

Estudos Eletroquímicos da Corrosão do Aço Inoxidável AISI 403 em Palhetas de Turbina a Vapor

Denise S. Pacheco, Gabriela G. Sonai, Walter A. Frech, Joanna F. Godinho, César V. Franco, Luiz Augusto M. Torres e Artur Roberto F. Ellwanger.

Resumo – O acúmulo de impurezas, como cloreto e sódio, durante os sucessivos ciclos dos sistemas a vapor, gera sérios danos por corrosão no equipamento, levando às paradas inesperadas do sistema de geração elétrica. O presente trabalho mostra a avaliação eletroquímica do aço inoxidável AISI 403, utilizado na confecção das palhetas da turbina em soluções eletrolíticas de NaCl 25% e NaOH 40%. Durante o estudo, foi variada a rotação do eletrodo de trabalho. As análises foram realizadas por meio das técnicas de Polarização Eletroquímica, Espectroscopia de Impedância Eletroquímica e Tafel.

Palavras-chave – Turbinas a vapor, eletroquímica, palhetas, corrosão.

I. INTRODUÇÃO

Estima-se que bilhões de toneladas de vapor podem passar ao longo da vida útil de uma turbina. Mesmo os níveis rigorosamente baixos das impurezas no vapor podem, eventualmente, causar sérios danos na forma de corrosão por erosão devido às partículas sólidas ou por processos de corrosão sob tensão, no qual compostos químicos deletérios e tensões atuam conjuntamente de forma perigosa culminando com eventos derradeiros e catastróficos. Mais de 15% da perda da capacidade de geração de energia elétrica pode ser causada pela erosão e acúmulo de depósitos de corrosão nas palhetas de turbinas a vapor [1].

Processos corrosivos e erosivos conduzem ao aumento dos custos de manutenção, podendo inclusive levar à interrupção de produção, causando prejuízos por lucro cessante, além de reduzir a confiabilidade e disponibilidade da planta. As perdas por lucro cessante por parada de uma unidade geradora de energia elétrica podem ser até muitas vezes maior

do que os custos em reparos, além de causar sérios transtornos para a sociedade como um todo [2], [3].

Há muitos anos tem-se estabelecido que grande parte dos problemas de operação das turbinas a vapor, por exemplo, corrosão-erosão, pites, trincas, acúmulo de depósitos e perdas de eficiência, estão relacionados às impurezas no vapor. Quantidades relativamente pequenas de impurezas no vapor podem formar soluções aquosas contaminadas, potencialmente corrosivas aos materiais da turbina.

Os elementos químicos reativos (sais, ácidos, hidróxidos) causam várias formas de corrosão e, além disso, interagem com as impurezas sólidas e óxidos esfoliantes, causando erosão no material. Diante deste fato, é necessário um controle rigoroso da qualidade da água que é utilizada no sistema, de forma a minimizar as conseqüências negativas provocadas pelos agentes corrosivos. O controle do tratamento da água e condensado em um sistema a vapor evita a concentração de impurezas que se depositam na turbina, e que são responsáveis por uma série de danos ao sistema.

No ano de 2002, numa usina termoeletrica localizada no sul de Santa Catarina, ocorreu uma falha nas palhetas da turbina de baixa pressão, que colocou a unidade de geração de energia fora de operação por seis meses. A falha foi atribuída à ruptura de uma das palhetas e ao trincamento de mais 39 palhetas (Figuras 1 e 2).



Figura 1. Estágio onde ocorreu fratura e trincamento de palhetas, salientando os detalhes da palheta fraturada no círculo vermelho.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

D. S. Pacheco, G G Sonai, W. A. Frech, J. F. Godinho e C. V. Franco trabalham na Universidade Federal de Santa Catarina (e-mails: denispacheco@gmail.com; gabrielagsonai@gmail.com; w.frech@hotmail.com; joannafg@gmail.com; franco@qmc.ufsc.br).

L. A. M. Torres e A. R. F. Ellwanger trabalham na TRACTEBEL (e-mails: ltorres@tractebelenergia.com.br e artur@tractebelenergia.com.br).

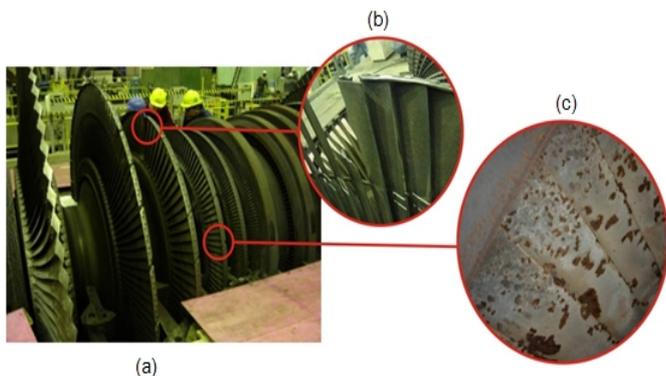


Figura 2. (a) Turbina de baixa pressão. (b) Palheta fraturada e com marcação em branco, palhetas trincadas. (c) Depósitos de sais devido a desvios e contaminação no tratamento da água do ciclo térmico.

A causa da falha teve origem em um defeito nas polidoras de resinas iônicas de condensado (Figura 3), responsáveis por manter a água em limites físico-químicos recomendáveis para a utilização neste sistema a vapor. As polidoras não estavam polindo 100% da água e por isso houve desvios na qualidade da água utilizada na caldeira, agravando o problema [2], [4].

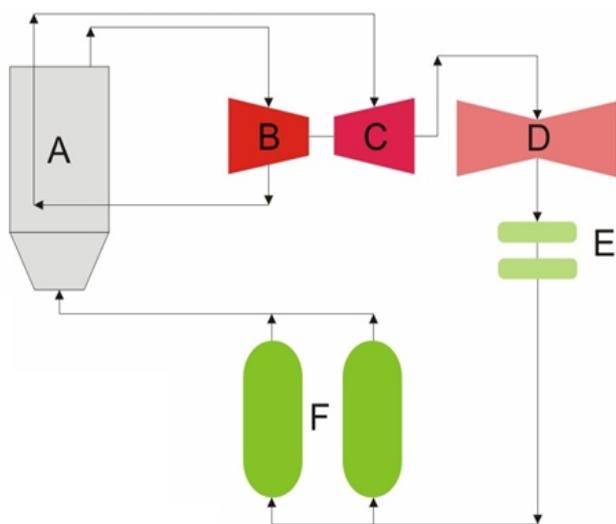


Figura 3. Esquema do ciclo de vapor de uma unidade de geração de energia elétrica. (A) Caldeira; (B) Turbina de Alta Pressão; (C) Turbina de Média Pressão; (D) Turbina de Baixa Pressão; (E) Condensadores; (F) Polidoras de Condensado.

O recomendável pelo EPRI é manter a condutividade em valores menores que $0,3 \mu\text{S}/\text{cm}$, porém o que se registrou no primeiro ano de operação do sistema foi uma condutividade muito maior, que indicava grande concentração de sais no sistema. O perfil físico-químico da água apresentado, agregado a concentração elevada de tensão no local por onde passa o aro que une as palhetas foi suficiente para gerar corrosão-fadiga nas palhetas da turbina a vapor após 43.000 horas de operação do sistema [4], [5].

Desde aquela ocorrência, a Tractebel Energia tem buscado desenvolver tecnologias por meio de pesquisa aplicada (projetos de P&D) junto com as Universidades no Brasil que forneçam metodologias preventivas para controle e predição da ocorrência de fenômenos de corrosão e fadiga nas palhetas da turbina a vapor e com isso poder planejar de modo

adequado a manutenção e evitando assim, as falhas catastróficas. Sendo assim, a abordagem da viabilidade econômica para o projeto de P&D 0403-015/2007 leva em consideração a probabilidade, num horizonte de 5 anos, de uma QM - quebra de máquina (quebra da palheta L-1). Como o resultado do projeto de P&D permitirá um melhor planejamento e controle preventivo, para que seja evitada a quebra das palhetas L-1 da turbina a vapor e uma parada da unidade por 6 a 12 meses para manutenção, cujos custos de manutenção seriam de: custos das peças de reposição = R\$ 5.500.000,00 (palhetas e acessórios) + custos dos serviços manutenção = R\$ 3.000.000,00 resultando que os custos de manutenção da turbina a vapor numa quebra de máquina (QM = peças + serviços) seriam de R\$8.500.000,00. Como o tempo de manutenção implicaria em uma indisponibilidade forçada da Usina de 6 a 12 meses (tempo necessário para manutenção da turbina a vapor) o impacto nas perdas financeiras (redução na receita futura) seriam de R\$ 122 a 241 milhões (perda de receita contratada por penalização devido a redução na garantia física -GF). Foram considerados neste cálculo preços de energia contratada de R\$ 105 a 111/ MWh. Esta penalização (redução na garantia física - GF) se deve a indisponibilidade de 330 MW médios pelo período da indisponibilidade forçada pela quebra das palhetas L-1 da turbina a vapor. Considerando um horizonte de apenas 5 anos para o fluxo de caixa (horizonte de 2007 a 2013), simulamos duas condições de quebra de máquina (QM): uma no início do período com o impacto da GF somado ao custo da QM a uma taxa de desconto de 12% a.a (T.M.A - taxa de mínima atratividade, sem inflação), e outra no final do período somente com os custos da QM a uma taxa de desconto de 20% a.a (T.M.A - taxa de mínima atratividade, sem inflação). Calculando o valor presente líquido e a TIR nas duas situações citadas acima e considerando que adotando as ações e metodologias preventivas resultantes dos investimentos nos projetos de P&D: R\$ 300.206 (2007 - projeto P&D novo) + R\$ 167.315 (2005/06 - projeto P&D já concluído) totalizando R\$ 510.086 (valor atualizado financeiramente a 12% a.a para 2008) não haveriam ocorrências de falhas nas palhetas da turbina teríamos o seguinte fluxo de caixa:

Condição 1: quebra de máquina (QM) no início do período com o impacto da GF somado ao custo da QM a uma taxa de desconto de 12% a.a (T.M.A - taxa de mínima atratividade, sem inflação)

Exposição = 330 MW médios
Tempo de Indisponibilidade = 180 dias

Investimento em P&D = (R\$ 510.086) (entra como despesa no fluxo de caixa como investimento em P&D para evitar a QM)

Ano da probabilidade de ocorrência da QM = 2009 (considerado na simulação)

Custos com QM = R\$ 8.500.000 (entra como receita no fluxo de caixa se não ocorrer a QM)

Perda da GF = 32,55 MW médios

Perda de Receita Futura (entra como receita no fluxo de caixa se não ocorrer a QM)

2009 = R\$ 30.051.648

2010 = R\$ 30.593.376

2011 = R\$ 30.964.032

2012 = R\$ 31.477.248

2013 = R\$ 31.676.832

Como resultado tem-se um VPL positivo de R\$ 118.318.111 e uma TIR de 7.537%, indicando que, se a adoção das ações e metodologia resultantes do projeto de P&D evitarem a QM, o investimento neste P&D altamente rentável.

Condição 2: quebra de máquina (QM) no final do período somente com os custos da QM a uma taxa de desconto de 20% a.a (T.M.A - taxa de mínima atratividade, sem inflação).

Exposição = 330 MW médios

Tempo de Indisponibilidade = 180 dias

Investimento em P&D = (R\$ 510.086) (entra como despesa no fluxo de caixa como investimento em P&D para evitar a QM)

Ano da probabilidade de ocorrência da QM = 2013 (considerado na simulação)

Custos com QM = R\$ 8.500.000 (entra como receita no fluxo de caixa se não ocorrer a QM)

Perda da GF = 32,55 MW médios

Perda de Receita Futura (não consideramos para o caso 2 no fluxo de caixa)

Mesmo assim, somente considerando os custo de manutenção pela QM, como resultado ainda tem-se um VPL positivo de R\$ 2.874.819 e uma TIR de 73%, indicando que, se a adoção das ações e metodologia resultantes do projeto de P&D evitarem a QM, o investimento neste P&D altamente rentável.

II. METODOLOGIA

A. Estudos Eletroquímicos

Na montagem da célula eletroquímica, foram confeccionados eletrodos de referência e contra eletrodos cilíndricos em *Hastelloy C* e eletrodos de trabalho, também cilíndricos, mas com diâmetro maior em aço inoxidável AISI 403, utili-

zando a técnica de eletroerosão por penetração (ENGEMAC modelo EDM 700), na empresa Embraco S.A. Um eixo confeccionado em aço SAE 1045, serviu como suporte para os eletrodos de trabalho e este foi então fixado no rotor (*Pine Instruments Company* – modelo ASR).

Os métodos eletroquímicos utilizados nesse estudo foram: polarização potencioestática, potenciodinâmica, curvas de Tafel e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica.

Foram preparadas soluções estoque com sais e bases: NaCl 25% (pH=7,29) e NaOH 40% (pH= 11,76), de grau de pureza analítico e em água Milli-Q. Os estudos eletroquímicos, simularam o meio corrosivo da turbina de baixa pressão em duas situações: com eletrodo rotativo e com eletrodo estático.

Os corpos de prova, confeccionados em AISI 403, foram fixados em um eixo rotatório, confeccionado em aço SAE 1045, que possibilitou realizar as análises no modo de eletrodo rotativo, simulando o movimento rotacional da turbina a vapor, como mostra a Figuras 4.

Os equipamentos utilizados nessa etapa foram: potencioestato/ galvanostato *Gamry PC4* – ZRA e rotator analítico *Pine Instruments Company* – modelo ASR. No tratamento dos dados foi utilizado o software *Gamry Framework 3.2*.

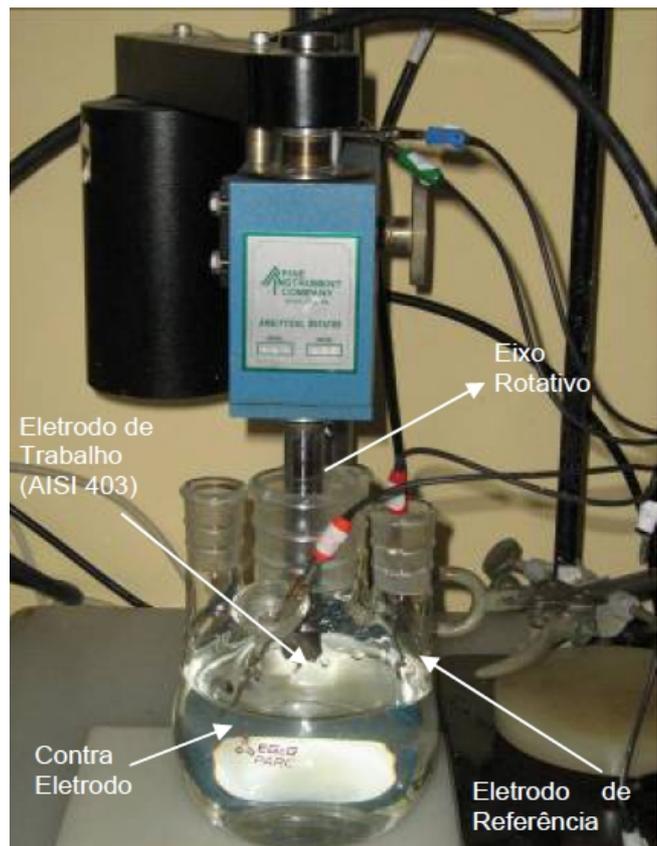


Figura 4. Foto ilustrativa da célula eletroquímica e do eletrodo rotativo (*Pine Instruments Company* – modelo ASR) utilizada nos testes.

Um eixo serviu como suporte para os eletrodos de trabalho e este foi então fixado no rotor (*Pine Instruments Company* – modelo ASR), como mostrado nas Figuras 5 (a e b) e 6.

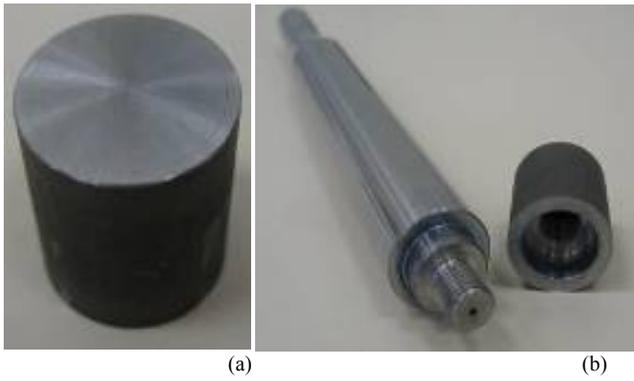


Figura 5. (a) Foto ilustrativa do corpo de prova de AISI 403 e (b) eixo-suporte confeccionado em aço SAE 1045.



Figura 6. Foto ilustrativa do conjunto eixo e corpo de prova.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Estudos Eletroquímicos de Tafel com eletrodo rotativo

A diferença dos valores de i_{corr} entre as soluções de NaCl 25% e NaOH 40%, é observada na Tabela I.

Tabela I – Estudos Eletroquímicos de Tafel em eletrodo.

Eletrodo Rotativo (1500 rpm) de AISI 403				
Solução	Tafel			Classificação *
	E_{corr} (V)	i_{corr} (A/cm ²)	TC (mm/ano)	
NaCl 25%	-0.1327	6.806×10^{-06}	0.079	Excelente
NaOH 40%	-0.2105	1.011×10^{-08}	0.012	Extraordinário

Esta diferença de valores de i_{corr} , deve-se a susceptibilidade à corrosão do aço inoxidável em meios contendo cloreto. Apesar da concentração de cloreto ser menor do que a concentração de hidróxido, o íon cloreto age no aço inoxidável rompendo a camada passiva do material e deixando o mesmo exposto ao meio corrosivo.

As Figuras 7 e 8 mostram os gráficos de Tafel para cada uma das análises: em NaCl 25% e NaOH 40%.

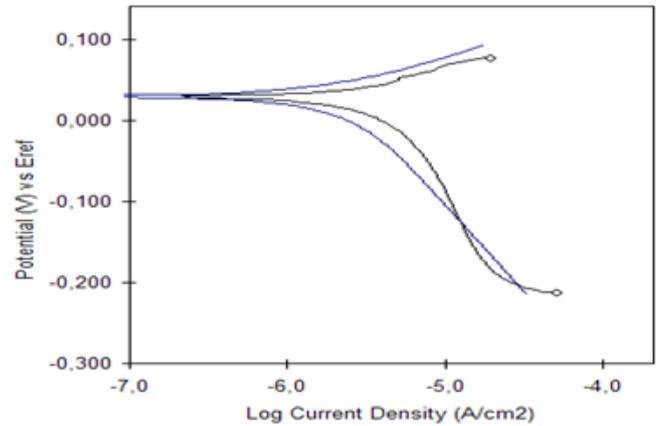


Figura 7. Tafel de uma solução de 25% de NaCl com eletrodo esmaltado em rotação de 1500 rpm.

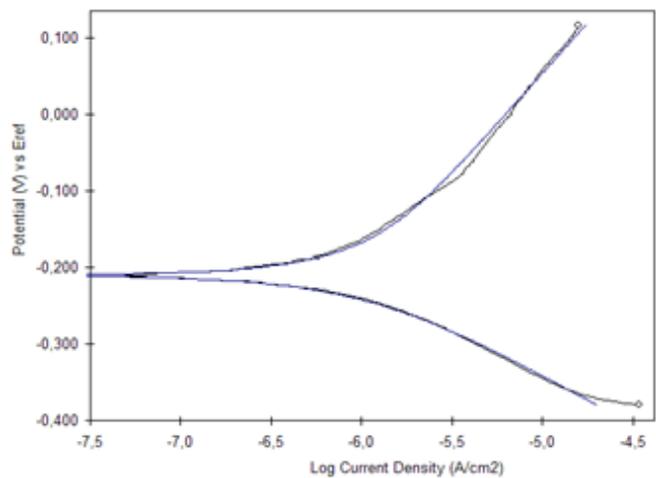


Figura 8. Tafel de uma solução a 40% de NaOH com eletrodo em rotação de 1500 rpm.

Segundo a classificação de Fontana [6], os dois casos analisados apresentam excelente resistência à corrosão em NaCl 25% e extraordinária resistência em NaOH 40%.

B. Estudos Eletroquímicos de Tafel com eletrodo rotativo

A Tabela II mostra os dados obtidos nas análises de Tafel em corpo de prova estático.

Tabela II – Estudos eletroquímicas de Tafel em eletrodo estático.

Eletrodo Estático de AISI 403				
Solução	Tafel			Classificação *
	E_{corr} (V)	i_{corr} (A/cm ²)	TC (mm/ano)	
NaCl 25%	0.030	2.379×10^{-06}	0.028	Excelente
NaOH 40%	-0.282	6.935×10^{-07}	0.008	Extraordinário

As Figuras 9 e 10 mostram os gráficos obtidos pelo estudo eletroquímico de Tafel. A classificação de Fontana [6] em ambos os casos é de boa resistência à corrosão.

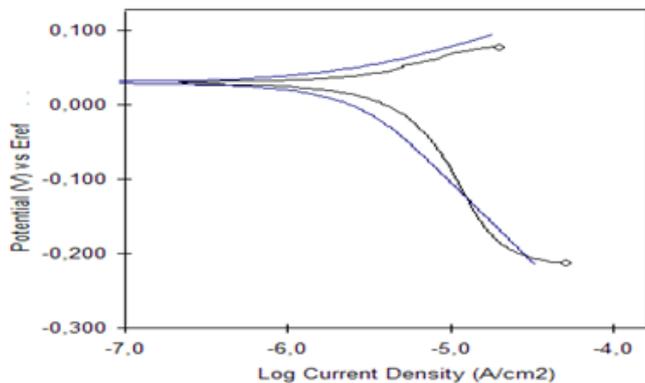


Figura 9. Gráfico de Tafel de uma solução de 25% de NaCl com eletrodo sem rotação.

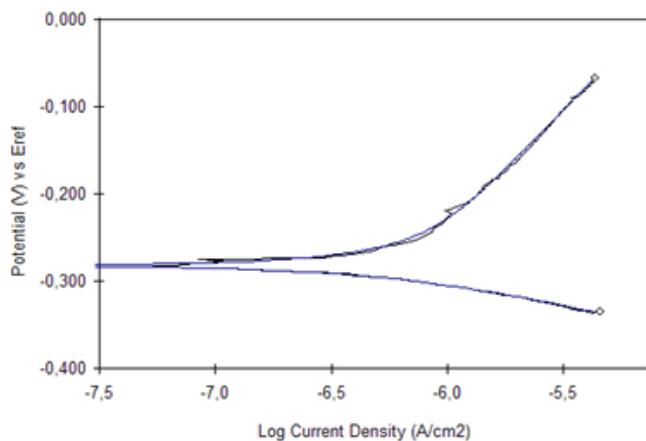


Figura 10. Gráfico de Tafel de uma solução de 40% de NaOH com eletrodo sem rotação.

Quando comparados os dados das análises utilizando eletrodo rotativo em rotação e estático, é possível perceber que no primeiro caso a taxa de corrosão é sutilmente maior para o meio NaCl 25%, quando o corpo de prova está em rotação.

Outro componente importante é a transferência de massa. Devido às reações eletroquímicas que ocorrem na superfície do metal durante um processo corrosivo, um gradiente de concentração se forma desde o meio eletrolítico até a parede metálica. Este gradiente é bastante comprometido quando o meio é posto em movimento, pois deste modo há a facilitação do transporte de espécies químicas em direção à superfície. Assim os processos corrosivos são fortemente favorecidos [7], [8].

C. Polarização Potenciodinâmica

Nos estudos realizados em NaOH 40%, o gráfico (Figura 11 A) apresenta um perfil muito similar ao teórico. Como pode ser visto na Figura, o perfil potenciodinâmico da amostra de AISI 403 em solução de NaOH 40% representa o

comportamento de um material muito resistente à polarização anódica, pois o aço inoxidável geralmente apresenta-se passivado.

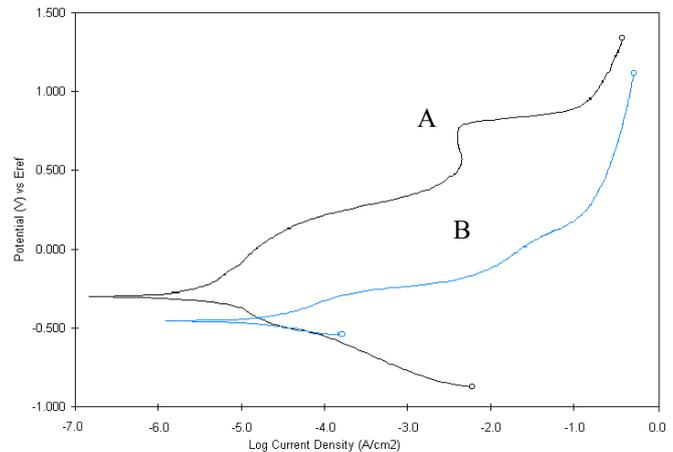


Figura 11. Gráficos sobrepostos do ensaio potenciodinâmico em NaOH 40% (A) e NaCl 25% (B).

Já em meio de NaCl 25% (Figura 11 B), há uma sutil tendência a passivação, representado por um pequeno ombro em torno de -100 mV e -0,015 A/cm². Através dos gráficos, é claramente observada a diferença dos valores de E_{corr} , sendo a resistência à corrosão do aço inoxidável reduzida devido à presença do cloreto. Com o aumento do potencial ocorre perda do material dissolvendo até atingir a faixa de equilíbrio com a corrente estável mesmo em alto potencial.

No ensaio realizado em solução de NaOH 40%, não é observada perda de material, tampouco produtos de corrosão. Ao final do teste, o material se manteve nas mesmas condições iniciais.

Com o aumento do potencial ocorre perda do material - como mostram as fotos retiradas por microscópio eletrônico (Figuras 12 e 13) para o ensaio em NaCl 25% - dissolvendo até atingir a faixa de equilíbrio com a corrente estável mesmo em alto potencial.

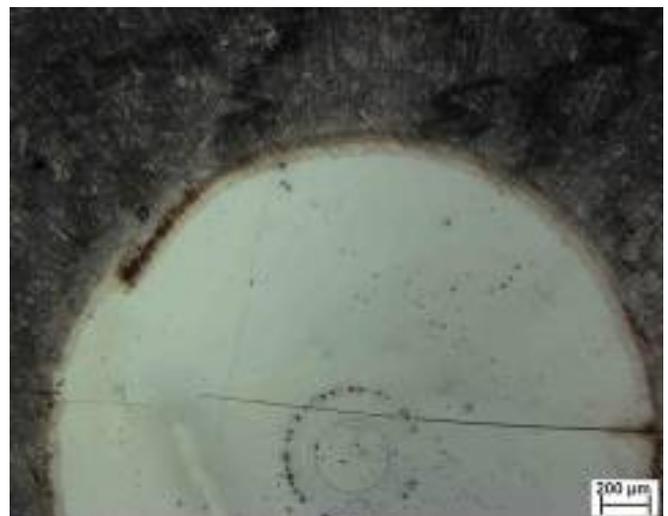


Figura 12. Corpo de prova (AISI 403) após teste potenciodinâmico em solução de NaCl 25%, aumento de 50 x (b) aumento de 1000x.



Figura 13. Corpo de prova (AISI 403) após teste potenciodinâmico em solução de NaCl 25%, aumento de 1000x.

No ensaio realizado em solução de NaOH 40%, não é observada perda de material, tampouco produtos de corrosão (Figuras 14 e 15). Ao final do teste, o material se manteve nas mesmas condições iniciais.

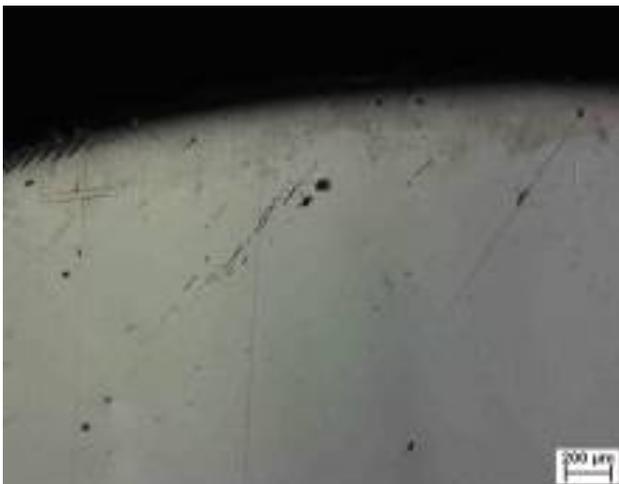


Figura 14. Corpo de prova (AISI 403) após teste potenciodinâmico em solução de NaOH 40%, aumento de 50 x.



Figura 15. Corpo de prova (AISI 403) após teste potenciodinâmico em solução de NaOH 40%, aumento de 100x.

O valor do potencial de circuito aberto é de -389 mV em solução de NaCl 25%, enquanto que em solução de NaOH 40% é de $-31,38$ mV. A diferença entre os valores indica que o material, quando em contato com a solução de NaOH 40% apresenta um comportamento passivante, enquanto que, o mesmo material em contato com a solução de NaCl 25%, mostra que o potencial atinge um valor muito negativo, indicando menor resistência do material à corrosão nestas condições.

Conseqüentemente, os valores de i_{corr} apresentam diferença de pouco mais de uma ordem de grandeza em NaOH 40%, indo de $7,735 \times 10^{-5}$ em NaCl 25% para $2,452 \times 10^{-6}$.

D. Análises por Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Solução eletrolítica de NaCl 25%

Comparando ambos os casos na Figura 16, rotativo e estático, este último apresenta valores um pouco menores do que o eletrodo rotativo e ambos apresentam apenas um semi-arco aberto, indicando um sistema capacitivo. As curvas ascendentes indicam um processo de corrosão acelerado, corroborando com os dados da polarização potenciodinâmica (Figura 11), que mostra o comportamento do aço inoxidável na solução contendo cloretos.

Porém, em eletrodo estático, observa-se a tendência a formar um semicírculo, indicando o processo de passivação do material [9]. Esses dados confirmam também a maior susceptibilidade à corrosão em eletrodos rotativos formando menisco, devido ao transporte de massa que é melhorado e a polarização por concentração é diminuída no eletrodo de trabalho ativo pelo aumento da mistura.

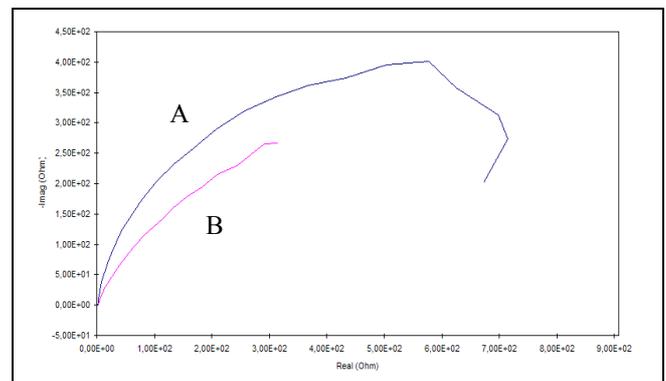


Figura 16. Gráfico Nyquist de impedância de uma solução de NaCl 25% com eletrodo de trabalho estático, em A e o eletrodo rotativo a 1500 rpm em B.

Outro indicativo de que o sistema é capacitivo tanto em eletrodos rotativos quanto em estáticos na solução de NaCl 25%, é o fato de que os valores máximos de ângulo de fase (θ) no diagrama de Bode (Figura 17), encontram-se em torno de 80° (estático), sendo 90° o valor para capacitores ideais.

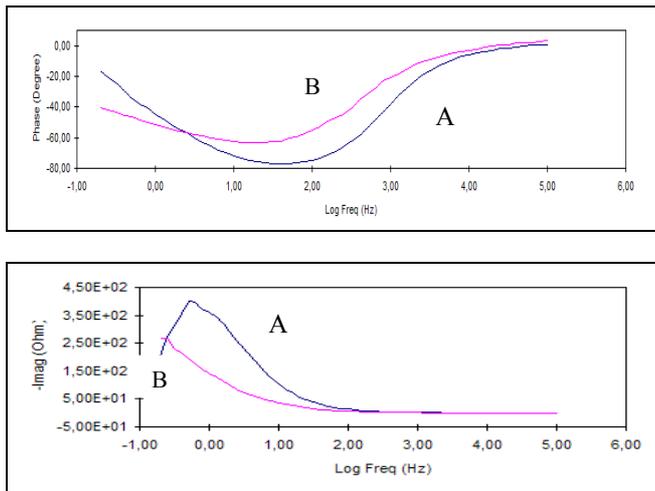


Figura 17. Gráfico Bode – ângulo de fase e módulo de Z imaginário de uma solução de NaCl 25% com eletrodo de trabalho estático, em A e o eletrodo rotativo (1500 rpm), em B).

Solução eletrolítica de NaOH 40%

Assim como no caso descrito acima, o comportamento do material em contato com a solução de NaOH 40%, apresenta a formação de um semi-arco capacitivo, como mostram as duas curvas apresentadas na Figura 7.

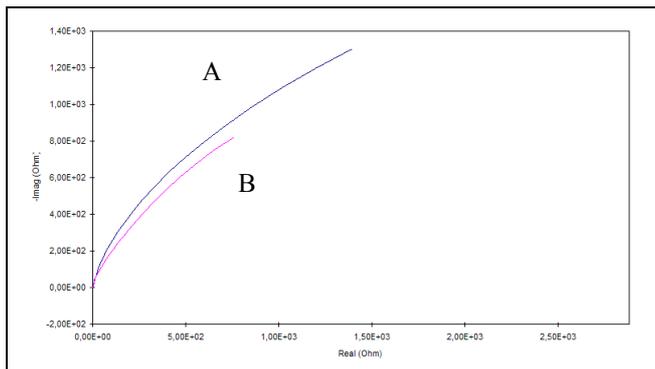


Figura 18. Gráfico Nyquist de impedância de uma solução de 40% de NaOH com eletrodo de trabalho estático, em A e o eletrodo rotativo (1500 rpm), em B.

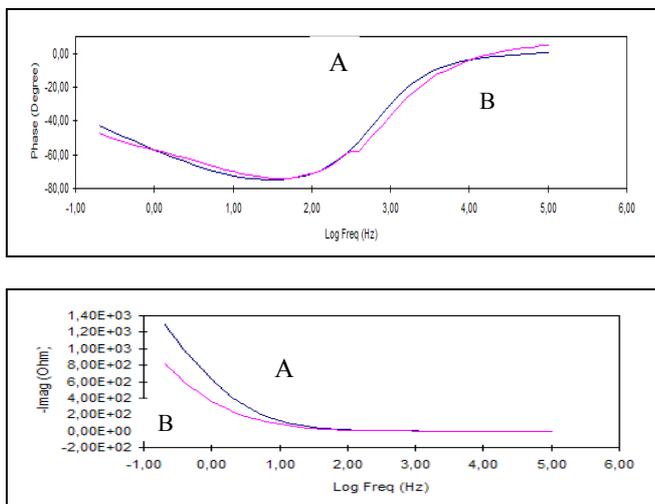


Figura 19. Gráfico Bode - ângulo de fase e módulo de Z imaginário de uma solução de NaOH 40% com eletrodo de trabalho estático, em A e o eletrodo em rotativo (1500 rpm), em B.

Pode-se observar também que a proximidade dos dados obtidos nos testes com eletrodos rotativos e estático é maior em solução de NaOH 40%.

Comparando os dados resultantes das análises em NaOH 40% e NaCl 25% (Figura 18) de todos os ensaios realizados até então, é possível observar que a resistência do aço inoxidável AISI 403 à corrosão é alta e confirmada pela classificação de Fontana através dos valores obtidos. Os resultados apresentados em ambas as soluções eletrolíticas não mostraram variações tão expressivas em tempos curtos, já que estamos tratando de um material com boa resistência à corrosão, porém têm-se apresentado casos reais, de que ao longo do tempo o material sofre processo corrosivo acentuado, há formação de pites, fragilização e alta suscetibilidade à fratura.

Os diagramas de Bode (Figura 19) comprovam que o sistema é capacitivo, sendo que os valores máximos do ângulo de fase se aproximam de 80°, assim como nos testes conduzidos em solução de NaCl 25%.

IV. CONCLUSÕES

Os estudos laboratoriais de Polarização Eletroquímica, Tafel e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, visando simular as condições da turbina de baixa pressão em soluções eletrolíticas de NaCl 25% e NaOH 40%, mostraram que tanto em corpos de prova estáticos quanto rotativos apresentaram taxa de corrosão mais acentuada em meio de NaCl 25%.

O estudo por Polarização Potenciodinâmica, em solução de NaOH 40%, apresentou região de passivação maior em relação ao NaCl 25%, ou seja, o NaCl 25% é mais agressivo ao material do que o NaOH 40%.

No estudo por Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, os eletrodos rotativos, em solução de NaCl 25%, apresentaram menor resistência em relação aos não rotativos. Enquanto que em solução de NaOH 40% mostraram que as resistências são bastante próximas entre rotativos e não rotativos. Comparando-se ambos os casos, os corpos de prova em NaOH 40% apresentaram maior resistência em relação ao NaCl 25%.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. J. Lindinger, R. M. Curran, "Effect of Steam Impurities on the Reliability of Large Modern Steam Turbines". General Electric Large Steam Turbine Seminar. 1984.
- [2] O. Jonas, J. M. Mancini, "Plant life extension – Design steam cycles to avoid corrosion," *Power Magazine*, 2004.
- [3] S. Fófano, "Avaliação de Técnicas Eletroquímicas na Monitoração de Corrosão por Sulfetos em Sistema de Água de Resfriamento Industrial". Dissertação de mestrado - UFPR, Curitiba, 1999.
- [4] O. Jonas and L. M. Machemer, "Turbine Inspection and Deposit Analysis," Jorge Lacerda C – LP, Capivari de Baixo, SC, Relatório Técnico, 2006.
- [5] D. S. Pacheco, "Estudos Eletroquímicos do aço AISI 403 em Meios Salinos Simulando a Corrosão em Palhetas de Turbinas a Vapor," Dissertação de Mestrado, PGMAT, UFSC, Florianópolis, 2008.
- [6] M. G. Fontana, *Corrosion Engineering*, 3rd ed., Ed. New York: McGraw – Hill, 1986, pp. 172.

- [7] M. R. Moreira, "Avaliação da Resistência à Corrosão dos Aços Inoxidáveis 13Cr e 13Cr-5Ni-2Mo em Meios Úmidos de CO₂ e H₂S Presentes em Colunas de Produção de Petróleo," Tese de Doutorado, CPGQMC, UFSC, Florianópolis, 2004.
- [8] D. R. Kane, S. Srinivasan, "Experimental Simulation of Multiphase CO₂/H₂S Systems," *Corrosion 99 – 14, Nace International*, 1999.
- [9] P. R. Silva, "Estudo Laboratorial da Estabilidade de Filmes de Sulfeto de Ferro Visando ao Monitoramento da Corrosão em Unidades de Craqueamento Catalítico Fluido," Tese de Doutorado, PIPE, UFPR, Curitiba, 2007.