



UFES – UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CT – CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**LEANDRO BITTI SANTA ANNA**

**ESTUDO DA EROSÃO-CORROSÃO NOS AÇOS  
ABNT 8550 E INOXIDÁVEL 301**

VITÓRIA  
2008

**LEANDRO BITTI SANTA ANNA**

**ESTUDO DA EROSÃO-CORROSÃO NOS AÇOS  
ABNT 8550 E INOXIDÁVEL 301**

Dissertação apresentada com parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Mecânica pela  
Universidade Federal do Espírito Santo,  
área de concentração: Materiais e  
Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo.

VITÓRIA  
2008

**LEANDRO BITTI SANTA ANNA**

**ESTUDO DA EROSÃO-CORROSÃO NOS AÇOS  
ABNT 8550 E INOXIDÁVEL 301**

Dissertação apresentada com parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela da Universidade Federal do Espírito Santo, área de concentração: materiais e processos de fabricação.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcelo C. S. de Macêdo – Orientador

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

---

Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco – Co-Orientador

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Flávio José da Silva – Examinador interno

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

---

Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin – Examinador externo

POLI-USP – Universidade São Paulo

VITÓRIA

2008

- I -

Dedico este trabalho aos meus Pais,  
Antonio Chrisanto Santa Anna e  
Marcelina Isaura Bitti Santa Anna,  
à minha irmã Marcele e a minha noiva  
Louise, que estiveram sempre  
presentes, incentivando-me  
na realização deste sonho.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a DEUS, Supremo Criador, por toda saúde e paz.

Aos meus pais Antônio Chrisanto Santa Anna e Marcelina Isaura Bitti Santa Anna, pela minha formação acadêmica. Por todo o apoio e incentivo, minha eterna gratidão. A tia Penha, minha avó Noêmia e meu primo Pedro pela acolhida. A Louise por todo apoio emocional e logístico.

Ao fomento a pesquisa através de bolsa de mestrado oferecida pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) durante a minha vida acadêmica.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo pela infatigável e impecável orientação, pela sua amizade e serenidade ao passar seus conhecimentos e experiências, visto que, foram de grande valia para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu Co-Orientador Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco e toda sua equipe, em especial aos Engenheiros Juliano, Henry, Raphael, e Camila, aos Técnicos Flávio e Jhonatan e aos alunos de Iniciação Científica Eduardo, Pedro e Hermes, que me receberam muito bem em Uberlândia, oferecendo sem hesitar e com grande satisfação toda estrutura disponível.

Ao Professores Chérlio Scandian, Fernando Menandro e Flávio José da Silva, e todos os outros professores pela compreensão e incentivo durante todo o curso.

Aos meus amigos de CEFETES, Renato Siqueira, Gibson Muniz, João Luiz Mendes, Hendrix , entre outros por todo apoio e amizade.

A todos os colegas, hoje amigos, do Programa de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, dentre eles, Dímisson Louzada, Jeanderson Sessa, Johannes Coradini, João Paulo Barbosa, Samuel Velten e tantos outros que mesmo não percebendo, contribuíram positivamente na conclusão deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho busca complementar o estudo de Silva (2008) contribuindo, assim, com estudos futuros sobre o assunto. Durante o trabalho buscou-se observar a mudança de comportamento do desgaste corrosivo-erosivo, em diferentes diâmetros das amostras e de velocidade do jato, nos aços ABNT 8550 e inoxidável 301. Além disso, outro objetivo buscado foi à verificação e análise da interação galvânica ao longo do diâmetro da amostra, na região de escoamento, no aço ABNT 8550 sob jato corrosivo-erosivo. Foram realizados ensaios de erosão pura, erosão-corrosão, corrosão pura e ensaios com objetivo de identificar a presença de interação galvânica com diferentes parâmetros, tais como, velocidade, materiais utilizados, diâmetros das amostras e ângulo, no caso dos ensaios de erosão pura. Para isso, foi utilizado um equipamento tipo jato da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Os resultados obtidos são compatíveis com a literatura e, assim como Silva (2008), também não foi verificado o efeito sinérgico. A mudança da taxa de corrosão com a variação do diâmetro foi verificada, sendo as amostras com menor diâmetro as que apresentaram uma maior resistência à corrosão em relação às amostras com diâmetros maiores. Finalmente, a interação galvânica foi observada, demonstrando ser significativa.

## **ABSTRACT**

This work aims to complement the study of Silva (2008) thus contributing to future studies on the subject. It was attempted to observe the change of behavior of corrosive-erosive wear, for different specimen diameters and jet velocities, for ABNT 8550 and stainless 301 steels. In addition, another objective was verification and analysis of galvanic interaction over the specimen diameter at yield conditions for ABNT 8550 under corrosion-erosion jet. Tests of pure erosion, erosion-corrosion, and corrosion were conducted in order to identify the presence of galvanic interaction with various parameters such as speed, materials used, specimen diameters and angle of the for the tests of pure erosion. For this, the equipment used was a jet of the Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia. The results are consistent with the literature and, just as Silva (2008), was also not verified the synergistic effect. The change in the rate of corrosion with the variation was found and the samples with smaller diameter showed a greater corrosion resistance than samples with larger diameters. Finally, the galvanic interaction was observed, proving it to be significant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama esquemático de uma montagem típica de célula de polarização (Silva, 2008).

Figura 2.2 – Características hidrodinâmicas do jato por impingimento mostrando as características das quatro regiões de escoamento (Efird, 2000).

Figura 2.3 - Influência do ângulo de impacto da partícula na erosão a) metais dúcteis b) materiais frágeis (Hutchings, 1992).

Figura 3.1. - Desenho esquemático do dispositivo de Jato impingimento, (Silva, 2008).

Figura 3.2 – Equipamento tipo jato, utilizado durante os testes, mostrando os principais componentes (Silva, 2008).

Figura 3.3 – Representação esquemática do bico de projeção (tubo venturi) (Silva, 2008).

Figura 3.4 – Porta-amostras com o conjunto amostra – eletrodos.

Figura 3.5 - Amostra utilizada nos ensaios de interação galvânica.

Figura 4.1 – Foto da microestrutura do aço inox 301, com 200 vezes de aproximação e atacado com Vilella (1g ácido pícrico, 5mL HCl, 100 mL etanol) por 10 segundos.

Figura 4.2 – Foto da microestrutura do aço ABNT 8550, com 500 vezes de aproximação e atacado com Nital 4%. (a) aço ABNT 8550 recozido e (b) aço ABNT 8550 beneficiado.

Figura 4.3 – Curva mostrando a leitura do potencial de circuito do centro da borda de uma amostra de aço 8550 beneficiada. Ensaio feito em água da torneira, sob ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.4 – Curvas mostrando a reprodutibilidade das medidas dos potenciais de circuito aberto entre centro e borda no tempo, em amostras recozidas do aço ABNT 8550, sob jato corrosivo a velocidade de 6,0 m/s e 90° de ângulo de incidência. Começando a medida pela borda.

Figura 4.5 – Curvas comparando a medida do potencial de circuito aberto no tempo, em uma amostra recozida e outra beneficiada do aço ABNT 8550 sob jato corrosivo a velocidade de 6,0 m/s e 90° de incidência exibindo a variação do potencial entre o centro e borda da amostra. Começando a medida pela borda.

Figura 4.6 – Curvas comparando a medida do potencial de circuito aberto no tempo entre o centro e a borda, em amostras recozidas do aço ABNT 8550, sob jato corrosivo nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s e 90° de incidência. Mostra a influência da velocidade no potencial de circuito aberto. Começando a medida pela borda.

Figura 4.7 – Curvas comparando a medida do potencial de circuito aberto no tempo, em uma amostra recozida do aço ABNT 8550 sob jato de água do mar e areia e sob jato com apenas água do mar a velocidade de 6,0 m/s e 90° de incidência, exibindo a variação do potencial entre o centro e borda da amostra. Começando a medida pela borda.

Figura 4.8 – Curvas comparando a medida do potencial de circuito aberto no tempo, em uma amostra recozida do aço ABNT 8550, sob jato de água do mar e areia nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s e ângulo de incidência de 90°. Exibindo a variação do potencial entre o centro e borda da amostra devido à variação da velocidade. Começando a medida pela borda.

Figura 4.9 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço ABNT 8550 recozido, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, ângulo de incidência de 90°, mostrando a influência das mesmas nas taxas de corrosão.

- VII -

Figura 4.10 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço inox 301, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s e ângulo de incidência de 90°, mostrando a influência das mesmas nas taxas de corrosão.

Figura 4.11 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço ABNT 8550 recozido e beneficiado, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo a velocidade de 6,0 m/s e ângulo de incidência de 90°, mostrando o comportamento corrosivo das diferentes microestruturas.

Figura 4.12 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço 8550 recozido sob jato corrosivo a velocidade de 6,0 m/s e ângulo de incidência de 90°, mostrando a influência do diâmetro da área de ensaio na taxa de corrosão.

Figura 4.13 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço ABNT 8550 e inoxidável 301 sob jato corrosivo a velocidade de 10,0 m/s e ângulo de incidência de 90°, comparando o comportamento dos dois materiais.

Figura 4.14 – Comparação da variação da taxa média de desgaste com o aumento da velocidade nos aços ABNT 8550 e inoxidável 301, sob jato erosivo com concentração em peso de 6% e ângulo de incidência de 90°, aço 8550 com face com 12,0 mm de diâmetro.

Figura 4.15 - Comparação da taxa média de desgaste nos aços ABNT 8550 e inox 301, sob jato erosivo, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, na velocidade de 10,0 m/s, concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo incidência de 90°.

Figura 4.16 - Variação da perda de massa acumulada com aumento da velocidade do jato, nos aços ABNT 8550 e inoxidável 301 sob jato erosivo com concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo incidência de 90°.

- VIII -

Figura 4.17 - Taxa média de desgaste em função da velocidade de impacto, concentração média de 6,0% (em peso) em amostras do aço ABNT 8550 beneficiado e recozido para ângulos de incidência de 30° e 90°.

Figura 4.18 - Taxa média de desgaste no aço ABNT 8550, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, sob jato erosivo na velocidade de 6,0 m/s, concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.19 - Taxa de desgaste normalizada pela dureza em função da velocidade para concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 30°.

Figura 4.20 - Taxa de desgaste normalizada pela dureza em função da velocidade para concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.21 – Figura mostrando a taxa média de desgaste no aço ABNT 8550, sob jato corrosivo-erosivo, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, na velocidade de 6,0 m/s, concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.22 – Figura comparando a taxa média de desgaste no Aço ABNT 8550, de amostras submetidas aos ensaios de erosão pura e erosão-corrosão. Amostras com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, submetidas ao jato na velocidade de 6,0 m/s, concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.23 - Variação da taxa média de desgaste, com o aumento da velocidade do jato corrosivo-erosivo, no aço ABNT 8550, recozido, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, concentração média de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.24 - Comparação da taxa média de desgaste nos aços ABNT 8550 e inoxidável 301, sob jato corrosivo-erosivo, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, na velocidade de 10,0 m/s, concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo incidência de 90°.

Figura 4.25 – Topografia do aço inoxidável 301 após o ensaio de erosão-corrosão, concentração média de 6,0% em peso, com ângulo de incidência de 90°. Amostra com face de ensaio com 12,0 mm de diâmetro. Velocidade de impingimento de 6,0 m/s.

Figura 4.26 – Topografia do aço inoxidável 301 após o ensaio de erosão-corrosão, concentração média de 6,0% em peso, com ângulo de incidência de 90°. Amostra com face de ensaio com 12,0 mm de diâmetro. Velocidade de impingimento de 10,0 m/s.

Figura 4.27 – Potencial de circuito aberto em amostras do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, com velocidade de 6,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°. Mostra a reprodutibilidade das medidas do potencial.

Figura 4.28 – Potencial de circuito aberto em amostras recozidas e beneficiadas do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, com velocidade de 6,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.29 – Potencial de circuito aberto em amostras do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, com velocidade de 6,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°. Mostra a reprodutibilidade das medidas.

Figura 4.30 – Comparação dos potenciais de circuito aberto em amostras do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.31 – Potencial de circuito aberto em amostras do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, com velocidade de 6,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.32 – Comparação dos potenciais de circuito aberto em amostras do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.33 – Comparação das curvas de polarização de ensaios de corrosão pura e erosão-corrosão para o aço ABNT 8550, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, com velocidade de 6,0 m/s e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.34 – Comparação das curvas de polarização de ensaios de corrosão pura e erosão-corrosão para o aço inoxidável 301, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato com velocidade de 10,0 m/s e ângulo de incidência de 90°.

Figura 4.35 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço 8550 recozido, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90° mostrando a influência das mesmas nas taxas de corrosão.

Figura 4.36 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço inoxidável 301, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, mostrando a influência das mesmas nas taxas de corrosão.

Figura 4.37 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras beneficiadas e recozidas do aço ABNT 8550, com faces de ensaios de 12,0 e 27,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo na velocidade de 6,0 m/s, mostrando o comportamento estaticamente igual destas diferentes microestruturas.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de potenciais de eletrodos medidos em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio a 25 °C (77 °F), concentração de íons 1,0 molar, e a 1,0 atm (ASM-vol13).

Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios realizados.

Tabela 4.2 – Composição química do aço ABNT 8550 (34 CrAlNi 7) empregado na confecção das amostras (% em peso), obtida por espectroscopia de emissão ótica (Silva, 2008).

Tabela 4.3 – Composição química (% em peso) medida do aço inoxidável 301.

## LISTA DE SÍMBOLOS

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

$d$  - Distância entre contra-corpo e amostra de teste (mm)

HV10 - Dureza Vickers com carga de 10 kgf

HV30 - Dureza Vickers com carga de 30 kgf

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

$n$  - Constante

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

pH - Potencial de Hidrogênio

$R$  - Constante dos gases perfeitos (1,987 cal/K mol)

$T$  - Temperatura (em Kelvin)

$n$  - Quantidade de elétrons transferidos na reação (em mol)

$F$  - Constante de Faraday ( $F = 23,060$  cal/volt equivalente)

(ox) - Atividades de oxidação das espécies

(red) - Atividades de redução das espécies

(V) - Volts

$i_{corr}$  - Corrente de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

$E_{corr}$  - potencial de corrosão (V)

$TC$  - taxa de corrosão (mm/ano)

$EW$  - Peso equivalente da liga (g)

$\rho$  - Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

- XIII -

- $\theta$  - Ângulo de incidência
- $E$  - Taxa de erosão (g/mm<sup>2</sup>.min);
- $c$  - Concentração de partículas erosivas (g/mm<sup>3</sup>);
- $V$  - Velocidade de impacto (m/s);
- $E_M$  - Taxa de erosão (g/g)
- $H$  - Dureza do material do material erodido (Pa);
- $\rho$  - Densidade do material erodido (kg/m<sup>3</sup>)
- $K_T$  - Taxa de desgaste total em erosão-corrosão
- $K_E^0$  - Taxa de erosão pura
- $K_C^0$  - Taxa de corrosão pura
- $S$  - Sinergia
- $K_{E^c}$  - Taxa de erosão devido ao efeito da corrosão
- $K_{C^E}$  - Taxa de corrosão devido ao efeito da erosão
- $K_E$  - Total contribuição da erosão
- $K_C$  - Total contribuição da corrosão

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1. Corrosão.....	4
2.1.1 Classificação da corrosão.....	5
2.1.2 Mecanismos da corrosão.....	5
2.1.3 Taxa de corrosão.....	8
2.1.4 Interação galvânica.....	10
2.2. Erosão.....	12
2.2.1 Erosão por partículas sólidas em meio gasoso e em meio líquido.....	13
2.2.2. Taxa de erosão .....	16
2.2.3 Erosão-Corrosão.....	17
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	20
3.1. Materiais.....	21
3.2. Descrição do Equipamento.....	22
3.3. Ensaios de corrosão pura.....	23
3.4. Ensaios de erosão pura.....	24
3.5. Ensaios de erosão-corrosão.....	25
3.6. Ensaios de interação galvânica.....	26
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	28
4.1 Caracterização dos materiais.....	28

4.2. Ensaio de interação galvânica.....	31
4.3. Testes de corrosão pura em água do mar sintética.....	37
4.4. Ensaio de erosão pura.....	42
4.5. Ensaio de erosão-corrosão.....	50
<b>5.CONCLUSÃO E SUGESTÕES .....</b>	<b>67</b>
5.1 Conclusões.....	67
5.2 Sugestões.....	67
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>69</b>



UFES – UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CT – CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**LEANDRO BITTI SANTA ANNA**

**ESTUDO DA EROSÃO-CORROSÃO NOS AÇOS  
ABNT 8550 E INOXIDÁVEL 301**

VITÓRIA  
2008

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil representado pela Petrobras, tem avançado muito nos últimos anos na exploração de petróleo, principalmente em águas profundas, devido às características das bacias brasileiras. Recentemente foi anunciada pela empresa a descoberta de uma bacia com enorme potencial localizada abaixo da camada pré-sal.

Para a exploração de petróleo em profundidades desse nível torna-se cada vez mais importante o estudo e desenvolvimento de materiais resistentes ao desgaste. Nesse processo são muito utilizados tubos de revestimentos de poços (*casing*), torres de extração, separadores de petróleo e água, sondas rotativas, bombas multifásicas para o bombeamento de petróleo, gás, água e sólidos ocorrentes, entre outros.

O *casing*, por exemplo, constitui uma das parcelas mais expressivas do custo da perfuração de um poço de petróleo (15 a 20% no mar, podendo chegar a 50% em terra). Durante o regime de operação de um poço de petróleo, o *casing* está exposto a diversos ambientes corrosivos e ao impacto contínuo das partículas de areia presentes em um poço (Carvalho, 2004).

Com a exploração do petróleo em águas profundas, as substituições de componentes de equipamentos acarretam em custos elevados. Desta forma, a proteção e o reparo dos materiais destes componentes representam redução elevada nos custos de produção (Franco *et al*, 2004).

Este desgaste, somado ao ambiente extremamente corrosivo, gera custos altos à indústria como um todo, devido à dificuldade de manutenção, principalmente em águas profundas. Por isso torna-se cada vez mais importante a investigação do comportamento dos materiais utilizados na construção destes equipamentos.

Silva (2008), por exemplo, estudou o desgaste de aços ABNT 8550 nitretados que são utilizados em bombas multifásicas para o bombeamento de petróleo, gás, água e sólidos ocorrentes, ainda não tratados, para unidades de produção localizadas em águas mais rasas. O aumento da resistência ao desgaste e à corrosão de bombas

para exploração de petróleo é de grande importância e está diretamente relacionado à lucratividade das companhias de exploração de petróleo (Wang et al., 1998).

Segundo Tschiptschin (2005) o processo de corrosão erosão é comumente encontrado em tubulações, diafragmas e outros componentes nas aplicações químicas, petroquímicas e marítimas.

Esta dissertação é uma continuação do trabalho de doutorado de Silva (2008) que busca estudar outras variáveis e situações a fim de complementá-lo.

Este trabalho tem como objetivos observar a mudança de comportamento do desgaste corrosivo-erosivo, em diferentes diâmetros das amostras e da velocidade do jato, nos aços ABNT 8550 e inoxidável 301.

Além disso, procura-se analisar o papel da microestrutura na resistência ao desgaste. Para isto foram utilizadas amostras recozidas e amostras temperadas e revenidas, do aço ABNT 8550, além de amostras confeccionadas em aço inoxidável 301.

Outro objetivo buscado foi à verificação e análise da interação galvânica ao longo do diâmetro da amostra, na região de escoamento, no aço ABNT 8550 recozido e temperado/revenido sob jato corrosivo-erosivo.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema do trabalho, no período de 1972 a 2008.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia e descreve como foram produzidas as amostras, ou seja, os tratamentos térmicos realizados, as caracterizações físicas e microestruturais e os diferentes ensaios realizados, além dos recursos laboratoriais utilizados.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos nos ensaios de corrosão pura, corrosão-erosão e erosão pura, além de ensaios que mostram o efeito da interação galvânica entre o centro e a borda da amostra. Através da discussão dos resultados, este trabalho visa contribuir com o

conhecimento em aspectos como as interações entre a erosão e a corrosão, o efeito galvânico ao longo do diâmetro da amostra na região de escoamento e a correlação das propriedades químicas, físicas e mecânicas com a resistência ao desgaste dos materiais.

O quinto capítulo traz as conclusões e as contribuições advindas dos resultados experimentais e discussões desenvolvidas, além de sugestões para trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CORROSÃO**

Num aspecto muito difundido e aceito mundialmente, a corrosão é definida como a deterioração de um material, normalmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, associada ou não a esforços mecânicos. Essa deterioração ocorre devido a desgastes, variações químicas ou outras modificações estruturais indesejáveis, que tornam o material inadequado para o uso (Gentil, 1996).

Pode-se classificar as perdas econômicas relacionadas à corrosão como diretas e indiretas. As perdas diretas ou custos diretos estão relacionados à aplicação de métodos de proteção, como pinturas, revestimentos e proteção, e a substituição de peças e equipamentos devido ao efeito da corrosão.

As perdas indiretas ou custos indiretos totalizam custos mais elevados que as perdas diretas e nem sempre podem ser quantificadas. Elas estão relacionadas aos custos que as trocas e paralisações de peças e equipamentos acarretam. São exemplos de perdas indiretas: perda de eficiência, paralisações acidentais, perdas e contaminações de produtos, entre outros.

A corrosão avança paralelamente ao desenvolvimento tecnológico, já que praticamente todos os setores da indústria sofrem com a corrosão, ou seja, os da mineração, metalurgia, alimentação, bebidas, química, indústria petrolífera (extração, transporte, refino e distribuição) automobilística, construção civil e construção naval, entre outras.

Devido aos custos relacionados a este fenômeno, os países avançados tecnologicamente têm investido muito na prevenção e combate da corrosão com objetivo de amenizar assim os prejuízos causados por ela.

### **2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DA CORROSÃO**

A corrosão pode, de modo geral, ser classificada como seca ou aquosa. A corrosão seca, também chamada de corrosão química, acontece na presença de meios não iônicos tais como: gases, líquidos anidros e metais fundidos (Gentil, 1996). O mecanismo da corrosão química pode ocorrer também à temperatura ambiente, meio gasoso e ainda em alguns meios líquidos, isentos de água.

A corrosão em meios aquosos é a mais comum, e isto é esperado, uma vez que a maioria dos fenômenos de corrosão ocorre no meio ambiente, no qual a água é o principal solvente (Wolyneq, 2003).

A corrosão aquosa (úmida) ou eletroquímica tem como característica principal do seu mecanismo o fato de que este só ocorre na presença de um eletrólito. A reação de corrosão é composta de duas reações parciais: uma reação anódica e uma reação catódica que se processam em pontos distintos (Dutra, 1991), ou seja, envolve materiais condutores de corrente elétrica (eletrodo) em um meio iônico (eletrólito). Além da existência de uma diferença de potencial na interface eletrodo/eletrólito.

Esta diferença de potencial é causada principalmente pelas diferenças microscópicas na estrutura metalúrgica do metal (composição, impurezas, tratamentos térmicos e mecânicos, condições de superfície) ou pelas características do meio corrosivo, tais como: composição química, diferenças em concentração, aeração, temperatura, velocidade, pH, teor de oxigênio, condição de imersão e movimento relativo entre o material metálico e o meio (Gentil, 1996).

Além desta classificação primária podem-se dividir ainda os tipos de corrosão quanto às características da aparência ou forma de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos (Gentil, 1996).

### **2.1.2 MECANISMOS DA CORROSÃO**

Quando um metal reage em sua superfície ele tem a tendência de perder elétrons. Este mecanismo pode ser explicado através das reações de oxi-redução que ocorrem de forma simultânea na superfície do material, ou seja, sempre que

ocorre a oxidação (perda de elétrons), ocorre também à redução (ganho de elétrons). Estas reações vêm acompanhadas da troca de elétrons.

Reações catódicas são aquelas que resultam em redução dos elementos reagente, já a dissolução de um metal resultante da sua oxidação é definida como uma reação anódica. Exemplos de reações catódicas e anódicas são apresentados nas equações 2.1 e 2.2 (Silva, 2008).



Experimentalmente verificou-se que os metais apresentam tendências diferentes a se oxidar, foi então desenvolvida uma tabela, chamada de tabela de potenciais de eletrodo, que dispõe a ordem preferencial de doação de elétrons, ou seja, ordena quais elementos tem maior facilidade de perder elétrons e conseqüentemente oxidar.

Quando se coloca um metal em forma de lâmina, placa, bastão, entre outros nas soluções eletrolíticas, determina o estabelecimento de uma diferença de potencial entre as duas fases, sólida e líquida (Gentil, 1996). Esta diferença de potencial é chamada diferença de potencial eletroquímico devido ao fato deste ser de natureza elétrica e química, e são medidos em condições específicas de temperatura, pressão e concentração, como mostrado na tabela 2.1.

O potencial é medido em relação a um eletrodo de referência ou de potencial padrão. Assim valores relativos de potenciais podem ser determinados experimentalmente usando-se o eletrodo padrão ou normal de hidrogênio que foi escolhido como referência e, arbitrariamente, fixado como potencial zero (Gentil, 1996). Outros eletrodos podem ser utilizados para medir potenciais eletroquímicos, como o eletrodo de referência de calomelano, de prata cloreto de prata e de cobre-sulfato de cobre.

O eletrodo de calomelano consiste em mercúrio em contato com cloreto mercurioso,  $Hg_2Cl_2$ , em uma solução de KCl. O de prata-cloreto de prata é construído

de um fio de platina revestido de prata, que é, por sua, vez convertido parcialmente em AgCl imerso em solução de ácido clorídrico diluído e o eletrodo de cobre-sulfato consiste de cobre metálico imerso em solução saturada de sulfato de cobre (Silva, 2008).

Tabela 2.1 - Valores de potenciais de eletrodos medidos em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio a 25 °C (77 °F), concentração de íons 1,0 molar, e a 1,0 atm (ASM-vol13).

Reação do eletrodo	Potencial de eletrodo padrão (E°) (volts)	Reação do eletrodo	Potencial de eletrodo padrão (E°) (volts)
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Au}$	+1,500	$\text{Ga}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ga}$	-0,530
$\text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pd}$	+0,987	$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0,740
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Hg}$	+0,854	$\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0,910
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}$	+0,800	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0,763
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Hg}$	+0,789	$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mn}$	-1,180
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0,337	$\text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ti}$	-1,630
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0,000	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Al}$	-1,660
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0,126	$\text{Hf}^{4+} + 4\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Hf}$	-1,700
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0,250	$\text{Be}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Be}$	-1,850
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0,440	$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}$	-3,050

Uma limitação do uso desta tabela deve-se ao fato dela não levar em conta algumas características cinéticas da reação como a velocidade. Além deste fato, esses potenciais não podem ser considerados em condições práticas devido terem sido mensurados em condições controladas.

A equação de Nernst (equação 2.3) em particular prevê estas mudanças de potencial do eletrodo em função destas variáveis (Gentil, 1996).

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{(ox)}{(red)} \quad (2.3)$$

Onde  $E$  é o potencial do eletrodo,  $E^{\circ}$  o potencial padrão do eletrodo,  $R$  constante dos gases perfeitos (1,987 cal/K mol),  $T$  a temperatura (em Kelvin),  $n$  a quantidade (em mol) de elétrons transferidos na reação,  $F$  a constante de Faraday ( $F = 23,060$  cal/volt equivalente), (ox) e (red) são as atividades de oxidação e redução das espécies, respectivamente. Atividade de um íon numa solução é a disponibilidade efetiva de íons na solução

A quantidade máxima de energia que se pode obter de uma reação química, sob a forma de energia elétrica, é igual à variação de energia livre da reação (Gentil, 1996).

### 2.1.3 TAXA DE CORROSÃO

Os equipamentos utilizados para a determinação das curvas polarização dinâmica são os potenciostatos/galvanostatos (figura 2.1), os quais são formados por uma célula com três eletrodos, sendo eles: o eletrodo de trabalho (material a ser testado), o eletrodo de referencia (uma ponte salina) e o eletrododo auxiliar (platina ou grafite) para fechar o circuito. Além dos eletrodos os equipamentos apresentam uma fonte de tensão ou de corrente estabilizada, onde são acoplados um amperímetro e um voltímetro de alta impedância.

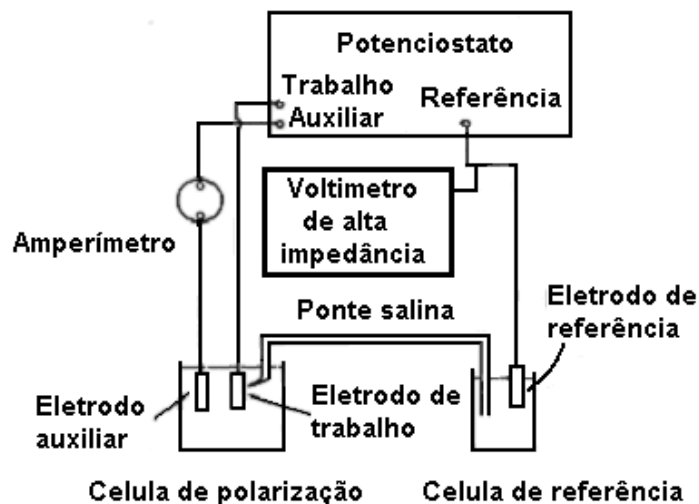


Figura 2.1 – Diagrama esquemático de uma montagem típica de célula de polarização (Silva, 2008).

O potenciostato/galvanostato acoplado a um microcomputador gera as curvas de polarização que serão usadas para obter-se a taxa de corrosão, através da medição da corrente de corrosão anódica que circula no metal no potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).

Existem duas possibilidades de se expressar a taxa de corrosão, a primeira é através da perda de massa perda de espessura por unidade de tempo (mm/ano), sendo esta industrialmente, devido ao fato de fornecer uma projeção do tempo de vida dos equipamentos. A segunda forma é pela perda de massa por unidade de área por unidade de tempo ( $g/mm^2 \cdot min$ ).

A taxa de corrosão em mm/ano pode ser expressa pela equação 2.4 conforme a norma (ASTM G-102-89).

$$TC = 3,27 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{i_{corr} EW}{\rho} \quad (2.4)$$

Onde:

$TC$  = taxa de corrosão (mm/ano).

$EW$  = peso equivalente da liga (g).

$\rho$  = densidade ( $g/cm^3$ ).

$3,27 \times 10^{-3} = \text{constante.}$

É importante ser lembrado que a taxa de corrosão obtida através da equação acima é válida apenas para corrosão uniforme, não contemplando por tanto corrosão localizada.

#### **2.1.4 INTERAÇÃO GALVÂNICA**

Quando um corpo simples está sujeito à variação de um fluxo hidrodinâmico, surge uma diferença de potencial ao longo do diâmetro do escoamento, ou seja, a formação de uma pilha ocorrendo assim à interação galvânica.

O efeito hidrodinâmico do jato altera as características eletroquímicas do material, seja pela mudança de rugosidade, pela despassivação do material ou pelo efeito galvânico entre as diferentes regiões de incidência do jato erosivo (Hodgkiess et al., 2003).

A corrosão galvânica acontece quando dois materiais dissimilares são colocados em contato dentro de um meio condutor. A diferença de potencial entre estes dois materiais é um indicativo da taxa de corrosão, isto é, quanto maior a diferença de potencial entre eles, maior a taxa de corrosão em serviço. O efeito hidrodinâmico faz com que apareça esta diferença de potencial ao longo do escoamento, e a conseqüente corrosão, ainda que seja no mesmo material.

A tensão de cisalhamento e coeficiente de transferência de massa são parâmetros que estão diretamente relacionados à corrosão, logo também relacionados ao efeito galvânico ao longo do diâmetro das amostras. Estes parâmetros podem ser obtidos através do ensaio de impingimento do jato. A figura 2.2 a seguir mostra as diferentes regiões do jato após o impingimento na amostra.

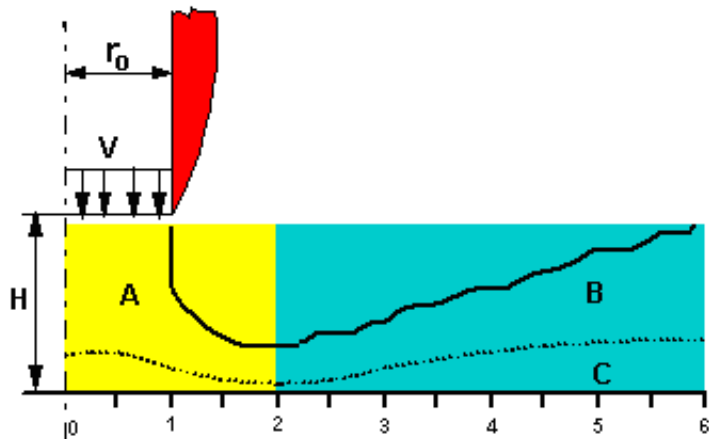


Figura 2.2 – Características hidrodinâmicas do jato por impingimento mostrando as características das regiões de escoamento (Efird, 2000).

A região (A) da figura é a região de estagnação, ou seja, região onde o jato está incidindo, logo ao lado desta região tem-se a região (B) chamada de região da parede, onde se tem um escoamento turbulento. A região (C) é chamada de camada limite hidrodinâmica. Onde  $H$  é à distância do bico, do jato de impingimento, até a amostra e  $r_0$  o raio do jato.

Segundo Efird (2000) a corrosão acelerada por escoamento é definida como o resultado do efeito da turbulência devido ao escoamento de um fluido que não contém partículas sólidas em suficiente concentração e/ou tamanho para impingir a superfície do metal.

Na região viscosa e na região da camada limite de difusão presentes na camada limite hidrodinâmica ocorrem os processos que controlam a corrosão e a formação de filme, nestas regiões as flutuações ocasionadas pela turbulência colocam em contato as espécies corrosivas com a superfície do metal e removem os produtos das reações de corrosão desta.

O efeito da interação galvânica também aumenta com o aumento da velocidade e a adição de areia ao jato. Hodgkiess *et al* (2003) mostrou que o jato com adição de areia pode apresentar este efeito, maior uma ordem de grandeza, em relação ao fluxo sem a presença de areia.

O aumento da velocidade implica em um maior transporte de massa nas reações catódicas e anódicas e, conseqüentemente, uma maior taxa de corrosão (Tan *et al*,

2005). Logo o efeito galvânico também aumenta sendo, portanto diretamente influenciado pela adição de areia e aumento de velocidade.

Isto pode ser explicado pela influência do escoamento, através da tensão de cisalhamento, na região turbulenta, onde se tem um aceleração da corrosão devido o escoamento. .

Segundo Orazem (2001) como a taxa transferência de massa é uniforme para um eletrodo que esteja inteiramente dentro da região de estagnação, células diferenciais de transferência de massa não são estabelecidas. Neste trabalho, portanto tem-se a presença destas células já que o eletrodo não se encontra totalmente dentro da região de estagnação.

## **2.2 EROSÃO**

Erosão é um tipo de desgaste causado pelo impacto repetitivo de partículas sólidas ou líquidas ou a implosão de bolhas formadas no fluido contra a superfície de um corpo sólido (Bhushan, 1999).

A erosão é frequentemente observada em uma grande variedade de condições ambientais, principalmente naquelas que envolve transporte de fluídos (líquidos ou gases), com ou sem a presença de particulados. Como exemplos de equipamentos e componentes que estão sujeitos a este tipo de desgaste, citam-se: transportadores pneumáticos, turbinas, tubulações, bombas, válvulas, conexões, entre outros (Santa Anna *et al*, 2008).

A erosão pode ser classificada em função de seis diferentes modos de desgaste por erosão (Zum Ghar, 1987): (a) erosão por partículas sólidas em meio gasoso; (b) erosão por partículas sólidas em meio líquido; (c) erosão devido à ação de líquidos; (d) erosão-corrosão, (e) erosão por cavitação e (f) erosão térmica.

Nesta revisão serão tratados em detalhe os desgastes de erosão por partículas sólidas em meio gasoso e em meio líquido, e o desgaste por erosão-corrosão.

## 2.2.1 EROSIÃO POR PARTÍCULAS SÓLIDAS EM MEIO GASOSO E EM MEIO LÍQUIDO

A erosão por partículas sólidas em meio gasoso é causada por partículas sólidas que são conduzidas por um fluxo de gás. O ângulo de incidência das partículas exerce grande influência no desgaste, além de poder modificar o mecanismo do mesmo. Turbinas aero-gás e transportadores pneumáticos de pó de carvão são exemplos de equipamentos sujeito a este tipo de erosão.

Também conhecida como erosão por meio lamacento, a Erosão por partículas sólidas em meio líquido é causada por partículas sólidas que são conduzidas por um fluxo de líquido. Bombas multifásicas, tubulações transportando meios lamacentos (*slurries*) são exemplos deste tipo de erosão.

A grande responsável pelas tensões de contato nas superfícies erodidas é a energia cinética das partículas convertida em energia de impacto. (Finnie,1995) classificou as variáveis, que podem influenciar na energia de impacto e na taxa de erosão, em três grandes grupos:

Variáveis relativas à partícula erosiva;

Variáveis relativas ao impacto;

Variáveis afeitas ao material.

As variáveis relacionadas à partícula são a dureza, o formato e o tamanho desta. A dureza ou relação de dureza entre a partícula e a superfície erodida está ligada ao desgaste de forma diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a dureza maior o desgaste. Esta relação também é válida para a forma da partícula, já que uma maior taxa de desgaste é observada em sistemas contendo partículas mais angulosas, onde a severidade nestes casos pode ser de até uma ordem de grandeza maior (Clark, 1991).

Geralmente o tamanho da partícula também é diretamente proporcional ao desgaste. Mudanças no tamanho das partículas podem alterar também as condições de fluxo e impacto durante a erosão, podendo resultar em mudanças no mecanismo e taxa desgaste (Clark e Hartwich, 2001).

A transição frágil-dúctil de determinados materiais também é afetado pelo tamanho da partícula erosiva. Um exemplo clássico é o comportamento dúctil apresentado pelo vidro quando erodido com pequenas partículas de 9  $\mu\text{m}$  (Finnie, 1995). Acredita-se, que esta mudança esteja relacionada com a menor área, menor energia de impacto e a presença de defeitos no material erodido (Wensink e Elwenspoek, 2002).

Entre as variáveis que estão relacionadas à partícula de impacto, estão: a velocidade que esta impacta sobre o material, o ângulo de ataque, a concentração destas partículas e o escoamento do fluido. A velocidade de impacto das partículas sobre um material é uma das principais variáveis que influenciam na taxa de erosão. A energia de impacto, proveniente da velocidade de impacto, é a responsável em causar o desgaste erosivo nos materiais. Experimentalmente, um aumento moderado na velocidade de impacto resulta em um grande aumento na taxa de erosão, independentemente do ângulo de incidência e da concentração de partículas erosivas (Divakar *et al.*, 2005).

Este aumento na taxa de erosão devido o aumento da velocidade está diretamente relacionado com o efeito da energia cinética ( $mV^2/2$ ) das partículas erosivas, onde: ( $m$ ) é a massa das partículas abrasivas e ( $V$ ) a velocidade de impacto. No caso de metais puros a relação entre a velocidade de impacto e a taxa de erosão é proporcional a  $V^n$ , e depende da dureza do material erodido. O índice “ $n$ ” pode variar entre 2,3 e 3, dependendo se o material é dúctil ou frágil (Zum Gahr, 1987).

A figura 2.3 mostra o efeito do ângulo de incidência na erosão. O ângulo de impacto da partícula é usualmente definido com relação ao plano da superfície. Para impacto normal, tem-se  $\theta = 90^\circ$ , enquanto que para impactos oblíquos o ângulo de incidência tende a zero.

O dano provocado pela erosão de materiais dúcteis depende fortemente do ângulo de impacto, sendo máximo em um ângulo entre  $20^\circ$  à  $30^\circ$  e caindo para a metade a um terço do pico da taxa de desgaste com incidência normal, como pode ser visto na curva (a) da figura 2.3 a seguir.

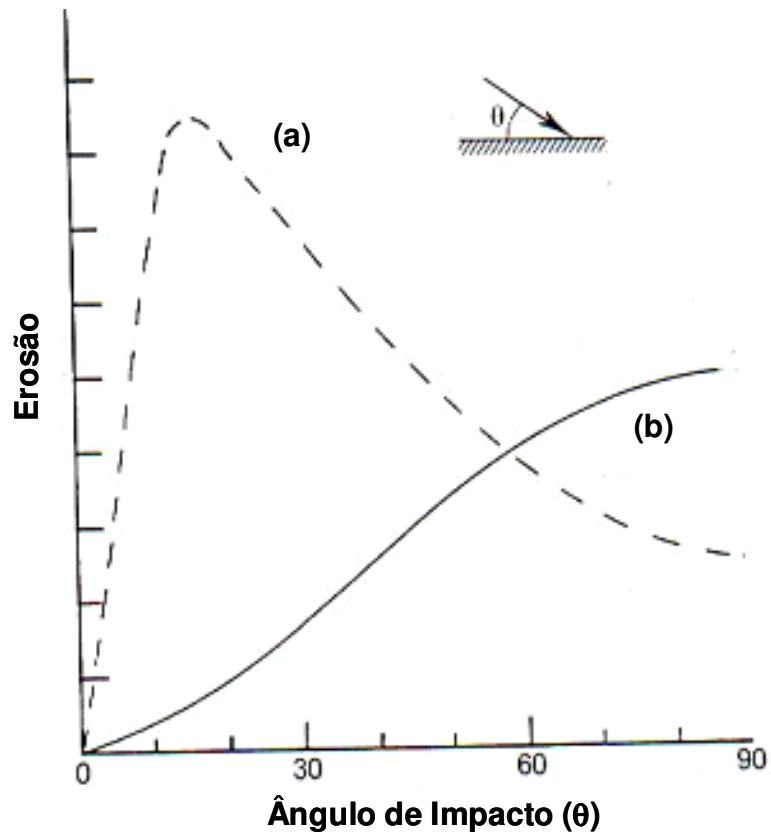


Figura 2.3 - Influência do ângulo de impacto da partícula na erosão a) metais dúcteis b) materiais frágeis (Hutchings, 1992).

A curva (b) da figura 2.3 mostra a dependência do dano provocado pela erosão em relação ao ângulo de impacto para um caso típico onde o desgaste ocorre por fratura frágil. A erosão cai drasticamente para ângulos distantes de 90°, em contraste ao que ocorre quando o desgaste se dá por deformação plástica como é mostrado na curva (a).

Segundo Girish *et al* (2007) o desgaste, em condições normais é muito influenciado pela relação de dureza entre o material que está causando o desgaste e o material alvo.

Uma outra variável relativa ao impacto é o tipo de escoamento do fluido. O escoamento laminar é um escoamento menos severo que escoamento turbulento, devido o impacto entre as partículas ser menor nesse escoamento.

A dureza do material, a microestrutura e a tenacidade fratura são variáveis afeitas ao material alvo, onde dependendo da situação e mecanismo uma dessas variáveis pode prevalecer em relação às demais. Quando os mecanismos de desgaste são o

microcorte e o microsulcamento, a propriedade de maior significância na taxa de desgaste é a dureza (Silva, 2008).

Assim, um aumento na dureza do material resulta numa maior resistência à penetração das partículas erosivas, e conseqüentemente, maior resistência à erosão (Hawthorn *et al.*, 1999).

### 2.2.2 Taxa de Erosão

A taxa de erosão pode ser expressa de formas diferentes. Algumas dessas taxas são mais comuns, como a taxa de erosão adimensional ( $E_M$ ), obtida pela relação da perda de massa de material removido, em gramas (g/g).

A taxa de erosão também pode ser obtida, através de um modelo matemático, em função da densidade do material erodido, da velocidade de impacto e da dureza do material, como demonstrado por Hutchings (1992).

$$E = \frac{K\rho V^2}{2H} \quad (2.5)$$

Onde:

$E$  = taxa de erosão (g/g);

$K$  = constante;

$V$  = velocidade de impacto (m/s);

$H$  = dureza do material do material erodido (Pa);

$\rho$  = densidade do material erodido ( $\text{kg/m}^3$ ).

Bingley e O'Flynn (2005) apresentam um modelo simples para a deformação normal, o qual pode ser desenvolvido pela resolução das equações de movimento para as partículas impactando uma superfície de dureza ( $H$ ). Deste modo o volume da cratera formada pode ser calculado. Ao determinar a taxa de erosão assume-se que alguma fração  $K$  deste volume da cratera é removido como debris de desgaste.

Assim, a taxa de erosão ( $E$ ) é dada por:

$$E = (K\rho V^2)/2H \quad (2.6)$$

$K$  é conhecido como coeficiente de desgaste.

A análise acima pode ser estendida para partículas atingindo um plano num ângulo oblíquo, assumindo que todo material é removido apenas pela ação de corte. Várias análises são possíveis, porém a maioria leva a uma solução na forma da expressão (2.7) onde a taxa de erosão é função do ângulo de impacto  $\theta$ :

$$E = (K\rho V^n f(\theta))/2H \quad (2.7)$$

Onde o expoente da velocidade varia tipicamente entre 2 e 2,5 e também é função de  $\theta$ . O valor de  $K$  depende da geometria da partícula e da fração de volume removido pela ponta da partícula que é realmente removido como debris.

### 2.2.3 Erosão-corrosão

É o dano causado pela ação simultânea de processos erosivos e corrosivos durante o transporte de líquidos quimicamente agressivos. Dutos de transferência e tubos de revestimento na indústria petrolífera, assim como rotores de bombas multifásicas são alguns exemplos de locais onde pode ocorrer o fenômeno da erosão-corrosão.

No cotidiano da indústria de petróleo é muito comum a ação da erosão em um meio corrosivo, causando o aumento do desgaste. A ação conjunta da erosão e da corrosão promove uma taxa de desgaste maior que a soma da erosão e da corrosão de forma separada. Essa ação conjunta chama-se sinergia, e deve ser levada em consideração no momento de classificar ou escolher o material a ser aplicado, a fim de evitar falhas inesperadas.

Segundo Tschiptschin (2005) quando a corrosão e a erosão atuam juntas, os mecanismos de desgaste são complexos e geralmente as perdas de massa, medidas, são maiores do que as somas das perdas de materiais separados devido à corrosão e erosão.

O efeito sinérgico é definido como sendo o fenômeno no qual ocorrem significantes interações entre os efeitos mecânicos e os efeitos eletroquímicos resultando assim em uma perda de massa do material maior do que a soma das perdas de massa conseguida quando cada efeito é analisado separadamente (Neville e Hu, 2001).

Em vários casos reportados na literatura, materiais sujeitos à erosão e à corrosão são testados geralmente através de ensaios puramente erosivos ou ensaios puramente corrosivos (Rogne *et al.*, 1998), esta prática pode vir a ocasionar acidentes, perdas de produção, entre outros.

A norma ASTM G119-03 (2003) apresenta um guia para o cálculo da sinergia entre desgaste e corrosão, isso permite que seja observado o quanto a sinergia contribui na taxa de desgaste total.

A taxa de desgaste total pode ser encontrada através da equação 2.8

$$K_T = K_E^0 + K_C^0 + S \quad (2.8)$$

Onde a taxa de desgaste total ( $K_T$ ) em erosão-corrosão é definida como a soma correspondente a taxa de erosão pura ( $K_E^0$ ), a taxa de corrosão pura ( $K_C^0$ ) e a sinergia ( $S$ ), (Neville *et al.*, 1995).

A sinergia é fornecida utilizando-se a equação a seguir:

$$S = \Delta K_{E^C} + \Delta K_{C^E} \quad (2.9)$$

Substituindo a equação 2.9 na equação 2.10:

$$K_T = K_E^0 + \Delta K_{E^C} + K_C^0 + \Delta K_{C^E} \quad (2.10)$$

A sinergia ( $S$ ) é atribuída a dois regimes de interação entre erosão-corrosão. No regime onde a taxa de erosão é aumentada pela corrosão,  $\Delta K_{E^C}$ , o termo “efeito sinérgico” é normalmente utilizado pela literatura para definir este efeito. O outro termo utilizado é denominado de “efeito aditivo” e está relacionado ao aumento da taxa de corrosão devido ao efeito da erosão,  $\Delta K_{C^E}$  (Stack *et al.*, 1999; ASTM G119-03; Stack e Badia, 2006).

Juntando os termos, da equação anterior, correspondentes à total contribuição da erosão ( $K_E$ ) e a total contribuição da corrosão ( $K_C$ ) em casos envolvendo a erosão-corrosão têm-se as equações 2.11 e 2.12.

$$K_E = K_E^0 + \Delta K_{E^C} \quad (2.11)$$

$$K_C = K_C^0 + \Delta K_{C^E} \quad (2.12)$$

Estas equações, quando substituídas na equação 2.10, apresentam a equação da taxa total da seguinte forma:

$$K_T = K_E + K_C \quad (2.13)$$

Segundo Hodgkiess a erosão-corrosão é um fenômeno complexo que inclui corrosão eletroquímica, erosão mecânica e alguns processos interativos conhecidos como efeitos sinérgicos ou aditivos.

É importante ressaltar, que a sinergia pode não existir e, em alguns casos de grande interesse prático, a sinergia pode até ser negativa, como por exemplo, quando a corrosão resulta na diminuição da taxa de erosão (Stack e Pungwiwat, 2004), tem-se nesses casos o efeito antagônico.

Existem alguns regimes de interação entre a erosão-corrosão. Estes regimes podem ser o de erosão dominante, erosão-corrosão dominante, corrosão-erosão dominante e corrosão dominante.

### 3 METODOLOGIA

A primeira etapa do trabalho foi de análise e estudo do assunto abordado, onde foi realizado um levantamento geral do mesmo. A segunda etapa realizada foi a escolha do outro material, o aço inoxidável 301, que junto do aço ABNT 8550 foi avaliado neste trabalho. Em seguida foram confeccionadas amostras do aço ABNT 8550 e do aço inoxidável 301. Depois da produção destas amostras foram realizadas medidas de dureza, e análises metalográficas.

Após as etapas iniciais, foram realizados os ensaios de erosão pura, erosão-corrosão, corrosão pura e ensaios com objetivo de identificar a presença de interação galvânica. Os ensaios foram realizados no equipamento tipo Jato do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia, representado esquematicamente na Figura 3.1.

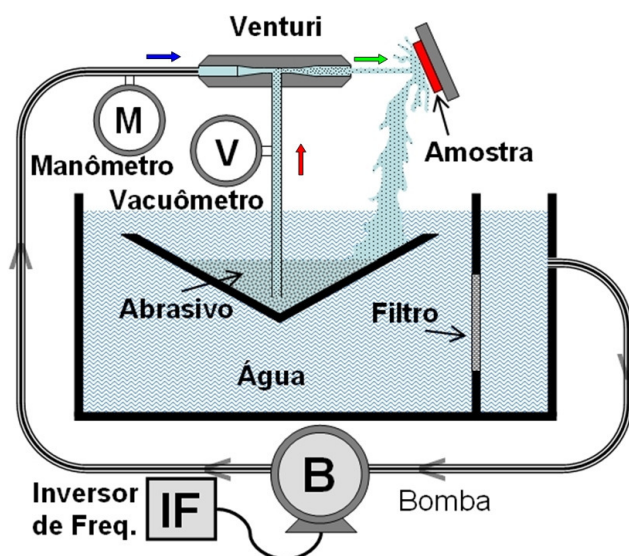


Figura 3.1. - Desenho esquemático do dispositivo de Jato impingimento, (Silva, 2008).

As velocidades do jato utilizadas foram de 6,0 e 10,0 m/s, para um ângulo de 90°. A concentração de areia utilizada nos testes foi de 6,0 % em peso. A areia utilizada como partícula erosiva foi a Areia Normal Brasileira do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica), segundo a NBR-7214, com granulometria entre 300 e 600  $\mu\text{m}$ .

Nos ensaios de erosão pura foram utilizados como parâmetros, não só, velocidades de 6,0 e 10,0 m/s e ângulo de incidência de 90°, como também

velocidades de 6,6 e 7,0 m/s no ângulo de 30°, a fim de se observar o efeito destes na taxa de desgaste.

Para cada condição de teste foram realizadas três repetições, a fim de confirmar a reprodutibilidade dos ensaios. Com base na metodologia adotada por Silva (2008) a areia foi trocada a cada duas horas de uso para evitar o efeito da degradação da partícula erosiva. A temperatura da água foi monitorada e os ensaios foram realizados em uma temperatura de 25 °C, com um intervalo que variou de +/- 1 °C.

### **3.1 MATERIAIS**

Os materiais escolhidos para a realização deste trabalho foram os aços ABNT 8550 e inoxidável 301. O aço 8550 foi escolhido, pois foi o material utilizado no trabalho de Silva, (2008), e foram utilizadas amostras recozidas e beneficiadas.

O aço Inoxidável 301 foi escolhido por ser um aço com boa resistência a corrosão e para que pudessem ser feitas comparações do comportamento de materiais estruturalmente diferentes sob jato corrosivo-erosivo. As amostras deste material foram confeccionadas a partir de barras cilíndricas de 25,4 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento.

A caracterização dos aços ABNT 8550 e inoxidável 301 foram realizadas através de medidas de dureza e análises metalográficas. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo.

Para isto, as amostras passaram pelos procedimentos padrões de preparação metalográfica de lixamento e polimento. No lixamento foram utilizadas lixas com 220, 320, 400, 600 e 800 de granulometria e o polimento foi feito com pasta de diamante de 3,0 µm de granulometria. O reagente utilizado para revelar a microestrutura foi o Vilella (1g ácido pícrico, 5ml HCl, 100 ml etanol), por 10 segundos no caso do aço inoxidável 301 e Nital 4% no caso do aço ABNT 8550.

### 3.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento tipo jato (figura 3.2) utilizado durante os testes desse trabalho é composto por uma cuba feita em aço inoxidável ABNT 304, com capacidade de armazenar 120 litros de líquido corrosivo.

Através de uma bomba de deslocamento positivo, que é acionada por um inversor de frequência, esse líquido é bombeado da cuba até um bico que direciona o fluido ou uma mistura fluido/abrasivo sobre a amostra.

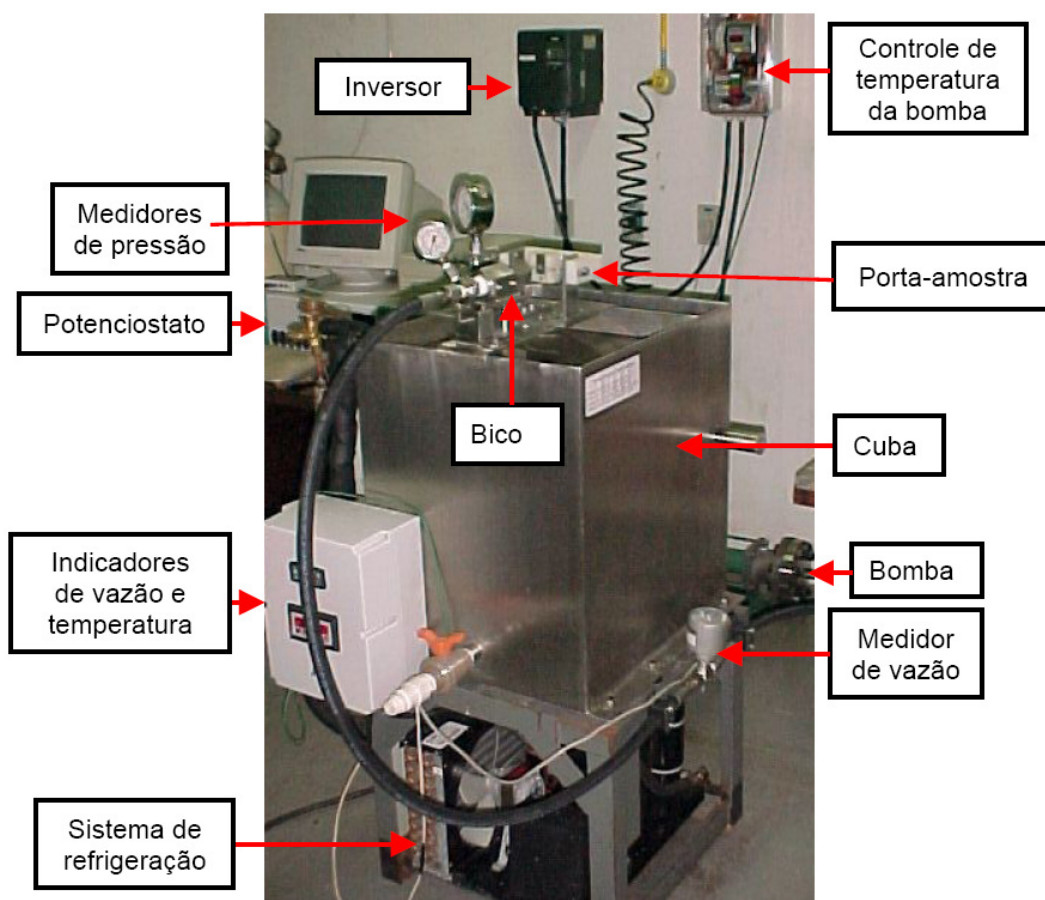


Figura 3.2 – Equipamento tipo jato, utilizado durante os testes, mostrando os principais componentes (Silva, 2008).

Este bico succiona uma mistura erosiva homogênea. Isto se deve ao fato de ser composto por um sistema que resulta em uma região de baixa pressão, gerando um vácuo suficiente para succionar a mistura erosiva para dentro do bico, conforme mostra a figura 3.3.

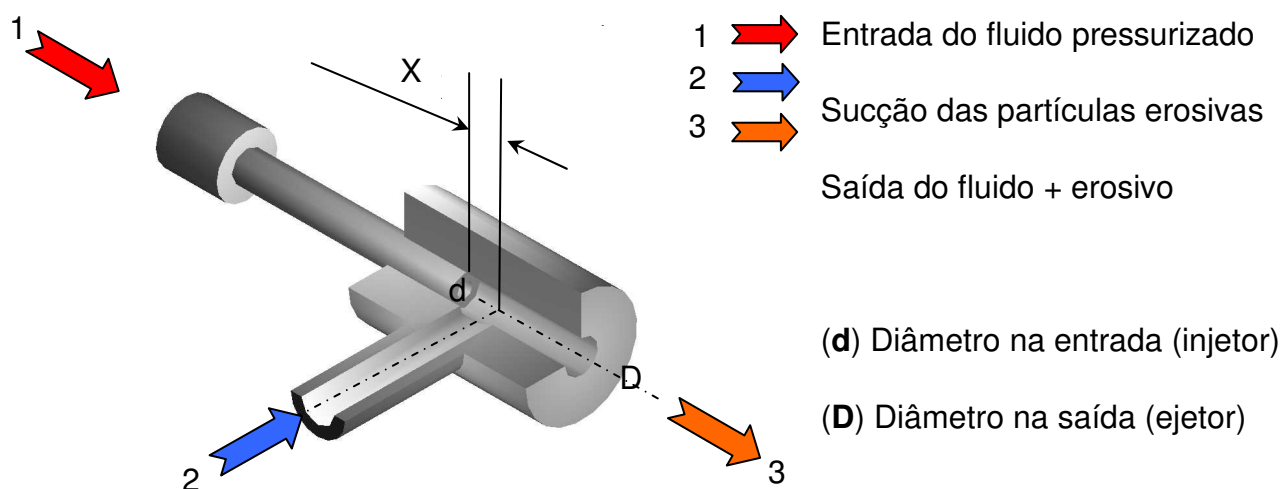


Figura 3.3 – Representação esquemática do bico de projeção (tubo venturi) (Silva, 2008).

A amostra fica posicionada num porta-amostras feito em material polimérico, posicionada em um ângulo reto em relação ao jato. A amostra é isolada eletricamente do restante do equipamento, permitindo se fazer dessa forma as medidas eletroquímicas durante o ensaio.

A amostra é ligada a uma célula eletroquímica composta de três eletrodos e acoplada a um potenciostato, que por sua vez está ligado a um microcomputador capaz de armazenar os dados, conforme detalhado a seguir.

### 3.3 ENSAIOS DE CORROSÃO PURA

Os ensaios de corrosão pura foram realizados no equipamento Jato I da Universidade Federal de Uberlândia, equipamento este que está ligado a um potenciostato capaz de realizar a monitoração do potencial, da corrente de corrosão e de gerar curvas de polarização com uma velocidade de varredura de 1,6 mV/s. A taxa de corrosão é calculada através das derivadas das curvas de polarização geradas.

Ao potenciostato foi conectado a uma célula eletroquímica com três eletrodos, sendo estes, o de trabalho, o de referência e o auxiliar (em grafite). O eletrodo de trabalho é ligado à amostra através de um fio de cobre. O eletrodo de referência

Ag/AgCl chega à amostra através de uma ponte salina e o eletrodo de grafite é ligado à amostra de forma semelhante a do eletrodo de trabalho, localizando-se ao redor da amostra com objetivo de fechar o circuito. Os valores de potenciais medidos neste trabalho são sempre em função do Ag/AgCl. A figura 3.4 apresenta este conjunto de eletrodos.

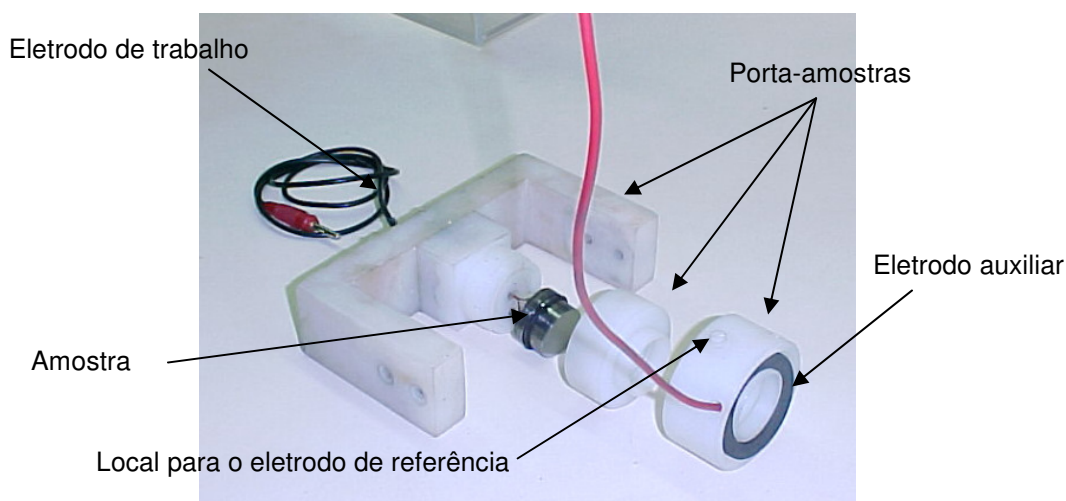


Figura 3.4 – Porta-amostras com o conjunto amostra – eletrodos.

Os ensaios foram realizados com água do mar sintética, segundo a norma ASTM D1141-98, onde o pH desta foi constantemente monitorado durante os ensaios, sendo controlado entre 8,15 e 8,25.

A amostra foi lixada utilizando-se lixas com granulometrias de 400 e 600 mesh, limpas em ultra-som por 15 minutos e pesadas em balança analítica com resolução de 0,1 mg. O ensaio foi composto de dois momentos distintos, em um primeiro o jato foi impingido durante uma hora sobre a amostra até que o potencial se estabilizasse. No segundo momento foi então gerada a curva de polarização utilizando um intervalo de varredura de +/- 0,1V em relação ao potencial natural estabelecido.

### 3.4 ENSAIOS DE EROSÃO PURA

Os testes de erosão pura foram realizados em água de torneira, e não em água destilada, com proteção catódica devido à dificuldade em se fabricar uma quantidade muito grande de água destilada, que seria necessária durante os

ensaios. Além disso, Silva (2008) mostrou, em seu trabalho, não existir diferença estatística dos ensaios de erosão pura realizados em água deionizada com proteção catódica e água da torneira sem proteção catódica.

A preparação das amostras foi feita da mesma forma que a preparação para o ensaio de corrosão pura. O ensaio teve duração total de quarenta minutos, sendo que a cada dez minutos era interrompido e a amostra era retirada, limpa em ultrassom com acetona e pesada em balança analítica com resolução de 0,1 mg, com o objetivo de determinar a perda de massa.

A taxa de desgaste (gramas de material removido/gramas de partículas erosivas) foi determinada dividindo-se a perda de massa pelo fluxo de partículas erosivas (Silva, 2008).

### **3.5 ENSAIOS DE EROSÃO-CORROSÃO**

Foram feitos ensaios para se observar a influência da erosão na corrosão (A) e ensaios com objetivo de se observar a influência da corrosão na erosão (B).

Em (A), os ensaios foram feitos na presença de água do mar sintética e areia. As amostras foram preparadas da mesma forma que nos ensaios anteriores e o ensaio, assim como ensaio de corrosão pura, também foi composto de dois momentos distintos, sendo no primeiro a leitura e observação do comportamento, durante uma hora, do potencial e no segundo geração da curva de polarização.

Tal ensaio foi realizado dessa forma, ou seja, utilizando-se água do mar com a presença de partículas abrasivas, pois buscou comparar, através das curvas de polarização e das taxas de corrosão, os resultados obtidos nesse ensaio com os resultados obtidos no ensaio de corrosão pura, observando assim a influência da erosão na corrosão.

Em (B) os ensaios foram realizados de forma semelhante aos ensaios de Erosão Pura, ou seja, duraram quarenta minutos no total, sendo interrompido a cada dez minutos, para limpeza e pesagem da amostra. O que o diferenciou do ensaio de erosão pura foi o fato dos ensaios serem feitos na presença de água do mar sintética ao invés de água da torneira.

A água do mar sintética substituiu a água da torneira para que pudesse ser observada a influência da corrosão na erosão, ou seja, qual a influência do meio corrosivo no desgaste do material ensaiado.

### 3.6 ENSAIOS DE INTERAÇÃO GALVÂNICA

No presente trabalho os ensaios para a observação deste tipo de interação foram feitos seguindo o procedimento de Hodgkiess e colaboradores (Hodgkiess et al 2003). Para a realização dos ensaios de interação galvânica foram confeccionadas amostras preliminares e feitos alguns testes preliminares, buscando observar se esta seria significativa.

Os ensaios preliminares foram feitos com amostras confeccionadas através de usinagem por eletroerosão. Para isto, as amostras já existentes foram usinadas através do processo de eletroerosão, onde foi utilizada uma ferramenta em forma de cilindro com um furo de 8,0 mm e parede de 1,0 mm de diâmetro. O centro foi então separado da borda da amostra, ou seja, o centro transformou-se em um cilindro de diâmetro igual ao diâmetro interno da ferramenta e a borda transformou-se em um cilindro com um furo de diâmetro igual ao diâmetro externo da ferramenta.

Após o processo de usinagem por eletroerosão, a amostra foi finalizada, para isso foi utilizada cola epóxi que isolou o centro da amostra, como está mostrado na figura 3.5.

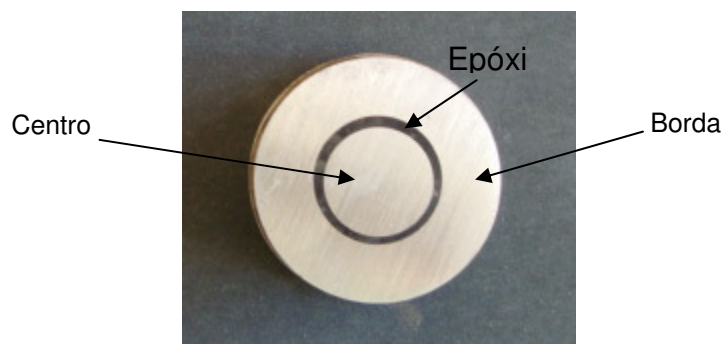


Figura 3.5 - Amostra utilizada nos ensaios de interação galvânica.

As amostras definitivas foram confeccionadas através de usinagem convencional, onde duas amostras transformaram-se em uma única. Uma amostra foi desbastada até formar um cilindro com diâmetro de 12,0 mm, a outra amostra foi furada com uma broca de 14,0 mm de diâmetro, formando assim um cilindro com um furo de 14,0 mm de diâmetro. Novamente, o centro foi isolado da borda através de cola epóxi e antes do início do ensaio, a amostra foi lixada respectivamente nas granulometrias de 400 e 600 *mesh*.

Os ensaios foram realizados utilizando-se dois fios como eletrodo de trabalho, um ligado ao centro e outro à borda. Os eletrodos liam o potencial no centro ou na borda conforme estivesse ligado ou não ao potenciostato, através de uma chave.

Para os ensaios definitivos foi mudada também a configuração dos mesmos, ou seja, os ensaios tiveram uma duração de uma hora, com a leitura inicialmente sendo feita no centro, tendo duração de quinze minutos. Após este primeiro momento o eletrodo ligado ao centro era isolado e o da borda ativado, realizando a leitura na borda durante quinze minutos também. Após a leitura na borda o processo inverso era feito e o eletrodo ligado ao centro voltava a fazer a leitura nesse local e o processo foi repetido até completar uma hora de ensaio.

Ensaio comparativos foram realizados com amostras confeccionadas por eletroerosão e usinagem convencional, ambas com mesmas dimensões, a fim de atestar a confiabilidade dos testes.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são apresentados os resultados da caracterização das amostras do aço inoxidável 301, dos ensaios de corrosão pura, erosão pura, corrosão-erosão e interação galvânica para os aços ABNT 8550 e inoxidável 301. Foram avaliados os desgastes ocorridos nesses ensaios em diferentes velocidades de impacto da partícula erosiva, nos diferentes diâmetros de amostras ensaiadas e microestruturas utilizadas.

Os ensaios foram realizados nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, para amostras com diâmetros de 12,0 e 27,0 mm, em um ângulo de 90°, como resumido na tabela abaixo:

Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios realizados.

Velocidade de Impacto	Amostras Utilizadas	Diâmetro das Amostras
6,0 m/s	8550 Beneficiadas e Recozidas	27,0 mm e 12,0 mm
	301	12,0 mm
10,0 m/s	8550 Recozidas	12,0 mm
	301	

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste tópico serão apresentados os resultados de caracterização dos materiais utilizados no trabalho. Para isto foram realizadas análises metalográficas e medidas de dureza dos aços ABNT 8550 recozido e beneficiado e do aço inoxidável 301. Além da análise da composição química destes, conforme apresentadas nas tabelas 4.2 e 4.3 a seguir. A composição química do aço inoxidável foi realizada na SBCQ - Inspeções, Ensaios e Testes de Qualidade Ltda.

Tabela 4.2 - Composição química do aço ABNT 8550 (34 CrAlNi 7) empregado na confecção das amostras (% em peso), obtida por espectroscopia de emissão ótica (Silva, 2008).

ELEMENTO	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Nb	V
ANÁLISE	0,32	0,031	0,011	0,280	0,740	1,710	0,940	0,170	1,060	0,230	0,010	0,020

Tabela 4.3 – Composição química (% em peso) medida do aço inoxidável 301.

ELEMENTO	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	S	P
ANÁLISE	0,06	1,65	18,82	7,50	0,11	0,51	0,028	0,038

A microestrutura encontrada no aço inoxidável 301 foi a austenítica. A figura 4.1 mostra uma foto com 500 vezes de aproximação, feita através microscopia ótica.

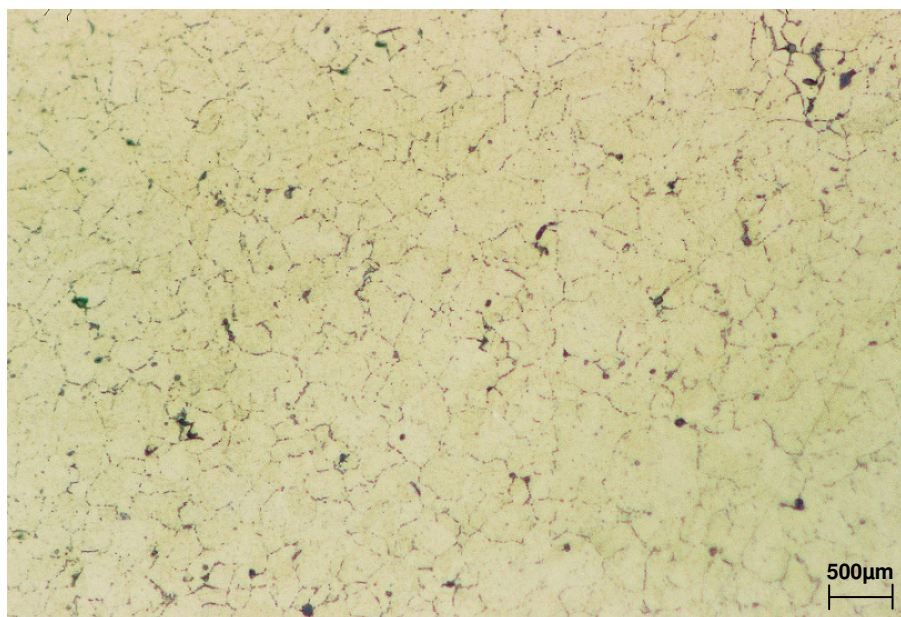
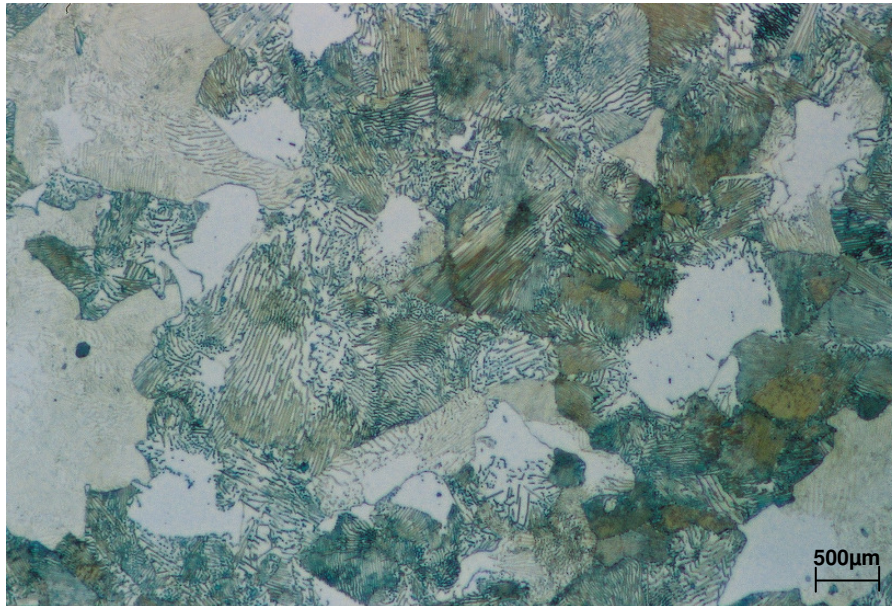


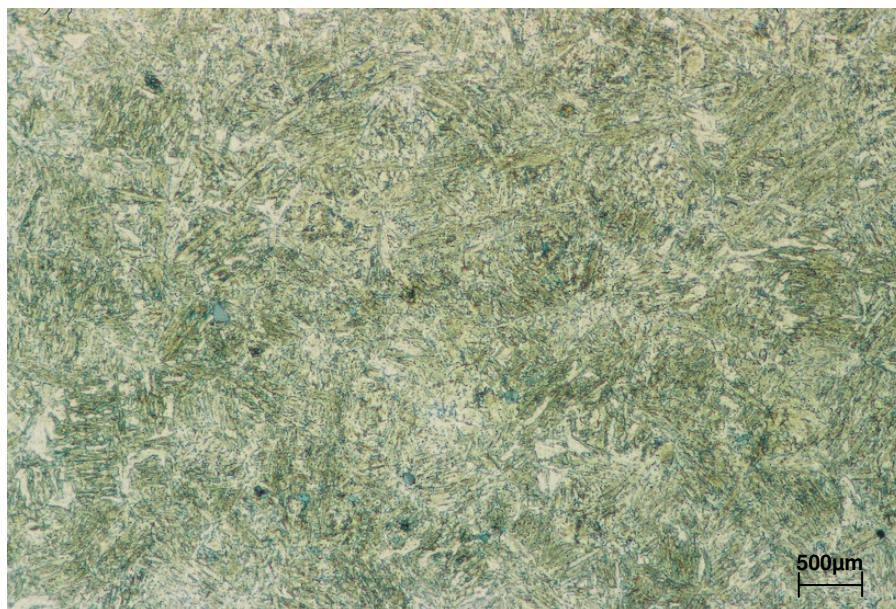
Figura 4.1 - Foto da microestrutura do aço inoxidável 301, com 500 vezes de aproximação e atacado com Vilella (1g ácido pícrico, 5mL HCl, 100 mL etanol) por 10 segundos.

A dureza média encontrada para o aço inoxidável 301 foi de 212HV10. A figura a seguir 4.2 (a) e (b) mostra respectivamente as microestruturas do aço ABNT 8550 recozido e beneficiado. A dureza média encontrada para o aço ABNT 8550 Recozido foi de 195 HV10, enquanto que para o aço ABNT 8550 beneficiado a dureza média

encontrado foi de 299 HV10. Os resultados encontrados estão de acordo com os encontrados por Silva (2008), que encontrou em seu trabalho durezas de 188HV30 para as amostras recozidas e 308HV30 para as beneficiadas.



(a)



(b)

Figura 4.2 - Foto da microestrutura do aço ABNT 8550, com 500 vezes de aproximação e atacado com Nital 4%. (a) aço ABNT 8550 recozido e (b) aço ABNT 8550 beneficiado.

## 4.2 ENSAIOS DE INTERAÇÃO GALVÂNICA

A seguir, são apresentados e discutidos os resultados de avaliação e observação do efeito galvânico no aço ABNT 8550. Primeiramente, foram feitos ensaios preliminares em água da torneira, à velocidade de 6,0 m/s, e ângulo de 90°, conforme mostrado na Figura 4.3.

Estes testes preliminares tiveram duração de duas horas, sendo que na primeira hora o eletrodo de trabalho foi ligado ao centro e na segunda hora de ensaio à borda. Como se pode observar, quando o eletrodo de trabalho está ligado ao centro da amostra o potencial de circuito aberto é maior que o circuito de potencial aberto da borda.

Os valores dos potenciais de circuito aberto encontrados sugerem que a borda seja o anodo e o centro o catodo. Ao fim do ensaio, os potenciais apresentam uma diferença bastante significativa (figura 4.3), principalmente pelo fato de se tratar de ensaios feitos em água de torneira.

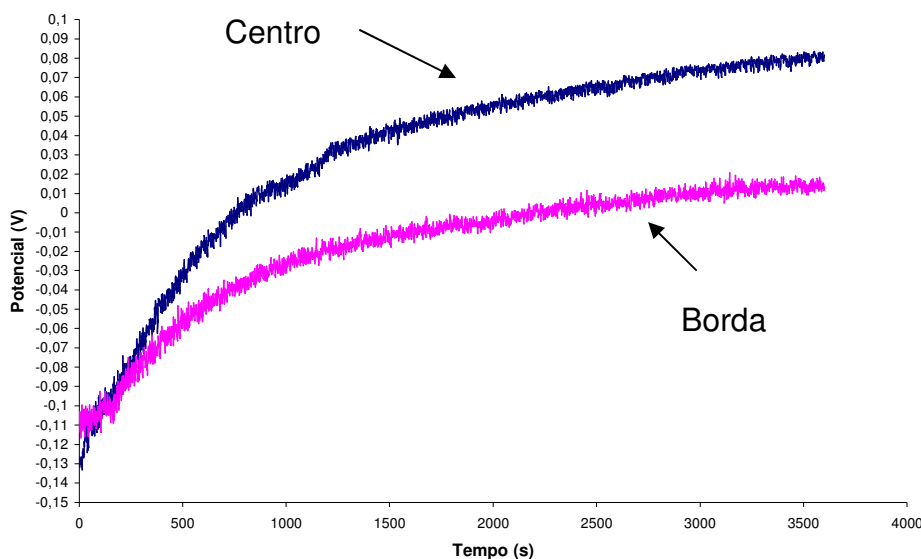


Figura 4.3 – Curva mostrando a leitura do potencial de circuito do centro da borda de uma amostra de aço 8550 beneficiada. Ensaio feito em água da torneira, sob ângulo de incidência de 90°.

Em seguida, os ensaios foram feitos em água do mar sintética, ângulo de 90° e nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s. Além disso, foram utilizadas amostras de aço ABNT 8550 recozidas e beneficiadas, sob jato com e sem areia.

Durante este ensaio o eletrodo de trabalho foi ligado, a cada quinze minutos, na borda e no centro respectivamente. Esta dinâmica foi repetida duas vezes durante o ensaio, totalizando uma hora de ensaio.

A figura 4.4 mostra os resultados obtidos para os testes feitos à velocidade de 6,0 m/s, nas amostras de aço ABNT 8550 recozidas. Como pode ser observado nesta figura, o potencial da região da borda é mais eletronegativo em relação ao potencial apresentado pelo centro. Este resultado sugere que, assim como nos ensaios preliminares em água de torneira, a região da borda é anódica em relação ao centro, ou seja, em relação à região de incidência do jato, devido à corrente que flui do centro para a borda. Hodgkiess e colaboradores (2003) estudaram materiais diferentes, ligas de cobre-níquel, titânio, aço inoxidável e um revestimento WC-10%cobalto-4%cromo, e apenas para as duas ligas de cobre a região de impacto do líquido foi o catodo.

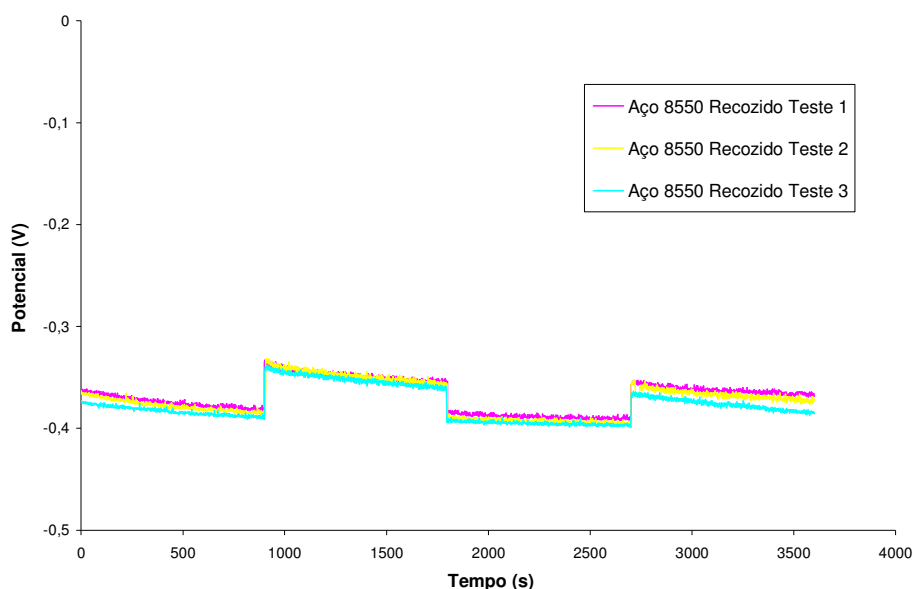


Figura 4.4 – Curvas mostrando a reprodutibilidade das medidas dos potenciais de circuito aberto entre centro e borda no tempo, em amostras recozidas do aço ABNT 8550 sob jato corrosivo a velocidade de 6,0 m/s, 90° de ângulo de incidência. Começando a medida pela borda.

A diferença média encontrada entre o centro e a borda foi de 30 mV, ou seja, uma diferença bastante significativa. Os valores de diferença encontrados para os materiais estudados por Hodgkiess e colaboradores (2003) foram menores que 10 mV, porém existem diferenças entre o arranjo experimental destes pesquisadores e o utilizado no presente trabalho.

Foram feitos três testes para cada parâmetro a fim de verificar a reprodutibilidade dos ensaios e como pode ser observado, na figura 4.4, os ensaios demonstraram uma boa reprodutibilidade, devido à sobreposição das curvas de potencial de circuito aberto.

A figura 4.5 compara o comportamento do potencial entre as amostras recozidas e temperadas e como mostrado as microestruturas não apresentaram diferenças de resultados.

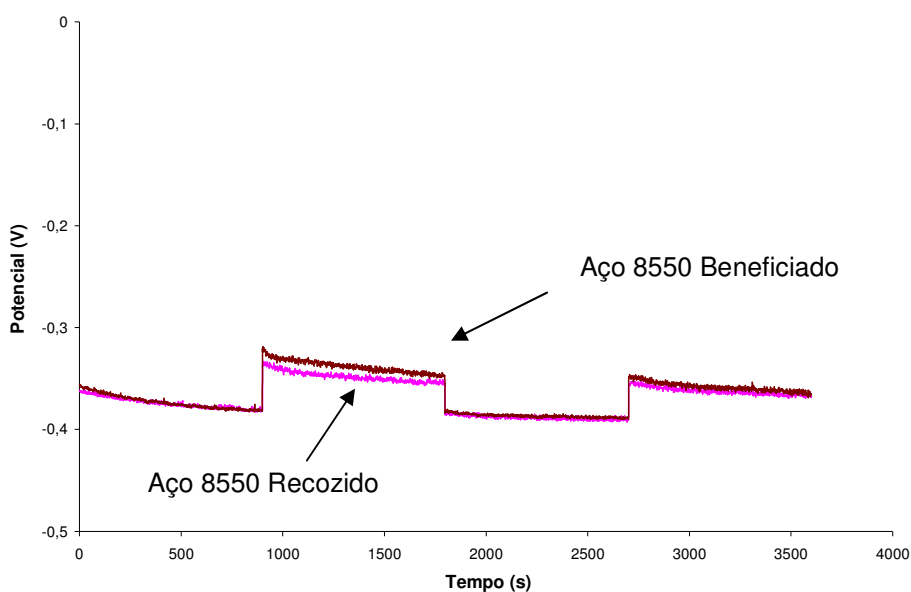


Figura 4.5 – Curvas comparando a medida do potencial de circuito aberto no tempo, em uma amostra recozida e outra beneficiada do aço ABNT 8550 sob jato corrosivo a velocidade de 6,0 m/s e 90° de incidência exibindo a variação do potencial entre o centro e borda da amostra. Começando a medida pela borda.

Durante os testes de interação galvânica também foi observada a influência da velocidade no potencial de circuito aberto, tanto no centro quanto na borda. Foram feitos ensaios em água do mar nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s.

A figura 4.6 mostra que a velocidade tem influência direta no potencial. Quanto maior esta velocidade, mais eletronegativo fica o potencial de circuito aberto. Esta influência da velocidade pode ser explicada através do oxigênio trazido junto do jato, e quanto mais veloz o jato mais oxigênio estará presente. O oxigênio é muito despolarizante, e logo quanto mais oxigênio mais eletronegativo será o potencial e maior será a tendência de corrosão.

Com o aumento da tensão de cisalhamento, devido ao aumento da velocidade, o gradiente de concentração do oxigênio difundido aumenta muito, a camada limite do fluido rapidamente fica mais fina e a resistência à transferência do oxigênio decresce conseqüentemente (Liu, 2005).

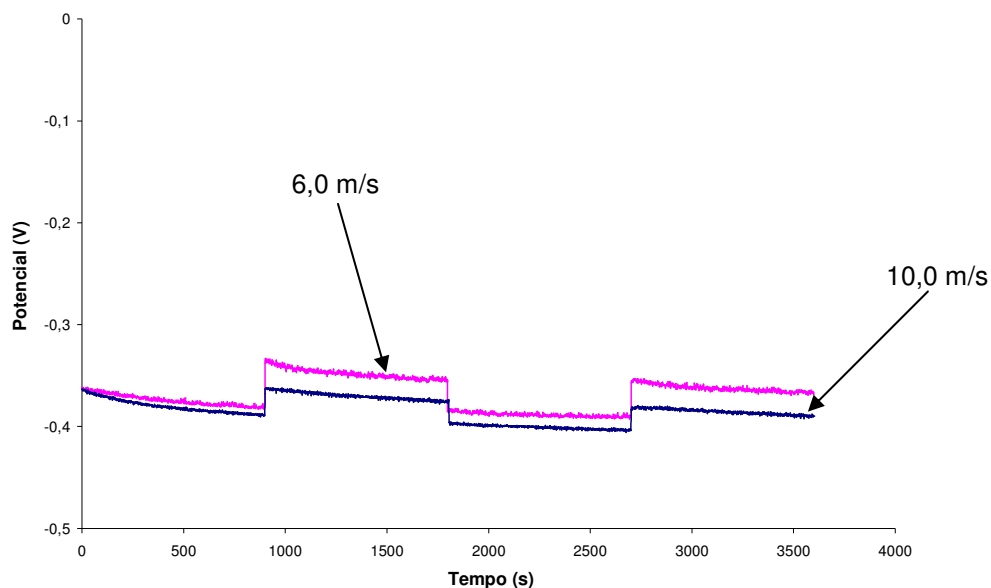


Figura 4.6 – Curvas comparando a medida do potencial de circuito aberto no tempo entre o centro e a borda, em amostras recozidas do aço ABNT 8550 sob jato corrosivo nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s e 90° de incidência. Mostra a influência da velocidade no potencial de circuito aberto. Começando a medida pela borda.

Todos estes fatores fazem com que mais e mais oxigênio da solução penetre na camada limite do fluido para atingir a superfície do metal quando o coeficiente de transferência de massa aumenta. O gradiente de concentração de oxigênio é tão elevado que a camada de difusão é muito fina e a taxa de transferência do oxigênio para a superfície metálica é suficiente para acelerar substancialmente a reação eletroquímica.

Após a transição do escoamento do fluido de laminar para turbulento, o gradiente de concentração do oxigênio é muito elevado; a camada limite do fluido sendo muito fina; e a transferência do oxigênio para a superfície metálica é tal que a reação eletroquímica é fortemente acelerada, resultando numa taxa de corrosão mais elevada.

Tem sido verificado que as taxas de corrosão de aços carbono em água do mar escoando são controladas principalmente pela taxa de difusão do oxigênio dissolvido, a qual é um processo estável, e a corrosão induzida pelo escoamento é causada, na verdade, pelo sinergismo das interações entre fatores hidrodinâmicos e processos eletroquímicos no fluido (Liu, 2005).

Ensaio sob jato com água do mar e areia também foram realizados a fim de verificar a influência da areia no potencial de circuito aberto nos aços ABNT 8550, conforme mostra a figura 4.7. O potencial de circuito aberto da amostra sujeita ao jato de água do mar e areia é mais eletronegativo quando comparado à amostra sujeita ao jato de água do mar, este resultado está de acordo com a literatura (Hu 2004 *et al*, Silva 2008).

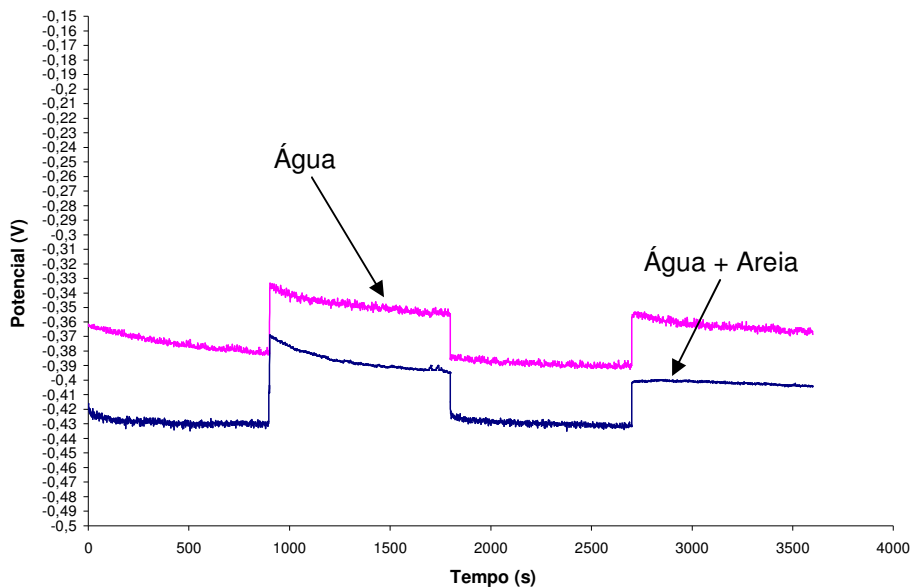


Figura 4.7 – Curvas comparando a medida do potencial de circuito aberto no tempo, em uma amostra recozida do aço ABNT 8550 sob jato de água do mar e areia e sob jato com apenas água do mar a velocidade de 6,0 m/s e 90° de incidência exibindo a variação do potencial entre o centro e borda da amostra. Começando a medida pela borda.

Este potencial mais eletronegativo indica uma maior tendência à corrosão na amostra sob o jato de água do mar com areia, já que a areia provoca mudanças nas propriedades eletroquímicas, devido aos efeitos galvânicos resultando em uma superfície mais ativa. Em condições de fluxo com areia, este efeito é uma ordem de grandeza maior do que aquele em condições envolvendo apenas o jato de água do mar (Hodgkiess et al., 2003).

A influência da velocidade no potencial foi mais uma vez observada, agora no jato corrosivo-erosivo. Assim como ocorreu quando a amostra foi submetida apenas ao jato corrosivo, a variação da velocidade também influenciou o potencial de circuito aberto. O potencial mais uma vez se tornou mais eletronegativo com o aumento da velocidade, conforme está mostrado na figura 4.8 a seguir.

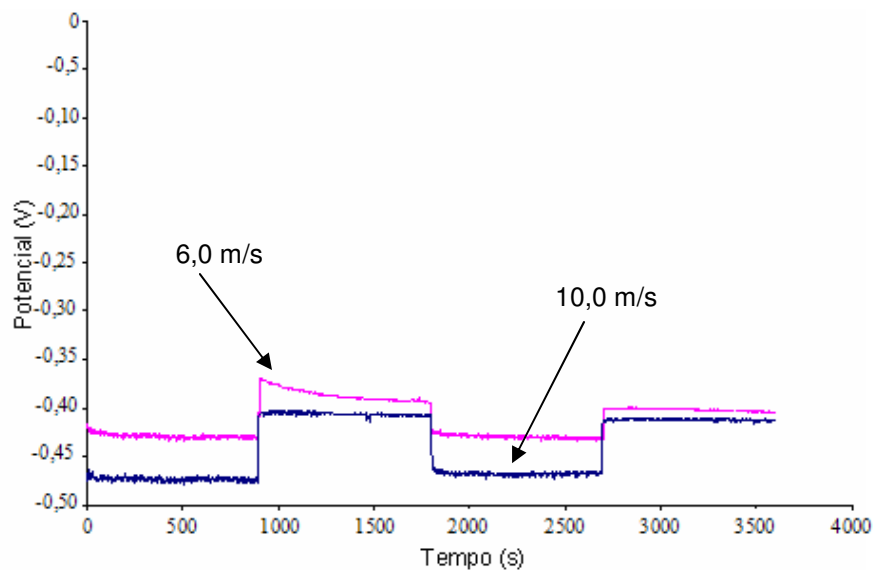


Figura 4.8 – Curvas comparando a medida do potencial de circuito aberto no tempo, em uma amostra recozida do aço ABNT 8550 sob jato de água do mar e areia nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, e ângulo de incidência de 90°. Exibindo a variação do potencial entre o centro e borda da amostra devido à variação da velocidade. Começando a medida pela borda.

Acredita-se, que este comportamento esteja relacionado ao aumento de transporte de massa sobre a superfície erodida, como sugerido por Tan *et al.* (2005). Além disso, tem-se um aumento da energia cinética das partículas, que pode resultar em aumento da temperatura na superfície, bem como alterações da topografia (Silva, 2008).

### 4.3 TESTES DE CORROSÃO PURA EM ÁGUA DO MAR SINTÉTICA

A seguir são apresentados e discutidos os principais resultados dos testes de corrosão pura realizados no erosímetro. Nestes ensaios, buscou-se observar a influência da velocidade, do diâmetro da área ensaiada e da microestrutura, na taxa de corrosão.

A taxa de corrosão foi determinada através de curvas de polarização obtidas durante os testes, após a estabilização do potencial de circuito aberto. O tempo mínimo estabelecido para a estabilização do potencial foi de uma hora, sendo geradas as curvas de polarização potenciodinâmicas em seguida.

A figura 4.9 apresenta um comparativo entre as curvas de polarização obtidas, nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, no aço ABNT 8550 recozido, com a face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro. Pode-se observar que sob uma velocidade menor (6,0 m/s) o potencial de corrosão é mais eletronegativo e a densidade de corrente é menor quando comparado ao fluxo de maior velocidade (10,0 m/s). O potencial mais eletronegativo estaria ligado com uma menor área de impacto do líquido, já que esta depende também da velocidade e, como visto na seção de interação a região central é catódica em relação a parte mais externa da amostra. Em condições de fluxo a água apresenta altos teores de oxigênio. Este oxigênio despolariza a reação catódica, aumentando a corrente de corrosão (Schumacher, 1979). Logo para uma maior velocidade de escoamento tem-se uma maior corrosividade.

Em geral, um aumento na temperatura e/ou na velocidade de circulação do fluido resulta no aumento da taxa de corrosão. A velocidade pode atuar na remoção de camadas de produtos da corrosão aderidas ao material e que poderiam estar retardando o processo corrosivo (Gentil 1996). Este efeito hidrodinâmico do jato, que altera as características eletroquímicas do material, tem um efeito maior com o aumento da velocidade.

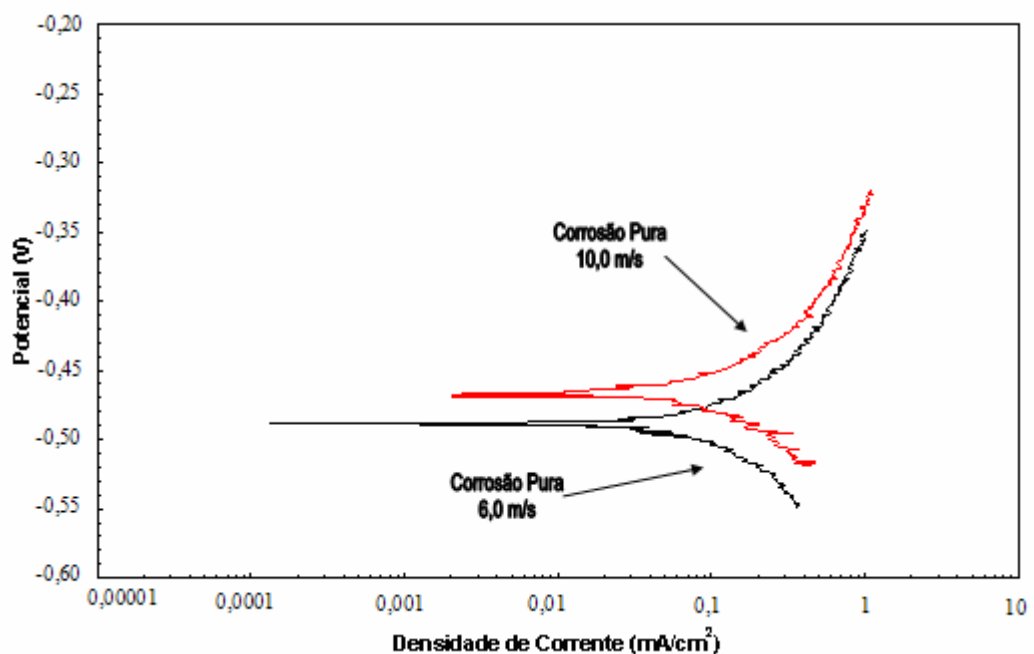


Figura 4.9 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço ABNT 8550 recozido, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, ângulo de incidência de 90 ° mostrando a influência das mesmas nas taxas de corrosão.

O efeito hidrodinâmico do jato também altera as características eletroquímicas do material, seja pela mudança de rugosidade, pela despassivação do material ou pelo efeito galvânico entre as diferentes regiões de incidência do jato erosivo (Hodgkiess *et al.*, 2003). Logo, o aumento da velocidade, faz com que ocorra também um aumento destes efeitos hidrodinâmicos.

Os ensaios realizados nas amostras de aço inoxidável 301, para as velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, mostraram que também ocorreu um aumento da taxa de corrosão com o aumento da velocidade, conforme está mostrado na Figura 4.10.

O mesmo fenômeno, mostrado na figura anterior, causado pelo aumento da velocidade pode ser visto aqui. Contudo um segundo efeito atua para aumentar a densidade de corrente, que é a remoção do filme passivo pela tensão de cisalhamento na parede produzida pelo jato.

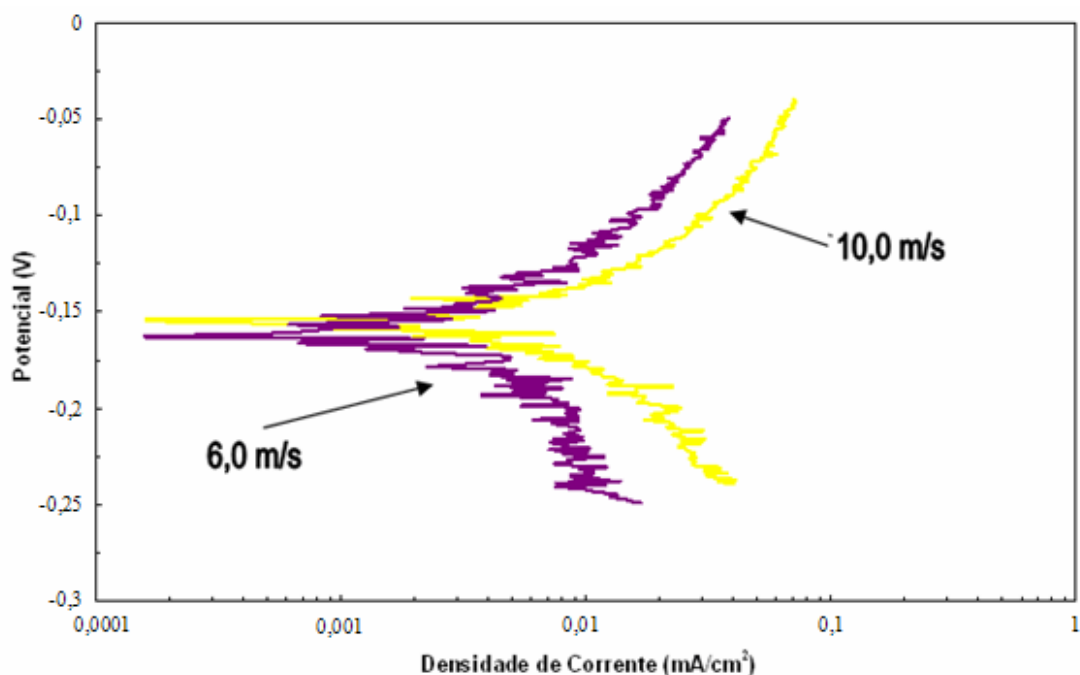


Figura 4.10 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço inoxidável 301, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, ângulo de incidência de 90°, mostrando a influência das mesmas nas taxas de corrosão.

As curvas de polarização do aço inoxidável 301 apresentam uma instabilidade maior quando comparadas às curvas do aço ABNT 8550, ou seja, apresentam oscilações que estão relacionadas à não formação do filme passivador durante todo ensaio devido ao impacto do fluido. Nesta figura, também pode ser observada a densidade de corrente limite, que para a velocidade de 6,0 m/s está em torno de 0,01 mA/cm<sup>2</sup> enquanto para a velocidade de 10,0 m/s a densidade de corrente limite cerca de 2 vezes maior.

As curvas de polarização da figura 4.11, mostram que as diferentes microestruturas do aço ABNT 8550 não apresentaram diferenças significativas, assim como também foi verificado por Silva (2008). Estas diferenças pouco significativas nos resultados se repetiram tanto para amostras com face de ensaio com diâmetro de 12,0 mm como para amostras com 27,0 mm de diâmetro.

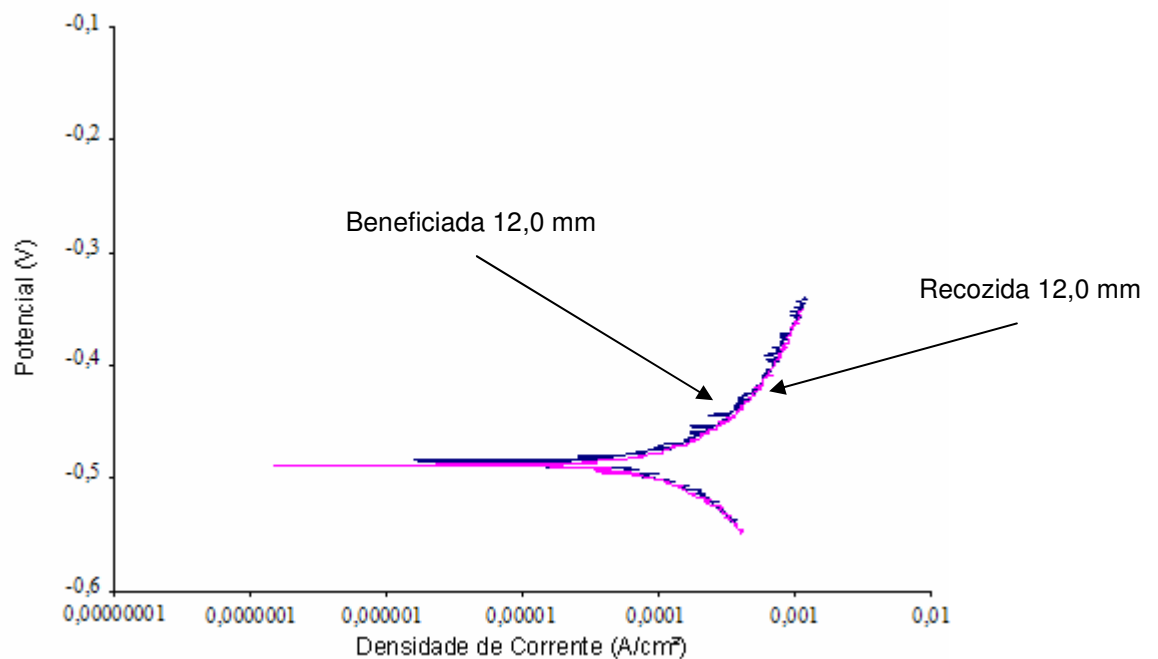


Figura 4.11 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço ABNT 8550 recozido e beneficiado, com face de ensaio de 12 mm de diâmetro, sob jato corrosivo a velocidade de 6,0 m/s, ângulo de incidência de 90°, mostrando o comportamento corrosivo das diferentes microestruturas.

A influência da variação do diâmetro, da face de ensaio, na corrosão também foi analisada como mostrado na figura 4.12. Pode-se observar o comportamento das

diferentes amostras do aço ABNT 8550 nos ensaios de corrosão, ou seja, analisar o comportamento das curvas de polarização em função do diâmetro da face de ensaio. As amostras com diâmetro de 27,0 mm apresentam uma menor densidade de corrente, e conseqüentemente uma menor taxa de corrosão.

A influência do escoamento, através da tensão de cisalhamento, na região turbulenta, causa uma aceleração da corrosão devido ao escoamento. Corrosão acelerada por escoamento é definida neste trabalho como “o resultado do efeito da turbulência devido ao escoamento de um fluido que não contém partículas sólidas em suficiente concentração e/ou tamanho para impingir a superfície do metal” (Efird, 2000).

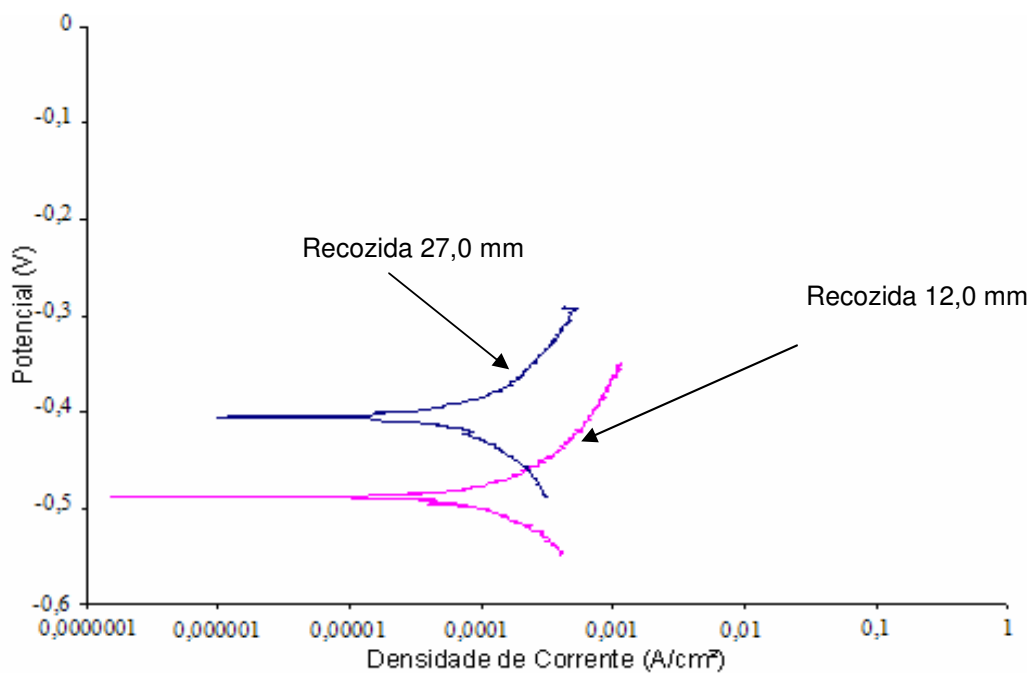


Figura 4.12 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço 8550 recozido sob jato corrosivo a velocidade de 6,0 m/s, ângulo de incidência de 90°, mostrando a influência do diâmetro da área de ensaio na taxa de corrosão.

Apesar disto quando se diminui o diâmetro da amostra ocorre um aumento da densidade de corrente anódica, pois a região central desta amostra se torna mais anódica aumentando a taxa de corrosão.

A amostra maior fica mais nobre que a menor, sugerindo assim que a parte central da amostra maior fica protegida catodicamente pela parte externa. Os resultados encontrados nos ensaios de interação galvânica (tópico 4.1) suportam esta afirmação.

A figura 4.13 mostra a comparação das curvas de polarização para os aços ABNT 8550 e inoxidável 301, onde o aço inoxidável apresenta um potencial menos eletronegativo e também uma menor densidade de corrente, ou seja, uma maior resistência à corrosão. Confirmando assim a maior resistência dos aços inoxidáveis ao fenômeno da corrosão, quando comparado aos aços carbonos expostos a este tipo de meio corrosivo.

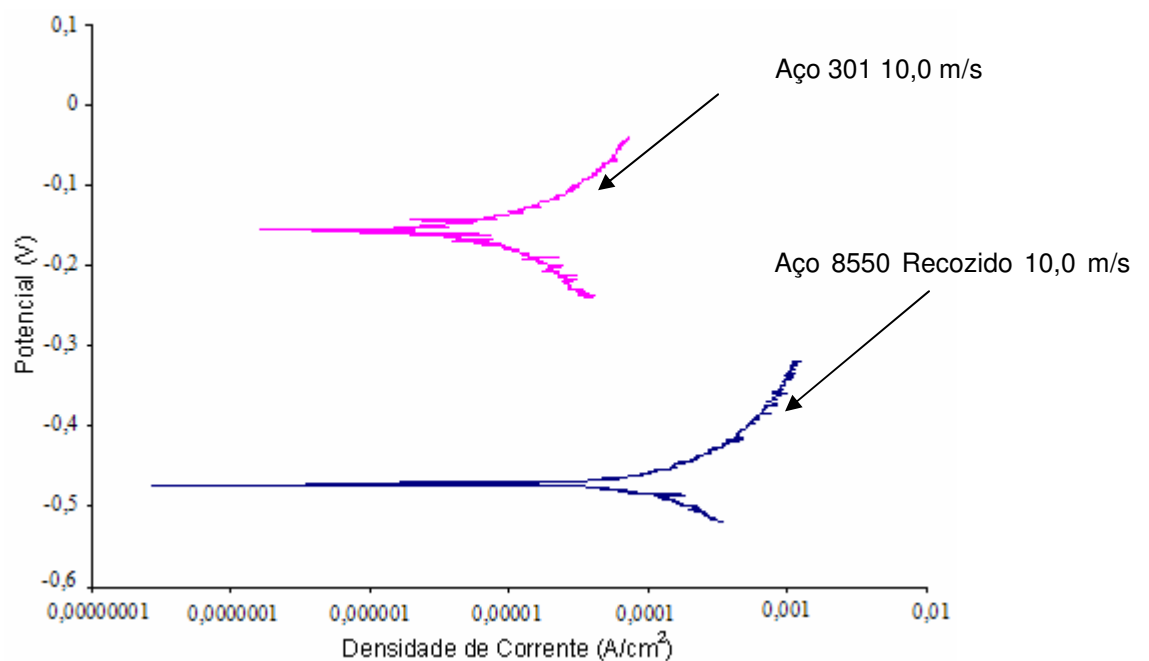


Figura 4.13 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço ABNT 8550 e inoxidável 301 sob jato corrosivo a velocidade de 10,0 m/s, ângulo de incidência de 90°, comparando o comportamento dos dois materiais.

#### 4.4 ENSAIOS DE EROSÃO PURA

Os resultados encontrados nos ensaios de erosão pura serão apresentados e discutidos neste tópico. Durante a realização dos testes, buscou-se observar a

influência da velocidade, do ângulo de incidência e da microestrutura, na taxa de erosão. Esta influência da velocidade na taxa de erosão nos aços ABNT 8550 recozido e inoxidável 301 é mostrada na figura 4.14. Pode-se observar que o aumento da velocidade provoca um aumento significativo da taxa de erosão. A variação da velocidade tem influência direta na variação da taxa média de desgaste, conforme mostrado.

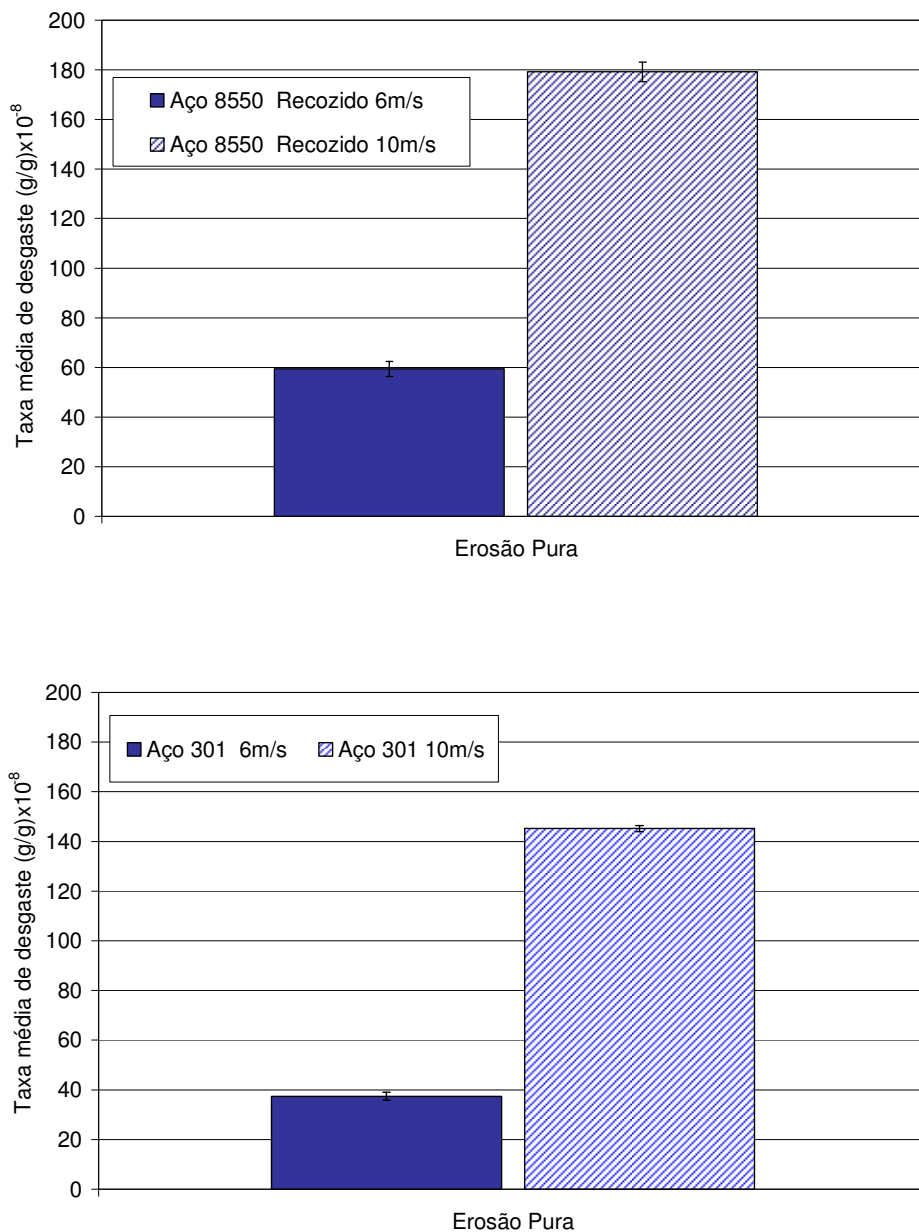


Figura 4.14 – Comparação da variação da taxa média de desgaste com o aumento da velocidade nos aços ABNT 8550 e inoxidável 301, sob jato erosivo com concentração em peso de 6,0% e ângulo de incidência de 90°. Aço 8550 com face com 12,0 mm de diâmetro.

A comparação, da taxa média de erosão, entre os aços ABNT 8550 e inoxidável 301 está demonstrada na figura 4.15. O aço inoxidável 301 apresentou uma maior resistência ao desgaste, quando comparado ao aço ABNT 8550.

Este comportamento do aço inoxidável 301 pode ser explicado pelo menor coeficiente de encruamento, cerca de 20%, apresentado por este em relação ao aço ABNT 8550 (Callegari, 2006). Deste modo, o aço 301 encruaria mais lentamente e uma camada de material encruado seria a responsável por esta menor perda de massa.

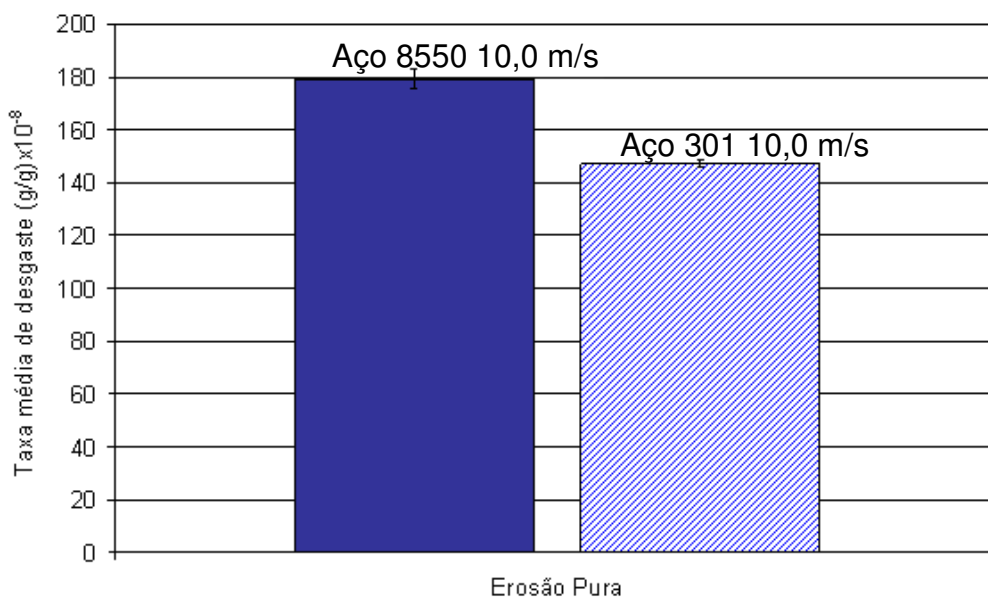


Figura 4.15 - Comparação da taxa média de desgaste nos aços ABNT 8550 e inoxidável 301, sob jato erosivo, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, na velocidade de 10,0 m/s, concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo incidência de 90°.

Lopez e colaboradores (2005) encontraram evidências da formação de plaquetas encruadas em amostras de aços inoxidável 304 e 420 ensaiadas a 8,5 m/s, o que dá suporte à hipótese de que o desgaste erosivo em materiais dúcteis sob impacto normal (90°) resulta de um efeito acumulativo, uma camada de material encruado é removida quando uma deformação crítica é alcançada (Hutchings, 1992).

Uma segunda hipótese para o resultado obtido seria a uma possível relação entre a menor taxa de desgaste em erosão e erosão-corrosão do aço 301 em comparação com o aço 8550 e a taxa de repassivação da liga inoxidável e de maiores

propriedades protetoras do filme de óxido em soluções escoando, já que ambas as soluções contém oxigênio dissolvido. É sabido que formadores de filmes passivos de óxidos tais como ligas a base de níquel e aços inoxidáveis são susceptíveis à corrosão por pites em água do mar estagnada e em baixa velocidade, mas apresentam bom desempenho em superfícies expostas a velocidades intermediárias e altas (Roberge, 2004). A variação da velocidade também afeta a perda de massa acumulada conforme pode ser observado na figura 4.16. Pode-se observar que assim como Silva (2008) as curvas também apresentam um comportamento linear, já que os índices de correlação apresentaram valores superiores a 0,99.

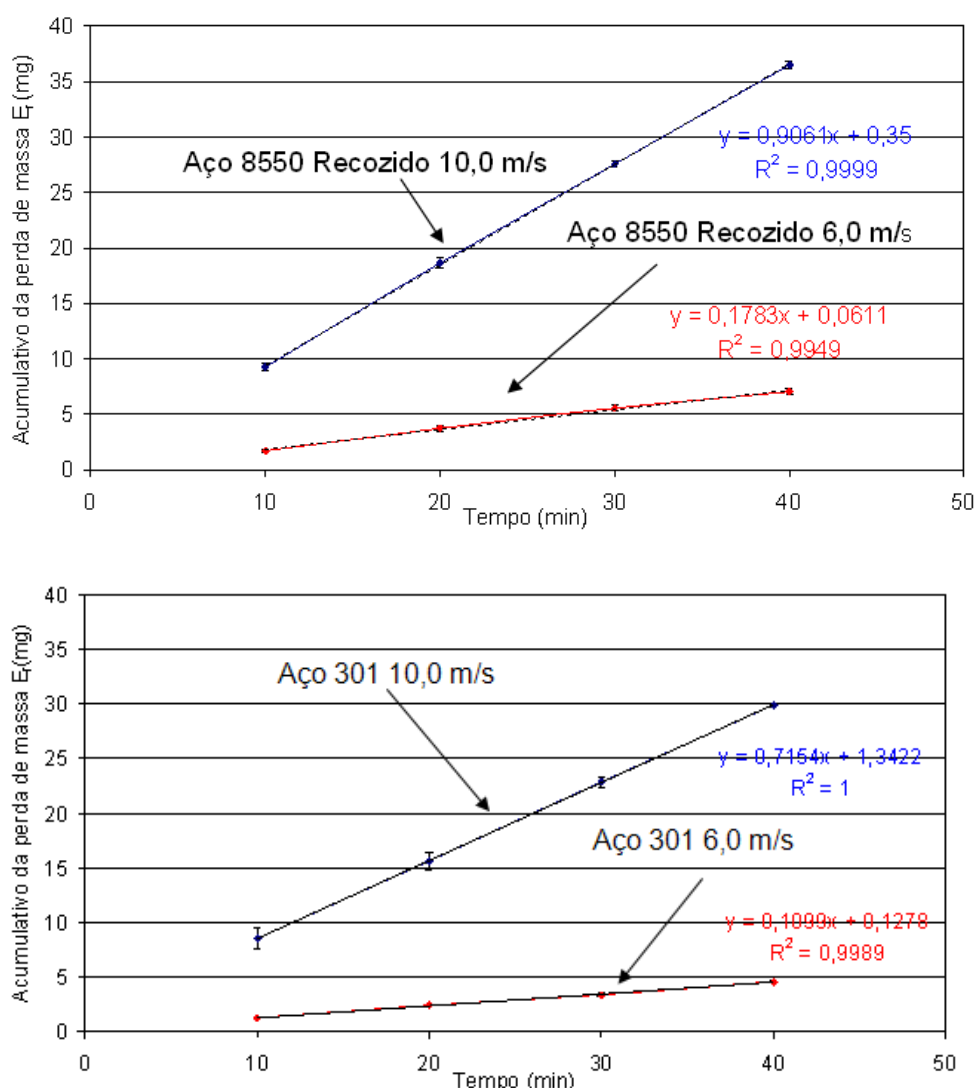


Figura 4.16 - Variação da perda de massa acumulada com aumento da velocidade do jato, nos aços ABNT 8550 e inoxidável 301, sob jato erosivo com concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo incidência de 90°.

Esta influência da velocidade na taxa de erosão acentua-se para impactos em incidência oblíqua, já que esse material apresenta características dúcteis. Devido ao mecanismo de remoção do material, acredita-se que a incidência normal seja menos influenciada pelo aumento da velocidade.

Velocidade e ângulo de impacto têm sido reconhecidos como dois parâmetros que visivelmente influenciam na taxa de desgaste e na degradação da superfície nos tribosistemas que sofrem erosão e erosão-corrosão (Lopez, 2005).

A figura 4.17 mostra o comportamento da taxa de desgaste nos testes de erosão pura realizados neste trabalho, no aço ABNT 8550, nas velocidades de 6,0; 6,6; 7,0; 10,0 e 15,0 m/s, concentração em peso de 6,0 % e compara o comportamento destas para os ângulos de 30 e 90°. Os pontos da curva referentes à velocidade de 15 m/s foram retirados de Silva (2008). Como pode ser observado o ângulo de incidência rasante apresenta uma maior taxa de desgaste quando comparado ao ângulo normal. A erosão de materiais dúcteis depende fortemente do ângulo de impacto e tipicamente apresenta as maiores taxas de erosão entre 20° e 30° (Finnie, 1995).

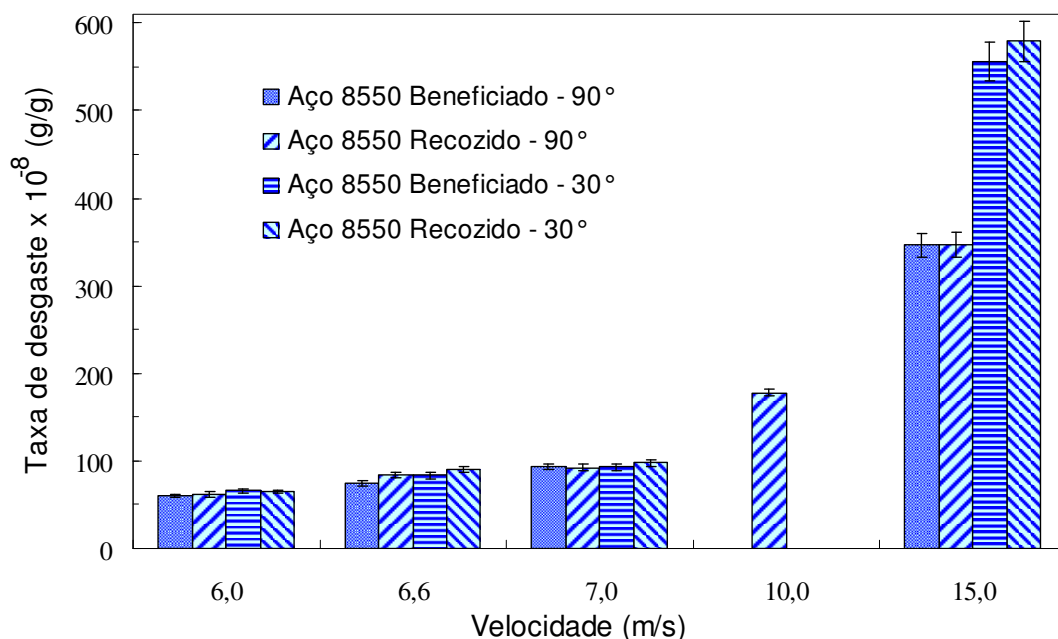


Figura 4.17 - Taxa média de desgaste em função da velocidade de impacto, concentração média de 6,0% (peso) em amostras do aço ABNT 8550 beneficiado e recozido para ângulos de incidência de 30° e 90°.

Este maior desgaste em ângulo rasante está relacionado com os mecanismos de desgaste, que segundo Hutchings (1992) são o sulcamento, corte e a deformação plástica.

A figura 4.18 mostra o comportamento das diferentes microestruturas em relação ao desgaste durante os testes de erosão pura. As amostras de aço ABNT 8550 recozidas e beneficiadas tiveram um comportamento estatisticamente igual, em relação à taxa média de desgaste.

Os testes mostraram não haver diferença estatística apesar da microestrutura martensítica ter maior dureza que a microestrutura ferrítica-perlítica e de alguns modelos de erosão preverem taxas de desgaste inversamente proporcionais à dureza do material (Silva, 2008).

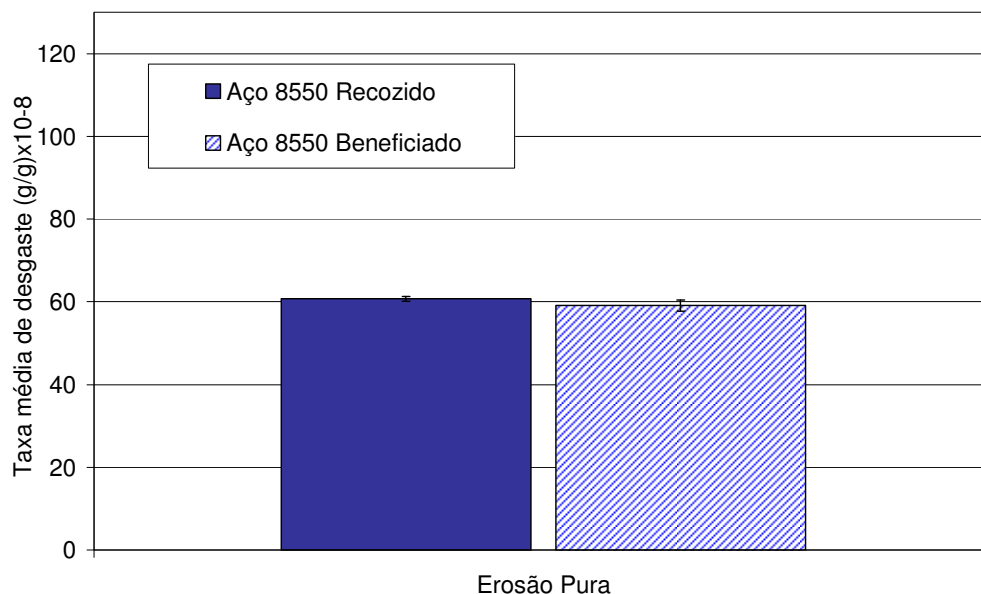


Figura 4.18 - Taxa média de desgaste no aço ABNT 8550, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, sob jato erosivo na velocidade de 6,0 m/s, concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo de incidência de 90°.

Segundo (Hutchings, 1992), o endurecimento por tratamento térmico nem sempre resulta em mudanças significativas na resistência à erosão, principalmente, quando a incidência é normal à superfície erodida. Uma das explicações para isso é que o

impacto localizado das partículas encrua o material, alterando significativamente a sua dureza.

Qualquer diferença de dureza, previamente existente, não tem efeito frente a estas condições. As amostras beneficiadas e recozidas apresentaram segundo Silva (2008) dureza igual a 308HV30 e 188HV30 respectivamente. Além disto, estatisticamente, não existem diferenças na taxa média de desgaste entre a microestrutura ferrítica-perlítica, obtida pelo recozimento, e a martensita revenida obtida por têmpera e revenido (Santa Anna *et al.*, 2008).

Portanto mecanismos metalúrgicos de aumento da resistência mecânica, tais como: endurecimento por precipitação, por solução sólida e por redução do tamanho do grão, resultarem em pouca influência na taxa de erosão. Isto é muito mais evidente na erosão com impacto das partículas erosivas em ângulos normais que em ângulos rasos, quando prevalecem os mecanismos de remoção de material por corte ou sulcamento (Wang, 1986).

Utilizando as equações 2.6 e 2.7, foi possível determinar o valor do expoente “n” da velocidade de impacto e, também, o valor do coeficiente adimensional de desgaste “K” (equação. 2.7). Foi encontrado para 30° de incidência, um expoente n médio igual a 2,3 para ambas as condições de tratamento térmico. Já o coeficiente de desgaste encontrado para a amostra temperada e revenida é de  $7,93 \times 10^{-5}$  e para a recozida é de  $4,77 \times 10^{-5}$ , Figura 4.19, dentro da faixa citada na literatura (Bhushan, 2002), que varia entre de  $10^{-5}$  e  $10^{-1}$ .

O coeficiente adimensional de desgaste “K” é uma constante que engloba os efeitos de algumas variáveis, tais como: densidade do material, forma das partículas erosivas e ângulo de incidência. O valor de “K” leva em consideração a taxa de desgaste (g/g), a densidade e a dureza do material e representa, basicamente, a eficiência do processo de remoção de material. Nota-se ainda, que a amostra recozida apresenta uma maior eficiência em relação ao desgaste. Apesar da sua menor dureza, a taxa de desgaste (g/g) é a mesma da microestrutura revenida, de maior dureza.

A constante “n” dependente principalmente do tipo de material e do ângulo de incidência. Todavia, as microestruturas ferrítica-perlítica e martensita revenida do

aço ANT 8850 apresentaram o mesmo valor. A taxa de desgaste foi praticamente a mesma para estas duas microestruturas, justificando, assim, este resultado. A partir da linha de tendência obtida para os dados médios de taxa de desgaste foram obtidos os valores de “n” e ”K”. Os valores médios de “n” encontrados para o ângulo de 30° foram de  $2,34 \pm 0,03$ , como mencionado acima. Para a incidência normal “n” foi fixado no valor dois conforme a equação 2.6

A Figura 4.20 mostra que quando o impacto é normal os valores encontrados para K são igualmente 1,5 vezes maiores para ambas as microestruturas, para “n” fixo igual a 2. Isto se deve ao fator  $f(\theta)$ , equação 2.7, que expressa a dependência com o ângulo de incidência. Nota-se um efeito maior da velocidade de impacto na incidência oblíqua, decorrente do comportamento dúctil deste material. Acredita-se, que na incidência normal, o aumento da velocidade tem uma menor influência no tipo de mecanismo de remoção de material. Os valores encontrados estão dentro da faixa especificada na literatura. No caso de materiais com comportamento dúctil, o expoente da velocidade pode variar entre 2 a 2,5, dependendo do ângulo de incidência (Stachowiak e Batchelor, 2001). Para materiais com comportamento frágil este valor pode chegar até 3.

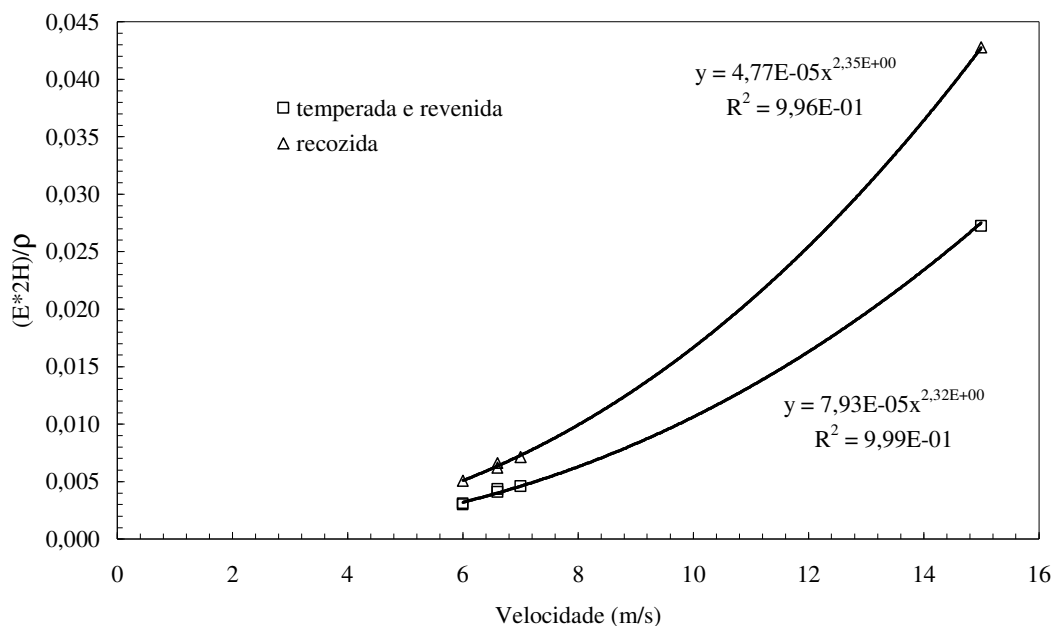


Figura 4.19 - Taxa de desgaste normalizada pela dureza em função da velocidade para concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 30°.

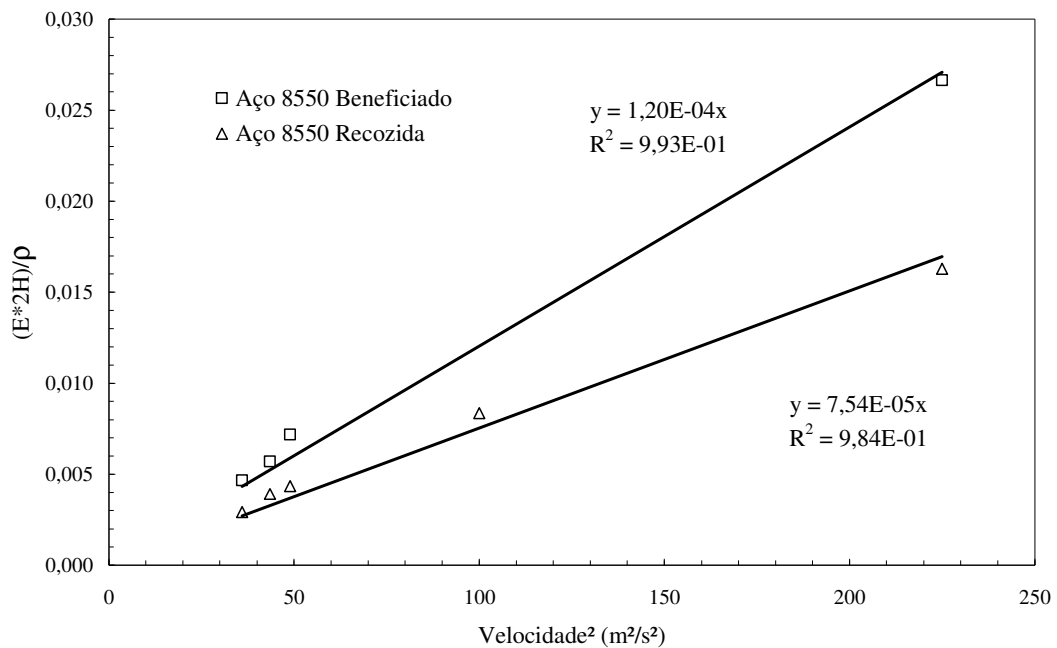


Figura 4.20 - Taxa de desgaste normalizada pela dureza em função da velocidade para concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

Considerando os valores de “K” e “n” calculados, uma velocidade de impacto de 66 m/s e um ângulo de incidência 30°, a taxa de desgaste (g/g) do aço ABNT 8550 temperado e revenido foi estimada, utilizando-se o modelo de erosão da (equação 2.7). O valor calculado foi  $0,18 \times 10^{-3}$  (g/g), muito próximo de  $0,19 \times 10^{-3}$  (g/g), citado por Hutchings (1992), para a erosão de aços com teor de carbono entre 0,06%C a 1,4%C, em uma velocidade de impacto de 66 m/s, areia com granulometria entre 350 e 500  $\mu m$  e ângulo de incidência 45°. A concordância entre estes valores permite estimar a taxa de erosão para diferentes valores de velocidade.

#### 4.5 ENSAIOS DE EROSÃO-CORROSÃO

Os resultados encontrados nos ensaios de erosão-corrosão serão expostos e discutidos neste tópico. Além de também buscar observar a influência da velocidade, do diâmetro da área ensaiada e da microestrutura, na taxa de desgaste, estes ensaios buscaram verificar a presença do efeito sinérgico entre a erosão e a corrosão.

Os ensaios feitos com velocidade de 6m/s, concentração de areia de 6% em peso e ângulo reto (90°), foram também comparados com os ensaios realizados por Silva (2008) com os mesmos parâmetros, com a exceção do ângulo que foi de 30°.

Os resultados encontrados para os testes feitos em ângulo reto apresentaram uma taxa de desgaste um pouco menor que os testes feitos a um ângulo de 30°, conforme mostrado na figura 4.21 a seguir.

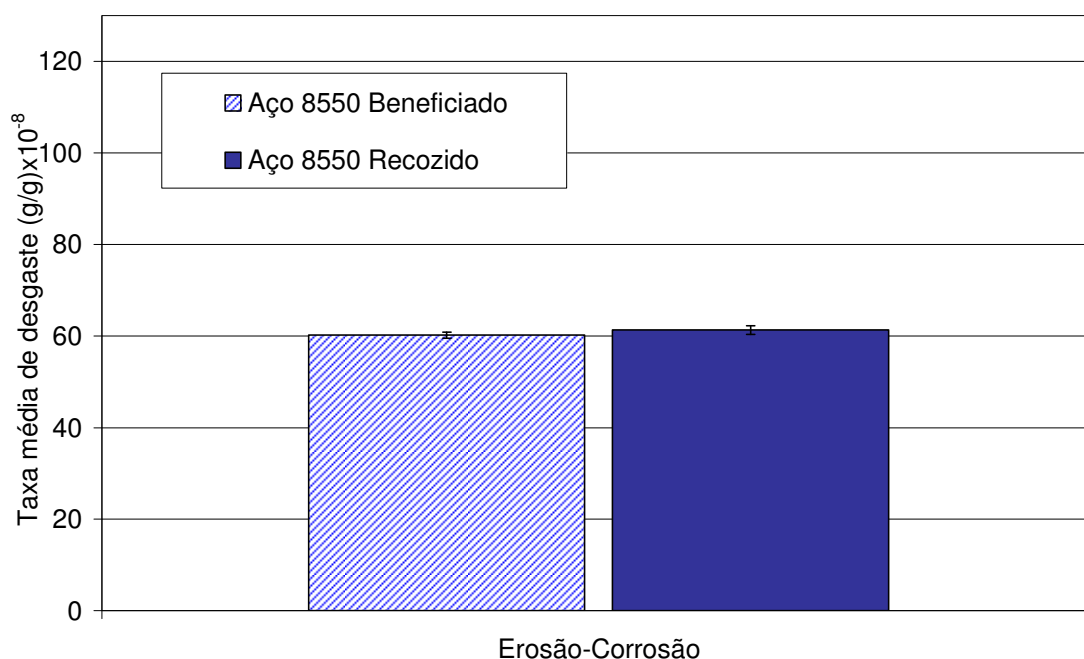


Figura 4.21 – Figura mostrando a taxa média de desgaste no aço ABNT 8550, sob jato corrosivo-erosivo, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, na velocidade de 6,0 m/s, concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo de incidência de 90°.

Os ensaios de erosão-corrosão também foram comparados com os de erosão pura, como mostrado na 4.22. O gráfico mostra que não há diferença estatística entre os ensaios de erosão-corrosão e os de erosão pura, logo este resultado sugere que, para as condições testadas não houve sinergia.

Silva (2008) encontrou para parâmetros muito parecidos com os utilizados neste trabalho, um predomínio da erosão sobre a corrosão, ou seja, os testes não apresentaram o efeito sinérgico.

Segundo (Stack e Pungwiwat, 2004) uma taxa de erosão muito superior à taxa de corrosão pode resultar em um sistema com domínio da erosão e minimizar qualquer efeito sinérgico. Este domínio depende de variáveis, tais como: velocidade de impacto, ângulo de incidência, concentração e tamanho de partículas erosivas, tipo de fluido (pH, viscosidade, temperatura, potencial eletroquímico), dentre outros (Silva, 2008).

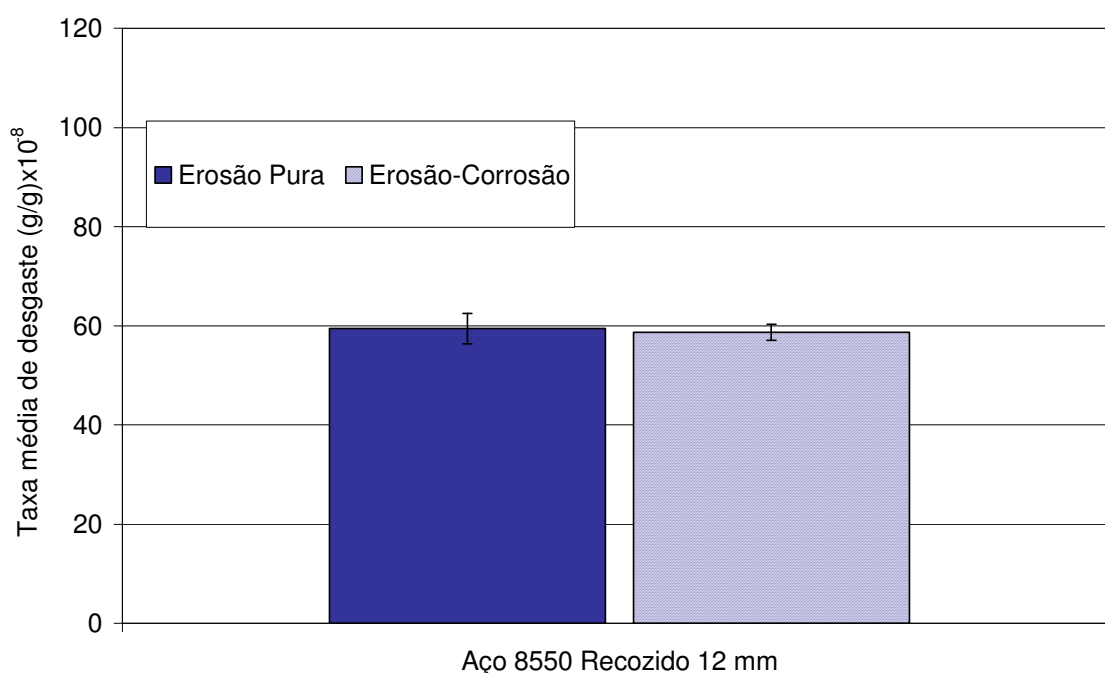


Figura 4.22 – Figura comparando a taxa média de desgaste no Aço ABNT 8550, de amostras submetidas aos ensaios de erosão pura e erosão-corrosão. Amostras com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, submetidas ao jato na velocidade de 6,0 m/s, concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo de incidência de 90°.

Esta igualdade estatística entre os testes de erosão pura e erosão-corrosão também foram observadas nas amostras do aço ABNT 8550 com face de ensaio com diâmetro de 27,0 mm, e em amostras do aço inoxidável 301.

A variação da velocidade e sua influência sobre a taxa de desgaste foram mais uma vez estudadas, e a figura 4.23 mostra que assim como nos ensaios de erosão pura o aumento da velocidade também provocou um aumento substancial na taxa de desgaste das amostras sob jato corrosivo-erosivo.

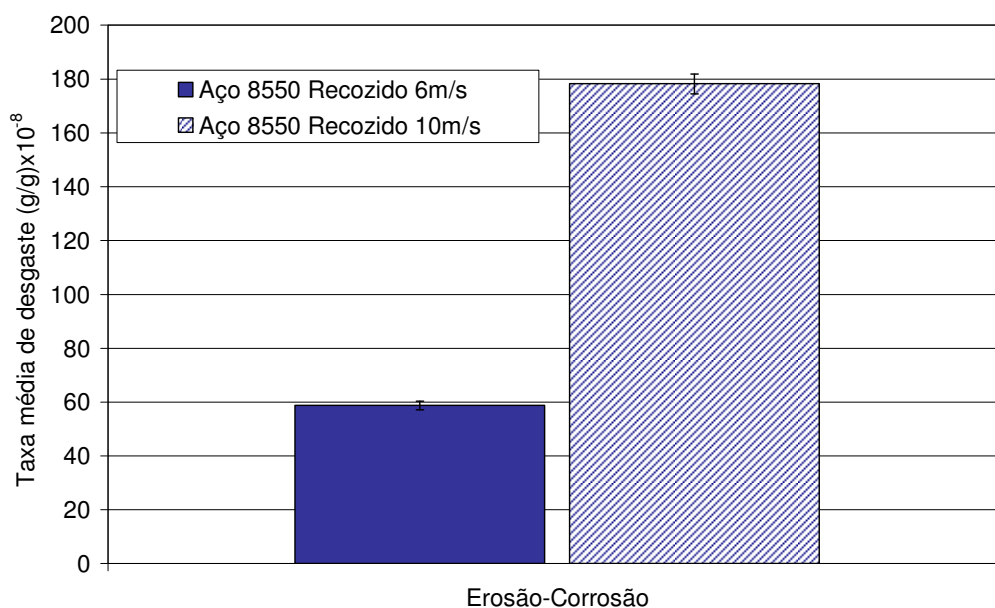


Figura 4.23 - Variação da taxa média de desgaste, com o aumento da velocidade do jato corrosivo-erosivo, no aço ABNT 8550, recozido, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, concentração média de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90.

A comparação, da taxa média de erosão, entre os aços ABNT 8550 e inoxidável 301 está demonstrada na figura 4.24. Assim como no ensaio de erosão pura os resultados mostraram que o aço inoxidável 301 apresentou uma maior resistência ao desgaste, quando comparado ao aço ABNT 8550.

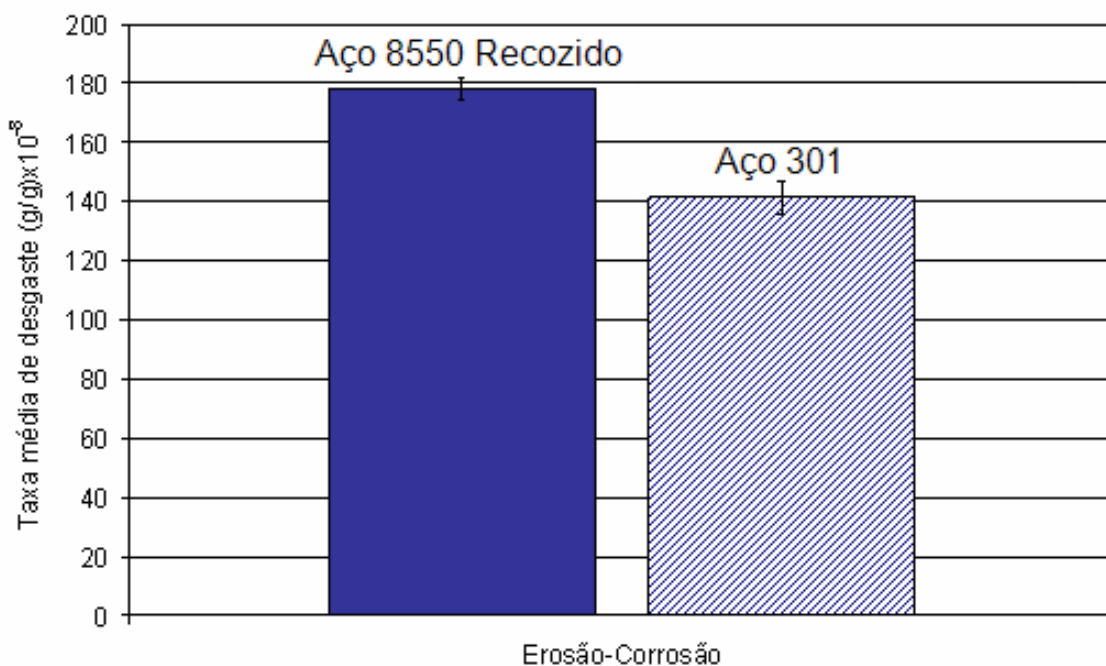


Figura 4.24 - Comparação da taxa média de desgaste nos aços ABNT 8550 e inoxidável 301, sob jato corrosivo-erosivo, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, na velocidade de 10,0 m/s, concentração em peso de areia de 6,0% e ângulo incidência de 90°.

Foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) as amostras do aço inoxidável 301 submetidas aos ensaios de erosão-corrosão, nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, erodidas num tempo de 40 minutos, como mostrado nas figuras 4.25 e 4.26. A topografia da amostra submetida ao jato com velocidade de 10,0 m/s apresenta uma microestrutura mais deformada plasticamente que a amostra sob jato a velocidade de 6,0 m/s.

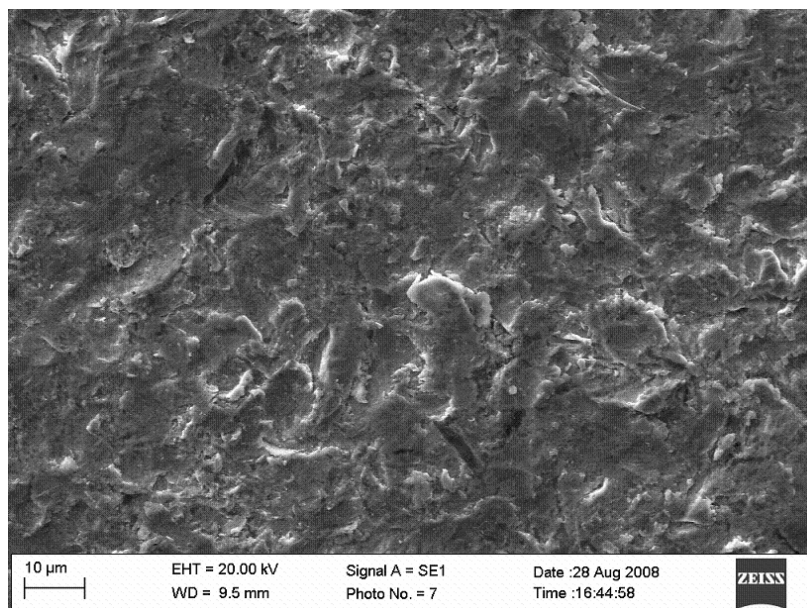


Figura 4.25 – Topografia do aço inoxidável 301 após o ensaio de erosão-corrosão, concentração média de 6,0% em peso, com ângulo de incidência de 90°. Amostra com face de ensaio com 12,0 mm de diâmetro. Velocidade de impingimento de 6,0 m/s.

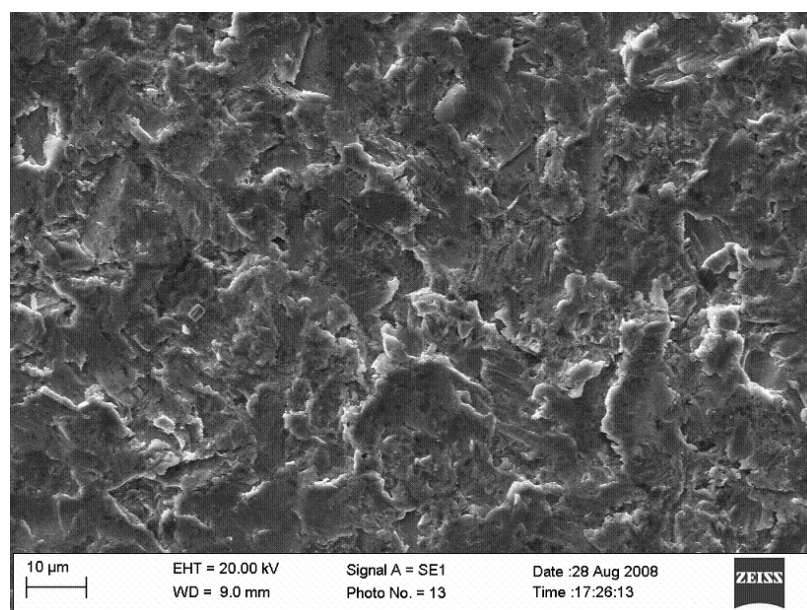


Figura 4.26 – Topografia do aço inoxidável 301 após o ensaio de erosão-corrosão, concentração média de 6,0% em peso, com ângulo de incidência de 90°. Amostra com face de ensaio com 12,0 mm de diâmetro. Velocidade de impingimento de 10,0 m/s.

Durante os ensaios de erosão-corrosão o potencial de circuito aberto foi medido. Esta medida foi feita tanto nos ensaios que tinham como objetivo observar a influência da erosão na corrosão, quanto nos ensaios onde se observou a influência da corrosão na erosão.

Em relação aos ensaios que tinham o objetivo de se observar a influência da erosão na corrosão, a medida do potencial foi feita enquanto se aguardava a estabilização do potencial de circuito aberto para posterior varredura do potencial a fim de gerar as curvas de polarização e teve a duração de dez minutos. A medida do potencial, conforme mostrado na figura 4.27, durante os dez minutos que precediam ao início da geração das curvas de polarização foi feita com objetivo de se verificar a reprodutibilidade do teste, confirmada conforme a figura a seguir.

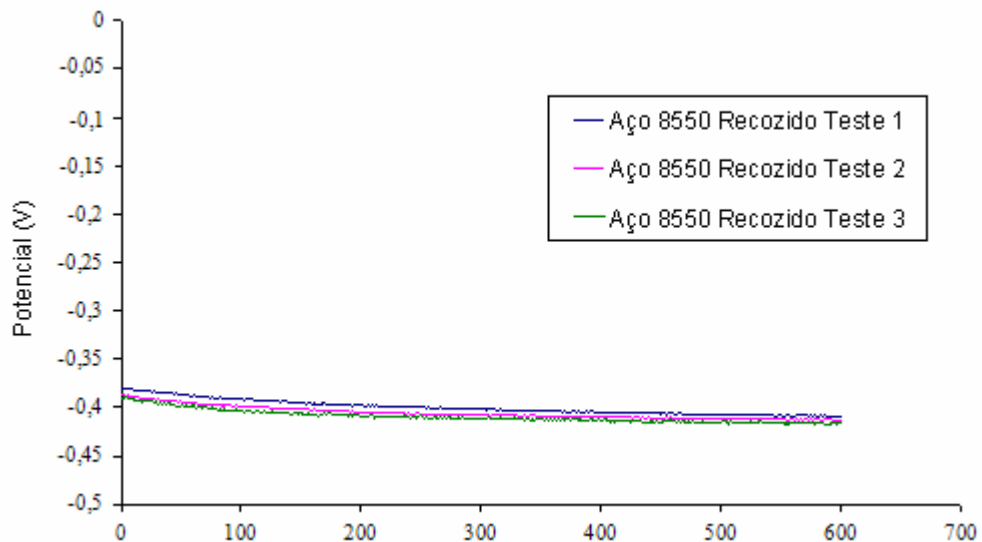


Figura 4.27 – Potencial de circuito aberto em amostras do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, com velocidade de 6,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°. Mostra a reprodutibilidade das medidas do potencial.

O comportamento do potencial de circuito aberto para as diferentes microestruturas também foi observado e não mostrou diferenças estatísticas, conforme a figura 4.28 seguir.

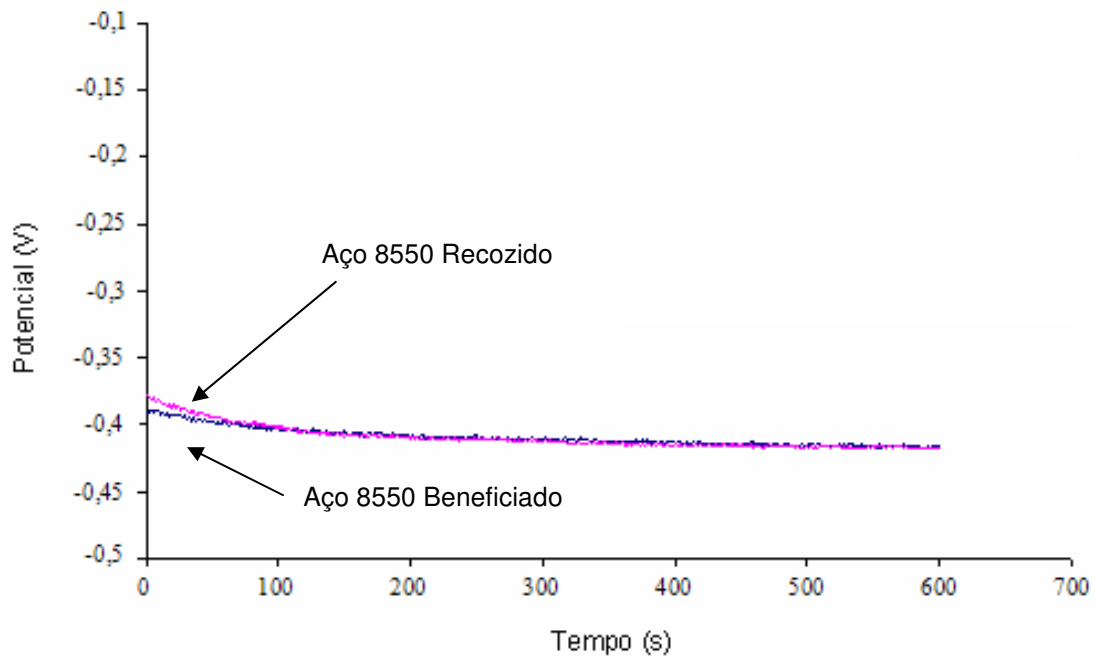


Figura 4.28 – Potencial de circuito aberto em amostras recozidas e beneficiadas do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, com velocidade de 6,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

A figura 4.29 mostra o potencial de circuito aberto, durante os ensaios que tinham o objetivo de observar a influência da erosão na corrosão. Estes ensaios tiveram duração de 40 minutos sendo interrompidos a cada 10 minutos. O objetivo da observação do potencial de circuito aberto durante estes ensaios foi observar a reprodutibilidade dos mesmos.

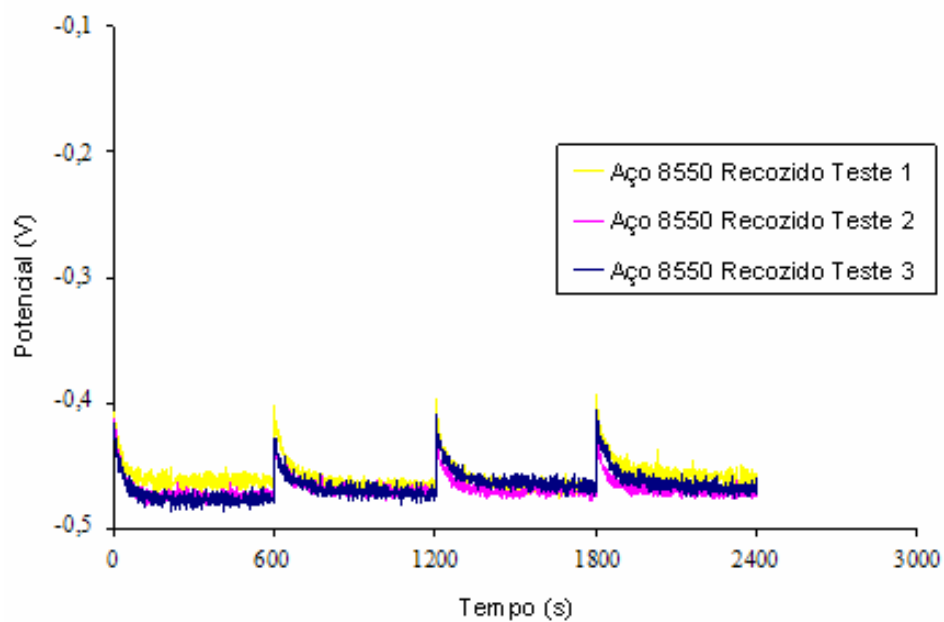


Figura 4.29 – Potencial de circuito aberto em amostras do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, com velocidade de 6,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°. Mostra a reprodutibilidade das medidas.

A influência da velocidade no potencial de circuito aberto está mostrada na figura 4.30 a seguir. O aumento da velocidade torna o potencial mais eletronegativo assim como na corrosão pura. O efeito da adição de areia está no deslocamento do potencial para valores abaixo de 0,40 V (Ag/AgCl).

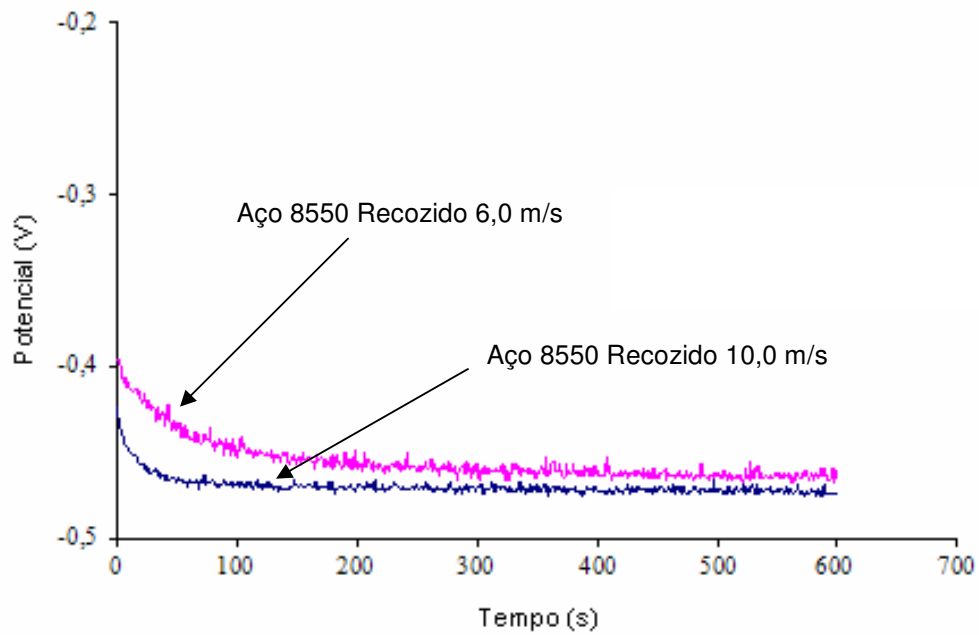


Figura 4.30 – Comparação dos potenciais de circuito aberto em amostras do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

A influência do ângulo no potencial de circuito aberto também foi observada. Os testes realizados no aço ABNT 8550, a velocidade de 6,0 m/s, concentração em peso de 6% e ângulo de 90°, conforme mostra a figura 4.31, quando comparados com os ensaios realizados por Silva (2008) com a mesma velocidade, concentração mas ângulo de 30°, mostrou um potencial de circuito aberto menos eletronegativo que o potencial encontrado por Silva (2008), que foi entre -0,400 e -0,450 V.

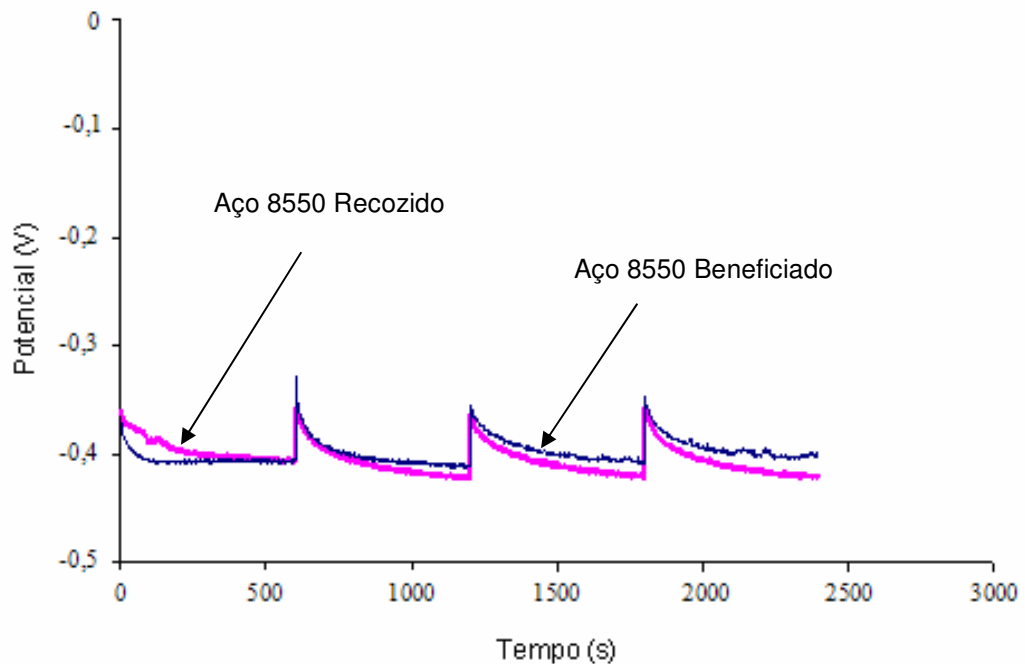


Figura 4.31 – Potencial de circuito aberto em amostras do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, com velocidade de 6,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

Segundo Silva (2008) a explicação para a influência do ângulo de incidência na variação do potencial de circuito aberto pode ser relacionada à presença de um efeito galvânico entre a região de incidência direta do jato e a região periférica da amostra.

A variação do potencial de circuito aberto com a velocidade também foi observada, conforme mostrado na figura 4.32. É possível observar que o aumento da velocidade provoca um deslocamento no potencial de circuito aberto, e deixa este mais eletronegativo.

Tan e colaboradores (2005) sugerem que este comportamento esteja relacionado com o transporte de massa sobre a superfície erodida, que sofre um aumento com o aumento da velocidade.

Além disso, tem-se um aumento da energia cinética das partículas, que pode resultar em aumento da temperatura na superfície, bem como alterações da topografia.

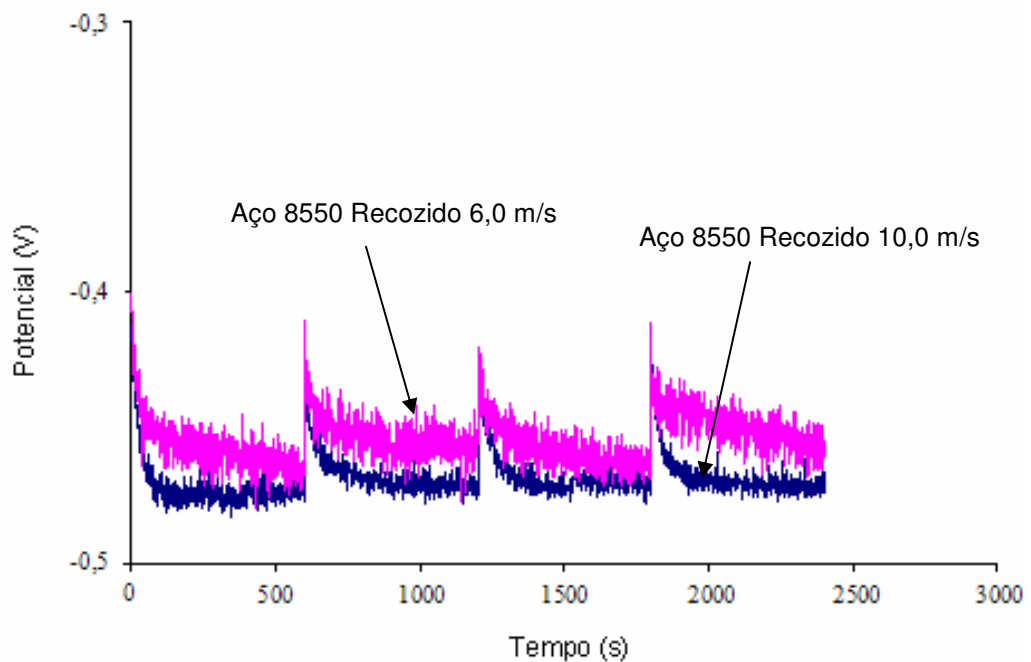


Figura 4.32 – Comparação dos potenciais de circuito aberto em amostras do aço ABNT 8550, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo, nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90°.

Durante os ensaios de erosão-corrosão também foi observado a influência da erosão na corrosão, ou seja, foram feitos ensaios, para se obter a taxa de corrosão, semelhantes aos ensaios de corrosão pura, mas com a adição de areia. A figura 4.33 mostra e compara as curvas de polarização obtidas nos ensaios de corrosão pura e nos ensaios de corrosão-erosão.

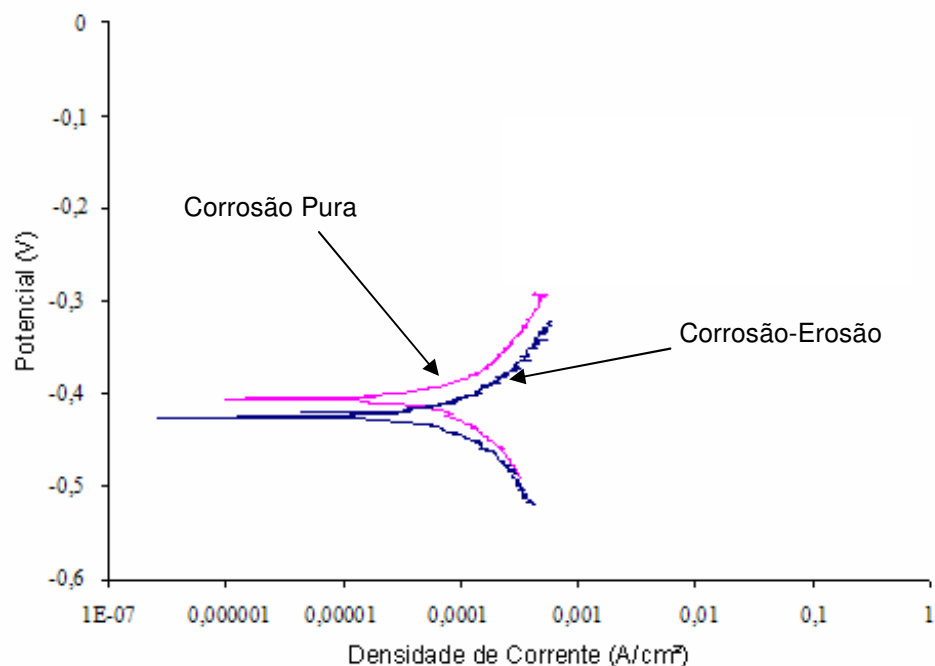


Figura 4.33 – Comparação das curvas de polarização de ensaios de corrosão pura e erosão-corrosão para o aço ABNT 8550, com face de ensaio de 27,0 mm de diâmetro, com velocidade de 6,0 m/s e ângulo de incidência de 90°.

Segundo Neville *et al.* (1995), a adição de areia no jato provoca a despolarização da reação anódica, resultando em uma superfície mais ativa e em uma maior densidade de corrente de corrosão.

A adição de areia no jato em aços como o ABNT 8550, que não possui camada passivadora, provoca mudanças nas propriedades eletroquímicas, as quais estão relacionadas ao efeito galvânico. Em condições de fluxo com areia, este efeito é uma ordem de grandeza maior do que aquele em condições envolvendo apenas o jato de água do mar (Hodgkiess *et al.*, 2003).

A figura 4.34 mostra a influência do jato com areia no aço inoxidável 301, e como pode ser observado houve um aumento ainda maior, em relação ao aço ABNT 8550, da densidade de corrente, com a adição de areia no jato. Isto pode ser explicado pelo fato de materiais com camada protetora, como o aço inoxidável 301, quando submetidos à erosão-corrosão terem a camada passivadora destruída, resultando em uma mudança do potencial de circuito aberto, que se torna mais eletronegativo e conseqüentemente o material mais ativo.

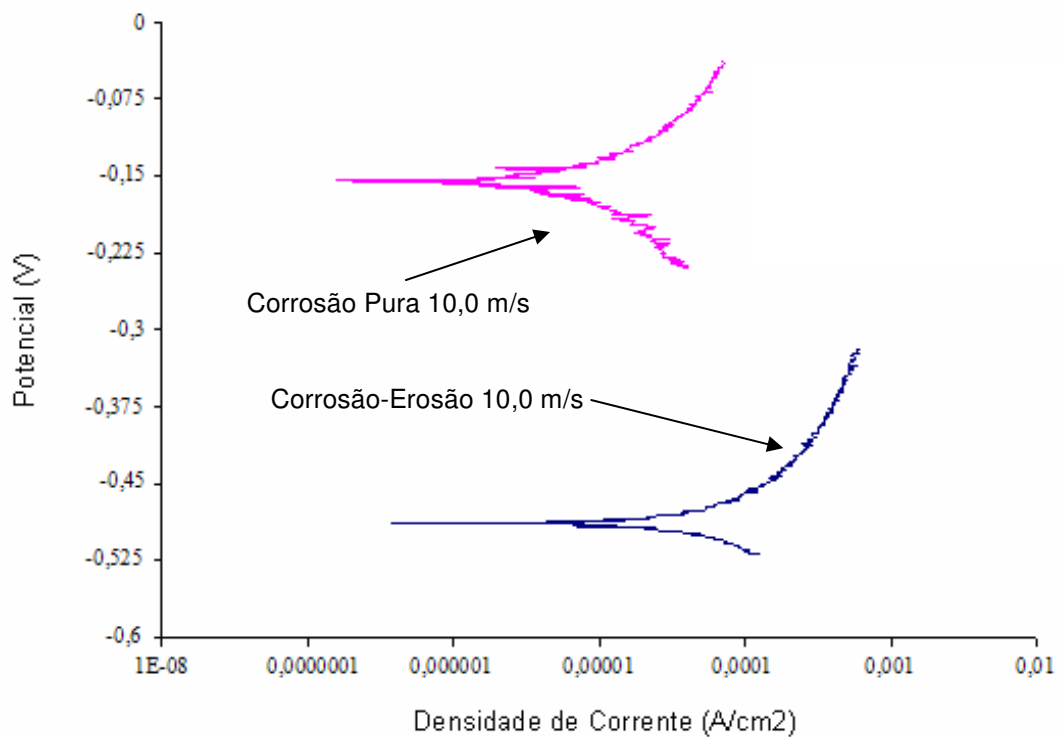


Figura 4.34 – Comparação das curvas de polarização de ensaios de corrosão pura e erosão-corrosão para o aço inoxidável 301, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato com velocidade de 10,0 m/s e ângulo de incidência de 90°.

Assim como nos ensaios de corrosão pura, também foi observado o efeito da velocidade do jato corrosivo-erosivo nas curvas de polarização. A figura 4.35 mostra que mais uma vez o aumento da velocidade provocou um aumento da densidade de corrente.

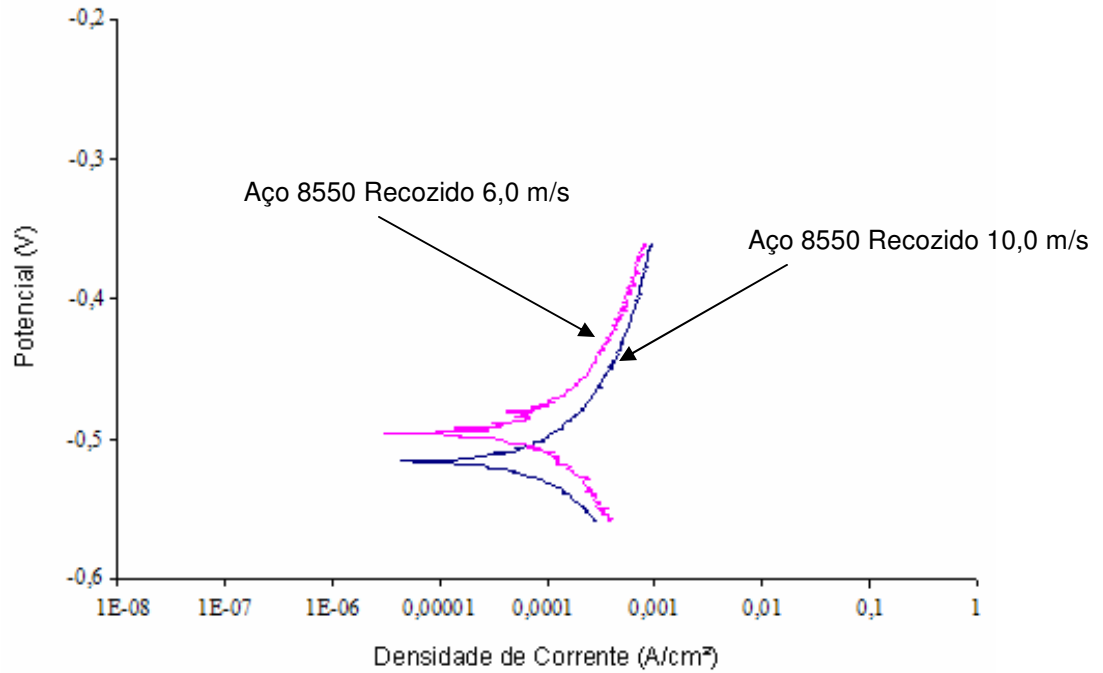


Figura 4.35 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço 8550 recozido, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90° mostrando a influência das mesmas nas taxas de corrosão.

A influência da velocidade no aço inoxidável 301, sob jato corrosivo-erosivo também foi observada, conforme mostra a figura 4.36. Como pode ser visto, a influência da velocidade do jato corrosivo-erosivo é maior para este aço, em relação ao aço ABNT 8550 e ao próprio aço inoxidável 301 sob jato corrosivo, provavelmente pelo fato deste possuir uma camada de óxido protetora que foi retirada pelo fluxo de água com areia durante o ensaio.

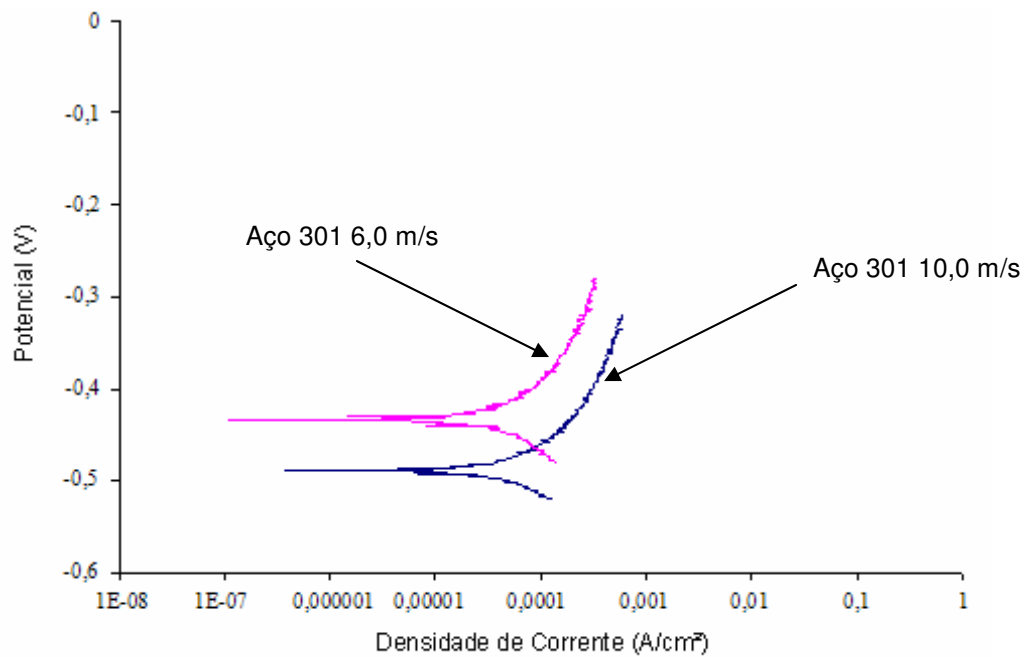


Figura 4.36 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras do aço inoxidável 301, com face de ensaio de 12,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo nas velocidades de 6,0 e 10,0 m/s, concentração de 6,0% em peso e ângulo de incidência de 90° mostrando a influência das mesmas nas taxas de corrosão.

Os comportamentos das diferentes microestruturas sob o jato corrosivo-erosivo também não apresentaram diferenças estatísticas, assim como já havia acontecido nos ensaios de corrosão pura. A figura 4.37 mostra como se comportaram as amostras recozidas e beneficiadas durante os testes de erosão-corrosão, tanto amostras com 12,0 mm de face de ensaio quanto às amostras com 27,0 mm de diâmetro.

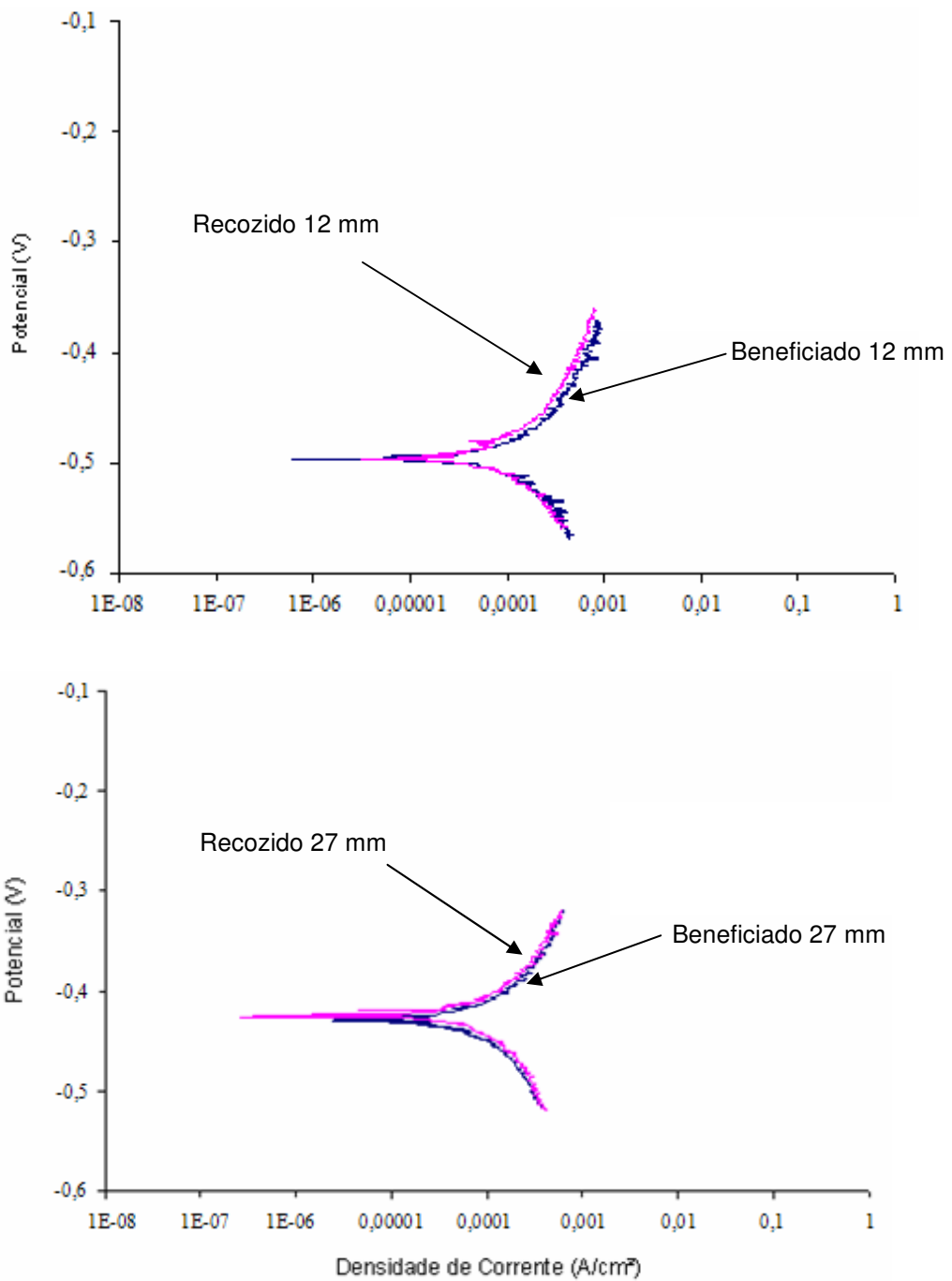


Figura 4.37 – Curvas de polarização potenciodinâmicas, obtidas em amostras beneficiadas e recozidas do aço ABNT 8550, com faces de ensaios de 12,0 mm e 27,0 mm de diâmetro, sob jato corrosivo-erosivo na velocidade de 6,0 m/s, mostrando o comportamento estatisticamente igual destas diferentes microestruturas.

## **5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES**

### **5.1 CONCLUSÕES**

As principais conclusões obtidas referente ao presente trabalho são apresentadas a seguir:

As taxas de erosão e de corrosão encontradas nos experimentos realizados, no equipamento tipo jato, para os diversos parâmetros estão de acordo com a literatura.

As taxas de erosão e corrosão sofreram influência direta da velocidade de impingimento do jato, ou seja, o aumento da velocidade levou a um aumento das taxas. Esta influência se repetiu para os diversos parâmetros e tipos de amostras testadas.

As taxas de corrosão aumentaram com a diminuição do diâmetro das amostras, devido à parte central da amostra tornar-se mais anódico, favorecendo a corrosão. As taxas de erosão, assim como já era esperado não sofreram influência da variação dos diâmetros da amostras.

As taxas de erosão e de erosão-corrosão foram estatisticamente iguais, não ocorrendo, portanto o efeito sinérgico. O regime classificado para tal situação foi o regime de erosão dominante, mesmo para os parâmetros menos severos, ou seja, velocidade de impingimento de 6,0 m/s e ângulo de incidência de 90°.

Foi observada uma variação significativa do potencial de circuito aberto ao longo do diâmetro da amostra, ou seja, apresentou a interação galvânica.

### **5.2 SUGESTÕES**

Como sugestões para os trabalhos futuros, podem-se ter:

Utilizar parâmetros ainda menos severos, a fim de se observar o efeito sinérgico.

Utilizar amostras com diâmetros ainda menores, ou seja, com mesmo diâmetro do jato a fim de se analisar somente a região de estagnação eliminando assim o efeito de diferenças de escoamento.

Fazer ensaios com maior tempo de duração a fim de se observar melhor o comportamento do potencial de circuito aberto.

Gerar curvas de polarização potenciodinâmicas com intervalos de varredura maiores a fim de melhor observar o efeito da velocidade na densidade de corrente limite.

## REFERÊNCIAS:

ASM Handbook, 2003, "Corrosion: fundamentals, testing, and protection", American Society for Metals International, vol. 13A., 1050 p.

ASTM D 1141-98, "Standard practice for the preparation of substitute ocean water", ASTM american society for testing and materials.

Bhushan, B., 1999, "Principles and applications of tribology", editora Wiley-Interscience", ISBN 0-471-59407-5, pp. 1020.

Bingley, M.S. and O'Flynn, D.J., "Examination and comparison of various erosive wear models", *Wear* 258 (2005).

Carvalho, E. B., 2004, "Corrosão-erosão de aço para tubo de revestimento em meio contendo H<sub>2</sub>S", Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 105 p.

Callegari, V.A., Ferreira, F.M., Soares Filho, B.G. Paes, M.T.P., Soares, A.B. e Franco, S.D., 2006, "Determinação de Propriedades Mecânicas Através de Ensaio de Macroindentação Instrumentada: Influência da Pressão Interna e da Topografia Superficial em Dutos", anais do 61º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro/RJ, pg. 2117-2127.

Chiaverini, V., 1990, "Aços e ferros fundidos", Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 6 ed., 576 p.

Clark, H. M. e Hartwich, R. B., 2001, "A re-examination of the particle size effect in slurry erosion", *Wear*, vol. 248, pp. 147-161.

Clark, H. M. e Wong, K. K., 1993, "A model of particle velocities and trajectories in slurry pot erosion tester", *Wear*, vol. 160, pp. 95-104.

Clark, H. M., 1991, "A comparison of the erosion rate of casing steels by sand-oil suspensions", *Wear*, vol. 151, pp. 217-230.

Efird, K. D., 2000, "Jet Impingement Testing for flow accelerated corrosion", *Corrosion*, Paper N° 52.

- Finnie, I., 1960, "Erosion of surface by solid particles" *Wear*, vol. 3, pp 87-103.
- Finnie, I., 1972, "Some observations on the erosion of ductile metals", *Wear*, vol. 19, pp. 81-90.
- Finnie, I., 1995, "Some reflections on the past and future of erosion", *Wear*, vol. 186-187, pp. 1-10.
- Franco, S. D., 1989, "Contribuição ao estudo do desgaste abrasivo de materiais polifásicos" Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, Brasil.
- Franco, S. D, Santos, K.G.; Moraes, J. O; Ribeiro, M.; Piza, M. T.; Franco, V. L. D. S., 2004, "Avaliação da resistência à corrosão-erosão de camadas aspergidas termicamente contendo WC e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>", 24<sup>o</sup> CONBRASCORR 2004, Congresso Brasileiro de Corrosão, 4<sup>o</sup> Seminário de Revestimento e Pintura, ABRACO - Associação Brasileira de Corrosão.
- Gentil, V, 1996, "Corrosão" Livros Técnicos e Científicos Editora, Terceira Edição, Rio de Janeiro.
- Girish, 2008, "Slurry erosion of ductile materials under normal impact condition", *Wear*, vol. 264, pp. 322-330.
- Gonzalez, E. R., 1998, "Eletroquímica, princípios e aplicações", Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo. Primeira edição, 220 pp.
- Hu X., Neville A.,2004, "An examination of the electrochemical characteristics of two stainless steels (UNS S32654 and UNS S31603) under liquid–solid impingement"*Wear*, vol 256, pp. 537–544.
- Hutchings, I. M., 1981, "A model for erosion of metals by spherical particles at normal incidence", *Wear*, vol. 70, pp. 269-281.
- Hutchings, I. M., 1992, "Tribology – Friction and wear of engineering materials", London, British Library, ISBN 0340 56184X.
- Lopez, D., Sánchez, C e Toro, A, 2005, "Corrosion-erosion behavior of TiN-coated stainless steels in aqueous slurries", *Wear*, vol. 258, pp. 684-692.

Lui, A. W. e Hoey, G. R., 1973, "Corrosive and erosive wear of metals in minerals slurries", *Can.Metall. Q.*, vol. 12 (2), pp. 185-190.

Neville, A., Hodgkiess, T. e Dallas, J. T., 1995, "A study o the erosion-corrosion behavior of engineering steels for marine pumping applications", *Wear*, vol. 186-187, pp. 497-507.

Neville, A., Hodgkiess, T., 1999, "Characterization of high-grade alloy behavior in severe erosion-corrosion conditions", *Wear*, vol. 233-235, pp. 596-607.

Orazem M. E., Filho, J. C. C, Tribollet B., 2001, "Application of a submerged impinging jet for corrosion studies: development of models for the impedance response"; *Electrochimica Acta* 46, pp. 3685–3698.

Roberge P, 2004 - *Erosion-Corrosion*, Ed. Nace Press, ISBN 1-57590-173-0, página 9.

Rogne, T., Solem, T. and Berget, J., 1998, "Effect of Composition and Corrosion Properties of the Metallic Matrix on the Erosion-Corrosion Behaviour of HVOF Sprayed WC-Coatings", *Proceedings of Corrosion*, p. 495.

Santa Anna, L. B., Macêdo, M. C. S., Franco, S. D., 2008, "Influência do ângulo de incidência e da velocidade de impacto na erosão", V Congresso nacional de engenharia mecânica – CONEM.

Schumacher, M., 1979, "Seawater Corrosion Handbook", NOYES DATA CORPORATION, ISBN: 0-8155-0736-4, Park Ridge, New Jersey, U.S.A.

Sefaja, J. e Malina, J., 1985, "Electrochemical aspects of steel corrosion in sea water", *Surface Technology*, vol. 26, pp. 369-380.

Silva F. J., 2008, "Erosão, corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço ABNT 8550 nitretado a plasma". Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, Brasil.

Stachowiak, G. W. e Batchelor, A. W., 2001, "Engineering tribology", Butterworth-Heinemann, 2ed., pp. 744.

Stack, M. M. e Badia, T. M. A. E., 2006, "On the construction of erosion–corrosion maps for WC/Co–Cr-based coatings in aqueous conditions", *Wear*, vol. 261, pp. 1181–1190.

Stack, M. M. e Pungwiwat, N., 2004, "Erosion-corrosion mapping of Fe in aqueous slurries: some views on a new rationale for defining the erosion-corrosion interaction", *Wear*, vol. 256, pp. 567-576.

Stack, M. M., Corlett N. e Turgoose, S., 1999a, "Some recent advances in the development of theoretical approaches for the construction of erosion-corrosion maps in aqueous conditions", *Wear*, vol. 233-235, pp. 535-541.

Stack, M. M., Corlett N. e Zhou, S., 1999b, "Impact angle effects on the transition boundaries of the aqueous erosion-corrosion map", *Wear*, vol. 225-229, pp. 190-198.

Tan, K.S., Wharton, J.A e Wood, R.J.K., 2005, "Solid particle erosion-corrosion behavior of a novel HVOF nickel aluminium bronze coating for marine applications – correlation between mass loss and electrochemical measurements", *Wear*, vol. 258, pp. 629-640.

Tschiptschin, A.P., López, D., Congote, J.P. , Cano, J.R., Toro, A., 2005, "Effect of particle velocity and impact angle on the corrosion–erosion of AISI 304 and AISI 420 stainless steels", *Wear*, vol. 259, pp. 118–124.

Wang, Y.S., Chu, P.K., Tang, B.Y., Yan, J.C. e Zeng, X.C. (1998), "Improvement of the wear and corrosion resistance of oil pump materials using plasma immersion ion implantation", *Surface and Coatings Technology*, vol. 98, pp. 897-900.

Wensink, H. e Elwenspoek, M. C., 2002, "A closer look at the ductile-brittle transition in solid particle erosion", *Wear*, vol. 253, pp. 1035-1043.

Wolynec, S. 2003, "Técnicas eletroquímicas em corrosão", edusp, 2003, São Pulo.

Zu, J.B., Hutchings, I. M. e Burstein G. T., 1990, "Design of a slurry erosion test rig", *Wear*, vol. 140, pp. 331-344.

Zum Gahr, K. H., 1987, "Microstructure and wear of materials", Elsevier, 599 p.