm)	2,551	3,060	**Rs (Ohm)**	1,170	2,249
Rp (kOhm)	3,400	3,694	**Rp (kOhm)**	24,78	2,375
Q (x10^{-3})	0,2838	3,586	**Q (x10^{-3})**	0,1114	0,543
n	0,7567	0,823	**n**	0,8807	0,218
W	-	-	**W (x10^{-2})**	0,4355	2,671

Os resultados apresentados nos Diagramas de Nyquist foram normalizados pela área do eletrodo e simulados os circuitos correspondentes e cada componente representando um processo: físico, químico ou eletroquímico do sistema, de modo a se obter o menor erro de associação. A amostra A apresentou comportamento semelhante, com um semi-círculo quase fechado.

Nesses casos, temos os circuitos representados pela Figura 7, que apresenta a resistência da solução (Rs), a resistência de polarização (Rp) e o elemento de fase constante Q.

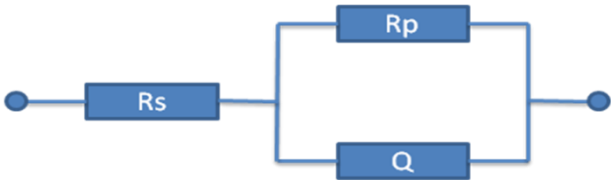

Figura 7 - Circuito equivalente para a amostra A.

A amostra B apresentou um comportamento diferente do atribuído à outras amostra em virtude da maior resistência à polarização e obteve-se um circuito com a presença de um componente difusional.

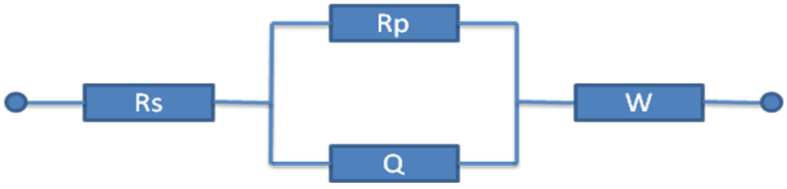

Figura 8 - Circuito equivalente para a amostra B.

- **Caracterização Metalográfica**

Esta técnica foi utilizada para principalmente para avaliar a influência do cloreto na superfície do metal, de forma a verificar a ocorrência de pite. A corrosão por pite é uma corrosão localizada na forma de pontos ou pequenas áreas delimitadas. Desta forma, um aumento do numero destes pontos na morfologia do substrato metálico está associado à corrosão por pite.

As figuras 9 e 10 mostram o metal após o polimento superficial com lixas de várias granulometrias. Observa-se que o aumento de 1000x e 1000x torna possível a visualização das frestas causadas pelo próprio polimento.

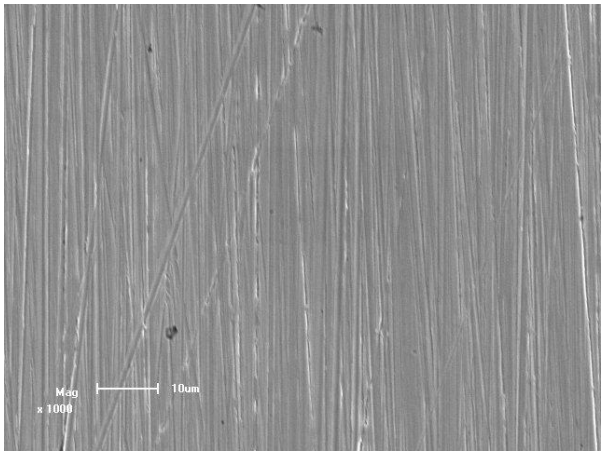

Figura 9 - Aço AISI 316L após polimento e ampliação de 1000x.

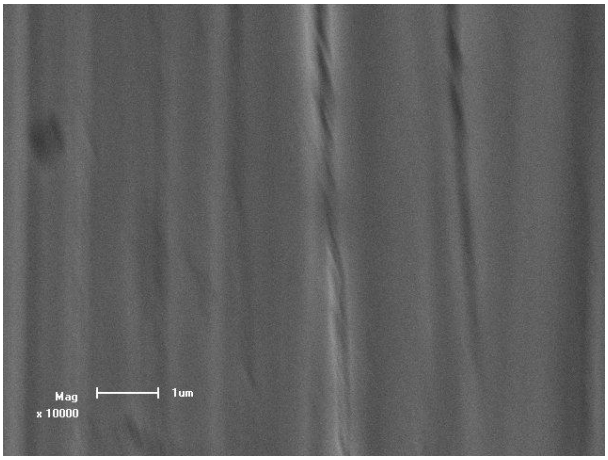

Figura 10 - Aço AISI 316L após polimento e ampliação de 10000x.

Após as medidas amperométricas, podemos observar o quanto à amostra de água de produção é corrosiva, principalmente devido a sua elevada concentração de cloretos, e isso pode ser observado de forma bastante clara nas figuras a seguir. Tanto o centro do eletrodo de trabalho quando as bordas sofrem processos corrosivos de forma intensa.

O interior de um pite, por exemplo, (Figura 11), mostra a grande porosidade com a qual o eletrodo se encontra, após ser submetido a um meio bastante agressivo com um potencial elevado.

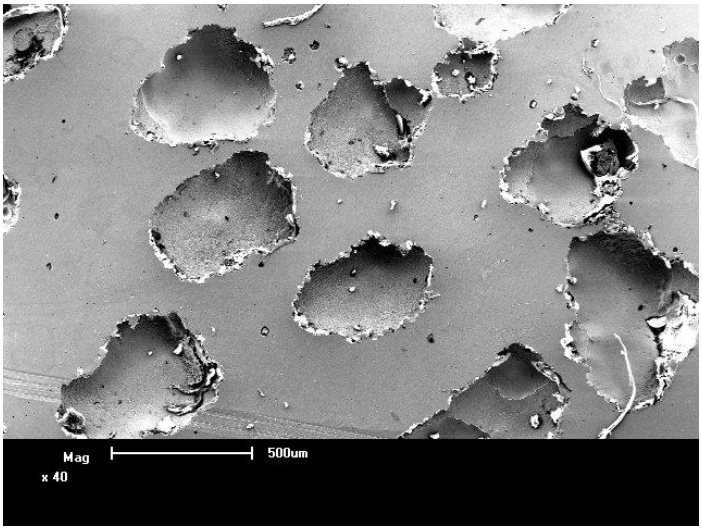

Figura 12 - Vista geral da superfície do eletrodo de aço AISI 316L com ampliação de 40x.

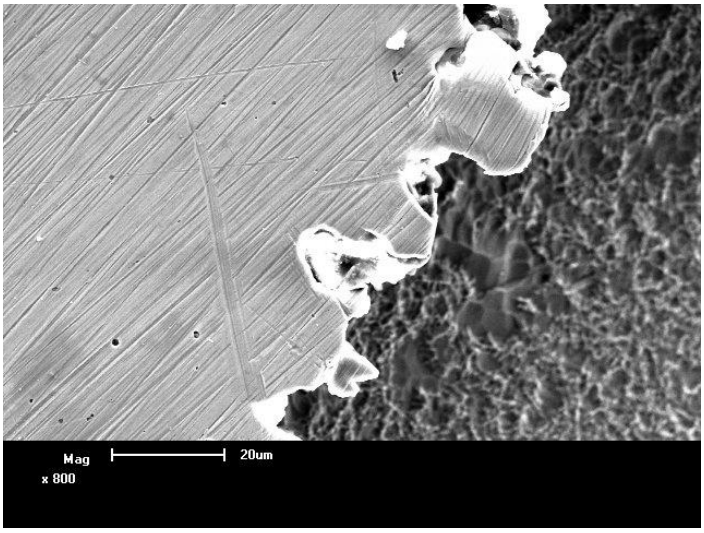

Figura 13 - Vista geral da borda do eletrodo de aço AISI 316L com ampliação de 800x.

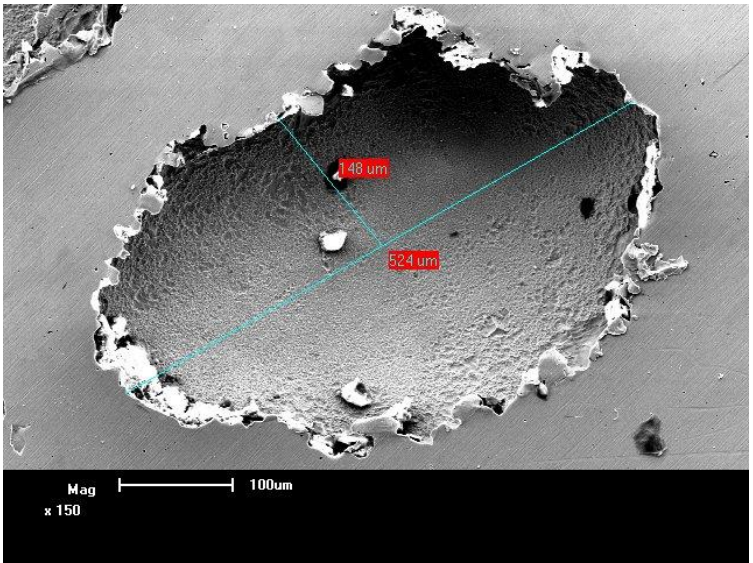

Figura 14- Vista geral de um pite com suas dimensões, ampliação de 150x.

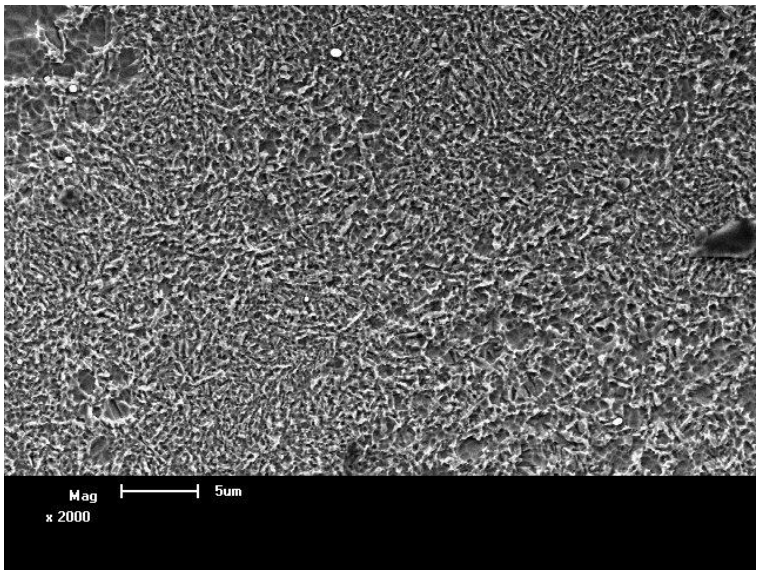

Figura 15 - Vista geral da superfície interior de um pite, ampliado 2000x.

A espectroscopia de energia dispersiva de raios x foi realizada para a caracterização principal dos produtos de corrosão formados no interior de um pite com ampliação de 2000x, e pode ser observado nas Figuras 16 e 17, e os resultados em percentagem, nas Tabelas 7 e 8.

Os metais encontrados nas análises são provenientes da própria constituição do metal, tais como: ferro, cromo, manganês e níquel, além de um teor baixo de molibdênio. Baixos teores de carbono também são observados, característica do aço em estudo.

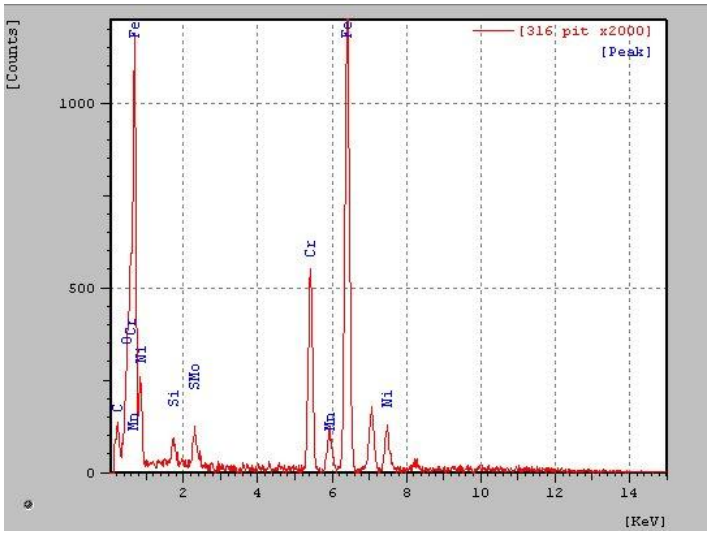

Figura 16 - EDS da superfície do eletrodo.

Tabela 7: EDS da superfície.

Elemento	Intensidade	%Massa
C	0,651	3,17
O	1,747	11,448
Si	0,45	0,665
S	0,681	1,114
Cr	3,011	14,142
Mn	0,423	2,739
Fe	6,682	54,807
Ni	0,652	9,525
Mo	0,688	2,39

Obteve-se também, o EDS proveniente da corrosão nas bordas, para um estudo comparativo (Figura 17). O interessante, é que não se observou a presença de cloreto em nenhuma das análises realizadas nas duas regiões do eletrodo.

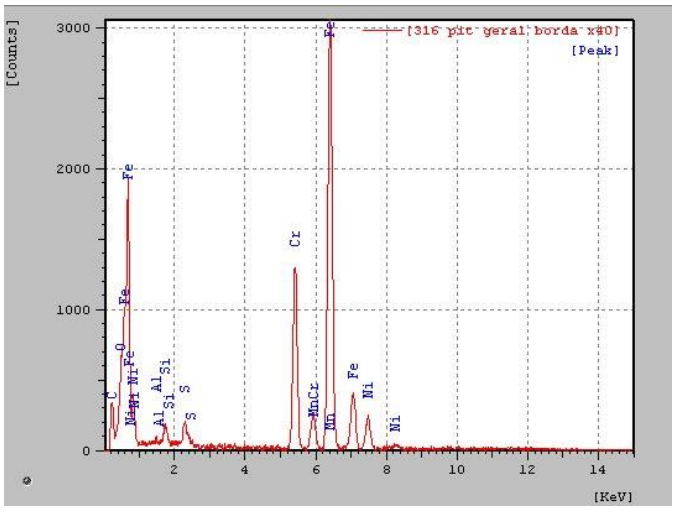

Figura 17 - EDS da borda do eletrodo.

Tabela 8: EDS da borda do Eletrodo

Elemento	Intensidade	%Massa
C	2,86	4,185
O	5,6	8,503
Al	0,625	0,308
Si	1,447	0,615
S	1,73	0,808
Cr	11,034	14,371
Mn	0,862	1,583
Fe	26,064	60,625
Ni	2,166	9,002

Conclusões

Considerando as curvas de Tafel, a amostra A mostrou-se a mais corrosiva, apresenta baixos teores de sulfetos e cloretos. Com as medidas cronoamperométricas, mostrou-se que amostra B é mais corrosiva, por apresentar maior corrente estacionária e passar maior carga no mesmo potencial e intervalo de tempo das demais amostras. Observou-se a diminuição da resistência à corrosão com as medidas de impedância, sendo que essa diminuição foi mais pronunciada na amostra A.

As medidas microscópicas possibilitaram uma melhor caracterização do processo de corrosão ocorrido no meio em estudo, demonstrando o quão agressiva é a amostra de água de produção, e pode ser atribuída, principalmente, a presença de cloreto.

Referências bibliográficas

1. ESTEVES, F. A., *Fundamentos de limnologia*, Interciência/Finep, Oecologia Brasiliensis, v. 1, pp. 575., 1988.
2. ALVEAL, C., *A Evolução da Indústria de Petróleo: a Grande Transformação.* Economia e Gestão em Energia, Curso de Especialização. COPPEAD-IE/UFRJ, 2003.
3. JOSÉ, H. J., *Combustão e combustíveis.* Departamento de Engenharia Química - EQA, UFSC , 2004.
4. MCCAIN, W. D. Jr., The *properties of petroleum fluids*. 2nd ed. - Tulsa (Oklahoma): PennWell Books, c1990. xli, 548 p., 1990.
5. HANOR, J. S. *Origin and migration of subsurface sedimentaly bries*. In: lecture notes for short course 21. SEPM, 247 p. 1987.
6. CARDOSO, S. P. Avaliação Teórica e Experimental de Potenciais Inibidores de Corrosão para Aços em Ácido Clorídrico. 2005. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
7. RODRIGUES, M. R., *Caracterização dos fluidos H2S e água em reservatórios carbonáticos*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1993.
8. FALLER, M. C. K., *Aspectos da Utilização de Substâncias Húmica no Tratamento de Água de Produção.* Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2006.
9. SANTOS, A. C., *Desenvolvimento de reatores eletroquímicos para o tratamento de água de produção.* Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Alagoras, Instituto de Química e Biotecnologia, 2006.
10. JÓIA, C. J. B. M., *Corrosão pelo CO2 em meios aquosos de aço carbono, aço baixa liga com 1% Cr, aço inoxidável 13% Cr e aço inoxidável 13% Cr-5% Ni-2% Mo* - 22º Congresso Brasileiro de Corrosão Salvador – Bahia, 2002.
11. CLESCERI, L.S.; GREENBERG, A.E.; EATON, A.D., Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, D.C., American Public Health Association, 20. p.v.. 1998.
12. Prado, A.; Merino, M.C.; Coy, A.E.; Viejo, F.; Arrabal, R.; Matykina, E. Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions. Corrosion Science 2008, 1796-1806.
13. WOLYNEC, Stephan. Técnicas eletroquímicas em corrosão. São Paulo: EDUSP, 166 p., 2003.