# UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DIEGO SILVA MAIER** 

AVALIAÇÃO DA CORROSÃO-EROSÃO EM MATERIAIS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA EM MEIO CONTENDO H₂S

#### **DIEGO SILVA MAIER**











## AVALIAÇÃO DA CORROSÃO-EROSÃO EM MATERIAIS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA EM MEIO CONTENDO H₂S

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de graduado em Engenharia Mecânica. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo

### **DIEGO SILVA MAIER**

## AVALIAÇÃO DA CORROSÃO-EROSÃO EM MATERIAIS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA EM MEIO CONTENDO H₂S

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Enç	genharia Mecânica da
Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito pare	cial para obtenção do
título de graduado em Engenharia Mecânica.	

Aprovado em//
COMISSÃO EXAMINADORA
Prof. Dr Marcelo Camargo Severo de Macedo - orientador Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. MSc Rosental Alves Girelli - examinador Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Dr Cherlio Sacandian - examinador

#### **AGRADECIMENTOS**

Durante minha trajetória acadêmica foi preciso muita dedicação, determinação e apoio de várias pessoas. Contudo, quero agradecer, primeiramente, à Deus por colocar essas pessoas na minha vida. E segue abaixo as pessoas, às quais quero demonstrar minha profunda gratidão.

Aos meus pais que mesmo distante nunca deixaram de me apoiar.

Aos meus avós que agiram como verdadeiros pais.

Aos primos e tios, pois me prestaram todo tipo de ajuda.

A todos os professores por tudo o que foi ensinado.

Ao Professor Marcelo Camargo pela sua atenção, dedicação e paciência para passar um pouco do seu conhecimento para mim.

Ao Professor Cherlio pela disponibilização do laboratório e seus equipamentos durante a fase experimental.

Aos Professores Temístocles Luz e Rogério Ramos por disponibilizarem os equipamentos necessários para o controle de temperatura do Erosímetro.

Ao Professor Flávio José pelo conhecimento passado e, pela atenção e tempo prestado na obtenção das fotografias através do MEV.

Ao técnico Carlos Alberto Zampieri, técnico que muito ajudou durante a preparação dos ensaios experimentais.

Aos mestrandos Dímissom e Alchaar que me passaram seus conhecimentos sobre o erosímetro facilitando e provendo maior segurança para a realização desta pesquisa. Aos meus colegas sempre presentes em todos os momentos.

À secretária do Colegiado de Engenharia Mecânica por estar sempre disposta a resolver os problemas burocráticos.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e ao Ministério da Ciência e Tecnologia pelo incentivo dado aos estudos e pesquisas através do Programa de Recursos Humanos, PRH-29, na Universidade.

#### **RESUMO**

Neste trabalho foi avaliado o dano causado pelo fenômeno da corrosão-erosão, em temperatura acima da ambiente, no aço inoxidável austenítico 304 utilizado na indústria do petróleo, através da determinação da taxa de erosão, corrosão e corrosão-erosão, além de verificar a existência de efeito sinérgico sob as condições do ensaio. Para isto, foram realizados ensaios em um erosímetro, a uma velocidade de 7,5 m/s a 40°C e alguns testes de corrosão-erosão foram realizados a 50°C. A carga sólida foi igual a 4 % em peso de partículas abrasivas de sílica. A faixa granulométrica das partículas utilizada foi entre 150 μm e 300 μm. Os testes de corrosão e corrosão-erosão foram realizados numa solução de cloreto de sódio mais ácido acético contendo uma concentração de 10<sup>-3</sup> mol/l de tiossulfato de sódio a qual busca simular a presença de H<sub>2</sub>S. Amostras cilíndricas de 4,76 mm de diâmetro foram utilizadas. Para comparar os efeitos da temperatura foram levantados dados na literatura existente para ensaios à temperatura ambiente.

Palavras-chave: Erosão. Corrosão. Erosão-corrosão. Temperatura. H<sub>2</sub>S. Tiossulfato. Austenítico.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 – Dependência típica da perda de massa da superfície de acordo com a
massa total de partículas impactadas. Linha (a) corresponde a um comportamento
linear da erosão, sem período de incubação. Sob algumas condições, e observado
um período de incubação, curva(b). (HUTCHINGS 1992)18
Figura 2.2 – Dependência típica da erosão com o ângulo de impacto Q (definido
como um ângulo entre a direção de impacto e a superfície). Materiais dúcteis
geralmente apresentam um pico de erosão em ângulos rasos de impacto (curva a),
enquanto materiais frágeis apresentam um desgaste máximo em ângulos normais
(curva b). (HUTCHINGS 1992)18
Figura 2.3 – Representação esquemática da taxa de erosão como função do ângulo
de impacto, por meio de diferentes curvas que são válidas para metais dúcteis ( $lpha$ ),
metais frágeis ( $\beta$ ), cerâmicos frágeis ( $\gamma$ ) e polímeros ( $\delta$ ). (ZUM GHAR, 1987)22
Figura 2.4 – Variação da taxa de erosão com a temperatura em aços inoxidáveis
(SUNDARARAJAN, 1997)23
Figura 2.5 – Variação da viscosidade absoluta com a temperatura (FOX, 2006) $24$
Figura 2.6 – Formas de Corrosão. (GENTIL, 1996)26
Figura 2.7 – Modelo de superfície de uma liga Fe-17Cr depois de exposto a um meio
contendo enxofre. (DURET-THUAL, COSTA e MARCUS, 1997)28
Figura 2.8 - Vários comportamentos e processos de corrosão/erosão dependentes
do tempo: (a) corrosão segue uma lei parabólica em função do tempo, (b) corrosão
segue uma lei linear com o tempo, (c) erosão e corrosão seguem uma lei quase-
linear com o tempo com repetidas rupturas no filme protetor superficial e (d)
dependência linear da erosão com o tempo após um período inicial de incubação.
(ROBERGE, 2004)
Figura 3.1 Componentes do Erosímetro (BOWEN, 2004)40
Figura 3.2 – Banho Termostático usado para controlar as temperaturas do ensaio $41$
Figura 3.3 – Amostra-suporte fixada ao eixo
Figura 4.1 – Foto tirada no MEV de uma amostra de aço AISI 304 com um aumento
de 2.000X45
Figura 4.2 – Regiões da amostra de aço AISI 304 analisadas quanto sua
composição química no MEV 46

Figura 4.3 – Curva de calibração do conjunto Erosímetro-Banho Termostático para
temperatura requerida de 30°C47
Figura 4.4 – Curva de calibração do conjunto Erosímetro-Banho Termostático para
temperatura requerida de 40°C47
Figura 4.5 – Curva de calibração do conjunto Erosímetro-Banho Termostático para
temperatura requerida de 50°C48
Figura 4.6 – Curva de calibração do conjunto Erosímetro-Banho Termostático para
temperatura requerida de 60°C48
Figura 4.7 – Curva de calibração do conjunto Erosímetro-Banho Termostático para
temperatura requerida de 70°C49
Figura 4.8 – Perda de massa das amostras de aço inoxidável 304 a 25 e 40 °C para
o tempo de 60 minutos
Figura 4.9 – Taxa de erosão das amostras de aço inoxidável 304 a 25 e 40 °C para o
tempo de 60 minutos
Figura 4.10 – Região onde foi realizada a analise química da amostra submetida ao
ensaio de erosão à 40 °C durante 60 minutos com um aumento de 150X51
Figura 4.11 – Fotos tiradas no MEV da amostra submetida a 60 minutos de ensaio
no erosímetro. a) parte central da face erodida com aumento de 1000X; b) parte
central da face erodida com aumento de 4000X. Ambas apresentam marcas de
desgaste erosivo com alguns raros riscos provenientes de impactos oblíquos52
Figura 4.12 – Perda de massa das amostras de aço inoxidável 304 à 25 °C e 40 °C
com o tempo
Figura 4.13 – Taxa de corrosão das amostras de aço inoxidável 304 à 25 °C e 40 °C
com o tempo
Figura 4.14 – Regiões da amostra ensaiada durante 60 minutos a temperatura de
40°C analisadas quanto sua composição química no MEV com um aumento de
1000X
Figura 4.15 – Regiões da amostra ensaiada durante 120 minutos a temperatura de
40°C analisadas quanto sua composição química no MEV com um aumento de
3.000X55
Figura 4.16 – Fotos tiradas no MEV da amostra submetida a 60 minutos de ensaio
no erosímetro. a) parte central da face da amostra corroída com aumento de 1000X;
b) parte central da face da amostra corroída com aumento de 4000X56

Figura 4.17 – Taxa de corrosão-erosão das amostras de aço inoxidável 304 à 25 °C,
40 °C e 50 °C durante 60 minutos e à 25 °C e 40 °C durante 120 minutos57
Figura 4.18 – Perda de massa das amostras de aço inoxidável 304 à 25 °C, 40 °C e
50 °C durante 60 minutos e à 25 °C e 40 °C durante 120 minutos57
Figura 4.19 – Taxa de corrosão-erosão das amostras de aço inoxidável 304
ensaiadas durante 60 minutos com a temperatura58
Figura 4.20 – Fotos tiradas no MEV da amostra submetida a 120 minutos de ensaio
no erosímetro. a) parte central da face da amostra submetida à corrosão-erosão com
aumento de 1000X; b) parte central da face da amostra submetida à corrosão-
erosão com aumento de 4000X60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química em porcentagem de peso do aço AISI 304.
(SEDRIKS, 1996)14
Tabela 2.2 – Espectro do processo de erosão-corrosão34
Tabela 4.1 - Concentração em peso da composição química do aço inoxidável AISI
304 referente a análise realizada na.região 146
Tabela 4.2 – Composição química em concentração em peso do aço inoxidável 304
submetido ao ensaio de erosão à 40 °C durante 60 minutos
Tabela 4.3 – Composição química em concentração em peso do aço inoxidável 304
submetido ao ensaio de corrosão à 40 °C durante 60 minutos na região 154
Tabela 4.4 – Composição química em concentração em peso do aço inoxidável 304
submetido ao ensaio de corrosão à 40 °C durante 120 minutos na região 155
Tabela 4.5 – Perda de massa e avaliação do efeito sinérgico para a temperatura de
40 °C58
Tabela 4.6 – Composição química em concentração em peso do aço inoxidável 304
submetido ao ensaio de corrosão-erosão à 40 °C durante 60 minutos59
Tabela 4.7 – Composição química em concentração em peso do aço inoxidável 304
submetido ao ensaio de corrosão-erosão à 40 °C durante 120 minutos59

## SUMÁRIO

1.	INTF	RODUÇÃO	10
2.	– RE	VISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
	2.1.	CONSIDERAÇÕES SOBRE O AÇO INOXIDÁVEL	12
	2.1.1	. Aço Inoxidável Martensítico	12
	2.1.2	2. Aço Inoxidável Ferrítico	13
	2.1.3	3. Aço Inoxidável Austenítico	13
	2.2.	EROSÃO	15
	2.2.1	. Definição	15
	2.2.2	2. Classificação	15
	2.2.3	B. Desgaste erosivo por deformação plástica	16
	2.2.4	Desgaste erosivo por fratura frágil	19
	2.2.5	5. Taxa de erosão	20
	2.2.6	S. Variáveis que afetam a taxa de erosão	21
	2.3.	CORROSÃO	25
	2.3.1	. Definição	25
	2.3.2	2. A influência dos gases sulfurosos dissolvidos	27
	2.3.3	3. Taxa de corrosão	29
	2.4.	CORROSÃO-EROSÃO	31
	2.4.1	. Definição	31
	2.4.2	2. Efeito sinergético	31
	2.4.3	3. Taxa de corrosão-erosão	33
	2.4.4	Variáveis que afetam a taxa de corrosão-erosão	33
3.	– PR	ROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	38
	3.1.	OBJETIVO	38
,	3.2.	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	38
	3.2.1	. Erosímetro/ Banho Termostático	38
	3.2.2	2. Amostras	41
	3.2.3	3. Abrasivo	42
	3.2.4	Líquido	43
	3.2.5	5. Velocidade de teste	43
	3.2.6	6. Desaeração com argônio	43

3.2.7.	Ensaio de dureza, metalografia e MEV	44
3.2.8.	Procedimentos para realização dos ensaios no erosímetro	44
4. – RESU	ILTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1. AN	ÁLISE METALOGRÁFICA E ENSAIO DE DUREZA	45
4.2. CU	RVAS DE CALIBRAÇÃO	47
4.3. EN	SAIOS DE EROSÃO PURA	49
4.4. EN	SAIOS DE CORROSÃO PURA	52
4.5. EN	SAIOS DE CORROSÃO-EROSÃO	56
5. – CONC	CLUSÕES	61
REFERÊNC	IAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXOS		65
ANEXO I – F	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS	66
ENSAIOS	DE EROSÃO	66
ENSAIOS	DE CORROSÃO	67
ENSAIOS	DE CORROSÃO-EROSÃO	68
LIMPEZA	DOS CORPOS DE PROVA	69
PESAGE	I DOS CORPOS DE PROVA	69
AQUECIM	IENTO DA SOLUÇÃO DE ENSAIO	70

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por novas fronteiras de exploração leva a condições de trabalho cada vez mais agressivas. Um dos maiores desafios na área de materiais de grandes indústrias petrolíferas como, por exemplo, a Petrobrás é corrosão por H<sub>2</sub>S.

As fontes de H<sub>2</sub>S são o óleo produzido e a geração no reservatório através bactérias redutoras de sulfato em águas que se encontram em condição de estagnação. Dentre os efeitos dessa substância nos equipamentos estão a corrosão uniforme e a localizada. Para agravar esse quadro há o fluxo do petróleo da extração até seu beneficiamento que em certos locais chegam a velocidades muito altas carregando consigo grande quantidade de areia. Essa areia desgasta o material através da erosão, mas, na maioria das condições, nota-se o efeito sinergético entre a corrosão e a erosão.

Por esse fato buscam-se formas de controlar esse tipo de deterioração seja com a aplicação de inibidores, seja com o uso de materiais e revestimentos resistentes à corrosão-erosão. (1)

Os aços inoxidáveis são muito utilizados em equipamentos sujeitos à erosão-corrosão, principalmente quando a corrosão é o fenômeno dominante. Por exemplo, o aço inoxidável martensítico tem melhores propriedades mecânicas que o aço inoxidável austenítico que por sua vez é mais resistente à corrosão, daí a importância de conhecer e escolher o aço inoxidável e seus elementos liga que sejam mais eficientes para uma determinada aplicação, a um custo viável de projeto.

Os aços inoxidáveis austeníticos têm um campo bastante abrangente e podem ser encontrados tanto no dia-a-dia em produtos de uso doméstico quanto em produtos empregados em indústrias químicas, petroquímicas, alimentícias, farmacêuticas, médico-hospitalar e outras. Devido às excelentes propriedades mecânicas a elevadas temperaturas apresentadas por estes aços, é comum sua aplicação em serviços envolvendo altas temperaturas por longos períodos de tempo, como válvulas de pressão, aquecedores, trocadores e condensadores de calor.

(LOUZADA, 2008) Essas altas temperaturas contribuem para alterar as taxas de desgaste dos materiais.

O objetivo deste trabalho é contribuir para o estudo do efeito da temperatura no processo de desgaste por erosão, corrosão e corrosão-erosão em um aço inoxidável 304.

## 2. – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O AÇO INOXIDÁVEL

Os aços inoxidáveis são altamente resistentes à corrosão (enferrujamento) numa variedade de ambientes, especialmente o ambiente atmosférico. Seu elemento de liga predominante é o cromo; uma concentração de pelo menos 11%Cr em peso é requerida. A resistência à corrosão pode também ser melhorada por adições de níquel e de molibdênio. (CALLISTER, 2002)

O agrupamento usual dos vários tipos de aços inoxidáveis em classes é baseado na microestrutura que apresentam nas condições comuns de serviço, à temperatura ambiente, assim são considerados os 3 grupos seguintes:

## 2.1.1.Aço Inoxidável Martensítico

São essencialmente ligas Fe-C-Cr, com, eventualmente em alguns tipos, pequenas quantidades de níquel. Os tipos mais comuns são classificados nas normas AISI com os números 403,410,414, 416, 420, 420F, 431, 440A, 440B, 440C e 440F.

Os tipos 403, 410, 414, 416 e 420 caracterizam se por baixo teor de carbono e um mínimo de 11,5% de cromo, que, no tipo 431, pode chegar a 17,09 C°. Embora o carbono seja baixo, esses aços possuem boa temperabilidade, devido à presença de cromo. Assim sendo, podem ser temperados ao ar, em óleo ou água e revenidos a temperaturas que dependem das propriedades mecânicas desejadas.

São aplicados em lâminas de turbina e compressores, mola, eixos e hélices de bombas, haste de válvulas, parafusos, porcas etc.

O tipo 420F possui carbono entre 0,30 e 0,40% e nos tipos 440A, 440B e 440C, o teor de carbono é mais elevado, mínimo de 0,60% no tipo 440A e máximo 1,20% no tipo 440C. O teor de cromo varia de 12,0 a 18,0%, os maiores teores para os tipos com mais carbono.

São empregados em cutelaria, instrumentos cirúrgicos, molas, mancais antifricção, etc.

## 2.1.2. Aço Inoxidável Ferrítico

O carbono é mantido, de modo geral, baixo, entre 0,08 a 0,12%. Alguns tipos, os de maior quantidade de cromo, podem apresentar teor máximo de carbono correspondente a 0,35%.

O teor de cromo mínimo varia de 11,5% nos tipos de carbono mais baixo e o máximo pode chegar a 27,0%, nos de carbono mais elevado.

A designação AISI indica como tipos principais: 405, 406, 430, 442,443 e 446.

São usados em parafusos, porcas e peças semelhantes, equipamentos para a indústria química, componentes de fornos, queimadores, radiadores, etc.

## 2.1.3. Aço Inoxidável Austenítico

Os tipos AISI mais comuns são designados pelos números 301, 302, 302B, 303, 304, 308, 309, 309S, 310, 316, 317, 321 e 347. Apresentam simultaneamente cromo e níquel como principais elementos de liga e são considerados os mais importantes aços inoxidáveis.

Geralmente, o carbono é mantido baixo - 0,08% máximo - podendo, contudo, em alguns casos, admiti-se teores de 0,25% máx., desde que o cromo seja aumentado a teores de 22, 24 ou 26% e o níquel a teores de 12, 15 ou 22%.

O níquel e elementos como o manganês e o nitrogênio são utilizados para estabilizar a austenita. (CHIAVERINI, 1986)

O mais comum dos aços inoxidáveis austeníticos é o AISI 304 (18%Cr – 8%Ni) tem excelente resistência à corrosão, ductilidade e soldabilidade. Na tabela 2.1 encontrase a composição química em porcentagem de peso desse material.

Composição (%)						
Cr	Ni	С	Mn	Si	Р	S
18 – 20	8 – 10	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030

Tabela 2.1 – Composição química em porcentagem de peso do aço AISI 304. (SEDRIKS, 1996)

O aço 304 é um material com grandes possibilidades em suas aplicações, a tal ponto que o podemos encontrar em nossas casas (em um garfo ou em uma panela, por exemplo) e também na indústria, em aplicações de grande responsabilidade. Entretanto, dependendo do meio, o aço 304 não é o austenítico mais utilizado, por isso outros elementos podem estar presentes, como o Molibdênio, Nióbio, Titânio, Nitrogênio, Alumínio entre vários outros, em proporções que caracterizam a estrutura, propriedades mecânicas e o comportamento final específico para cada serviço. (LOUZADA, 2008)

## 2.2. EROSÃO

## 2.2.1. Definição

O desgaste erosivo é causado pelo impacto de partículas de um sólido ou líquido contra a superfície de um objeto. O desgaste erosivo ocorre em uma ampla variedade de máquinas e exemplos típicos são a danos às lâminas de turbina a gás, quando um avião voa através de nuvens, e do desgaste da bomba propulsoras de lama em sistemas de processamento mineral. Em comum com outras formas de desgaste, apenas a resistência mecânica, não garante resistência ao desgaste e um estudo detalhado das características do material é necessário para minimizar o desgaste. As propriedades das partículas erosivas também são significativas e, cada vez mais, estão sendo reconhecidas como um parâmetro relevante no controle deste tipo de desgaste.(STACHOWIAK, 2001)

## 2.2.2. Classificação

Segundo Zum Ghar (1987), a erosão pode ser classificada em função de diferentes modos de desgaste. A seguir serão citados alguns tipos de desgastes erosivos e suas respectivas características.

- Erosão por partículas sólidas em meio gasoso;
- Erosão por partículas sólidas em meio líquido;
- Erosão devido à ação de líquidos;
- Erosão por cavitação;
- · Erosão por ação térmica;
- Erosão-corrosão.

Neste estudo são focados dois modos de erosão, a erosão por partículas sólidas em meio líquido e a erosão-corrosão. O primeiro modo, também conhecido como erosão por meio lamacento, é causada por partículas sólidas que são conduzidas por um

fluxo de líquido. Tubulações transportando meios lamacentos (slurries) são exemplos deste tipo de erosão. Já o segundo modo é definido como sendo 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 são alguns exemplos de locais onde pode ocorrer o fenômeno da erosão-corrosão.

Os mecanismos de desgaste por erosão podem envolver deformação plástica e fratura frágil. O processo de erosão em metais usualmente envolve deformação plástica, já no caso de materiais frágeis, esses podem se romper devido à deformação ou à fratura.

## 2.2.3. Desgaste erosivo por deformação plástica

A deformação plástica será considerável na superfície quando a pressão média de contato com a partícula for proporcional a 3Y, que representa o valor de dureza do material do corpo e independerá da forma da partícula. A indentação ocorrerá com o aumento da carga normal aplicada, pelo contato da partícula, caso esta suporte a pressão de contato sem deformar-se. Caso a partícula sofra deformação ou fratura antes que a pressão atinja 3Y (do corpo), a deformação plástica da superfície será desprezível.

Primeiramente, será analisado o comportamento de uma partícula colidindo com uma superfície macia sob um ângulo normal. Algumas simplificações podem ser realizadas: a partícula não se deforma e o problema pode ser resolvido como quasiestático. A única força presente é a força de contato exercida pela superfície. A deformação sofrida pela superfície é perfeitamente plástica, com uma dureza H constante. Num tempo t após o contato, a partícula de massa m deformará a superfície em uma profundidade x; A(x) é a área da seção transversal desta indentação, que é determinada pela forma da partícula. A força de desaceleração da partícula é devido à dureza atuando na área A(x):

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -H.A(x)$$
(2.1)

Deseja-se saber qual o volume final da indentação, ou seja, na profundidade d, com velocidade nula. Neste ponto, a energia cinética foi completamente convertida em energia de deformação da superfície. O volume final da indentação é dado, assumindo a dureza constante, por:

$$V = \frac{m \cdot U^{-2}}{2 \cdot H}$$
 (2.2)

O material deslocado da superfície de impacto pode ter vários destinos: acomodarse por deformação plástica fora da indentação; formar uma borda plasticamente deformada; ou ser removido formando debris (partícula material resultante do processo de desgaste). Somente uma fração k do material gera debris, que pode ser escrita como:

Massa de Material Removido = 
$$k\rho \frac{mU^2}{2H}$$
 (2.3)

Onde p é a densidade do material removido e k e um fator adimensional.

O gráfico da figura 2.1 mostra que o volume de massa removido da superfície é proporcional a massa de partículas erosivas, conforme a equação acima. Para alguns materiais ocorre um ganho de massa nos instantes iniciais, mostrado pela curva (b). Entretanto, este período, chamado de incubação, pode ser desprezado e a massa perdida pela superfície é aproximadamente a mostrada pela curva (a). A relação linear no período estacionário permite definir a erosão, E:

$$E = \frac{mmr}{mpe}$$
 (2.4)

Onde mmr é a massa de material removido e mpe é a massa das partículas erosivas colidindo na superfície.

E é adimensional, assim a equação 2–3 fica:

$$E = \frac{k\rho U^2}{2H} \tag{2.5}$$

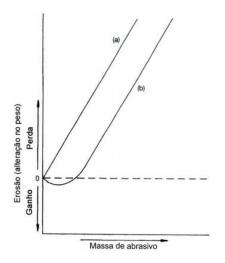


Figura 2.1 – Dependência típica da perda de massa da superfície de acordo com a massa total de partículas impactadas. Linha (a) corresponde a um comportamento linear da erosão, sem período de incubação. Sob algumas condições, e observado um período de incubação, curva(b). (HUTCHINGS 1992)

A equação 2.5 é apenas uma estimativa dos fatores que controlam a erosão, ela ignora, por exemplo, o ângulo de impacto. A erosão em materiais dúcteis depende fortemente do ângulo de impacto, como mostra a figura 2.2, tendo um máximo de erosão entre 20° e 30°.

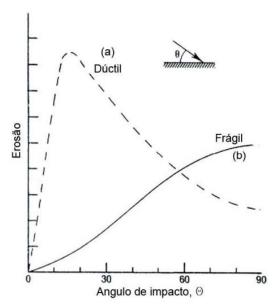


Figura 2.2 – Dependência típica da erosão com o ângulo de impacto Q (definido como um ângulo entre a direção de impacto e a superfície). Materiais dúcteis geralmente apresentam um pico de erosão em ângulos rasos de impacto (curva a), enquanto materiais frágeis apresentam um desgaste máximo em ângulos normais (curva b). (HUTCHINGS 1992)

Um modelo mais real, onde a partícula é livre para girar, trás uma expressão para *E* que pode ser aproximada por:

$$E = \frac{k_1 \cdot \rho \cdot U^n}{H} f_1(\theta)$$
 (2.6)

Onde o expoente n varia entre 2,0 e 2,5 e, também, é função do ângulo de impacto, que conforme pode ser observado na figura 2.2 acima é um importante fator no caso do desgaste erosivo.

Outros modelos mais complexos também podem ser utilizados, onde estes utilizam além das variáveis citadas a deformação crítica, que pode ser utilizada como uma medida da ductilidade do material sobre condições de erosão.

Na prática, a erosão é fortemente influenciada pela velocidade de impacto.

$$E \propto U^n \tag{2.7}$$

Onde n pode variar entre 2,3 e 3,0 e, geralmente, em torno de 2,4 para materiais dúcteis com impacto próximo ao ângulo de máxima erosão. Os modelos teóricos mencionados prevêem que a erosão devido a mecanismos que envolvem deformação plástica deve ser inversamente proporcional à dureza como mostram as equações 2.5 e 2.6.

Para alguns metais recozidos, com o aumento da dureza, consegue-se um aumento na resistência ao desgaste, entretanto, para os aços não existe essa relação, o aumento da dureza não confere nenhum ganho em resistência. Uma melhor relação é encontrada entre a resistência ao desgaste e a dureza superficial. (HUTCHINGS, 1992)

## 2.2.4. Desgaste erosivo por fratura frágil

Quando o impacto de uma partícula erosiva causa uma fratura frágil, o material é removido da superfície por formação e interseção de trincas. Essas trincas são formadas por impacto de partículas duras e angulosas. No impacto de partículas

arredondadas e macias, tende a ocorrer uma deformação puramente elástica e trincas Hertzianas.

A dimensão do dano da trinca devido ao impacto de partículas é mais severa quando ocorre normal a superfície, e a erosão nessas condições é mais rápida, como mostra a figura 2.2 curva (b). Para modelos de impacto próximos a normal, tem-se que:

$$E \propto r^m U^n \tag{2.8}$$

Onde r e o raio da partícula.

Para o modelo de trincas Hertzianas, tem-se valores de m próximos de 1 e n na faixa entre 2,6 e 3,0.

Para partículas angulares, comumente encontradas na prática, modelos para erosão por fratura elasto-plástica são mais aplicáveis. O material é removido pela interseção das trincas laterais com outras trincas laterais e com a superfície.

$$\frac{E}{\rho} = r^{0.7} U^{3.2} \frac{\sigma^{0.6}}{k_c^{1.3} H^{0.25}}$$
(2.9)

Observa-se pela fórmula acima que a propriedade do material mais determinante na resistência a erosão por fratura frágil é a tenacidade à fratura ( $K_c$ ), com a dureza (H) tendo menor importância. Ao contrário do modelo de erosão por deformação plástica, este prevê a dependência do raio da partícula.

#### 2.2.5. Taxa de erosão

A taxa de erosão pode ser medida como a perda de massa do material por unidade de área e unidade de tempo (g/mm².min), ou medida como a perda do material por unidade de área e unidade de massa das partículas que estejam impactando contra a amostra (g/mm².g). A primeira é citada na maioria dos livros especializados com a nomenclatura R<sub>t</sub>, e é muito útil para se monitorar equipamentos em serviço, já que com esta taxa é possível determinar sua vida útil, evitando paradas não

programadas para manutenção. Já a segunda tem como nomenclatura mais usual  $R_m$ , e é mais útil quando o dano individual provocado pelo impacto das partículas é o interesse primário do estudo.

O parâmetro  $R_t$  foi o adotado para este estudo, já que o objetivo principal do trabalho é avaliar a perda de massa em amostras de aço inoxidável usando um modelo confeccionado baseado em estudos anteriores (CLARK, 1991).

## 2.2.6. Variáveis que afetam a taxa de erosão

Existem inúmeras variáveis que afetam a erosão, e entendê-las individualmente é o primeiro passo para compreender o fenômeno de erosão em si. Clark (2002) enumerou em seus estudos as principais variáveis que acarretam uma maior ou menor taxa de erosão, R<sub>t</sub>, em um tanque contendo lama abrasiva sendo agitada:

- a) Concentração da partícula;
- b) Velocidade de impacto da partícula;
- c) Ângulo de impacto da partícula;
- d) Tamanho da partícula;
- e) Forma da partícula;
- f) Densidade e dureza da partícula;
- g) Natureza do liquido em suspensão;
- h) Natureza do escoamento do meio lamacento;
- i) Natureza do material alvo (amostra).

Além destes, de acordo com (STACHOWIAK, 2001) há o efeito da temperatura sobre a taxa de perda de massa. Este parâmetro será o alvo do presente estudo. A seguir, são apresentados estudos que mostram o efeito das variáveis consideradas mais relevantes na erosão de aços inoxidáveis nas condições levantadas neste trabalho.

## • Ângulo de impacto da partícula

Na erosão, o ângulo de impacto da partícula é usualmente definido com relação ao plano da superfície. Ângulos de impacto podem variar de 0° a 90°. No ângulo zero de impacto o desgaste é insignificante, porque as partículas erosivas não impactam à superfície, embora em pequenos ângulos de aproximadamente 20°, pode ocorrer desgaste grave se as partículas são duras e a superfície é dúctil. Se a superfície é frágil, então o desgaste será pela fragmentação da superfície e pode ocorrer de sua taxa máxima ser atingida em impacto ângulos perto de 90°. A relação entre a taxa de desgaste e o ângulo de impacto para materiais dúcteis e frágeis é mostrado na figura 2.1. (STACHOWIAK, 2001)

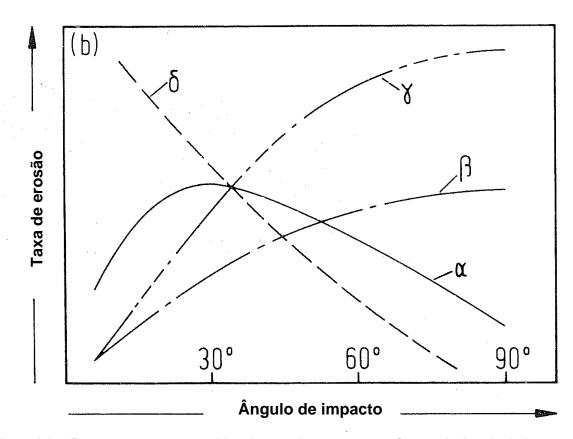


Figura 2.3 – Representação esquemática da taxa de erosão como função do ângulo de impacto, por meio de diferentes curvas que são válidas para metais dúcteis ( $\alpha$ ), metais frágeis ( $\beta$ ), cerâmicos frágeis ( $\gamma$ ) e polímeros ( $\delta$ ). (ZUM GHAR, 1987)

Num estudo realizado por Clark (1993), foram observados ângulos de impacto das partículas variando de 0 a 90° com relação aos corpos de provas cilíndricos usados nos experimentos. Nos pontos mais próximos das extremidades destes corpos de provas foram observados impactos oblíquos em maior numero, enquanto que nos

pontos mais próximos da linha de estagnação, linha que divide a área de impacto ao meio, foi observada uma maior incidência de impactos normais.

#### A influência da Temperatura

A taxa e o mecanismo de desgaste erosivo são influenciados pela temperatura. O principal efeito de temperatura é o de amolecer o material a ser erodido e aumentar taxas de desgaste. (STACHOWIAK, 2001)

Através da figura 2.2, pode-se avaliar o efeito da temperatura sobre aços inoxidáveis, sendo que para o aço 304 até 200 °C quase não se nota alteração na taxa de desgaste em um meio gasoso.

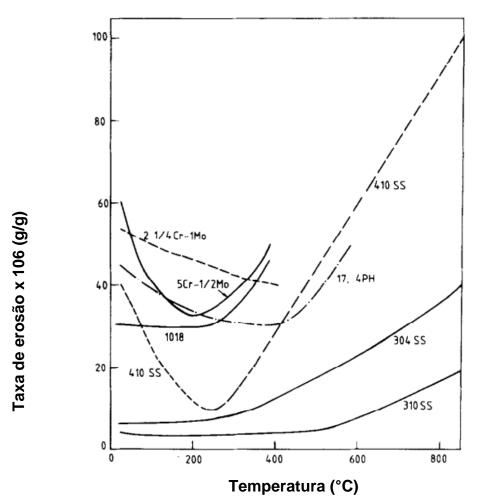


Figura 2.4 – Variação da taxa de erosão com a temperatura em aços inoxidáveis (SUNDARARAJAN, 1997)

Um efeito secundário da temperatura seria sobre o filme "squeeze". Este filme é uma camada de líquido que separa duas superfícies muito próximas e resiste à aproximação delas. O filme "squeeze". interfere tanto no contato partícula-partícula quanto no contato partícula-superfície. Este filme depende da viscosidade do líquido no qual estão imersas as partículas erosivas e o metal a ser desgastado.(CLARK, 2003)

O aumento na temperatura causa uma mudança na viscosidade do meio, em geral, nos líquidos a viscosidade diminui com o aumento da temperatura, como pode ser observado na figura 2.3.(FOX, 2006)

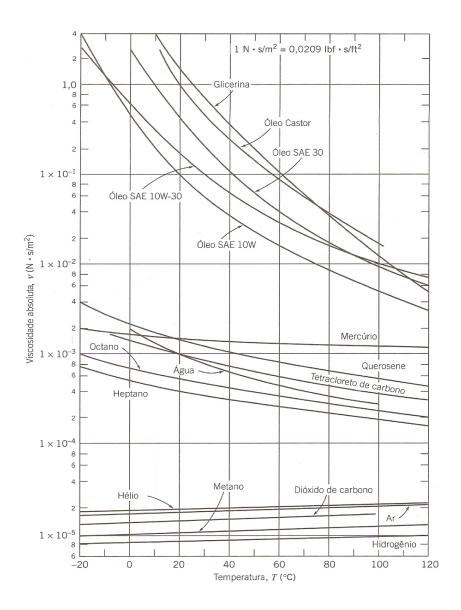


Figura 2.5 – Variação da viscosidade absoluta com a temperatura (FOX, 2006)

## 2.3. CORROSÃO

## 2.3.1. Definição

Num aspecto muito difundido e aceito universalmente pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação fisico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso. (GENTIL, 1996)

Os problemas de corrosão são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades, como por exemplo nas indústrias química, petrolífero, petroquímica, naval, de construção civil, automobilística. Nos meios de transportes aéreo, ferroviário, metroviário, marítimo, rodoviário e nos meios de comunicação, como sistemas de telecomunicações, na odontologia (restaurações metálicas, aparelhos de prótese), na medicina (ortopedia) e em obras de arte como monumentos e esculturas.

Assim, no estudo de processos corrosivos devem ser consideradas as variáveis dependentes do material metálico, do meio corrosivo e das condições operacionais para que se possa indicar o material mais adequado a ser utilizado em determinados equipamentos.

A caracterização da forma de corrosão auxilia bastante no esclarecimento do mecanismo e na aplicação de medidas adequadas de proteção, daí serem apresentadas a seguir as características fundamentais das diferentes formas de corrosão:

- Uniforme
- Por placas;
- Alveolar,
- Puntiforme ou por pite;
- Intergranular (ou intercristalina);

- Intransgranular (ou transgranular ou transcristalina);
- Filiforme;
- Por esfoliação;
- Grafítica;
- Dezincificação;
- Empolamento pelo hidrogênio;
- Em torno de cordão de solda.

As formas de corrosão podem ser vistas na figura 2.4.

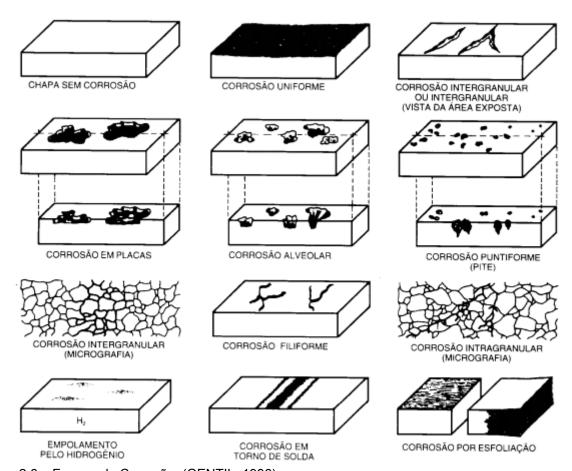


Figura 2.6 – Formas de Corrosão. (GENTIL, 1996)

## 2.3.2. A influência dos gases sulfurosos dissolvidos

Identificar enxofre adsorvido é de importância, tal como a presença de camadas deste elemento na superfície, já que isto pode alterar significativamente a resistência à corrosão do metal. Uma camada de enxofre adsorvido em aços inoxidáveis aumenta a dissolução anódica e gera atrasos ou dificulta a formação do filme passivo, afetando drasticamente a resistência à corrosão dos metais e as ligas. Quando adsorvido o enxofre pode também aumentar a absorção de hidrogênio atômico em metais, que é formado pela redução catódica dos íons de hidrogênio. Isto promove a nucleação e a propagação de trincas de corrosão sob tensão em aços de alta resistência e, conseqüentemente, pode levar a uma ruptura catastrófica do material em tensão inferior à esperada. (DURET-THUAL, COSTA e MARCUS, 1997)

O H<sub>2</sub>S é uma das substâncias mais tóxicas, inflamáveis e corrosivas encontradas no meio industrial. Então foi utilizada uma solução proposta por Tsujikawa et alli (1993), que contém tiossulfato, cloreto de sódio e ácido acético.

Através de reações químicas mostradas abaixo os íons de tiossulfato formam as moléculas de H<sub>2</sub>S.

$$S_2O_3^{2-} + 6 H^+ + 4 e^- = 2 S + 3 H_2O$$
  
 $4S + 4 H_2O = 3 H_2S + HSO_4^- + H^+$ 

Por sua vez, o H<sub>2</sub>S age na superfície do metal da seguinte forma:

$$H_2S + H_2O(M) = S(M) + H_2O + 2 H^+ + 2e^-$$
  
 $HS^- + H_2O(M) = S(M) + H_2O + H^+ + 2e^-$ 

O símbolo (M) significa o átomo de um metal. (MARCUS e PROTOPOPOFF,1997)

A deposição de enxofre na superfície dos aços inoxidáveis ainda não esta bem elucidada, o que se sabe é que ele se instala na forma de sulfetos em ilhas localizadas em regiões não oxidadas ou ao longo da superfície. O sulfeto formado geralmente é de cromo ou de ferro. No caso do ferro a sua oxidação ocorre em

paralelo com a redução do enxofre, já o cromo a oxidação ocorre de forma preferencial. Há, também, a formação de uma camada de hidróxido de cromo ou de ferro sobre os sulfetos e os óxidos. A configuração dessas camadas pode ser vista na figura 2.5. (DURET-THUAL, COSTA e MARCUS, 1997)

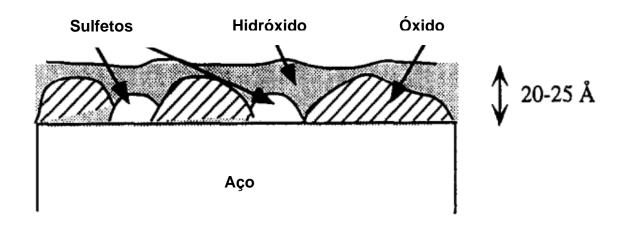


Figura 2.7 – Modelo de superfície de uma liga Fe-17Cr depois de exposto a um meio contendo enxofre. (DURET-THUAL, COSTA e MARCUS, 1997)

#### A influência da temperatura

A quase totalidade dos metais usados industrialmente. bem como suas ligas, são suscetíveis de sofrer corrosão quando expostos a agentes oxidantes como. por exemplo, oxigênio, enxofre, halogênios, dióxido de enxofre, gás sulfídrico, vapor de água. Esse comportamento resulta do fato de as reações desses metais com esses oxidantes serem exotérmicas, sendo, portanto, termodinamicamente possíveis em temperaturas elevadas, onde o decréscimo de energia livre é menor, a reação é mais favorecida cineticamente e a velocidade de oxidação é consideravelmente maior.

Os óxidos obtidos por reações exotérmicas são os mais fáceis de se formar, logo, os metais que apresentam esses óxidos podem ser facilmente corroídos. (GENTIL, 1996)

O papel da temperatura também pode ser a alteração da solubilidade dos produtos da corrosão, sendo que quanto maior a temperatura maior é a solubilidade desses produtos tornando o filme protetor menos aderente à superfície do metal aumentando a taxa de corrosão. (POULSON, 1999)

#### 2.3.3. Taxa de corrosão

De acordo com a aplicação na engenharia em que o estudo está sendo feito, a taxa de corrosão pode ser expressa de muitas formas distintas. Neste estudo, ela foi definida como sendo a perda de massa do material por unidade de área e por unidade de tempo (g/mm2.min), para que fosse possível fazer comparações com a perda de massa por erosão pura e com a perda de massa por corrosão-erosão. A nomenclatura adotada foi R<sub>c</sub>. Esta definição é útil para se avaliar s perda de massa do material com relação à área exposta bem como em relação ao tempo de exposição. Entretanto, este tipo de taxa possui uma séria desvantagem que é não considerar a resistência à corrosão em termos de penetração ou perda de espessura do material.

A taxa de penetração é muito importante, sob o ponto de vista da engenharia, pois permite fazer uma estimativa da vida útil de um componente com base na sua resistência estrutural. A equação 2.10 permite expressar a taxa de corrosão do material em milésimo de polegada de penetração por ano (mpy) que é o recomendado pela norma NACE TM – 01 – 69:

$$mpy = \frac{534.W}{D.A.T} \tag{2.10}$$

Onde: W = perda de massa do material (mg);

D = densidade da amostra (g/cm<sup>3</sup>);

A =área da amostra (pol $^2$ );

T = tempo de exposição (h).

A densidade do aço inoxidável AISI 304 é igual a 8,0 g/cm<sup>3</sup>.

A taxa de corrosão obtida através da equação 2.1 só é valida para corrosão uniforme, não se aplicando para casos de corrosão localizada como, por exemplo, puntiforme, intergranular e transgranular.

Quando o ataque corrosivo for uniforme, os metais podem ser classificados em três grupos, de acordo com suas taxas de corrosão e aplicação projetada:

- Menor do que 5 mpy (0,127 mm / ano) Metais com boa resistência a corrosão.
   São apropriados para partes críticas de equipamentos.
- 5-50 mpy (0,127 1,27 mm / ano) Metais usados no caso em que uma alta taxa de corrosão é tolerada como, por exemplo, em tanques, tubulações e corpo de válvulas.
- Maior do que 50 mpy (1,27 mm / ano) Metais pouco resistentes, daí não ser recomendado o uso dos mesmos.

Se for conhecida a taxa de corrosão de um material em determinado meio, o tempo de vida útil de um equipamento pode ser estimado. Assim uma espessura da parede pode ser projetada para atender características como pressão, temperatura, e o próprio peso do equipamento. É comum a utilização de uma espessura extra para a corrosão, que é conhecida como sobre-espessura de corrosão, que tem o objetivo de compensar a perda de massa por corrosão durante o tempo previsto para a operação do equipamento.

## 2.4. CORROSÃO-EROSÃO

## 2.4.1. Definição

Corrosão-erosão é a aceleração na taxa de deterioração ou ataque a um metal por causa do movimento relativo entre o fluído corrosivo, contendo partículas duras e sólidas, e a superfície do metal. Geralmente, este movimento é muito rápido e efeitos de desgaste mecânico por erosão estão envolvidos (FONTANA, 1987).

A remoção do metal é feita a partir da superfície como íons dissolvidos, ou através da formação de produtos de corrosão sólidos que são removidos mecanicamente da superfície do metal. Em inúmeros casos, a falha de um equipamento devido à corrosão-erosão acontece em um tempo relativamente curto. Além disso, esta falha ocorre de maneira inesperada, ou porque os testes de corrosão foram feitos em condições estáticas ou porque não foram levados em consideração os efeitos da erosão.

Muitos metais e ligas são sujeitos são susceptíveis ao dano por corrosão-erosão bem como também a maioria dos equipamentos expostos ao movimento de fluídos com sólidos em suspensão (slurries). Sistemas de tubulação, estranguladores, bombas, conexões, agitadores, lâminas de turbinas e reservatórios agitados, são alguns exemplos onde este tido de desgaste ocorre. O aparecimento de riscos, ondulações, cavidades arredondadas e vales, que freqüentemente, possuem uma tendência direcional, é a caracterização de uma superfície de um metal exposto a corrosão-erosão.

## 2.4.2. Efeito sinergético

O efeito sinergético é definido como sendo o fenômeno no qual ocorrem significantes interações entre os efeitos mecânicos e os efeitos eletroquímicos

32

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).

A erosão pode aumentar a taxa de corrosão pela remoção do filme passivo,

enquanto a corrosão pode incrementar a taxa de erosão dissolvendo

preferencialmente a matriz de um material bifásico ou através da formação de uma

camada de produtos de corrosão porosa facilmente removida pelos eventos

erosivos. (STACK, 2004)

Neste presente estudo, o sinergismo total (S) é definido como a diferença entre a

perda de massa total (T), obtida através dos ensaios de corrosão-erosão, e as

perdas de massa de erosão pura (E) e corrosão pura (C).

$$S = T - E - C$$

Este sinergismo total (S) pode ser dividido em dois componentes:

S': Aumento da corrosão devido à erosão

S": Aumento da erosão devido à corrosão

Sendo que:

$$S = S' + S''$$

É importante observar que o sinergismo pode ou não ocorrer e que ele depende do eletrólito presente, do material estudado, da condição de escoamento e de diversas condições tribológicas. Um pequeno efeito da erosão na corrosão é esperado em ligas metálicas expostas a um determinado eletrólito onde o comportamento da perda de massa por corrosão não é dependente da presença de um filme passivo. Mas, por outro lado, em materiais como o aço inoxidável, onde a formação de um filme passivo exerce grande influência na resistência à corrosão, o efeito da erosão é considerável (MADSEN, 1988).

#### 2.4.3. Taxa de corrosão-erosão

A taxa de corrosão-erosão foi medida como a perda de massa do material por unidade de área e por unidade de tempo (g/mm2.min) cuja nomenclatura adotada foi  $R_{\text{C-F}}$ .

## 2.4.4. Variáveis que afetam a taxa de corrosão-erosão

Uma vez que a corrosão pura e a erosão pura estão envolvidas com a corrosãoerosão, todos os fatores já mencionados devem ser considerados. Abaixo, são apresentados fatores relacionados a corrosão-erosão neste estudo.

#### 1) filme na superfície

As propriedades e a natureza do filme protetor que se forma em muitos metais e ligas são muito importantes no que se refere à resistência a corrosão-erosão. A capacidade deste filme em proteger a superfície metálica depende dos seguintes pontos:

- Da velocidade ou capacidade com que o filme é formado quando o metal é submetido ao ambiente corrosivo;
- Da sua resistência ao dano mecânico ou ao desgaste;
- Da sua capacidade de repassivar o metal quando o filme é removido ou danificado.

Em relação aos pontos acima citados, Roberge (2004) estudou a variação de mecanismos num processo de erosão-corrosão. Estes mecanismos são apresentados na Tabela 2.2.

## Dissolução dominante O filme de óxido cresce em soluções aguosas estáticas de acordo com a cinética de crescimento do óxido. A taxa de corrosão é uma função da taxa de dissolução do metal nu e da taxa de passivação. A cinética de corrosão segue uma lei parabólica com o tempo. O escoamento reduz o filme a uma espessura de equilíbrio, a qual é uma função de ambas a taxa de transferência de massa e Dano Mecânico Crescente a cinética de crescimento do óxido. A taxa de corrosão é uma função da transferência de massa e da força motriz de concentração. A cinética da corrosão segue uma lei linear com o tempo. Aumento da Dissolução O filme é localmente removido seja pela tensão de cisalhamento na superfície ou pela dissolução ou pelo impacto de partículas, mas pode re-passivar. A taxa de dano é uma função da taxa de dissolução do metal nu. taxa de passivação e da freqüência de remoção do óxido. A cinética de dano segue uma lei quase linear com o tempo. O filme é localmente removido por dissolução ou pela tensão de cisalhamento superficial e a taxa de dano é equivalente à taxa de dissolução do metal nu. A cinética de dano segue uma lei quaselinear com o tempo. O filme é localmente removido, e a superfície metálica exposta é danificada mecanicamente, o que contribui para a perda de massa total. A taxa de dano é igual à taxa de dissolução do metal nu mais um possível efeito sinérgico devido ao dano mecânico. A taxa de dano segue uma lei não-linear com o tempo O filme de óxido é removido e o dano mecânico ao metal exposto é o mecanismo de dano dominante. A cinética da erosão seque uma lei não linear com o tempo Dano mecânico dominante

Tabela 2.2 – Espectro do processo de erosão-corrosão.

A variação dos mecanismos é mostrada na figuras 2.6a, 2.6b, 2.6c, 2.6d.

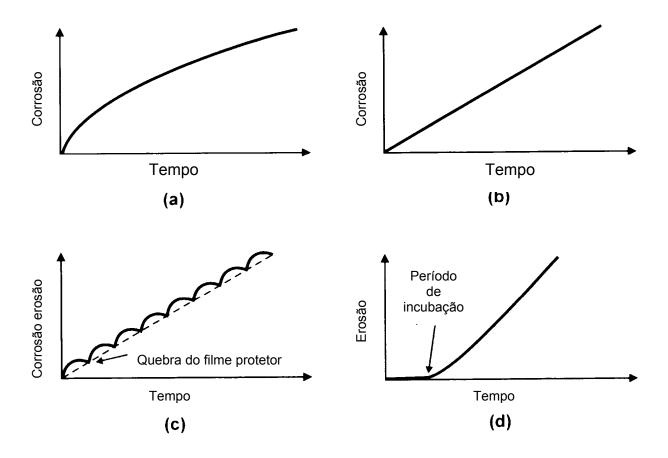


Figura 2.8 - Vários comportamentos e processos de corrosão/erosão dependentes do tempo: (a) corrosão segue uma lei parabólica em função do tempo, (b) corrosão segue uma lei linear com o tempo, (c) erosão e corrosão seguem uma lei quase-linear com o tempo com repetidas rupturas no filme protetor superficial e (d) dependência linear da erosão com o tempo após um período inicial de incubação. (ROBERGE, 2004)

Em água estagnada, a taxa de corrosão é baixa e decresce parabolicamente com o tempo devido à formação e crescimento de um filme de corrosão protetor na superfície (curva (a) na Figura 2.6). Em baixas velocidades de escoamento para as quais condições escoamento laminar e turbulento coexistem, a corrosão é originada a partir de um processo acelerado pelo escoamento. O filme protetor que se forma na superfície devido à corrosão é dissolvido pela água escoando. É geralmente aceito que o fenômeno é um processo em estado estacionário. Este exibe uma cinética linear de corrosão (curva (b) na Figura 2.6), isto é, a camada dissolvida na interface óxido-água é substituída por uma nova camada de mesma espessura. Acima de uma velocidade crítica de escoamento, conhecida como velocidade breakaway, o filme protetor é continuamente danificado e removido. O papel, normalmente, protetor da camada de óxido pode estar comprometido. Deste modo a taxa de degradação total é uma função de ambos o dano mecânico ao filme e a

corrosão a partir da oxidação. Quando o filme é frequentemente rompido, o processo de desgaste possui uma taxa quase-linear (curva (c) na Figura 2.6).

Em elevadas velocidades de escoamento, o processo de remoção do metal é causado por cavitação-erosão ou por impactos de gotículas. O filme de óxido é continuamente removido, e perdas elevadas de material ocorrem. Este comportamento é basicamente causado por erosão pura do metal com uma pequena componente de corrosão. O processo de desgaste se torna dependente do tempo e experimenta um período de incubação (curva (d) na Figura 2.6). O período de incubação está relacionado ao tempo necessário para uma superfície metálica se tornar frágil. (ROBERGE, 2004)

Assim, um filme de maior dureza, aderente e contínuo irá oferecer melhor proteção do que um filme com grande facilidade de remoção por esforços mecânicos ou pelo desgaste da superfície. Geralmente, a natureza do filme protetor que se forma em um dado metal depende do ambiente específico o qual o metal está exposto. O aço inoxidável é um exemplo de material altamente vulnerável a corrosão-erosão, já que ele depende da sua passividade para garantir a resistência à corrosão.

#### 2) turbulência

No escoamento turbulento ocorrem agitações maiores de um líquido quando comparado com um escoamento laminar. Como conseqüência desta característica, torna-se maior a freqüência com que partículas sólidas colidem contra a superfície de um material e assim tornando a formação do filme passivo mais difícil. O tipo de escoamento obtido depende da taxa e da quantidade de fluido bombeado bem como da geometria e características de projeto do equipamento. Agitadores e estrangulamentos em tubulações são componentes típicos que operam sob a condição turbulenta.

### 3) natureza do metal ou liga

Fatores como, a composição química, resistência à corrosão, dureza e o histórico metalúrgico de metais e ligas, podem influenciar no desempenho destes materiais sob condições de corrosão-erosão. A composição química tem papel fundamental na resistência à corrosão. Uma vez que, seja um metal ativo ou uma liga composta por elementos ativos, está resistência à corrosão é devido à facilidade de se formar e de se manter filmes protetores sobre a superfície metálica.

### 3. - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. OBJETIVO

Os experimentos foram realizados com o objetivo de determinar a taxa de erosão, a taxa de corrosão e a taxa de corrosão-erosão de um aço inox ABNT 304. O aço não recebeu nenhum tratamento permanecendo como recebido (encruado). As condições dos ensaios foram pré-estabelecidas para que se pudesse verificar a influência da temperatura nas taxas de erosão, corrosão e corrosão-erosão, e também investigar para cada condição a presença de algum efeito sinergético que pudesse vir a acelerar a perda de massa do material. Nos testes, os tempos de ensaio foram de 60 e 120 minutos, pois são tempos que apresentam as taxas de desgaste em regime permanente à temperatura ambiente, não significando que o mesmo ocorre à 40° e 50 °C que são as temperaturas dos ensaios realizados.

## 3.2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

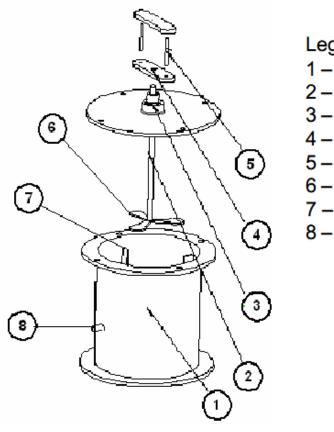
Todos os experimentos foram realizados no laboratório de materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo.

### 3.2.1. Erosímetro/ Banho Termostático

O erosímetro utilizado para realização dos testes pertence ao laboratório de materiais da UFES, e foi concebido, projetado e construído por Bowen (2004), onde ele empregou para o estudo da corrosão-erosão de aço para tubo de revestimento em meio contendo H<sub>2</sub>S. O projeto deste erosímetro foi idealizado de acordo com a literatura de Clark (1991), onde este o empregou para comparar a perda de massa por erosão em quatro tipos de aço utilizados como material para tubos de revestimento na indústria petrolífera.

Todas as suas partes foram dimensionadas para que se pudesse garantir a suspensão das partículas sólidas de partícula abrasiva quando o mesmo fosse agitado (BOWEN, 2004). Durante os testes, deveria ser atingido um fluxo turbulento dentro do reservatório, tal como ocorrem em poços de petróleo, e um alto índice de partículas em suspensão deveria colidir contra a amostra em diferentes ângulos de incidência.

O reservatório foi construído a partir de um tubo de aço inox 304 com 250 mm de diâmetro interno e 8 mm de espessura de parede, tendo como capacidade máxima 8 litros. Um eixo de aço inox vertical foi montado no centro, suportando duas amostras verticais a uma distância de 48 mm da rotação axial. Um agitador mecânico de 255 W de potência e rotação máxima de 2000 rpm, regulável através de uma caixa de engrenagens e equipado com tacômetro digital, foi utilizado para realização dos testes. O reservatório dispunha, ainda, de quatro tiras verticais, chamadas de baffles, dispostas 90 ° uma em relação a outra, e foi agitado com uma hélice do tipo naval de 120 mm de diâmetro com inclinação axial. A largura das tiras verticais (Lb) foi tomada com base no diâmetro do tanque (DT), isto é Lb = 0,1 DT, e as mesmas foram soldadas a uma distância de 2 mm da parede do reservatório para que não ficasse retida nenhuma partícula sólida na superfície das tiras. O conjunto tiras verticais-agitador tinha como função precípua manter o fluxo turbulento dentro do erosímetro, além de garantir a máxima suspensão das partículas sólidas. O erosímetro dispunha, ainda, de uma junta de vedação de borracha para que não ocorresse nenhum vazamento durante a realização dos experimentos. Os componentes do reservatório citados acima são mostrados na Figura 3.1.



# Legenda:

- 1 Recipiente
- 2 Eixo de aço inox
- 3 Bucha de Vedação
- 4 Suporte de polietileno
- 5 Amostras
- 6 Hélice
- 7 Baffle
- 8 Válvula

Figura 3.1 Componentes do Erosímetro (BOWEN, 2004)

Para fazer o controle da temperatura do ensaio foi usado um banho termostático da marca Veb Prufgerate – Werk de 0,6 kW de potência e que opera da temperatura ambiente até 70 °C. O equipamento pode ser visto na figura 3.2.



Figura 3.2 – Banho Termostático usado para controlar as temperaturas do ensaio.

### 3.2.2. Amostras

As amostras obtidas a partir de uma barra de aço inoxidável AISI 304 com diâmetro de 3/16 polegadas (4,76mm) e 4 metros de comprimento, sendo confeccionadas 48 amostras de comprimento igual a 60 mm. Não houve nenhum tratamento nas amostras permanecendo no estado no qual o material foi recebido. Durante os testes, as amostras foram fixadas em dois suportes de polietileno para evitar a geração de pilha eletroquímica (amostra-suporte) conforme ilustra a figura 3.3. A área frontal sujeita ao impacto de cada amostra foi de 238,0 mm² (área = diâmetro X comprimento).



Figura 3.3 – Amostra-suporte fixada ao eixo.

As taxas de erosão, de corrosão e de corrosão-erosão das amostras foram determinadas a partir da perda de massa medidas por gravimetria, isto é, pela diferença de peso antes e após os testes utilizando uma balança analítica Sartorius CP 225D com resolução de 0,01 mg.

### 3.2.3. Abrasivo

O abrasivo usado nos testes de erosão pura e corrosão-erosão foi a areia normal brasileira do IPT (Instituto de Pesquisa e Tecnologia) padronizada segundo as normas NBR 7214 e NBR 5734, que contém a sílica como mineral predominante, na faixa de granulometria entre 150 µm e 300 µm. No experimento, foi adotada uma concentração de 4% em peso (184g) baseado em estudos anteriores (CLARK, 1991) onde foi constatado que com essa concentração não há interferência partícula-partícula que pudesse afetar os resultados.

### 3.2.4. Líquido

O Líquido usado no experimento foi água destilada com densidade aproximada de 1000 Kg/m³ e viscosidade de 0,8927 centipoises a temperatura ambiente de 25 °C. O volume de água nos ensaios foi de 4600 ml. Nos testes de corrosão pura e corrosão-erosão foi adotada uma solução proposta por Tsujikawa et alli (1993). Esta solução é composta de 5% em peso de cloreto de sódio (NaCl) + 0,5 % em peso de ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) + 10<sup>-3</sup> mol/l de tiossulfato de sódio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

#### 3.2.5. Velocidade de teste

A velocidade adotada nos testes foi de  $1500 \pm 50$  rpm, que corresponde a uma velocidade de impacto de aproximadamente  $7.5 \pm 0.4$  m/s da areia contra a superfície do corpo de prova. Este valor foi escolhido de modo que em comparação aos experimentos realizados por Louzada (2008) apenas haja a alteração na temperatura e, assim, possa-se analisar a influência desta nas taxas de desgaste.

## 3.2.6. Desaeração com argônio

Antes de se iniciar os testes de corrosão pura e corrosão-erosão, o reservatório foi desaerado com argônio de alta pureza (99,99%) durante 30 minutos a uma vazão de 2 l/min. O objetivo deste procedimento foi remover o oxigênio contido no recipiente que poderia consumir o H<sub>2</sub>S afetando os resultados dos ensaios e não possibilitando a verificação do dano causado pela solução utilizada, que simula uma baixa concentração de H<sub>2</sub>S.

## 3.2.7. Ensaio de dureza, metalografia e MEV

Uma amostra foi lixada, polida e atacada quimicamente para que pudesse se fazer a análise metalográfica. O reagente utilizado possui a seguinte composição química 10 ml ácido acético, 10 ml ácido nítrico, 15 ml ácido clorídico e 5 ml de glicerina durante 60 segundos. O ensaio de dureza foi realizado na amostra embutida na baquelite, para que se pudesse comparar os resultados obtidos à 40 °C com os dados de ensaios realizados em temperatura ambiente e sua possível influência nas as taxas de erosão, corrosão e corrosão-erosão.

Foi feito também a análise no MEV das amostras ensaiadas no erosímetro para verificar, a partir da topografia das amostras, os mecanismos de desgaste ocorrido durante os testes. E com o uso da ferramenta EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) foi obtida a composição química do material das amostras ensaiadas e não-ensaiadas.

## 3.2.8. Procedimentos para realização dos ensaios no erosímetro

Foram seguidos procedimentos padrões de preparação durante todos os ensaios para que pudesse ser minimizado o erro decorrente da manipulação do ensaio. Os mesmos são detalhados no ANEXO I.

## 4. - RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 4.1. ANÁLISE METALOGRÁFICA E ENSAIO DE DUREZA

Foi realizado ensaio de microdureza no aço inoxidável AISI 304 encruado tendo como resultado o valor de 346 HV que é compatível com os 348 HV encontrado por Louzada (2008).

Além disso, foi feita uma análise metalográfica da amostra, na figura 4.1 pode-se ver uma foto feita no MEV.

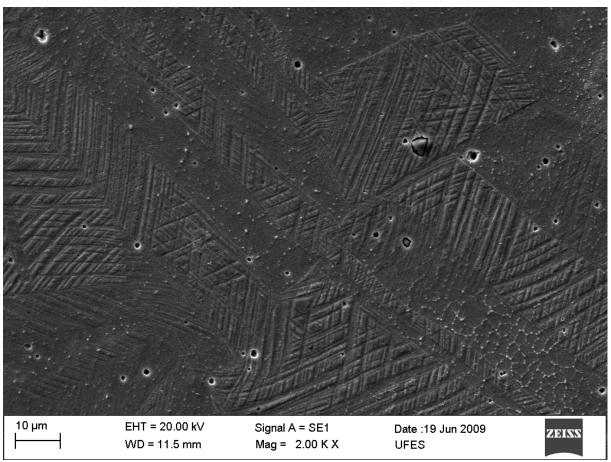


Figura 4.1 – Foto tirada no MEV de uma amostra de aço AISI 304 com um aumento de 2.000X.

Podem ser observadas algumas linhas cruzadas que são bandas de deslizamento.

Na figura 4.2 observa-se regiões de onde foram feitas as análises químicas na amostras, as quais estão destacadas.

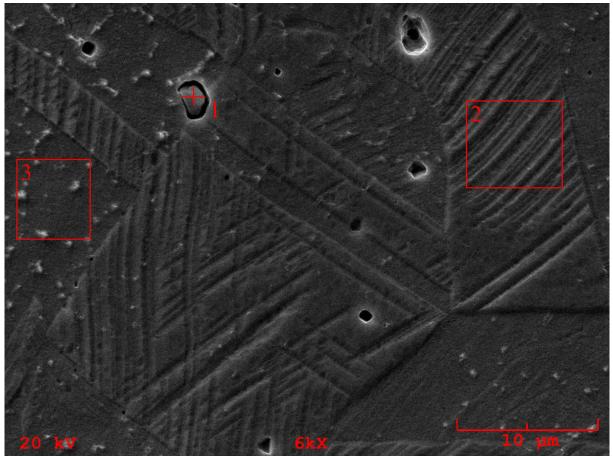


Figura 4.2 – Regiões da amostra de aço AISI 304 analisadas quanto sua composição química no MEV.

Os resultados da análise química podem ser visto na tabela 4.1

	Região 1	Região 2	Região 3
Elemento	Concentração	Concentração	Concentração
	(% em peso)	(% em peso)	(% em peso)
Fe	10,646	65,352	68,165
Cr	18,962	18,693	18,962
Ni	1,098	8,887	8,784
0	30,687	-	-
S	-	0,031	0,065

Tabela 4.1 - Concentração em peso da composição química do aço inoxidável AISI 304 referente a análise realizada na região 1.

A concentração de oxigênio na região 1 indica a presença de óxido na superfície. Nas outras regiões as composições estão em conforme com as porcentagens encontradas em um aço AISI 304, atentando apenas para um pequeno aumento da quantidade de enxofre na região 3, mas a medida foi encontrada apenas nesta região.

# 4.2. CURVAS DE CALIBRAÇÃO

Nem todo calor gerado no banho termostático chega ao erosímetro de forma que a temperatura nos dois equipamentos não são necessariamente iguais. Devido a este fato foram levantadas curvas de calibração para apurar como o banho influencia a temperatura do erosímetro. Os resultados são indicados através das figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7.

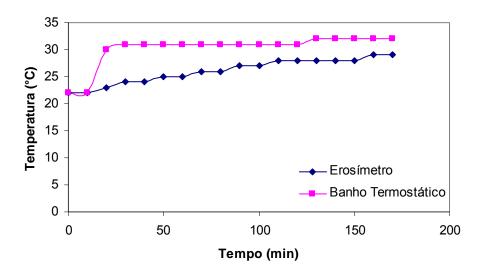


Figura 4.3 – Curva de calibração do conjunto Erosímetro-Banho Termostático para temperatura requerida de  $30^{\circ}$ C.

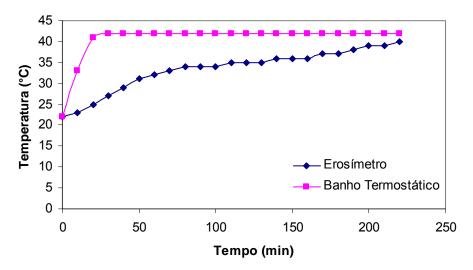


Figura 4.4 – Curva de calibração do conjunto Erosímetro-Banho Termostático para temperatura requerida de  $40^{\circ}$ C.

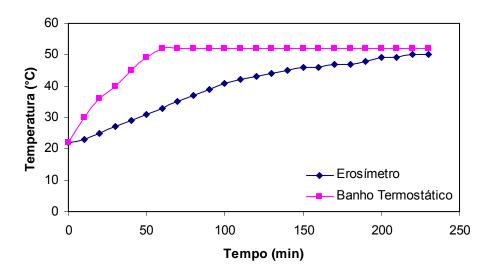


Figura 4.5 – Curva de calibração do conjunto Erosímetro-Banho Termostático para temperatura requerida de 50°C.

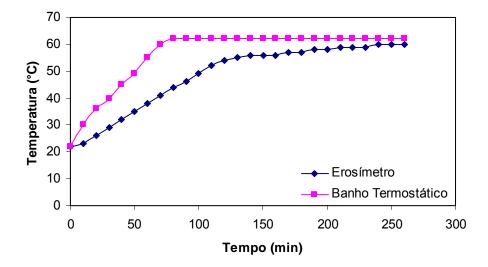


Figura 4.6 – Curva de calibração do conjunto Erosímetro-Banho Termostático para temperatura requerida de 60°C.

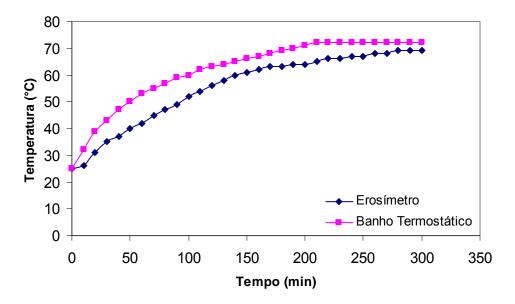


Figura 4.7 – Curva de calibração do conjunto Erosímetro-Banho Termostático para temperatura requerida de 70°C.

Nota-se, que mesmo entrando em um regime permanente, a temperatura do erosímetro não atinge a temperatura do banho termostático, sendo 2°C a diferença média entre as temperaturas. Para contornar esse problema apontou-se no termopar do banho a temperatura requerida acrescida de dois graus para que no erosímetro fosse atingida a temperatura necessária de teste.

## 4.3. ENSAIOS DE EROSÃO PURA

Foram conduzidos testes de erosão pura para o aço inoxidável AISI 304 à 40 °C durante 60 minutos para analisar a influência da temperatura sobre a taxa de erosão e de perda de massa do material. Os resultados são mostrados nas figuras 4.8 e 4.9.

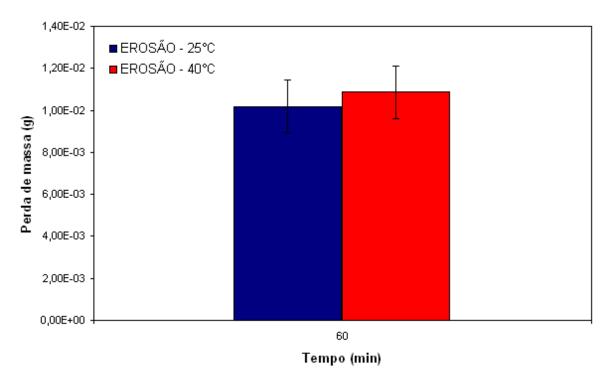


Figura 4.8 – Perda de massa das amostras de aço inoxidável 304 a 25 e 40 °C para o tempo de 60 minutos.

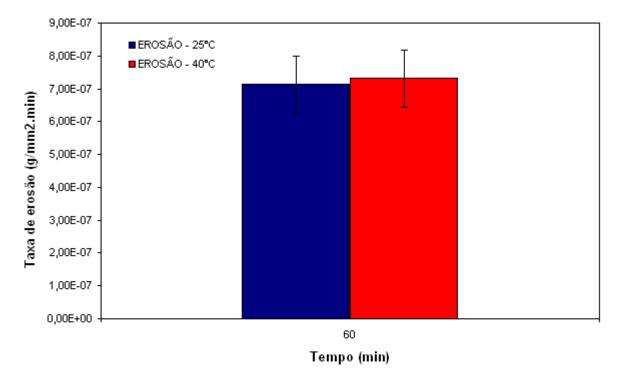


Figura 4.9 – Taxa de erosão das amostras de aço inoxidável 304 a 25 e 40 °C para o tempo de 60 minutos.

A taxa de erosão média encontrada foi de 7,30742 x 10<sup>-07</sup> g/mm<sup>2</sup>.min correspondendo a 2 % acima do valor encontrado por Louzada (2008). Portanto, não

foi notada uma alteração significativa da taxa de erosão devido o acréscimo de temperatura, já que as outras condições de ensaio não foram modificadas.

A análise química realizada no MEV resultou nos dados da tabela 4.2.

Elemento	Concentração (% em peso)	
<b>-</b> .	,	
Fe	63,051	
Cr	17,137	
Ni	7,042	
S	0,374	

Tabela 4.2 – Composição química em concentração em peso do aço inoxidável 304 submetido ao ensaio de erosão à 40 °C durante 60 minutos.

Nota-se que apesar do teor de enxofre medido nessa região da superfície ser baixo, ele é superior ao especificado na composição nominal, em torno de 0,03% em peso. Além disto, os teores de níquel e cromo medidos são inferiores aos valores mínimos da faixa de composição química nominal, respectivamente 8 e 18% em peso. Os valores encontrados sugerem que o aço dever do tipo 301, porém é necessário realizar uma análise química por um método mais preciso.

A região analisada pode ser vista na figura 4.10 abaixo.

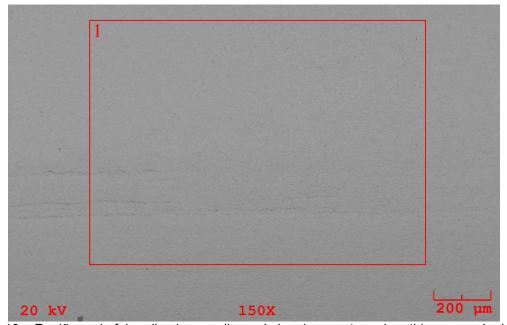


Figura 4.10 – Região onde foi realizada a analise química da amostra submetida ao ensaio de erosão à 40 °C durante 60 minutos com um aumento de 150X.

Foi analisada no MEV a topografia resultante do desgaste erosivo, e abaixo são mostradas as partes centrais das amostras que sofreram este tipo de desgaste.

Pode ser visto na Figuras 4.11a e 4.11b deformações geradas pelo desgaste erosivo, evidenciando assim, o mecanismo dúctil que se dá a perda de massa por este tipo de desgaste. Em alguns pontos, são observados alguns raros riscos indicando impactos oblíquos mesmo na parte central.

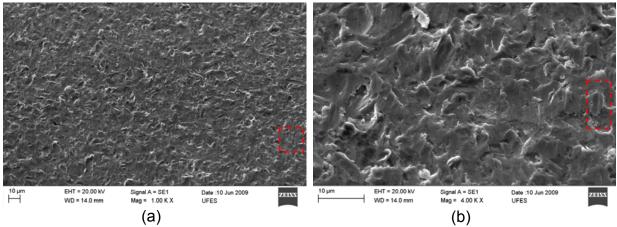


Figura 4.11 – Fotos tiradas no MEV da amostra submetida a 60 minutos de ensaio no erosímetro. a) parte central da face erodida com aumento de 1000X; b) parte central da face erodida com aumento de 4000X. Ambas apresentam marcas de desgaste erosivo com alguns raros riscos provenientes de impactos oblíquos

## 4.4. ENSAIOS DE CORROSÃO PURA

Foram realizados ensaios de corrosão pura para o aço inoxidável AISI 304 à 40 °C durante 60 e 120 minutos para analisar a influência da temperatura sobre a taxa de erosão e de perda de massa do material. Os resultados podem ser observados nos figuras 4.12 e 4.13.

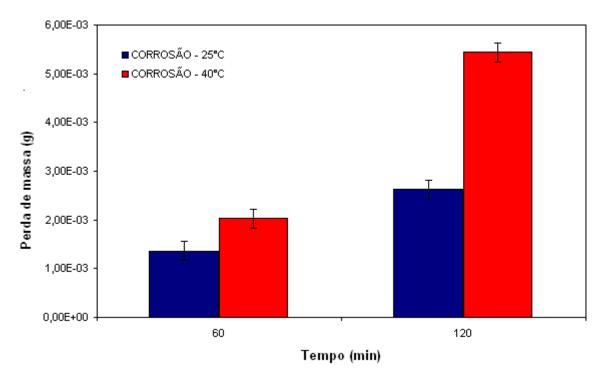


Figura 4.12 – Perda de massa das amostras de aço inoxidável 304 à 25 °C e 40 °C com o tempo.

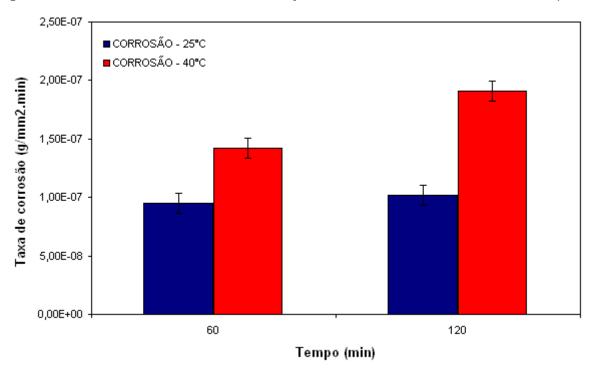


Figura 4.13 – Taxa de corrosão das amostras de aço inoxidável 304 à 25 °C e 40 °C com o tempo.

A taxa de corrosão média levantada nos ensaios foi de 1,41982 x 10<sup>-07</sup> g/mm<sup>2</sup>.min para o tempo de 60 minutos e 1,90564 x 10<sup>-07</sup> g/mm<sup>2</sup>.min para 120 minutos de ensaio. Em relação aos valores encontrados por Louzada (2008) houve um aumento de 49 % e 86 % nas taxas de corrosão para 60 e 120 minutos, respectivamente. Esse é aumento expressivo demonstrando a interferência da temperatura na taxa de

corrosão do aço 304. Devido ao fato de uma maior energia de ativação estar disponível para a reação química.

Foi realizada a análise química no MEV das amostras submetida ao ensaio de corrosão, da peça ensaiada durante 60 minutos tem-se os dados retirados das 3 regiões mostradas na figura 4.14.

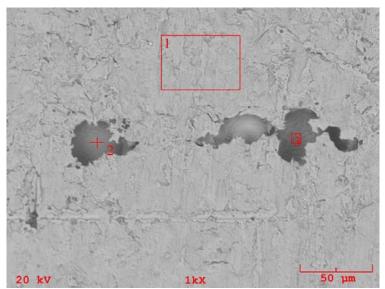


Figura 4.14 – Regiões da amostra ensaiada durante 60 minutos a temperatura de 40°C analisadas quanto sua composição química no MEV com um aumento de 1000X.

A tabela 4.3 apresenta os dados da análise das regiões destacadas na figura 4.14.

	Região 1	Região 2	Região 3
Elemento	Concentração	Concentração	Concentração
	(% em peso)	(% em peso)	(% em peso)
Fe	63,448	61,375	60,494
Cr	17,717	28,036	24,055
Ni	7,651	2,278	6,380
S	1,893	0,640	1,337

Tabela 4.3 – Composição química em concentração em peso do aço inoxidável 304 submetido ao ensaio de corrosão à 40 °C durante 60 minutos na região 1.

Em todas as regiões a quantidade de enxofre é maior que as taxas encontradas na amostras da análise metalográfica e do ensaio de erosão, significando, de acordo com Duret-Thual, Costa e Marcus (1997), que há a adsorção de enxofre na superfície metálica, seja resultado de corrosão ou deposição de íons de sulfato. Nas regiões de pite encontra-se uma maior quantidade de cromo sendo possível

resultado de carbetos de cromo, carecendo de um método de análise química mais preciso para inferir mais conclusões.

Para o ensaio de 120 minutos a análise foi realizada conforme as regiões mostradas na figura 4.15.

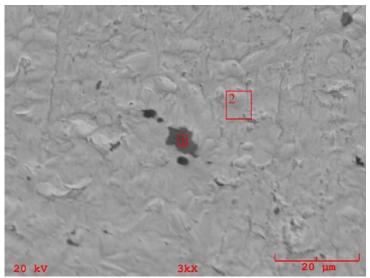


Figura 4.15 – Regiões da amostra ensaiada durante 120 minutos a temperatura de 40°C analisadas quanto sua composição química no MEV com um aumento de 3.000X.

A tabela 4.4 apresenta os resultados da região 1 da amostra ensaiada a 40 °C e 120 minutos.

	Região 1	Região 2
Elemento	Concentração	Concentração
	(% em peso)	(% em peso)
Fe	67,960	66,724
Cr	25,728	18,798
Ni	2,381	7,350
S	0,056	0,042

Tabela 4.4 – Composição química em concentração em peso do aço inoxidável 304 submetido ao ensaio de corrosão à 40 °C durante 120 minutos na região 1.

A quantidade de enxofre, para as amostras ensaiadas à 120 minutos, esta próxima do valor nominal, indica que conforme Roberge (2004) os produtos de corrosão foram retirados pelo escoamento do líquido de ensaio ou pela dissolução. Mais uma vez temos uma quantidade maior de cromo no pite.

É mostrada abaixo, a região central das amostras corroídas, submetida ao teste de corrosão pura durante 60 minutos, com prévia desaeração. As Figuras 4.16 a e b

mostram a superfície de uma das amostras ensaiadas neste teste. Podem ser observados os sinais do ataque corrosivo.

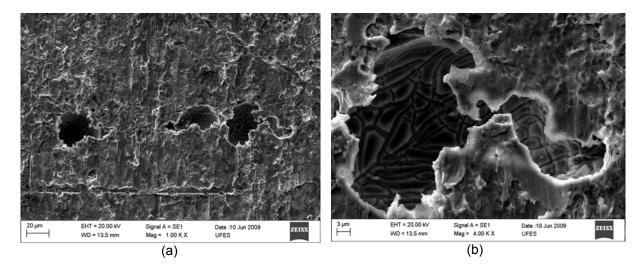


Figura 4.16 – Fotos tiradas no MEV da amostra submetida a 60 minutos de ensaio no erosímetro. a) parte central da face da amostra corroída com aumento de 1000X; b) parte central da face da amostra corroída com aumento de 4000X.

## 4.5. ENSAIOS DE CORROSÃO-EROSÃO

Os ensaios de corrosão-erosão foram executados a uma temperatura de 40°C nos tempos de 60 e 120 minutos. Sendo obtida a taxa de 1,27188 x 10<sup>-6</sup> g/mm².min para o primeiro caso e 1,38060 x 10<sup>-6</sup> g/mm².min para o segundo caso. Comparando-se aos valores encontrados por Louzada (2008) são encontrados aumentos de 28 % e 35 %, respectivamente. Foram realizados ensaios na temperatura de 50 °C, e foi obtida uma taxa de 1,67734 x 10<sup>-06</sup> g/mm².min, sendo a maior para o tempo de 60 minutos. Como não foram encontradas alterações significativas no ensaio de erosão pura, os aumentos nas taxas de corrosão erosão podem ser creditados aos efeitos da temperatura sobre os mecanismos de corrosão. Para a temperatura de 50°C não foi possível a realização dos experimentos de erosão e corrosão pura, ficando a oportunidade para trabalhos futuros. Os resultados podem ser vistos nas figuras 4.17 e 4.18.

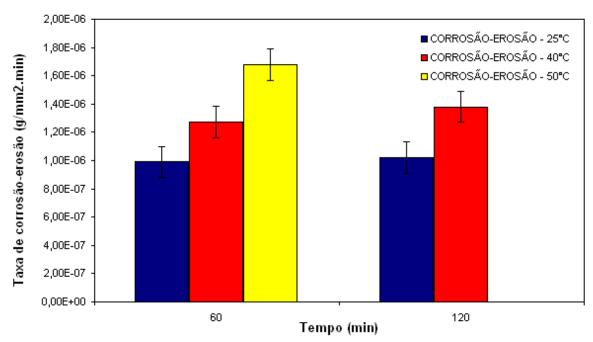


Figura 4.17 – Taxa de corrosão-erosão das amostras de aço inoxidável 304 à 25 °C, 40 °C e 50 °C durante 60 minutos e à 25 °C e 40 °C durante 120 minutos.

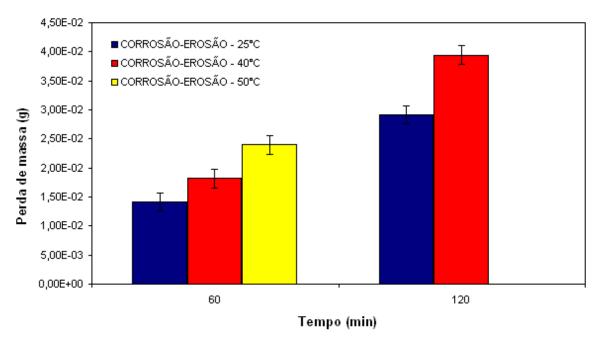


Figura 4.18 – Perda de massa das amostras de aço inoxidável 304 à 25 °C, 40 °C e 50 °C durante 60 minutos e à 25 °C e 40 °C durante 120 minutos.

Da figura 4.19 pode-se ver que para as condições dos experimentos realizados temse um aumento exponencial da taxa de corrosão-erosão com o tempo.

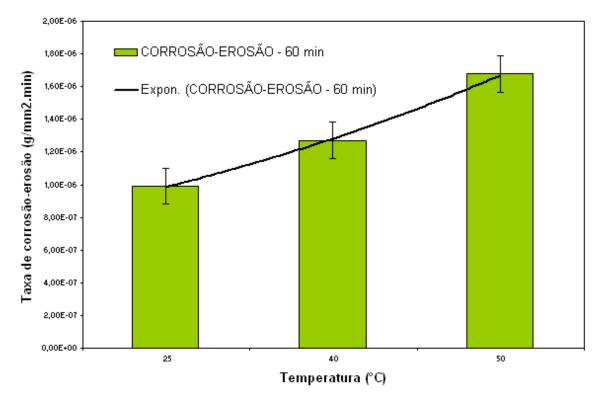


Figura 4.19 – Taxa de corrosão-erosão das amostras de aço inoxidável 304 ensaiadas durante 60 minutos com a temperatura.

Na tabela 4.5 pode-se ver as taxas de deterioração médias e se existiu ou não o efeito sinérgico à temperatura de 40 °C condições ensaiadas.

Tempo (min)	Perda de massa (g)			
Tempo (min)	Erosão	Corrosão	Corrosão-erosão	Efeito sinérgico
60	0,01086	0,00202	0,01816	0,00528
120	-	0,00544	0,03943	-

Tabela 4.5 – Perda de massa e avaliação do efeito sinérgico para a temperatura de 40 °C.

Dos resultados apresentados na tabela acima nota-se o efeito sinérgico na condição de 60 minutos e 40 °C, pois a taxa de corrosão-erosão foi maior que a soma das taxas de erosão pura e corrosão pura. Segundo Stack (2004) a erosão pode ter aumentado a taxa de corrosão pela remoção do filme passivo ou enquanto a corrosão pode ter incrementado a taxa de erosão através da dissolução do metal, ou ainda através da formação de uma camada de produtos de corrosão porosa facilmente removida pelos eventos erosivos. Como a taxa de erosão não sofreu grandes alterações, acredita-se que o efeito sinérgico é devido à contribuição da erosão na taxa de corrosão.

A análise química feita no MEV forneceu os seguintes resultados apresentados nas tabelas 4.6 e 4.7.

Elemento	Concentração (% em peso)	
Fe	61,375	
Cr	28,036	
Ni	2,278	
S	0,592	

Tabela 4.6 – Composição química em concentração em peso do aço inoxidável 304 submetido ao ensaio de corrosão-erosão à 40 °C durante 60 minutos.

Elemento	Concentração (% em peso)	
Fe	65,864	
Cr	19,658	
Ni	8,371	
S	0.640	

Tabela 4.7 – Composição química em concentração em peso do aço inoxidável 304 submetido ao ensaio de corrosão-erosão à 40 °C durante 120 minutos.

Assim como nos casos de corrosão encontra-se um teor maior de enxofre, podendo ser resultado de corrosão ou de deposição de íons de enxofre. No caso do cromo, tem-se a formação de uma camada passivadora ainda não retirada pelo escoamento.

Na corrosão-erosão, também foi observado deformações plásticas, como no desgaste puramente erosivo, devido ao impacto frontal das partículas abrasivas em suspensão no meio lamacento, caracterizando assim o mecanismo dúctil pelo qual se deu o desgaste. Nas Figuras 4.20a e 4.20b são mostrados os aspectos superficiais das amostras submetidas a 120 minutos de teste.

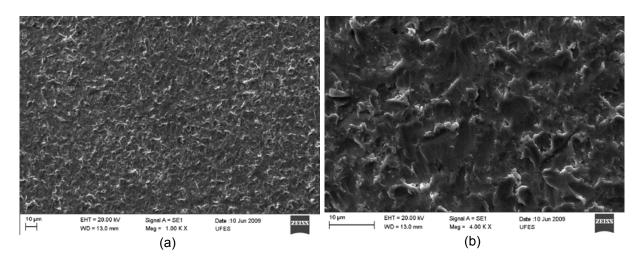


Figura 4.20 – Fotos tiradas no MEV da amostra submetida a 120 minutos de ensaio no erosímetro. a) parte central da face da amostra submetida à corrosão-erosão com aumento de 1000X; b) parte central da face da amostra submetida à corrosão-erosão com aumento de 4000X.

## 5. - CONCLUSÕES

- 1) A temperatura não influenciou nos mecanismos de erosão a 40 °C durante o ensaio de 60 minutos.
- 2) O mecanismo pelo qual se deu a perda de massa por erosão pura e corrosãoerosão é o mecanismo dúctil.
- 3) A temperatura influenciou os mecanismos de corrosão aumentando significativamente a taxa de corrosão em relação ao encontrado na literatura à temperatura ambiente.
- 4) Nos ensaios de corrosão-erosão o aumento da taxa de deterioração é devido a influencia da temperatura na corrosão, já nos ensaios de erosão pura não houve mudanças significativas.
- 5) Houve deposição de enxofre nos ensaios que envolviam corrosão aumentando a quantidade desse elemento na superfície do metal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/apresent\_petrobras\_desafios \_seleção\_materiais\_v2.pdf.

LOUZADA, D. A. Análise da influência de tratamento térmico na resistência à corrosão-erosão do aço inoxidável AISI 304, PPGEM-UFES, 2008.

CALLISTER JR, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais, 2002.

SEDRIKS, A. John. Corrosion of stainlees steels, 1996

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica Vol. III - Materiais de Construção Mecânica**, 1986.

STACHOWIAK, G.W. & BATCHELOR, A. W. Engineering Tribology, 2001.

ZUM GHAR, K.H. Microstructure and wear of materials, 1987.

HUTCHINGS, Ian M. **Tribology friction and wear of engineering materials**, Cambridge, Ed.Butterworth Heinemann, 1992.

CLARK, H. McI, A comparison of the erosion rate of casing steels by sand-oil suspensions, Wear, vol. 151, pp: 217-230, 1991.

CLARK, H. Mcl. Particle velocity and size effects in laboratory slurry erosion measurements OR... do you know what your particles are doing?, Tribology International, vol. 35, pp. 617-624, 2002.

CLARK, H. Mcl. The influence of the squeeze film in slurry erosion, Wear, vol. 256, pp. 918-926, 2003.

FOX, ROBERT W.; McDONALD, ALAN T.; PRITCHARD, PHILIP J. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 2006.

CLARK, H. McI.; WONG, K. K. A model of particle velocities and trajectories in a slurry pot erosion tester, Wear, vol. 160, pp. 95-104, 1993.

GENTIL, Vicente. Corrosão, 1996.

TSUJIKAWA, S. et alli, Alternative for evaluation Sour gás resistance of low-alloy steels and corrosion-resistance alloys, Corrosion, vol. 9, n° 5, pp. 409-419, 1993.

C. DURET-THUAL, D. COSTA, W.P. YANG, P. MARCUS. The role of thiosulfates in the pitting corrosion of Fe-17Cr alloys in neutral chloride solution. Eletrochemical and XPS study, Corrosion, vol. 39, n° 5, pp. 913-933, 1997.

P. MARCUS, E. PROTOPOPOFF, Thermodynamics of thiosulfate reduction on surfaces of iron, nickel and chromium in water at 25 and 300 °C, Corrosion, vol. 39, n° 9, pp. 1741-1752, 1997.

FONTANA, M.G., Corrosion Engineering, 1987.

NEVILLE, A.; HU, X., Mechanical and electrochemical interations during liquid-solid impingement on high-alloy stainless steel, Wear, vol 251, pp.1284-12994, 2001.

M.M. STACK, N. PUNGWIWAT, Erosion-corrosion mapping of Fe in aqueous slurries: some views on a new rationale for defining the erosion-corrosion interaction, Wear, vol. 256, pp. 565–576, 2004.

MADSEN, B.W. Measurement of erosion-corrosion synergism with a slurry test apparatus., Wear, vol 123, pp.127-142, 1998.

ROBERGE, P. Corrosion Testing Made Easy: Erosion-corrosion, 2004.

POULSON, B. **Complexities in predicting erosion corrosion**, Wear, vol 233–235, pp. 497-504, 1999.

BOWEN, E. C. Corrosão-erosão de aço para tubo de revestimento em meio contendo H<sub>2</sub>S, dissertação de mestrado, PPGEM-UFES, 2004.

# **ANEXOS**

### ANEXO I – PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

### **ENSAIOS DE EROSÃO**

- 01 Colocar 4600 ml de água no tanque de aço inoxidável com o auxílio de um Becker de 2 litros.
- 02 Colocar 4% em peso (184 gramas) de areia padrão 150 µm dentro do tanque de aço inoxidável.
- 03 Aquecer a solução de acordo com o procedimento de aquecimento da solução de ensaio
- 04 Retirar 2 corpos de prova do desumidificador e realizar o processo de limpeza dos mesmos (ver limpeza).
- 05 Realizar a pesagem dos 2 corpos de prova de forma separada (ver procedimento de pesagem).
- OBS: Manter a tampa da balança fechada e todos os equipamentos que gerem vibração desligados.
- 06 Prender os corpos de prova no suporte com o auxílio de uma pinça tomando cuidado para que o mesmo não efetue nenhuma rotação em torno do seu eixo.
- 07 Fixar a hélice na haste.
- 08 Fixar o conjunto (CP's, suporte e haste) no motor já encaixado por dentro da tampa.
- 09 Posicionar o motor com relação à altura no suporte tipo ferradura (ver marcação).
- OBS: Foram feitas marcações para que não houvesse divergência no posicionamento dos CP's.
- 10 Posicionar a haste com relação à altura do mandril (ver marcação).
- 11 Ligar o equipamento e estabilizar a rotação por volta do valor desejado.
- 12 Após o término do ensaio, seguir os procedimentos de limpeza e pesagem.
- 13 Numerá-los e guardá-los no vasilhame do vidro.

## **ENSAIOS DE CORROSÃO**

- 01 Pesar 230 g de NaCl e 1,1408 g de tiossulfato de sódio na balança analítica.
- 02 Dissolver metade do NaCl e do tiossulfato em água destilada dentro de um balão de 2 litros.
- 03 Adicionar 17,48 ml de ácido acético dentro do balão e misturar a solução.
- 04 Repetir o procedimento 2.
- 05 Repetir o procedimento 3.
- 06 Virar os 4 litros de solução no tanque de aço inox e adicionar mais 600 ml de água destilada.
- 07 Retirar 2 corpos de prova do dessumidificador e realizar o processo de limpeza dos mesmos conforme procedimento de limpeza.
- 08 Realizar a pesagem de 2 corpos de prova de forma separada conforme procedimento de pesagem.
- 09 Prender os corpos de prova no suporte com auxilio de uma pinça tomando cuidado para que o mesmo não efetue nenhuma rotação em torno do seu eixo.
- 10 Fixar a hélice na haste.
- 11 Fixar o conjunto (CP's, suporte e haste) no motor já encaixado por dentro da tampa.
- 12 Posicionar o motor com relação à altura no suporte tipo ferradura conforme marcação.
- 13 Posicionar a haste com relação à altura do mandril conforme marcação.
- 14 Desaerar o tanque com argônio de alta pureza (99,99%) durante 30 minutos com uma vazão de 2l/min.
- 15 Aquecer a solução de acordo com o procedimento de aquecimento da solução de ensaio.
- 16 Ligar o equipamento e estabilizar a rotação por volta do valor desejado.
- 17 Após o término do ensaio, seguir os procedimentos de limpeza e pesagem.
- 18 Numerá-los e guardá-los no vasilhame de vidro.

## ENSAIOS DE CORROSÃO-EROSÃO

- 01 Pesar 230 g de NaCl, 1,1408 g de tiossulfato de sódio e 184 g de areia padrão na balança analítica.
- 02 Dissolver metade do NaCl e do tiossulfato em água destilada dentro de um balão de 2 litros.
- 03 Adicionar 17,48 ml de ácido acético dentro do balão e misturar a solução.
- 04 Repetir o procedimento 2.
- 05 Repetir o procedimento 3.
- 06 Virar os 4 litros de solução no tanque de aço inox e adicionar mais 600 ml de água destilada e as 184 g de areia padrão.
- 07 Retirar 2 corpos de prova do dessumidificador e realizar o processo de limpeza dos mesmos conforme procedimento de limpeza.
- 08 Realizar a pesagem de 2 corpos de prova de forma separada conforme procedimento de pesagem.
- 09 Prender os corpos de prova no suporte com auxilio de uma pinça tomando cuidado para que o mesmo não efetue nenhuma rotação em torno do seu eixo.
- 10 Fixar a hélice na haste.
- 11 Fixar o conjunto (CP's, suporte e haste) no motor já encaixado por dentro da tampa.
- 12 Posicionar o motor com relação à altura no suporte tipo ferradura conforme marcação.
- 13 Posicionar a haste com relação à altura do mandril conforme marcação.
- 14 Desaerar o tanque com argônio de alta pureza (99,99%) durante 30 minutos com uma vazão de 2l/min.
- 15 Aquecer a solução de acordo com o procedimento de aquecimento da solução de ensaio.
- 16 Ligar o equipamento e estabilizar a rotação por volta do valor desejado.
- 17 Após o término do ensaio, seguir os procedimentos de limpeza e pesagem.
- 18 Numerá-los e guardá-los no vasilhame de vidro.

#### LIMPEZA DOS CORPOS DE PROVA

1 – Retirar 2 CP's do desumidificador.

OBS: Os CP's estarão imersos em óleo para evitar a oxidação.

- 2 Lavá-lo com detergente em água corrente com o auxílio de uma esponja macia, por aproximadamente 2 minutos.
- 3 Deixar os CP's imersos em acetona dentro de um Becker (250ml), por 8 minutos com o auxílio do utra-som.

OBS: Retirá-los do Becker com o auxílio de uma pinça.

4 – Deixar os CP's imersos em álcool etílico dentro de um Becker por 8 minutos com o auxílio do ultra-som.

OBS: Tomar o cuidado de sempre manter a superfície de ensaio para o lado, a fim de se garantir total remoção das impurezas da superfície, além das amostras serem retidas antes de se desligar o ultra-som.

5 – Secar as amostras em ar quente (secador de cabelo) a uma distância de aproximadamente 2 cm durante 10 minutos, com o cuidado de se utilizar uma pinça (sempre) para a manipulação das mesma, a fim de se evitar ao máximo qualquer tipo de contaminação (suor, poeira, etc), que possa influenciar na medições de massa.

#### PESAGEM DOS CORPOS DE PROVA

 1 – Colocar as amostras em pé no centro da balança a após estabilizar a medida (quando surgir o "g" (grama)), fazer a medição após 15 segundos (cronômetro).

OBS: Após o ensaio repetir o mesmo procedimento de limpeza e de pesagem descritos anteriormente. OBS: Nunca toque na amostra, pois o suor faz diferença.

# AQUECIMENTO DA SOLUÇÃO DE ENSAIO

- 1 Conectar as mangueiras no Banho Termostático e no Erosímetro.
- 2 Verificar se o nível de água no Banho Termostático esta dentro da faixa correta de uso.
- 3 Apontar temperatura requirida no termopar, devido a perdas durante o experimento, recomenda-se adicionar 2°(dois graus) a temperatura desejada.
- 5 Ligar o Banho Termostático.
- 6 Após passado o tempo indicado nas tabelas de calibração, conferir a temperatura do Erosímetro com o auxílio de um termopar.