



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**CAMPUS CURITIBA**

**GERÊNCIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**E DE MATERIAIS - PPGEM**

**ANTONIO KOZLIK JUNIOR**

**SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE FALHA POR  
CORROSÃO EM COMPONENTES MECÂNICOS  
METÁLICOS**

**CURITIBA**

**MARÇO - 2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**ANTONIO KOZLIK JUNIOR**

**SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE FALHA POR  
CORROSÃO EM COMPONENTES MECÂNICOS  
METÁLICOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Materiais, da Gerência de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus Curitiba, da UTFPR.

**Orientador:** Prof. Marcos Flávio de Oliveira Schiefler Filho, Dr. Eng.

**CURITIBA**

**MARÇO - 2007**

## TERMO DE APROVAÇÃO

ANTONIO KOZLIK JUNIOR

# SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE FALHA POR CORROSÃO EM COMPONENTES MECÂNICOS METÁLICOS

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia de materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

---

Prof. Neri Volpato, PhD  
Coordenador do Programa

### Banca Examinadora

---

Prof. Marcos Flávio de Oliveira  
Schiefler Filho, Dr. (UTFPR)

---

Prof. Haroldo de Araújo Ponte, Dr.  
(UFPR)

---

Prof. Carlos Cziulik, PhD  
(UTFPR)

---

Prof. João Batista Floriano, Dr.  
(UTFPR)

Curitiba, 26 de março de 2007

Àqueles que de alguma forma contribuem com a preservação dos recursos naturais esgotáveis.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, pelo apoio e compreensão demonstrados nos muitos momentos em que precisei me ausentar para realizar este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Marcos Flávio de Oliveira Schiefler Filho, por sua atenção e por estar sempre à disposição para auxiliar nesta tarefa.

Ao Prof. César Lúcio Molitz Allenstein, colega e Diretor da Spectroscan Tecnologia de Materiais Ltda., pelas informações técnicas fundamentais e pelo apoio prático e bibliográfico.

Ao PPGEM – UTFPR, por oportunizar os estudos que tornaram realidade este trabalho.

Ao DAMEC – UTFPR, pelo apoio e disponibilidade de recursos didáticos que tornaram possíveis os estudos que levaram à execução deste trabalho.

Ao colega Julio César de Almeida, Engenheiro da Compagás S/A, pela colaboração na disponibilização de dados práticos e informações técnicas.

Aos demais colegas que, direta ou indiretamente, contribuíram com informações e incentivos.

“Tenha em mente que tudo o que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos.”

Albert Einstein

KOZLIK Jr., Antonio, **Sistemática para Análise de Falha por Corrosão em Componentes Mecânicos Metálicos**, 2007, 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

## RESUMO

Uma variada gama de aspectos técnico-econômicos relacionados com o ciclo de vida de equipamentos e, conseqüentemente, de seus componentes, exige a utilização de ferramentas ágeis que permitam diagnosticar - de forma rápida, segura e economicamente viável - as causas de falhas em serviço. Como a grande maioria dos componentes mecânicos é construída em metais, um modo de falha bastante comum está relacionado com processos de corrosão, os quais, em alguns casos, determinam a vida útil dos mesmos. Adicionalmente, a avaliação das causas que levam um componente a falhar é, freqüentemente, realizada de maneira subjetiva e depende do conhecimento prático e da experiência do próprio avaliador. A metodologia adotada neste trabalho baseado na hipótese: "O uso de ferramentas consagradas na manutenção (TFA, FMA, FMEA, TPR, Diagrama de Causa e Efeito, entre outros), aliado a uma classificação e estratificação dos modos de ataque corrosivo em metais, permite a proposição de uma sistemática que auxilia no estudo da causa da falha por corrosão". A análise cuidadosa de diversos estudos de casos permitiu a observação de ações semelhantes durante a etapa de diagnóstico. As principais ações foram associadas a uma metodologia de análise de falha já conhecida. Adicionalmente, diversos casos práticos foram examinados, permitindo verificar a consistência da sistemática proposta. Para isso, é descrito um novo modelo que abrange uma seqüência ordenada de ações visando à análise das causas potenciais de falha por corrosão. Ensaios preliminares aplicando-se o modelo a um grupo de estudantes indicam que o processo de identificação da causa potencial de falha por corrosão pode ser melhor conduzido, economizando tempo e permitindo comparar os resultados com aqueles fornecidos por consultores experientes.

**Palavras-chave:** análise de falha, falha por corrosão, ferramentas de manutenção, sistemática de análise.

KOZLIK Jr., Antonio, A Systematic for Corrosion Failure Analysis of Metallic Mechanical Components, 2007, 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

## **ABSTRACT**

A diversity of technical and economical features related to the life cycle of equipments, and consequently, of their parts, demands the utilization of agile tools that allow to diagnose the causes of failure in service, in a safe, fast and low cost way. As the majority of mechanical components is manufactured from metals, it is very common to occur failure by corrosion processes, which in several cases define their service life. In addition, the assessment of the causes of failure is frequently conducted in a subjective mode and depends on the practical knowledge and experience of the professional involved. The methodology proposed in this work is based on the following hypothesis: "The use of successful tools in maintenance (TFA, FMA, FMEA, TPR, Cause and Effect Diagram, and so on), associated to a classification and stratification of the corrosive attack ways in metals, allow the proposition of a systematic approach to support the study of the corrosion failure causes". The careful analysis of several cases allowed the observation of similar actions during the stage of diagnostic. The main actions have been aggregated to a well-known failure analysis methodology. Additionally, several practical cases have been examined, allowing to verify the consistency of the aimed framework. From that, a novel model that encompasses a sequence of ordinate actions for analyzing the potential causes of failure, considering corrosion, is described. A preliminary test of the model with a group of students indicates that the identification of potential cause of failure by corrosion is better conducted, saving time and mapping the results with those from experienced consultants.

**Keywords:** failure analysis; failure by corrosion; maintenance tools; systematic of analysis.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	14
1.1. Caracterização do Problema.....	14
1.2. Metodologia Adotada .....	16
1.3. Objetivos .....	17
1.4. Organização do Trabalho.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. O Contexto do Estudo da Manutenção .....	19
2.1.1. Análise de Árvore de Falhas (TFA, <i>Tree Fault Analysis</i> ).....	19
2.1.2. Análise do Modo e Efeito da Falha (FMEA, <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> ) .....	21
2.1.3. Diagrama de Causa e Efeito.....	21
2.1.4. Tabulação do Modo de Falha (FMA, <i>Failure Mode Assessment</i> ) .....	24
2.1.5. Plano Técnico para Resolução (TPR, <i>Technical Plan for Resolution</i> ) .....	24
2.2. O Contexto do Estudo da Corrosão .....	26
2.2.1. Processo Químico .....	27
2.2.2. Processo Eletroquímico .....	27
2.2.3. Caracterização da Região Anódica .....	27
2.2.3.1. Classificação Segundo a Morfologia .....	28
2.2.3.2. Classificação de Graus de Corrosão de Acordo Com a Norma N-2260.....	30
2.2.3.3. Padrões Fotográficos Para Avaliação de Formas de Deterioração de Acordo Com a Norma N-2561 da Petrobrás .....	32
2.2.4. Caracterização do Cátodo ou Região Catódica .....	32
2.2.5. Caracterização da Formação da Pilha .....	35
2.2.5.1. A Equação de Nerst .....	36
2.2.5.2. Pilha de Eletrodos Diferentes .....	40
2.2.5.3. Pilha Ativa-Passiva.....	42
2.2.5.4. Pilha de Ação Local.....	42
2.2.5.5. Pilha de Concentração Iônica Diferencial.....	43
2.2.5.6. Pilha de Aeração Diferencial .....	44
2.2.5.7. Pilha Eletrolítica.....	47
2.2.5.8. Pilha de Temperaturas Diferentes .....	48
2.2.6. Caracterização do Eletrólito ou Meio Corrosivo .....	49
2.2.6.1. Corrosão Pela Atmosfera .....	49
2.2.6.2. Corrosão Pelas Águas.....	55
2.2.6.3. Corrosão Pelo Solo .....	58
2.2.6.4. Corrosão Por Produtos Químicos.....	61
2.2.6.5. Meios Corrosivos a Altas Temperaturas.....	61
2.2.7. Fatores Que Contribuem Com o Processo Corrosivo .....	63
2.3. A Metodologia de Dennies .....	64
2.3.1. Os Quatro Passos Para A Solução de Um Problema .....	64

2.3.2. Os Nove Passos Para A Análise da Falha Segundo Dennies [1].....	64
2.3.2.1. Entender e Negociar as Metas da Análise .....	64
2.3.2.2. Obter Claro Entendimento da Falha .....	65
2.3.2.3. Objetividade e Clareza ao Identificar Todas as Causas-Raiz Possíveis .....	66
2.3.2.4. Avaliar Objetivamente a Probabilidade de Cada Causa-Raiz .....	66
2.3.2.5. Atuar na Causa-Raiz Mais Provável.....	67
2.3.2.6. Identificar Claramente Todas as Ações Corretivas Possíveis .....	68
2.3.2.7. Avaliar Objetivamente Cada Ação Corretiva .....	68
2.3.2.8. Selecionar as Melhores Ações Corretivas.....	68
2.3.2.9. Avaliar a Efetividade das Ações Corretivas.....	68
3. TÉCNICA PROPOSTA.....	69
3.1. O que é normalmente executado em uma Análise de Falha por Corrosão .....	70
3.1.1. Determinação do Número de Casos Verificados.....	70
3.1.2. Casos de Análise de Falha por Corrosão.....	70
3.1.2.1. Análise de Caso 1 .....	70
3.1.2.2. Análise de Caso 2 .....	77
3.1.2.3. Análise de Caso 3 .....	82
3.1.3. O Que Foi Executado em Outras Análises de Falhas .....	86
3.1.3.1. Estudos de Casos Selecionados .....	87
3.1.4. Determinação das Ações Mais Comuns em Análise de Falha Por Corrosão....	91
3.2. Como Gerar Uma Seqüência Lógica Para Executar as Ações de Análise.....	91
3.2.1. Construção da Árvore de Falha Primária (ou Básica) Para Casos de Corrosão Eletroquímica .....	92
3.2.1.1. Informações Referentes ao Ânodo.....	92
3.2.1.2. Dados Inerentes ao Tipo de Pilha .....	92
3.2.1.3. Dados Inerentes ao Cátodo.....	93
3.2.1.4. Dados Inerentes ao Eletrólito .....	93
3.2.2. Construção da Árvore de Falhas Secundária.....	93
3.2.3. Árvore de Falha Terciária .....	94
3.2.4. <i>Check List</i> de Análise .....	97
4. APLICAÇÃO DA TÉCNICA .....	98
4.1. Casos de Análise de Falha Por Corrosão de Acordo Com a Técnica .....	98
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	106
5.1. Conclusões.....	106
5.2. Trabalhos Futuros .....	106
6. REFERÊNCIAS.....	107
ANEXO I.....	113

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de TFA [4].....	20
Figura 2 – Exemplo de FMEA [6]. .....	22
Figura 3 – Exemplo de Diagrama de Causa e Efeito [7]. .....	22
Figura 4 – Exemplo de FMA [1].....	24
Figura 5 – Exemplo de TPR [1]. .....	25
Figura 6 – Corrosão Generalizada – Fundo de Tanque Material: ASTM A 283 Gr. C [17]. .....	28
Figura 7 – Sobre espessura de corrosão – Foto referencial para a classificação de Corrosão - Material: ASTM A 385 Gr [17]. .....	31
Figura 8 – Corrosão Tipo I – Material: ASTM A 285 – Gr. [17].....	31
Figura 9 – Corrosão Tipo II – Material: ASTM A 285 – Gr [17].....	32
Figura 10 – Corrosão Tipo III – Material: A 285 – Gr [17].....	32
Figura 11 – Pilha de Eletrodos Diferentes [19]. .....	41
Figura 12 – Pilha Ativa-Passiva [19].....	43
Figura 13 – Pilha de Ação Local [19].....	43
Figura 14 – Pilha de Concentração Iônica Diferencial [19].....	44
Figura 15 – Célula de Aeração Diferencial [19]. .....	45
Figura 16 - Corrosão Por Corrente de Fuga [19].....	47
Figura 17 - Vela Coletora de Cloretos e Suporte da Vela [23].....	54
Figura 18 - Fotos da Vela Coletora de Sulfatos (a) e do Suporte da Vela (b) [23]. ....	55
Figura 19 – Fluxograma da Análise de Falha [1].....	69
Figura 20 - Fotografia 01 - Fita Adesiva [26]. .....	71
Figura 21 - Fotografia 02 – Tubo [26]. .....	71
Figura 22 - Fotografia 03 - Amostra S-8817 – Chapa [26]. .....	72
Figura 23 - Fotografia 04 - Depósito de Material entre Chapa e Tubo [26]. .....	75
Figura 24 - Fotografia 05 - Corrosão Ocorrida no Tubo [26]. .....	75
Figura 25 – Ampliação do Trecho do Tubo [12]. .....	80
Figura 26 – Trinca Transgranular (Ampliada 206 X). .....	81
Figura 27 – Pite na Solda [27]. .....	84
Figura 28 – Pite nas Adjacências da Solda [27]. .....	84
Figura 29 – Metalografia [27].....	85
Figura 30 – Fluxograma Básico.....	94
Figura 31 - Exemplo de Construção de Uma Árvore de Falhas Primária (ou Básica). .....	95
Figura 32 – Exemplo de Construção da Árvore de Falhas Secundária.....	96
Figura 33 - Foto do Sistema [52]. .....	98
Figura 35 - Roda de Liga de Alumínio Corroída [53]. .....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Simbologia Utilizada na Construção da Árvore de Falha [5].	20
Tabela 2 – Série Eletromotriz – Potencial Padrão de Redução $E^0$ a 25°C [16].	34
Tabela 3 - Série Galvânica de Materiais Metálicos na Água do Mar [12].	35
Tabela 4 - Quadro-Resumo da Corrosão por Aeração Diferencial Considerando a Redução de Oxigênio como a Principal Reação Catódica [11].	46
Tabela 5 - Categorias de Corrosividade Atmosférica [20].	52
Tabela 6 – Composição da Água do Mar (gramas por litro de água) [12].	58
Tabela 7 – Grau de Agressividade do Solo em Relação à Resistividade [24].	61
Tabela 8 – Classificação dos Solos em Função do Potencial Redox [11].	61
Tabela 9 – Amostra S-8816: Tubo $\phi$ 6,4 mm.	73
Tabela 10 – Elementos encontrados após análise XPS (% em massa).	74
Tabela 11 – Peso das Ações na Análise.	87
Tabela 12 – Quadro Resumo das Principais Ações em Análise de Falha.	90
Tabela 13 – <i>Check List</i> .	97

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TFA	- <i>Tree Fault Analysis</i>
FMEA	- <i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
FMA	- <i>Failure Mode Assessment</i>
TPR	- <i>Technical Plan for Resolution</i>
SCC	- <i>Stress Corrosion Cracking</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
API	- <i>American Petroleum Institute</i>
AISI	- <i>American Iron and Steel Institute</i>
ISO	- <i>International for Standardization Organization</i>
ASA	- <i>American Standard Association</i>
pH	- <i>Potential Hidrogeniônico</i>
NBR	- <i>Norma Brasileira</i>
ABNT	- <i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ppm	- <i>Partes por milhão</i>
CCA	- <i>Corrective Action Assessment</i>
TPE	- <i>Technical Plan for Evaluation</i>
ESCA	- <i>Electron Spectroscopy for Chemical Analysis</i>
XPS	- <i>X-ray Photoelectron</i>
ASME	- <i>American Society of Mechanical Engineers</i>
SAE	- <i>Society of Automotive Engineers</i>
MEV	- <i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>
ASM	- <i>American Society of Materials</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	- Atividade
$A^{z+}_{Me}$	- Atividade do metal
$q$	- Carga elétrica
$cm$	- Centímetro
$K$	- Constante de equilíbrio numa reação
$F$	- Constante de Faraday
$R$	- Constante universal dos gases
$\Delta\Phi$	- Diferença de potencial elétrico
$eV$	- Eletrovolt
$\Delta\hat{G}$	- Energia livre eletroquímica
$\Delta G^0$	- Energia livre padrão
$\Delta G$	- Energia livre química
$^{\circ}C$	- Grau Celcius
$z$	- Íon
$K$	- Kelvin
$\ln$	- Logarítmo neperiano
$\log$	- Logarítmo decimal
$Me$	- Metal
$m$	- Metro
$m^2$	- Metro quadrado
$m^3$	- Metro cúbico
$\mu g$	- Micrograma
$mg$	- Miligrama
$mm$	- Milímetro
$mV$	- Milivolt
$n$	- Número de elétrons transferidos
$E^0$	- Potencial padrão
$E^0_e$	- Potencial padrão de equilíbrio
$Eh$	- Potencial redox
$Q$	- Quociente da reação química
$T$	- Temperatura
$\Sigma$	- Somatório
$\Omega$	- Ohm
$\emptyset$	- Diâmetro

# 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1.1. Caracterização do Problema

Atualmente, muitos aspectos técnico-econômicos relativos ao ciclo de vida de equipamentos e, conseqüentemente, de seus componentes, evidenciam a necessidade de se dispor de ferramentas que permitam diagnosticar de forma rápida, precisa e economicamente viável, a causa que os levou a deixar de exercer satisfatoriamente a sua função.

Uma série de fatores pode levar um componente de um sistema a falhar em serviço, podendo ser citados [1]:

- a) erro de projeto;*
- b) erro de montagem;*
- c) uso inadequado;*
- d) incompatibilidade com o meio;*
- e) processo de fabricação inadequado;*
- f) manutenção incorreta.*

É oportuno salientar que muitos componentes mecânicos metálicos acabam tendo como fator preponderante de sua falha alguma forma de corrosão metálica, podendo esta, em determinados casos, determinar a vida útil dos mesmos. Entretanto, a avaliação da causa que levou um componente a falhar, em conseqüência da corrosão, é feita, muitas vezes, de forma subjetiva e depende do conhecimento prático e da experiência do próprio avaliador. Além disso, uma parte considerável das análises torna-se inviável economicamente devido a razões como:

- a) escassez de profissionais com o conhecimento específico para executá-la;*
- b) exigência de facilidades laboratoriais especiais;*
- c) tempo de análise relativamente longo, pois normalmente não se segue uma seqüência pré-definida para as diversas etapas necessárias.*

Segundo Xenos [2], o que se observa no dia-a-dia das empresas é uma análise de falhas deficiente e uma ênfase excessiva em somente “consertar o que quebrou”, ou seja, o mais comum é ainda ver o pessoal da manutenção limitando-se a “remover sintomas”, sem tempo para utilizar métodos eficazes de análise de falhas. Lafraia [3] também comenta que, na prática, as companhias de operação não dão atenção suficiente para relatórios e análises de falhas e que muitos programas de manutenção trabalham com a síndrome “operação/falha/conserto”. O mesmo autor enaltece que, por outro lado, os relatórios de falhas são importantes por produzir informações que podem ser utilizadas na análise de confiabilidade de peças e componentes. Esta análise permite que um componente tenha sua capacidade de produção e vida útil otimizadas, evitando quedas de produção, custos desnecessários e garantindo operações seguras.

Componentes mecânicos apresentam normalmente três fases de taxa de falha<sup>1</sup> [3]:

*a) a primeira fase é também chamada de “mortalidade infantil” e é caracterizada pela ocorrência de falhas prematuras. Nesta fase, a taxa de falha é decrescente e tem como origem fatores de adaptação do componente ao sistema em que é inserido (por ex., amaciamento insuficiente de um mancal);*

*b) na segunda fase, o período de vida útil é caracterizado por taxa de falha constante e, devido a isso, a aplicação de conceitos de confiabilidade na manutenção é adequada durante a mesma;*

*c) na terceira fase, chamada de período de desgaste, a taxa de falha passa a ser crescente.*

Verifica-se, portanto, que na abordagem da manutenção, há a necessidade de orientações para se tratar da falha por corrosão, pois, para situações em que a taxa de falha não é constante (primeira e terceira fases), não é adequado se adotar a teoria da confiabilidade.

---

<sup>1</sup> Taxa de falha é a relação entre o número de vezes que um componente falhou num intervalo de tempo considerado. É comum se medir a taxa de falhas para se tentar evitar que um componente chegue ao período de falhas por desgaste. A falha por corrosão, juntamente com o desgaste e a fadiga, é classificada como pertencente à terceira fase [3].

## 1.2. Metodologia Adotada

Considerando o exposto anteriormente, partiu-se para a identificação de hipóteses que pudessem apontar as direções a serem tomadas para o desenvolvimento de uma técnica de análise. No presente trabalho a seguinte hipótese foi considerada: “O uso de ferramentas consagradas na manutenção (TFA, FMEA, FMA, TPR, Diagrama de Causa e Efeito), aliado a uma classificação e estratificação dos modos de ataques corrosivos em aço, permite a proposição de uma sistemática que auxilie na investigação da causa da falha por corrosão”.

A metodologia proposta para a avaliação desta hipótese foi a seguinte:

*a) estudou-se um determinado número de casos práticos e casos clássicos disponíveis na literatura, nos quais componentes mecânicos metálicos falharam com a participação significativa de alguma forma de corrosão metálica;*

*b) a rotina de análise em campo e/ou em laboratório para cada um desses casos foi cuidadosamente observada e comparada;*

*c) foram selecionadas as ações mais comumente aplicadas nos diversos casos. Nesta etapa, cada fase de análise pode envolver:*

*c1) dados de montagem;*

*c2) dados de projeto;*

*c3) coleta da amostra;*

*c4) exame visual;*

*c5) exame fractográfico;*

*c6) análises químicas;*

*c7) determinação das propriedades mecânicas;*

*c8) exame macroscópico;*

*c9) exame microscópico;*

*c10) exame microscópico de alta ampliação.*

*d) classificou-se, dentre os tipos de corrosão verificados, aqueles que apresentaram maior correlação com a corrosão metálica na indústria metal-mecânica;*

*e) as principais ações foram estratificadas, possibilitando a formação de níveis de células para a construção de árvores de falhas;*

*f) a sistemática foi aplicada por estudantes de engenharia<sup>2</sup> em casos conhecidos de falhas por corrosão, com o objetivo de que os mesmos verificassem a potencialidade da técnica proposta no levantamento da causa da falha (ou dano), apesar da pouca ou nenhuma experiência no assunto.*

### **1.3. Objetivos**

Com base no exposto anteriormente, pretendeu-se chegar às seguintes contribuições:

*a) agregar à literatura uma sistemática que auxilie na avaliação da causa de falha quando constatado, a priori, que a corrosão metálica está presente no processo;*

*b) definir ferramentas que permitam profissionais com pouca, ou relativa experiência prática no assunto, executar a pré-avaliação de falhas por corrosão, possibilitando, assim, reduzir o custo de muitas formas de avaliação;*

*c) aumentar o ciclo de vida de componentes mecânicos produzidos em metais, uma vez que se dispor de uma sistemática de avaliação, esta poderá ser utilizada em caráter preventivo como, por exemplo, na etapa de seleção de materiais;*

*d) propiciar intervenções de reparo mais simples e rápidas, o que demandará menos tempo de manutenção em equipamentos que apresentarem falhas, no tocante ao restabelecimento dos mesmos a sua condição funcional;*

*e) definir critérios de manutenção preventiva;*

*f) reduzir riscos de erro de diagnósticos de falhas;*

*e) contribuir para um dia-a-dia mais seguro do profissional de manutenção.*

---

<sup>2</sup> Curso de Engenharia Industrial Mecânica do Campus Curitiba da UTFPR, 8º período.

#### 1.4. Organização do Trabalho

O Capítulo 2, relativo à Revisão Bibliográfica, é dividido em três partes, que se consideradas simultaneamente, já indicam a proposta do trabalho. No *Contexto da Manutenção* são apresentadas as principais ferramentas utilizadas na manutenção, que também são sugeridas por Dennies [1] para se elaborar uma análise de falhas. No *Contexto do Estudo da Corrosão* são apresentadas definições e caracterizados os tipos principais de formação de pilhas eletroquímicas, o que permite a identificação de regiões anódicas e catódicas, além de serem apresentados os principais meios corrosivos. Buscou-se organizar as variáveis hierarquicamente, já prevendo como estas devem ser arranjadas na construção das chamadas árvores de falhas, ferramentas fundamentais no contexto deste trabalho. Neste item é apresentada ainda uma forma de caracterização da região anódica pela “técnica de comparação com padrões visuais”, como etapa do processo de análise e não como critério único para se chegar a uma conclusão. A *Metodologia de Dennies*, apresentada na seqüência, é uma metodologia de análise de falhas que se mostrou adequada e de boa aplicabilidade ao assunto aqui tratado. Composta por nove passos, o presente trabalho estará concentrado no terceiro deles, denominado *Objetividade e Clareza ao Identificar Todas as Causas-Raiz Possíveis*.

O Capítulo 3 contempla os critérios que permitem responder aos questionamentos “o que” e “como” executar a análise de falhas tendo, como subsídios as variáveis de processos corrosivos reunidas no item *Contexto do Estudo da Corrosão* (Capítulo 2).

No Capítulo 4 a sistemática proposta é aplicada a casos práticos e são apresentados três relatórios elaborados de acordo com a mesma.

No Capítulo 5 são apresentadas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por sua vez, o Capítulo 6 reúne as referências consultadas.

Finalmente, o Anexo I apresenta, na íntegra, a Norma N-2561 da Petrobrás (padrões fotográficos para avaliação de formas de deterioração).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. O Contexto do Estudo da Manutenção

A bibliografia sobre a prática de manutenção apresenta sugestões, roteiros e técnicas para se chegar à origem de uma falha, podendo-se enumerar como principais as seguintes ferramentas.

#### 2.1.1. Análise de Árvore de Falhas (TFA, *Tree Fault Analysis*)

A Análise de Árvore de Falhas (Figura 1) [4] pode ter uma abordagem do tipo qualitativa ou quantitativa. Na primeira, o objetivo pode ser determinar as causas básicas de um evento ou a seqüência que levou ao mesmo. Na segunda, busca-se estabelecer a probabilidade de ocorrência do evento [3].

De acordo com Klingelfus [5], a análise de um sistema por árvore de falhas consiste na construção de um diagrama lógico, através de um processo dedutivo, que partindo de um evento indesejado pré-definido (normalmente um determinado modo de falha de um sistema), busca as possíveis causas de tal evento. O processo segue investigando as sucessivas combinações de falhas dos componentes até atingir as chamadas falhas básicas (ou eventos básicos), as quais constituem o limite de resolução da análise. O evento indesejado é comumente chamado de “evento topo” da árvore.

Portanto, o conceito fundamental da análise por árvores de falhas consiste na tradução de um sistema físico em um diagrama lógico estruturado, no qual certas causas específicas conduzem a um evento topo de interesse. Esse diagrama lógico é construído usando-se os símbolos lógicos e de eventos mostrados na Tabela 1 [5]. Importantes informações qualitativas podem ser obtidas de uma árvore de falhas por meio da determinação dos seus cortes mínimos, que são conjuntos mínimos de eventos básicos cuja ocorrência simultânea implica, por sua vez, na ocorrência do evento topo. Um corte mínimo formado por um único evento básico (corte mínimo de primeira ordem) significa que a ocorrência de um único evento básico pode causar a falha do sistema. Este fato pode ser, por si só, uma indicação importante, caso se refira a um sistema do qual se requer alta confiabilidade [3-5].

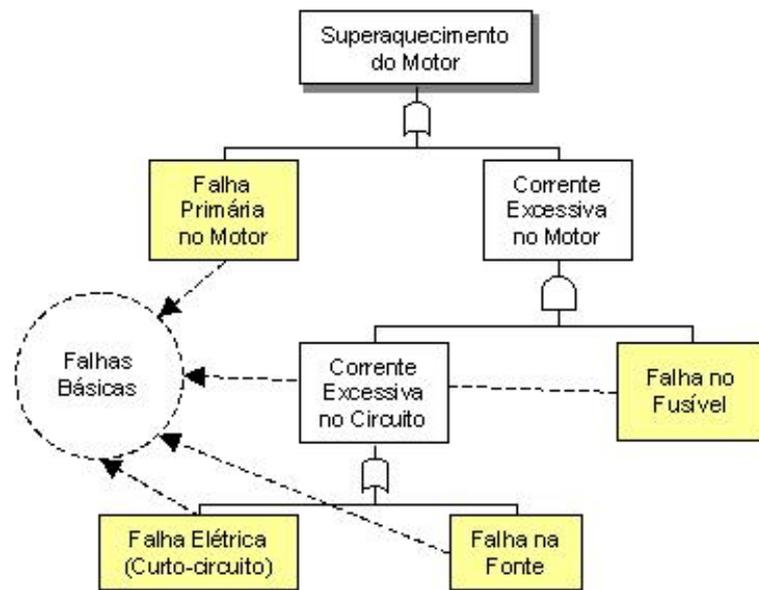


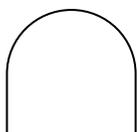
Figura 1 – Exemplo de TFA [4].

Tabela 1 - Simbologia Utilizada na Construção da Árvore de Falha [5].

Portão E	Portão OU	Evento Intermediário (Retângulo)	Evento Básico (Círculo)
Evento de saída. Ocorre se todos os eventos de entrada ocorrem.	Evento de saída. Ocorre se pelo menos um dos eventos de entrada ocorre.	Evento que resulta da combinação de eventos de falha através do portão lógico de entrada.	Evento de falha básico que não requer desenvolvimento posterior. Dados de falha disponíveis.
E	OU	variáveis	=

A avaliação quantitativa da probabilidade de ocorrência do evento topo pode ser feita através das regras básicas de quantificação dos portões lógicos “E” e “OU”, conforme descrito a seguir [3, 5]:

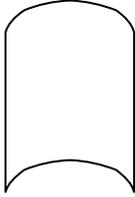
a) Para um portão “E” com dois eventos básicos, tem-se:



$$P(T) = P(1) \cdot P(2) \tag{1}$$

“A probabilidade de ocorrência do evento topo é igual ao produto entre a probabilidade do evento 1 e a probabilidade do evento 2.”

b) Para um portão “OU” com dois eventos básicos, tem-se:



$$P(T) = P(1) + P(2) - P(1) \cdot P(2) \quad (2)$$

“A probabilidade de ocorrência do evento topo é igual à probabilidade do evento 1 mais a probabilidade do evento 2 menos o produto entre a probabilidade do evento 1 e a probabilidade do evento 2.”

### 2.1.2. Análise do Modo e Efeito da Falha (FMEA, *Failure Mode and Effect Analysis*)

É uma técnica indutiva estruturada e lógica para identificar e/ou antecipar as causas e efeitos de cada modo de falha de um sistema ou produto. A análise resulta em ações corretivas, classificadas de acordo com sua criticidade, para eliminar ou compensar os modos de falhas e seus efeitos. A FMEA pode também ser utilizada como ferramenta de comunicação para identificar a importância das características do produto e do processo, suas funções e os efeitos das falhas [3]. Um exemplo desta técnica é mostrado na Figura 2 [6].

### 2.1.3. Diagrama de Causa e Efeito

Também conhecido como diagrama espinha de peixe, é principalmente usado em reuniões de trabalho para estudar as causas identificadas nas discussões originadas durante essas reuniões (Figura 3) [7].

Este diagrama, originalmente proposto por Kaoru Ishikawa na década de 60, já foi bastante utilizado em ambientes industriais para a localização de causas de dispersão de qualidade no produto e no processo de produção [7]. Ele é uma ferramenta gráfica utilizada para explorar e representar opiniões a respeito de fontes de variações em qualidade de processo, mas que pode perfeitamente ser utilizada para a análise de problemas organizacionais genéricos. A utilização deste diagrama

é indicada em situações onde existe um efeito indesejável bem localizado e de consenso entre os elementos envolvidos na análise [7].

Peça/Componentes: - Elemento de Aquecimento - Medidor de Potência								Eng. do Subsistema: Hishern			
Ano do Modelo: 1994								Eng. do Sistema: Braunemm			
Lançamento Previsto do Produto: 06/dez/1994								Data do FMEA:			
Fornecedor Externo: Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>								Original: 07/11/94			
								Revisado: 20/11/94			
Código de Identificação	Nome N°	Função	Modo de Falha	Efeito	S E V	O C O	Causa	D E T	R P N	Ações Recomendadas	Situação Atual
S05	Elem. de Aquecimento	Aquecer o Ar	1. Elemento quebrado	Ar quente não sai	4	3	Choque físico	1	12		
S06	Medidor da Potência	Variar temperatura e curso de ar	1. Medidor de Potência Falha	Temperatura e curso do ar constantes	5	1	Sobrecarga Maior tempo de operação	5	25		Recomendações finalizadas em 20/11/94
Aprovações: Gerente de Projeto: M. Schail Ahmed Supervisor de Confiabilidade: S. Asif All				DET=Detecção RPN=Índice da Prioridade de Risco OCO=Ocorrência SEV=Severidade				De acordo: Contr. de Qualidade do Staff: Contr. de Qualidade da Fábrica:			

Figura 2 – Exemplo de FMEA [6].

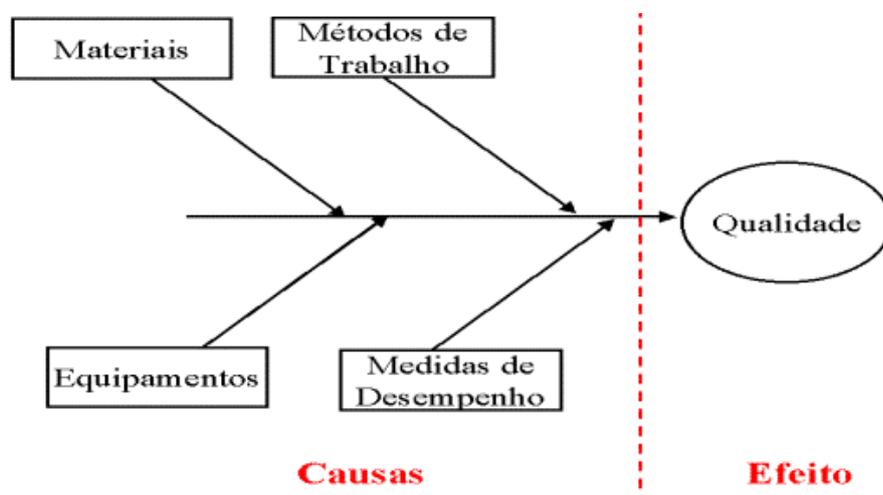


Figura 3 – Exemplo de Diagrama de Causa e Efeito [7].

Adicionalmente, um diagrama de causa e efeito é útil para a identificação de direcionadores que potencialmente levam ao efeito indesejável. Ele é uma ferramenta analítica que, adotada por um grupo de projeto, parte de um "problema de interesse" e possibilita a ocorrência de um "*brainstorming*" visando identificar as causas possíveis para o problema.

No entanto, entende-se que o conceito de causa-raiz<sup>3</sup> não é propriamente expresso no Diagrama de Causa e Efeito, pois o Diagrama de Ishikawa é uma ferramenta poderosa para a identificação dos direcionadores que potencialmente causam os efeitos indesejáveis. Estes direcionadores, por sua vez, também podem ser originados por outras causas-raiz [7].

Sendo assim, o diagrama de Ishikawa conduz a uma diversidade de causas, sem estabelecer exatamente quais as raízes do problema. Ele apresenta como pontos fortes [7]:

- a) uma boa ferramenta de levantamento de direcionadores;*
- b) uma boa ferramenta de comunicação;*
- c) estabelece a relação entre o efeito e suas causas;*
- d) possibilita um detalhamento dessas causas.*

Mas, também apresenta os seguintes pontos fracos [7]:

- a) não apresenta os eventuais relacionamentos entre as diferentes causas;*
- b) não focaliza necessariamente as causas que devem efetivamente ser atacadas.*

Desta forma, para sanar esses pontos fracos, é sugerida a utilização combinada do Diagrama de Ishikawa com uma ferramenta de focalização, como a Árvore de Falhas [7].

---

<sup>3</sup> Causa-raiz é a causa que quando identificada faz com que um problema passe a ser um erro conhecido.

#### 2.1.4. Tabulação do Modo de Falha (FMA, *Failure Mode Assessment*)

É uma planilha eletrônica onde são relacionadas todas as possíveis causas-raiz da falha, tendo como objetivo definir qual a causa mais provável (Figura 4) [1].

Nº	Potencial Causa Raiz	Probabilidade	Prioridade	Razão
1	Processo de bombeamento de água deficiente			
1A	Vedação da bomba danificada	Provável	1	Em inspeção visual detectaram-se vazamentos de água  O consumo de água está além do normal
1A1	Folga nos mancais do eixo da bomba	Improvável	3	Os mancais não apresentam ruído nem emissão sonora anormal
1A2	Rotor da bomba desbalanceado	Improvável	3	Idem 1A1
1B	Perda de carga excessiva na tubulação de recalque	Provável	1	A tubulação é longa apresenta características de corrosão
1B1	Incrustações na tubulação de recalque	Provável	1	Há indícios de corrosão nas conexões da tubulação
1B2	Tubulação sub-dimensionada	Improvável	3	O projeto está conforme
1C	Água contendo impurezas	Improvável	3	A análise da água está satisfatória
1D	Perda de carga na tubulação de sucção	Provável	1	Tubulação danificada externamente
1D1	Incrustações na tubulação de sucção	Provável	1	Idem 1B1
1D2	Tubulação sub-dimensionada	Improvável	3	Idem 1B2

Figura 4 – Exemplo de FMA [1].

#### 2.1.5. Plano Técnico para Resolução (TPR, *Technical Plan for Resolution*)

Também de acordo com Dennies [1], o Plano Técnico para Resolução (TPR) é uma planilha eletrônica montada em um programa a partir da Tabulação do Modo de Falha (FMA), na qual são adicionadas a esta mais quatro colunas, a saber:

abordagem técnica para resolução, quem executará, quando executará, resultados esperados (Figura 5).

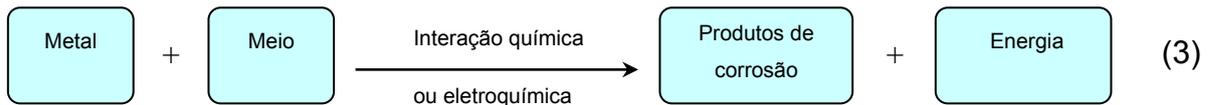
As cinco ferramentas citadas nesta seção podem ser utilizadas, portanto, para analisar a causa de uma falha por corrosão. Uma situação ainda mais favorável pode ser obtida quando as mesmas são associadas a uma classificação de danos por corrosão, tendo-se em vista que a análise de falha para casos específicos de corrosão é pouco privilegiada pela literatura técnica sobre manutenção.

Nº	Potencial causa raiz	Prioridade	Técnica de resolução	Quem?	Quando?	Resultado
1	Processo de Bombeamento de água deficiente					
1A	Vedação da bomba danificada	1	Substituir vedação	Pessoal de Manutenção Corretiva	03/06/2005	Vazamento estanque.
1A1	Folga nos mancais do eixo da bomba	3				
1A2	Rotor da bomba desbalanceado	3				
1B	Perda de carga excessiva na tubulação de recalque	1	Substituir trechos com incrustações da tubulação	Equipe de instalações	05/06/2005	Melhoria do fluxo de água
1B1	Incrustações na tubulação de recalque	1	Substituir material das conexões. Usar material com estabilidade eletroquímica compatível com a tubulação	Equipe de compras e equipe de instalações	05/06/2005	Evitar corrosão galvânica
1B2	Tubulação sub-dimensionada	3				
1C	Água contendo impurezas	3				
1D	Perda de carga na tubulação de sucção	1	Idem 1B	Idem 1B	Idem 1B	Idem 1B
1D1	Incrustações na tubulação de sucção	1	Idem 1B1	Idem 1B1	Idem 1B1	Idem 1B1
1D2	Tubulação sub-dimensionada	3				

Figura 5 – Exemplo de TPR [1].

## 2.2. O Contexto do Estudo da Corrosão

Genericamente falando, a corrosão é um fenômeno de interface irreversível, que provoca a transformação de um metal através de sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra, podendo estar ou não aliada a esforços mecânicos e ainda ser induzida pela presença de bactérias [8-10]. Esquemáticamente, tem-se a seguinte reação:



Formas clássicas de conceituar corrosão metálica incluem muitas vezes os termos “inutilização” ou “destruição” do metal. Na conceituação aqui apresentada, o termo “transformação” do metal foi intencionalmente empregado, acatando o argumento de que nem sempre a corrosão é um fenômeno danoso ou indesejável [11-13]. Sistemas de proteção catódica (usando materiais de sacrifício, como o zinco), técnicas de revelação metalográfica e processos de gravação em metais (utilizando reagentes químicos) são exemplos do uso benéfico da corrosão. Da mesma forma, a corrente gerada nas pilhas e baterias não recarregáveis resulta de processos de corrosão [10].

Conforme a Reação (3), a corrosão está relacionada a interações do tipo química ou eletroquímica entre o metal e o meio, as quais provocam reações homônimas (reações de oxi-redução). *Reações químicas* são importantes para o desgaste de materiais cerâmicos [8, 14], enquanto *reações eletroquímicas* são responsáveis por praticamente todos os processos de corrosão metálica em soluções aquosas [9, 11, 15], além dos casos de corrosão atmosférica e em alguns outros meios (por ex., corrosão em solos na presença de umidade).

Com o intuito de fornecer subsídios mínimos para ilustrar a sistemática de análise de falha proposta neste trabalho, serão apresentadas, a seguir, descrições bastante sucintas a respeito dos processos de corrosão relacionados a reações químicas ou eletroquímicas.

### 2.2.1. Processo Químico

O campo de abrangência da dissolução química é bem mais restrito em comparação ao da corrosão eletroquímica, baseando-se principalmente na oxidação. Não obstante, a dissolução química pode se dar também à temperatura ambiente, em meio gasoso e, ainda, em alguns meios líquidos. Nesse caso, ocorrem reações químicas diretas entre o material metálico (ou não metálico) e o meio corrosivo, não havendo geração de corrente elétrica [10].

### 2.2.2. Processo Eletroquímico

A corrosão eletroquímica, via de regra, se verifica na presença de um determinado eletrólito. A reação de corrosão é composta de duas reações parciais: uma reação anódica e uma reação catódica, as quais se processam em pontos distintos. A reação anódica é uma reação de oxidação, na qual são liberados elétrons que se deslocam para outros pontos do metal, onde ocorre a reação catódica, que é uma reação de redução. A reação anódica tem como consequência a dissolução do metal, ou seja, um processo de corrosão, ao passo que a reação catódica conduz à redução de espécies presentes no meio sem a participação do metal sobre o qual ela ocorre. O mecanismo se traduz no funcionamento de uma pilha de corrosão, que requer quatro elementos essenciais para ocorrer, a saber:

- a) uma área onde se passa a reação anódica, por isso mesmo denominada de área anódica;*
- b) uma área distinta daquela, onde se passa a reação catódica, por isso mesmo denominada de área catódica;*
- c) uma ligação metálica que une ambas as áreas e por onde fluem os elétrons resultantes da reação anódica;*
- d) um eletrólito em contato simultâneo com as mesmas áreas por onde fluem os íons resultantes de ambas as reações.*

### 2.2.3. Caracterização da Região Anódica

O ânodo ou região anódica é de simples identificação, pois, na maioria dos casos, é onde ocorre a falha, havendo, portanto, a manifestação do processo corrosivo, ainda

que em alguns casos haja a necessidade do uso de microscopia ou análises mais apuradas para observá-la. Segundo Gentil [12], as formas (ou tipos) de corrosão podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou forma de ataque, as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos. Assim, pode-se classificar corrosão segundo a morfologia, as causas ou mecanismos, os fatores mecânicos, o meio corrosivo e quanto à localização do ataque.

### 2.2.3.1. Classificação Segundo a Morfologia

A morfologia ou aparência da região corroída é tratada na literatura com muita semelhança, ou seja, a denominação conforme o aspecto é padronizada. Panossian [11] Gentil [12] como Nunes e Dutra [16] adotam a seguinte classificação:

#### *a) uniforme*

A corrosão se processa em toda a extensão e de forma contínua em uma superfície, ocorrendo perda uniforme da espessura (ver Figura 6). É chamada por alguns de corrosão generalizada, mas, segundo Gentil [11] o termo generalizada também pode ser usado para corrosão por pite ou alveolar generalizada, isto é, quando estes ocorrem em toda a extensão da superfície corroída.

#### *b) por placas*

A corrosão se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda a sua extensão, formando placas com escavações.

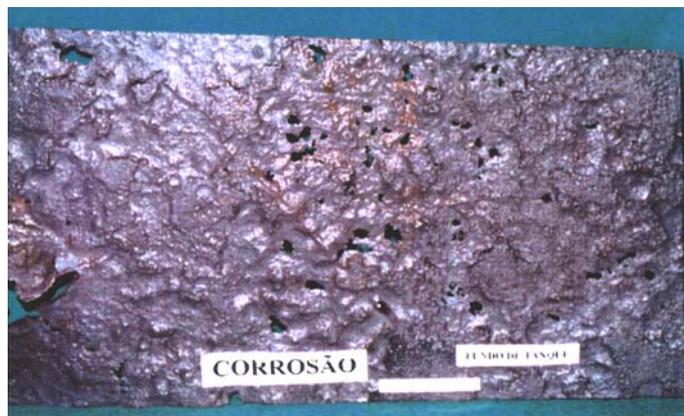


Figura 6 – Corrosão Generalizada – Fundo de Tanque  
Material: ASTM A 283 Gr. C [17].

*c) alveolar*

A corrosão se processa na superfície metálica, produzindo sulcos ou escavações. Os alvéolos gerados apresentam fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro.

*d) puntiforme ou por pite*

A corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo os pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angular e profundidade geralmente maior que seu diâmetro.

*e) intergranular ou intercristalina*

A corrosão ocorre entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos. Este mecanismo é popularmente chamado de *Stress Corrosion Cracking* (SCC).

*f) transgranular ou transcristalina*

A corrosão se processa nos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual, perdendo suas propriedades mecânicas, poderá fraturar à menor sollicitação mecânica, caracterizando também uma forma de SCC.

*g) filiforme*

A corrosão se verifica sob forma de finos filamentos não profundos, que se propagam em diferentes direções e que não se ultrapassam, pois se admite que o produto de corrosão, em estado coloidal, apresenta carga positiva, daí a repulsão.

*h) por esfoliação*

A corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica e é observada em algumas ligas de alumínio.

*i) corrosão seletiva gráfitica*

Caso particular que ocorre no ferro fundido cinzento em temperatura ambiente. O ferro metálico é convertido em produtos de corrosão, restando a grafite intacta, o que torna a área corroída com aspecto escurecido.

*j) corrosão seletiva por dezincificação*

É a corrosão que ocorre em ligas de cobre-zinco (latões), observando-se o aparecimento de regiões com coloração avermelhada contrastando com a coloração amarela característica dos latões.

*k) corrosão em torno de um cordão de solda*

É um tipo de corrosão intergranular que se observa em torno de cordões de solda. Ocorre principalmente em aços inoxidáveis não estabilizados ou com teores de carbono maiores que 0,03%.

*l) empolamento pelo hidrogênio*

O hidrogênio atômico penetra no material metálico e, como tem pequeno volume atômico, difunde-se rapidamente aproveitando-se de regiões com descontinuidades, como vazios e inclusões. A partir daí ele se transforma em hidrogênio molecular, exercendo pressão e formando bolhas. Esse tipo de avaria está relacionado à corrosão devido ao fato da concentração de hidrogênio muitas vezes estar relacionada à polarização do eletrodo.

### **2.2.3.2. Classificação de Graus de Corrosão de Acordo Com a Norma N-2260**

A norma Petrobrás N-2260 [17] de outubro de 1988, intitulada “Graus de Corrosão e Tipos de Superfícies Avariadas e Preparadas”, classifica graus de corrosão, tipos de avaria e preparação de superfície em instalações e estruturas submarinas de aço por meio de registros fotográficos, apresentando as seguintes definições:

*a) quanto à forma*

*a1) uniforme* – caracterizada por uma perda uniforme de material;

*a2) alveolar* – caracterizada por apresentar cavidades na superfície metálica, possuindo fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro;

*a3) pitiforme* – caracterizada por cavidades apresentando fundo em forma angular e profundidade geralmente maior que seu diâmetro.

*b) quanto à extensão (em relação a cada área inspecionada)*

*b1) localizada* – corrosão em um ponto isolado na área considerada na inspeção;

*b2) generalizada* – corrosão em toda área considerada na inspeção (rever Figura 6);  
*b3) dispersa* – corrosão em vários pontos isolados na área considerada na inspeção.

*c) quanto à Intensidade (considerando a forma alveolar)*

*c1) leve* – alvéolos que apresentam diâmetro menor que 2 mm;

*c2) média* – alvéolos que apresentam diâmetro entre 2 e 4 mm;

*c3) severa* – alvéolos que apresentam diâmetro maior que 4 mm.

*d) quanto à Intensidade (considerando a forma uniforme) (Figura 7)*

*d1) tipo I* – redução até 20% da sobre espessura de corrosão (Figura 8);

*d2) tipo II* – redução de 20 a 60% da sobre espessura de corrosão (Figura 9);

*d3) tipo III* – redução além de 60% da sobre espessura de corrosão (Figura 10).



Figura 7 – Sobre espessura de corrosão – Foto referencial para a classificação de Corrosão - Material: ASTM A 385 Gr [17].

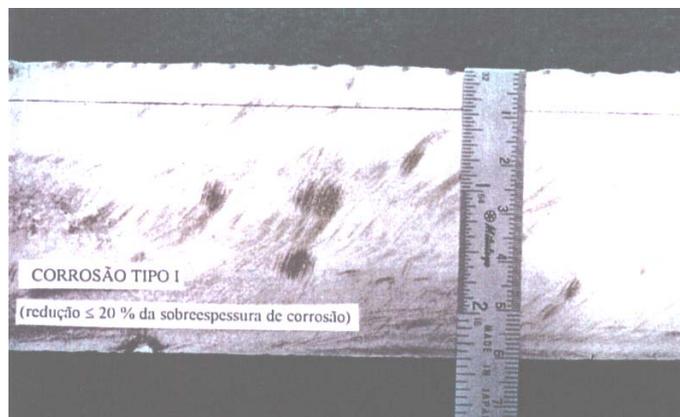


Figura 8 – Corrosão Tipo I – Material: ASTM A 285 – Gr. [17].



Figura 9 – Corrosão Tipo II – Material: ASTM A 285 – Gr [17].

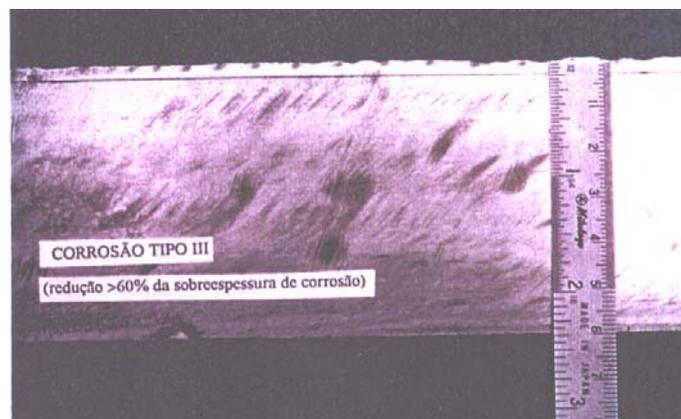


Figura 10 – Corrosão Tipo III – Material: A 285 – Gr [17].

### 2.2.3.3. Padrões Fotográficos Para Avaliação de Formas de Deterioração de Acordo Com a Norma N-2561 da Petrobrás

A norma Petrobrás N-2561 [18] de setembro de 1996, intitulada “Padrões Fotográficos para Avaliação de Formas de Deterioração” e cujo objetivo é definir padrões para avaliação de deterioração em instalações industriais, define corrosão como sendo a deterioração sofrida por um material metálico em consequência da ação eletroquímica do meio, propondo uma classificação conforme apresentada no Anexo I.

### 2.2.4. Caracterização do Cátodo ou Região Catódica

O cátodo ou região catódica pode ser identificado como sendo um componente ou região com potencial elétrico superior ao potencial do ânodo. Ainda, conforme a

formação das principais pilhas, o cátodo pode ser uma região metalurgicamente mais nobre, mais aerada, de maior concentração iônica, região passivada ou região a uma temperatura diferente. A série eletroquímica para o ambiente em questão é uma boa referência para se identificar o cátodo uma vez conhecido o material do ânodo.

O funcionamento de pilhas eletroquímicas envolve uma importante grandeza, que se denomina potencial do eletrodo. A sua ocorrência se baseia no princípio de que quando um metal entra em contato com um eletrólito, desenvolve-se entre estes uma diferença de potencial elétrico que depende do metal, das espécies presentes no eletrólito, além de outras variáveis. A explicação deste fenômeno é devida a tendência natural da maioria dos metais a entrar em solução quando em contato com um eletrólito, passando assim para a forma iônica. Isto acontece com os metais ativos em relação aos meios aquosos e ocorre segundo a reação anódica. Esta reação prossegue até ocorrer a saturação do eletrólito com íons do metal, nas imediações da interface metal/meio, até a situação em que a entrada de um íon a mais na solução provoca a redução de outro íon no próprio metal, mantendo o equilíbrio de cargas. A diferença de potencial é, portanto explicada pela presença de cargas elétricas de um sinal no eletrólito e de sinal oposto no metal formando uma espécie de capacitor chamado de “Dupla Camada Elétrica”. Esta diferença de potencial depende de muitos fatores, uns ligados ao metal e outros ligados ao eletrólito como: tipo do eletrólito, concentração, temperatura, grau de aeração e grau de agitação. Se forem fixadas as variáveis ligadas ao eletrólito, o potencial passa a ser função do metal e depender da propriedade deste.

A escala de potenciais ou série eletromotriz (Tabela 2) [16] foi desenvolvida tendo como referência um eletrodo conhecido como “eletrodo normal de hidrogênio” ao qual foi atribuído o potencial nulo. Foi adotado o sinal negativo quando, numa célula eletroquímica, os elétrons se deslocam do metal considerado para o eletrodo de hidrogênio e sinal positivo caso contrário.

A série eletromotriz estabelece condições padronizadas estando sujeita a várias limitações, não podendo ser utilizada em casos práticos. Contudo ela dá uma noção, embora grosseira, da tendência dos metais à corrosão quando em contato no mesmo meio.

Tabela 2 – Série Eletromotriz – Potencial Padrão de Redução  $E^0$  a 25°C [16].

Reação de Eletrodo	Potencial $E_0$ (Volt)	Reação de Eletrodo	Potencial $E_0$ (Volt)
$\text{Li}^+ + e = \text{Li}$	-3,045	$\text{Ni}^{++} + 2e = \text{Ni}$	-0,250
$\text{K}^+ + e = \text{K}$	-2,925	$\text{Mo}^{+++} + 3e = \text{Mo}$	-0,200
$\text{Ba}^{++} + 2e = \text{Ba}$	-2,906	$\text{Sn}^{++} + 2e = \text{Sn}$	-0,136
$\text{Ca}^{++} + 2e = \text{Ca}$	-2,866	$\text{Pb}^{++} + 2e = \text{Pb}$	-0,126
$\text{Na}^+ + e = \text{Na}$	-2,714	$\text{H}^+ + e = 1/2\text{H}_2$	0,000
$\text{Mg}^{++} + 2e = \text{Mg}$	-2,363	$\text{Cu}^{++} + e = \text{Cu}^+$	+0,153
$\text{Al}^{+++} + 3e = \text{Al}$	-1,662	$\text{Cu}^{++} + 2e = \text{Cu}$	+0,337
$\text{Ti}^{++} + 2e = \text{Ti}$	-1,628	$\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 + 2e = 2\text{OH}^-$	+0,401
$\text{Zr}^{++++} + 4e = \text{Zr}$	-1,529	$\text{Fe}^{+++} + e = \text{Fe}^{++}$	+0,771
$\text{Mn}^{++} + 2e = \text{Mn}$	-1,180	$\text{Hg}_2^{++} + 2e = 2\text{Hg}$	+0,778
$\text{Nb}^{+++} + 3e = \text{Nb}$	-1,100	$\text{Ag}^+ + e = \text{Ag}$	+0,799
$\text{Zn}^{++} + 2e = \text{Zn}$	-0,762	$\text{Hg}^{++} + 2e = \text{Hg}$	+0,854
$\text{Cr}^{+++} + 3e = \text{Cr}$	-0,744	$\text{Pd}^{++} + 2e = \text{Pd}$	+0,987
$\text{Fe}^{++} + 2e = \text{Fe}$	-0,440	$\text{Pt}^{++} + 2e = \text{Pt}$	+1,190
$\text{Cd}^{++} + 2e = \text{Cd}$	-0,403	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e = 2\text{H}_2\text{O}$	+1,228
$\text{Co}^{++} + 2e = \text{Co}$	-0,277	$\text{Au}^{+++} + 3e = \text{Au}$	+1,498

Como na utilização dos materiais dificilmente ocorrem as condições padrão, deve ser utilizada uma série específica para cada meio, sendo a mais difundida a série galvânica para a água do mar (Tabela 3) [12].

Um fator importante na corrosão galvânica é a possibilidade de “inversão de polaridade” de alguns materiais metálicos, devido à presença de determinadas substâncias no meio corrosivo ou condições de temperatura. Um exemplo é o comportamento do estanho, que é catódico em relação ao ferro na maioria dos meios corrosivos, mas na presença de certos ácidos orgânicos, que formam complexos solúveis com o estanho, este se torna anódico em relação àquele [12].

Da mesma forma, o cobre é catódico em relação ao zinco, mas quando em presença de cianeto de potássio torna-se uma pilha onde ele passa a ser o ânodo. A temperatura também pode ocasionar inversão de polaridade como, por exemplo, no caso do zinco, uma vez que em meios corrosivos usuais ele é anódico em relação

ao ferro, mas em água quente, acima de 60 °C, a polaridade inverte-se e o zinco torna-se catódico.

Tabela 3 - Série Galvânica de Materiais Metálicos na Água do Mar [12].

<p><b>Extremidade anódica (corrosão)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Magnésio</li> <li>2. Ligas de Magnésio</li> <li>3. Zinco</li> <li>4. Alclad 38</li> <li>5. Alumínio 3S</li> <li>6. Alumínio 61S</li> <li>7. Alumínio 63S</li> <li>8. Alumínio 52</li> <li>9. Cádmio</li> <li>10. Aço Doce</li> <li>11. Aço baixo teor de liga</li> <li>12. Aço-liga</li> <li>13. Ferro fundido</li> <li>14. Aço AISI 410 (ativo)</li> <li>15. Aço AISI 430 (ativo)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>16. Aço AISI 304 (ativo)</li> <li>17. Aço AISI 316 (ativo)</li> <li>18. Chumbo</li> <li>19. Estanho</li> <li>20. Níquel (ativo)</li> <li>21. Inconel (ativo)</li> <li>22. Metal Muntz</li> <li>23. Latão Amarelo</li> <li>24. Latão Almirantado</li> <li>25. Latão Alumínio</li> <li>26. Latão Vermelho</li> <li>27. Cobre</li> <li>28. Bronze</li> <li>29. Cupro-Níquel 90/10</li> <li>30. Cupro-Níquel 70/30 (baixo teor de ferro)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>31. Cupro-Níquel 70/30 (alto teor de ferro)</li> <li>32. Níquel (passivo)</li> <li>33. Inconel (passivo)</li> <li>34. Monel</li> <li>35. Hastelloy C</li> <li>36. Aço AISI 410 (passivo)</li> <li>37. Aço AISI 430 (passivo)</li> <li>38. Aço AISI 304 (passivo)</li> <li>39. Aço AISI 316 (passivo)</li> <li>40. Titânio</li> <li>41. Prata</li> <li>42. Grafite</li> <li>43. Ouro</li> <li>44. Platina</li> </ol> <p><b>Extremidade catódica (proteção)</b></p>
--	--	--

A formação de películas de produtos de corrosão sobre a superfície metálica, em alguns casos, é responsável pela inversão de polaridade. Este fenômeno é chamado de passivação e implica na modificação do potencial de um eletrodo no sentido de menor atividade (mais catódico ou mais nobre). Metais ou ligas metálicas que se passivam são formadores destas películas protetoras. O alumínio torna-se passivo em meio oxidante devido à formação da película de alumina ( $Al_2O_3$ ), o cromo, níquel, titânio, aço inoxidável também se passivam na grande maioria dos meios corrosivos, especialmente na atmosfera. O chumbo se passiva na presença de ácido sulfúrico. O ferro se passiva na presença de ácido nítrico concentrado e não se passiva na presença de ácido nítrico diluído. A maioria dos metais e ligas passivam-se na presença de meios básicos, com exceção dos metais anfóteros (alumínio, zinco, chumbo, estanho e antimônio) [19].

### 2.2.5. Caracterização da Formação da Pilha

Conforme visto anteriormente, a pilha eletroquímica é constituída de um ânodo (ou região anódica) e um cátodo (ou região catódica), ligados de modo a permitir transferência de elétrons entre si quando ambas as regiões estão em contato com

um eletrólito. Teoricamente, conforme mostra a equação de Nerst [11], uma pilha pode se originar a partir da variação de três fatores:

- a) o potencial de equilíbrio da reação ( $E_e^0$ );
- b) a atividade do metal ( $a_{Me}^{z+}$ );
- c) a temperatura da reação (T).

### 2.2.5.1. A Equação de Nerst

#### a) Energia livre química

Para se verificar se uma reação química será espontânea quando realizada à pressão e à temperatura constantes, deve-se calcular a variação de energia livre do sistema,  $\Delta G$ . Se  $\Delta G$  é negativa, o processo será espontâneo. Se  $\Delta G$  é zero, os estados inicial (reagentes) e final (produtos) podem existir em equilíbrio um com o outro, sem variação efetiva de energia. Se  $\Delta G$  é positiva, a reação não ocorrerá espontaneamente, mas sim o seu inverso.

O cálculo de  $\Delta G$  de uma dada reação é feito considerando-se a diferença entre a energia livre de formação de todos os produtos e a energia livre de formação de todos os reagentes. Considerando-se a representação da seguinte reação química:



A variação de energia livre é dada por:

$$\Delta G = \gamma \Delta G_f(C) + \delta \Delta G_f(D) - \alpha \Delta G_f(A) - \beta \Delta G_f(B) \quad (5)$$

ou 
$$\Delta G = \sum x_i \Delta G_{fi}(\text{produtos}) - \sum y_i \Delta G_{fi}(\text{reagentes}) \quad (6)$$

onde:

$\Delta G$  = variação da energia livre da reação;

$\Delta G_{fi}(\text{produtos})$  = energia livre de formação dos produtos;

$\Delta G_{fi}(\text{reagentes})$  = energia livre de formação dos reagentes;

$x_i$  = número estequiométrico dos produtos;

$y_i$  = número estequiométrico dos reagentes.

Uma vez calculada a variação de energia livre de reação, pode-se verificar se esta será espontânea. Não se deve esquecer, no entanto, que as energias de formação dos compostos são tabeladas em seus estados padrão, com a denominação energia

livre padrão de formação  $\Delta G_f^\circ$ , que é definida como a variação de energia livre envolvida quando um mol de um composto em seu estado padrão se forma, a partir de seus elementos nos seus estados padrão. Por definição, a energia livre padrão de formação de todos os elementos é zero. O estado padrão de um composto é aquele em que o mesmo se encontra em sua forma estável, à pressão de 1 atm e a uma temperatura específica que, freqüentemente, mas não necessariamente, é 25 °C. Tendo-se uma reação química, pode-se verificar sua espontaneidade por meio da determinação da variação da energia livre padrão  $\Delta G^\circ$  da reação, dada por:

$$\Delta G^\circ = \sum x_i \Delta G_{fi}^\circ(\text{produtos}) - \sum \Delta G_{fi}^\circ(\text{reagentes}) \quad (7)$$

onde os valores de  $\Delta G_f^\circ$  tanto dos produtos como dos reagentes são tabelados. Para calcular a variação de energia livre de uma reação em que nem todos os produtos e/ou reagentes estão em seus estados padrão, utiliza-se a expressão que relaciona a variação de energia livre com a constante de equilíbrio da reação, representada por:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad (8)$$

onde:

$K$  = constante de equilíbrio da reação em questão;

$T$  = temperatura em Kelvin;

$R$  = constante universal dos gases.

#### b) Energia Livre Eletroquímica

A energia livre química é utilizada para a verificação da espontaneidade das reações químicas nas quais não ocorre redistribuição de cargas. No entanto, numa reação eletroquímica, uma ou mais espécies perdem elétrons enquanto que outras ganham, isto é, ocorre uma redistribuição de cargas, havendo a necessidade de se realizar trabalho elétrico. Nesse tipo de sistema, a variação de energia livre química não será a grandeza adequada para se estudar a espontaneidade das reações, visto que são desconsideradas as variações de energia elétrica envolvidas. Nesse caso, a grandeza a ser considerada é a variação de energia livre eletroquímica,  $\Delta \hat{G}$ . Esta é obtida acrescentando-se à variação de energia livre química um termo referente à variação de energia elétrica, ou seja, o trabalho elétrico necessário para a

redistribuição de cargas. A expressão matemática que representa esta situação é a seguinte:

$$\Delta\hat{G} = \Delta G + q\Delta\Phi \quad (9)$$

onde:

$\Delta\hat{G}$  = variação de energia livre eletroquímica;

$\Delta G$  = variação de energia livre química;

$q\Delta\Phi$  = trabalho elétrico;

$\Delta\Phi$  = diferença de potencial elétrico.

Assim, nos casos das reações eletroquímicas, a espontaneidade será verificada considerando-se a variação da energia livre eletroquímica,  $\Delta\hat{G}$ .

### c) Equação de Nerst

Quando se definiu o potencial de equilíbrio, não se fez referência a respeito da concentração dos íons metálicos no eletrólito. No entanto, se fossem considerados vários eletrólitos contendo diversas concentrações de íons metálicos e, caso se determinasse o potencial de equilíbrio, verificar-se-ia que os valores obtidos seriam diferentes, notando-se uma dependência em função da concentração. Através de considerações termodinâmicas é possível verificar como ocorre esta dependência.

A variação da energia livre química de uma reação, em que nem todos os produtos e/ou reagentes estão em seus estados padrão, é dada pela expressão:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad (10)$$

Relacionando a variação de energia livre química com o potencial de equilíbrio de reação, tem-se:

$$\Delta G = -zFE_e \quad (11)$$

Sendo  $E_e^\circ$  o potencial de equilíbrio de uma reação em que todos os produtos e os reagentes estão em seus estados padrão. Esse potencial é obtido por meio da seguinte expressão:

$$\Delta G^\circ = -zFE_e^\circ \quad (12)$$

Como a variação de energia livre química padrão de uma dada reação pode ser obtida a partir das energias livres de formação das espécies químicas envolvidas, conclui-se que o potencial de equilíbrio padrão também poderá ser determinado utilizando a expressão (12).

A equação resultante será determinada pelo potencial de equilíbrio de uma reação em que nem todos os reagentes e/ou produtos estão nos seus estados padrão, a partir do conhecimento do potencial de equilíbrio padrão.

Substituindo as expressões (11) e (12) em (10), tem-se:

$$-zFE_e = -zFE_e^\circ + RT \ln K \quad (13)$$

Dividindo por  $-zF$  a equação acima, tem-se:

$$E_e = E_e^\circ - RT \ln K / [zF] \quad (14)$$

Considerando-se a reação:



tem-se que a sua constante de equilíbrio é dada por:

$$K = 1/[a^{z+}_{Me}] \quad (16)$$

Como a atividade do metal  $a_{Me}$ , sendo este puro, e a atividade dos elétrons no metal são unitárias, tem-se que:

$$K = 1/[a^{z+}_{Me}] \quad (17)$$

Substituindo (17) em (14):

$$E_e = E_e^\circ + RT \ln a^{z+}_{Me} / [zF] \quad (18)$$

A equação (18) é uma relação quantitativa que permite calcular a força eletromotriz de uma pilha, para concentrações de íons diferentes de uma unidade. É também usado para cálculos em titulação de oxi-redução, sendo expressa geralmente na forma:

$$E = E^\circ - (0,0591 \log Q)/n \quad (19)$$

onde:

$E^\circ$  = força eletromotriz ou potencial normal da pilha correspondente;

$n$  = número de elétrons transferidos;

Q = quociente de reação.

Esse quociente é o produto das concentrações das espécies ativas do segundo membro da reação de oxidação-redução, elevadas a seus respectivos coeficientes estequiométricos (coeficientes que precedem as fórmulas na equação química equilibrada), e seu denominador é o produto análogo das concentrações dos reagentes.

Quando a concentração em uma pilha alcança o estado de equilíbrio, a força eletromotriz da pilha torna-se zero, o quociente de reação coincide com a constante de equilíbrio e a equação de Nerst é, então, expressa da seguinte maneira:

$$\log K = nE^{\circ}/0,059 \quad (20)$$

Essa expressão possibilita o cálculo da constante de equilíbrio, tendo como base a força eletromotriz normal. Assim, o potencial padrão de uma pilha está relacionado com a constante de equilíbrio da reação de funcionamento da pilha.

Em uma abordagem prática, os três tipos de pilhas de corrosão eletroquímica que podem se formar de acordo com a equação de Nerst podem ser subdivididas, pois a literatura [11,12,16] apresenta algumas denominações como: pilha de eletrodos metálicos diferentes, pilha ativa-passiva, pilha de ação local, pilha de concentração iônica, pilha de aeração diferencial, pilha eletrolítica e ainda a pilha de temperaturas diferentes. O tratamento de um estudo de caso pela metodologia proposta deverá enquadrá-lo em um destes tipos de pilha, geralmente o predominante, pois é comum se observar mais de um destes tipos de pilha agindo simultaneamente.

#### **2.2.5.2. Pilha de Eletrodos Diferentes**

É o tipo de pilha de corrosão que ocorre quando dois metais ou ligas diferentes estão em contato e imersos em um mesmo eletrólito. Nesta situação o metal mais ativo na tabela funciona como ânodo e, portanto, será corroído. A Figura 11 [19] representa esquematicamente este tipo de pilha.

A taxa de corrosão do metal menos nobre e da eficiência de proteção ao metal mais nobre, num par galvânico, dependerá dos seguintes fatores [12]:

a) potenciais de corrosão de cada um dos metais constituintes do par no meio considerado;

b) polarização da reação catódica sobre a superfície do metal mais nobre e da polarização da reação anódica do metal menos nobre;

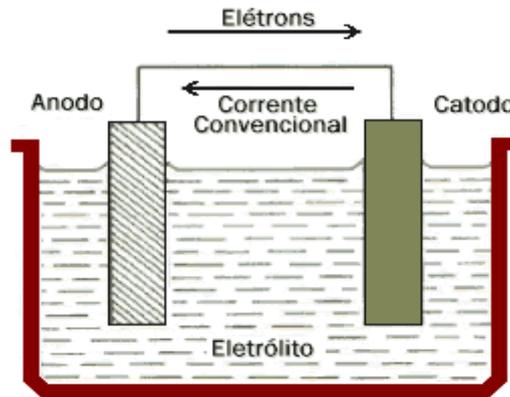


Figura 11 – Pilha de Eletrodos Diferentes [19].

A polarização pode ser interpretada como a dificuldade com que uma reação ocorre sobre um metal. Assim, diz-se que a reação catódica sobre o metal mais nobre é pouco polarizada quando esta reação ocorre facilmente, ou seja, a cinética da reação é rápida. Do mesmo modo, diz-se também que a reação catódica sobre o metal mais nobre é muito polarizada, quando esta reação ocorre com dificuldade, ou seja, a cinética da reação é lenta.

c) natureza do meio;

O meio influencia na intensidade do ataque do metal menos nobre, no grau de proteção do metal mais nobre, na extensão da ação galvânica em termos de área atingida, determinar qual o metal será o anodo e qual o catodo, podendo haver inversão de polaridade, na cinética das reações. Outro fator de grande relevância na corrosão galvânica é a condutividade do meio. No caso de dois metais em contato direto, imersos em meios de alta condutividade, a ação galvânica entre ambos faz sentir por toda a superfície exposta, o mesmo ocorrendo na proteção do metal mais nobre. À medida que a condutividade do meio diminui, a ação galvânica fica restrita às vizinhanças da junção entre os metais.

*d) fatores geométricos;*

A área relativa dos metais constituintes do par (quanto menor for a área anódica em relação à catódica maior é a taxa de corrosão) e distância entre os mesmos.

*e) produtos das reações, natureza do metal mais nobre e tipo da reação catódica também influenciam.*

### **2.2.5.3. Pilha Ativa-Passiva**

Conforme já visto, alguns metais e ligas tendem a se tornar passivos devido à formação de uma película fina e aderente de óxido ou outro composto insolúvel nas suas superfícies. A passivação faz com que esses materiais passem a funcionar como áreas catódicas. O íon cloreto e em menor escala o brometo e o iodeto, em alguns casos, destroem e impedem a passivação. Os íons penetram através de poros ou falhas da camada passivadora e como a destruição da passivida não ocorre em toda a extensão da película, e sim em pontos determinados geralmente pela variação da espessura e variações na estrutura desta película formam-se pequenos ânodos circundados por grandes cátodos proporcionando uma taxa relativamente alta de corrosão. A destruição da passividade também pode ocorrer por meio de riscos na camada de óxido, tornando exposta uma superfície metálica ativa que funcionará como ânodo [12]. Uma representação esquemática da pilha ativa-passiva é mostrada na Figura 12 [19].

### **2.2.5.4. Pilha de Ação Local**

A presença de heterogeneidades ligadas à superfície de um mesmo material gera a ocorrência de pilhas localizadas (Figura 13) que podem ser conseqüência de [16]:

*a) variações na composição química do grão;*

*b) presença de inclusões;*

*c) concentração de tensões;*

*d) variação na temperatura;*

*e) variações nos contornos de grãos;*

*f) variação no tamanho de grão.*

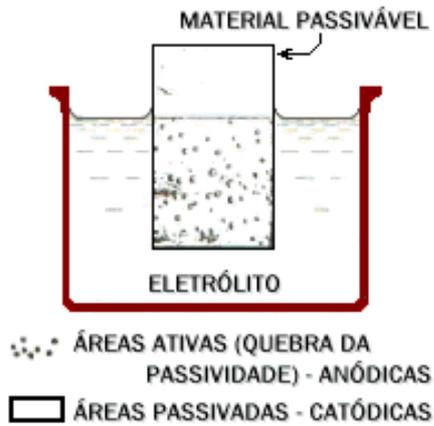


Figura 12 – Pilha Ativa-Passiva [19].

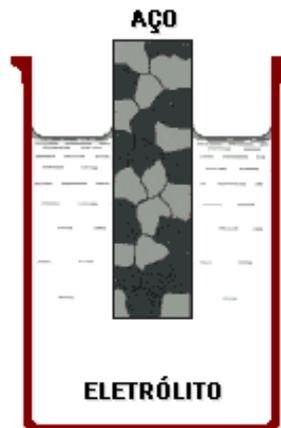


Figura 13 – Pilha de Aço Local [19].

Na metodologia proposta neste trabalho, esse tipo de pilha será utilizado quando, aparentemente, houver um único material e o eletrólito puder ser considerado homogêneo.

#### 2.2.5.5. Pilha de Concentração Iônica Diferencial

Este tipo de pilha ocorre quando uma peça metálica está em contato com um eletrólito que apresenta, em sua massa, regiões de diferentes concentrações de íons do próprio metal. A parte da peça que está em contato com a solução mais concentrada funciona como cátodo da pilha.

As principais heterogeneidades do eletrólito são [16]:

- a) variações na concentração (Figura 14) [19];
- b) variações no grau de aeração do eletrólito;
- c) variações na temperatura do eletrólito;
- d) variações no grau de agitação;
- e) variações na resistividade elétrica.

A pilha de resistividade elétrica diferencial é uma importante pilha que ocorre em tubulações enterradas. Na metodologia proposta neste trabalho, esse tipo de pilha será levado em conta quando for possível considerar o metal homogêneo.

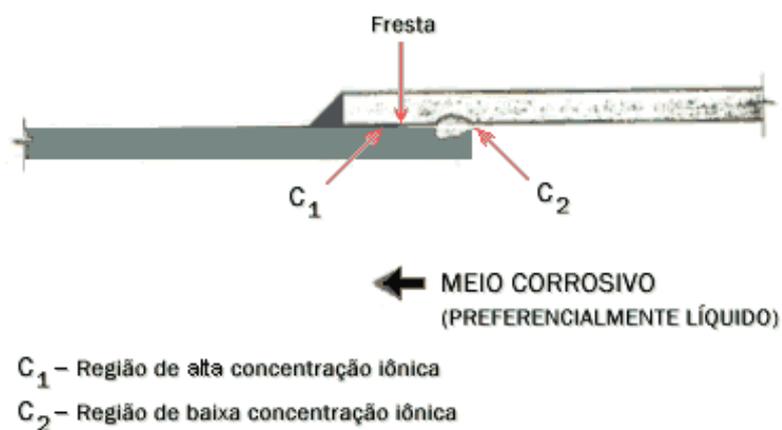


Figura 14 – Pilha de Concentração Iônica Diferencial [19].

#### 2.2.5.6. Pilha de Aeração Diferencial

O potencial de corrosão é resultado do “balanço” entre a reação de oxidação do metal e a reação de redução do oxidante contido no eletrólito. Qualquer variação local de composição deste último poderá propiciar o surgimento de corrosão. Além da existência de água, o oxigênio também deve estar presente para que o processo de corrosão possa acontecer. Uma das reações catódicas de grande importância no processo de corrosão dos metais no solo é a de redução do oxigênio dissolvido na água, gerando hidroxilas, por conseqüência, a aeração do solo é fator de grande importância no processo.

No solo, em grandes profundidades (maiores do que 10m), a velocidade de corrosão deixa de ser controlada preferencialmente pela resistividade e passa a ser determinada pela disponibilidade de oxigênio dissolvido nas águas subterrâneas, isto é, a difusão limita a velocidade de corrosão. Quando o aço carbono é colocado

em um eletrólito neutro (p.ex.: NaCl), pode-se observar o ataque intenso nas regiões pouco aeradas e a redução catódica nas regiões aeradas. O pH das regiões aeradas (áreas catódicas) se torna mais alto devido à redução do oxigênio, envolvendo a formação de íons hidroxila (o que contribui para a passivação local do material). Se o material é passivável, a corrosão da região menos ventilada pode se tornar muito maior do que aquela da região ventilada. A corrosão por aeração diferencial é a responsável, por exemplo, pelo ataque abaixo da linha d'água de navios e em estruturas enterradas em solos onde a permeabilidade do oxigênio é desigual. No caso de materiais que não desenvolvem película passiva, a corrosão da região menos ventilada não será superior àquela observada na região mais ventilada [12].

A corrosão bimetálica é bastante comum e destrutiva, mas, células de aeração diferencial, causadas por diferenças no nível de oxigenação do eletrólito são ainda mais comumente observadas, e costumam causar estragos ainda maiores. Uma célula de aeração diferencial (Figura 15) [19] pode ser desenvolvida em qualquer situação onde a água estiver em contato com uma superfície, ainda, em frestas, esse tipo de pilha é freqüentemente observada.

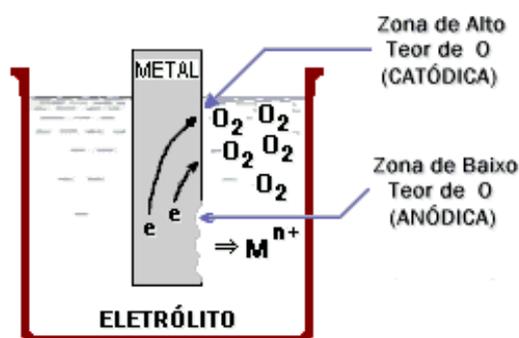


Figura 15 – Célula de Aeração Diferencial [19].

Impurezas depositadas que absorvem ou mantêm água ou lama, produtos de corrosão, folhas, tecidos e papel em contato com a estrutura promovem a formação de pilhas de aeração diferencial. Materiais porosos e absorventes utilizados como isolantes térmicos, isolantes acústicos, podem absorver água como uma “esponja”, possibilitando a ocorrência de células de aeração diferencial na interface material absorvente/metal.

A Tabela 4 apresenta um quadro-resumo organizado por Panossian [11] da corrosão por aeração diferencial, apontando o que se observa quando a superfície de um metal apresenta uma região em contato com uma solução em que a concentração de oxigênio é maior (região aerada), e outra, em contato com a mesma solução, com concentração menor de oxigênio ou ausência deste (região menos aerada ou desaerada). A partir dos dados da tabela é possível concluir que nem sempre em uma célula de aeração diferencial o metal em contato com a solução desaerada sofre corrosão, enquanto o metal em contato com a região aerada é protegido, pois esta questão vai depender da natureza do metal e de variáveis do meio.

Tabela 4 - Quadro-Resumo da Corrosão por Aeração Diferencial Considerando a Redução de Oxigênio como a Principal Reação Catódica [11].

Condição que prevalece	Exemplos práticos	O que ocorre
O metal não se passiva	Ferro ou zinco em soluções ácidas ou neutras tamponadas, ferro em soluções muito alcalinas; zinco em soluções moderadamente alcalinas.	O metal em contato com a solução aerada (M1) apresentará taxa de corrosão igual ou sempre maior do que o metal em contato com a solução desaerada (M2). A taxa de corrosão do metal M, será mínima e correspondente a 50% da perda total de massa do sistema no caso de se ter resistividade desprezível do meio. Nestas condições, a taxa de corrosão do metal M, será igual a taxa de corrosão do metal M2. A taxa de corrosão do metal M, será tanto maior quanto maior for o valor da resistividade do meio, atingindo um valor Máximo nos casos em que a resistividade do meio for muito elevada. Nesta situação, tudo se passará como se o metal em contato com a solução aerada estivesse eletricamente isolado do metal em contato com a situação desaerada.
O metal em contato com a solução aerada sofre passivação logo após sua imersão no eletrólito ou decorrido algum tempo após sua imersão.	Ferro em solução neutra não tamponada.	O metal em contato com a solução aerada (M1), estando passivado, apresentará uma taxa de corrosão desprezível e muito menor do que a taxa de corrosão do metal em contato com a solução desaerada M2. A taxa de corrosão do metal M2 será máxima quando a resistividade do meio for desprezível. A medida que a resistividade do meio aumenta, a taxa de corrosão de M2 vai diminuindo até um valor mínimo correspondente a resistividade muito elevada do meio, situação em que tudo se passa como se os metais M1 e M2 estivessem eletricamente isolados.
O metal passiva-se independente da concentração de oxigênio.	Ferro em solução moderadamente alcalina.	O metal estando passivo sofrerá taxa de corrosão desprezível, tanto na região em contato com a solução aerada como desaerada, não se notando nenhuma influência de aeração diferencial.

### 2.2.5.7. Pilha Eletrolítica

Grande parte dos tipos de corrosão envolve processos eletroquímicos espontâneos, onde a diferença de potencial se origina dos potenciais próprios dos materiais metálicos no processo. No caso da corrosão eletrolítica, verificamos a diferença de potencial causada por um meio externo, podendo causar uma corrosão acentuada em dutos enterrados, gasodutos, cabos telefônicos, entre outros casos.

Com a diferença de potencial instalada, surgem correntes de fuga, também chamadas de parasitas, vagabundas, espúrias ou de interferência. As correntes abandonam o circuito original, penetram no solo, e, através dele, retornam ao circuito. Esse caso também é verificado em dutos envoltos por água. Essas correntes são muito maiores do que as correntes de pilhas naturais (causadas pela simples diferença de potencial dos materiais), e, devido a variações do meio em que se encontram, pode-se ter uma corrosão intensa e com velocidade alta.

Esse tipo de corrosão observado é chamado de *corrosão eletrolítica*, e, segundo Gentil [12], é “a deterioração da superfície de um metal forçada a funcionar como ânodo ativo de uma cuba ou pilha eletrolítica”. Ou seja, através do meio externo, o metal de uma tubulação será deteriorado, funcionando como um ânodo, resultando em perda de material.

A *corrosão eletrolítica* (Figura 16) [19] é geralmente localizada, e como ocorre em alta velocidade, a perfuração da espessura de parede do duto ocorre em pouco tempo, causando vazamentos repentinos.



Figura 16 - Corrosão Por Corrente de Fuga [19].

Os problemas com corrente de fuga se devem ao fundamento sobre o qual são feitos os desenhos para os sistemas férri-co-elétricos, onde a corrente volta para as subestações através dos trilhos. O solo em volta dos trilhos pode ser visto como um condutor paralelo para a corrente de retorno. A magnitude da corrente de fuga será maior quanto menor for a resistência do solo. Qualquer estrutura metálica no solo tenderá a atrair a corrente de fuga, uma vez que representa um caminho de baixa resistência.

Essas correntes de fuga tendem a ser altamente dinâmicas, com a magnitude da corrente variando conforme o uso dos trens, por exemplo, a posição relativa e o grau de aceleração dos mesmos. Fundamentalmente, os seguintes fatores têm efeito no grau de corrosão por corrente de fuga: magnitude da corrente de propulsão, espaçamento das subestações, método de aterramento das subestações, resistência dos trilhos, uso e localização de junções em cruz e ligações isoladas, isolamento trilho-solo e a voltagem do sistema de força.

#### **2.2.5.8. Pilha de Temperaturas Diferentes**

Também chamada de pilha termogalvânica este tipo de pilha é constituída de um mesmo material metálico, estando as regiões anódicas e catódicas a temperaturas distintas. Geralmente ocorre quando se tem um material metálico imerso em eletrólito que apresenta áreas diferentemente aquecidas. A elevação da temperatura aumenta a velocidade das reações eletroquímicas, bem como a velocidade de difusão, pode-se portanto, admitir que o aumento da temperatura torna mais rápido o processo corrosivo. Entretanto, alguns fatores são considerados para explicar os casos em que o processo corrosivo diminui com o aumento da temperatura. Um deles é o da influência da elevação de temperatura na eliminação de gases dissolvidos, como por exemplo, oxigênio, diminuindo a corrosão. Também a influência da elevação da temperatura sobre películas protetoras deve ser considerada, pois se algumas de suas propriedades (porosidade, volatilidade e plasticidade) variarem com a temperatura, a velocidade de corrosão também irá variar. Exemplos [12]:

- a) *em solução de  $\text{CuSO}_4$ , o eletrodo de cobre em temperatura mais elevada é o cátodo e o eletrodo de mesmo material na temperatura mais baixa é o ânodo;*

- b) o chumbo em contato com seus sais age da maneira descrita acima;
- c) a prata tem polaridade inversa aos exemplos anteriores;
- d) o ferro imerso em soluções diluídas e aeradas de NaCl tem como ânodo a parte mais aquecida, mas após algumas horas (dependendo da agitação e da aeração) a polaridade pode se inverter.

### **2.2.6. Caracterização do Eletrólito ou Meio Corrosivo**

Segundo Gentil [12] os meios corrosivos mais freqüentemente encontrados são: a atmosfera; a água; o solo e produtos químicos e, em menor escala; alimentos, substâncias fundidas; solventes orgânicos, madeiras e plásticos.

#### **2.2.6.1. Corrosão Pela Atmosfera**

a) *classificação da atmosfera corrosiva de acordo com as suas características [11]*

a1) *ambiente rural;*

Não apresenta contaminantes químicos fortes, contém poeiras orgânicas e inorgânicas que podem promover ambiente corrosivo quando em mistura com elementos gasosos, alta umidade relativa, intensa luz solar e longos períodos de condensação.

a2) *ambiente urbano;*

Apresenta em sua composição fumos e sulfatos provenientes da combustão que em presença de alta umidade relativa e condensação pode estabelecer elevada taxa de corrosão, pois promove uma interação mais intensa dos poluentes perante estruturas metálicas.

a3) *ambiente industrial;*

Altamente corrosivo, verificando-se a presença de compostos de enxofre, provenientes da queima de óleo, carvão e outros. O SO<sub>2</sub> se oxida por vários processos catalíticos a ácido sulfúrico, se depositando sobre superfícies expostas resultando num ácido hidratado em presença de orvalho.

a4) *ambiente marinho;*

O cloreto é o principal agente contaminante. As finas partículas de sais marinhos podem ser levadas pelo vento e sedimentam sobre as superfícies metálicas expostas. A quantidade destas partículas no ar diminui rapidamente ao se distanciar da orla marítima.

*a5) ambiente marinho-industrial.*

É notável a presença de íons cloretos e compostos de enxofre devido à emissão de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e outros, na atmosfera, pela queima de combustíveis fósseis. Caracteriza-se por regiões litorâneas altamente industrializadas, normalmente próximas de portos.

*b) fatores que influenciam na ação corrosiva da atmosfera*

*b1) umidade relativa;*

À temperatura ambiente e em atmosfera seca a corrosão atmosférica sobre superfícies metálicas pode, do ponto de vista prático, ser ignorada. Entretanto, adquire especial relevância sobre superfícies úmidas, visto que, por estar associada a um mecanismo essencialmente eletroquímico, a umidade relativa exerce um papel decisivo no processo. Abaixo de um determinado nível de umidade relativa, a corrosão torna-se insignificante, pois não existe porção apreciável de eletrólito sobre o metal. Geralmente, a corrosão do ferro e outros metais é desprezível sob umidades relativas abaixo de 60%. Mesmo que a umidade relativa exceda a esse patamar, ela precisa, necessariamente, estar contaminada [12].

*b2) substâncias poluentes (particulados e gases);*

O cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) e o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) são os principais contaminantes e agentes corrosivos mais comuns encontrados na atmosfera. O cloreto de sódio se incorpora à atmosfera a partir do mar, sendo seus efeitos muito intensificados próximo à orla marítima, isso ocorre pelo fato do ar transportar grandes quantidades de sal, produzindo uma contínua pulverização de água. O dióxido de enxofre é encontrado em atmosferas poluídas por fumaças de origem industrial e pela queima de combustíveis fósseis. Essas duas substâncias químicas estimulam significativamente a corrosão de superfícies metálicas umedecidas, visto que aumentam a atividade de película aquosa. Assim, a corrosão atmosférica em locais próximo da orla pode exceder consideravelmente o previsto para o caso de

uma atmosfera pura. O mesmo ocorre em complexos fabris e grandes centros urbanos, onde os processos corrosivos se aceleram notavelmente [11].

O dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) procede tanto de fontes naturais como artificiais. Como fonte natural pode-se citar a atividade vulcânica sendo a principal fonte de emissão proveniente da queima de combustíveis, isso ocorre pelo fato de grande parte desses combustíveis conterem enxofre, procedente de aminoácidos e proteínas que formavam parte da matéria orgânica, a qual originou o combustível. Somente uma pequena parte do  $\text{SO}_2$  emitido (cerca de 10%) provém de fundições e fabricação de ácido sulfúrico [11].

Os cloretos atmosféricos são originados a partir da água do mar, sendo o seu íon cloreto, dissolvido como sal, arrastado através da pulverização de micro partículas aquosas dispersadas na atmosfera pelos fortes ventos e rebentações oceânicas. Ambas as formas alcançam, na atmosfera, concentrações compreendidas entre 0,5 e  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Outras fontes naturais de emissão de cloretos na atmosfera são os gases oriundos de vulcões em erupção, ainda que boa parte do HCl da atmosfera é proveniente das atividades industriais [11].

A deposição de partículas salinas sobre a superfície metálica acelera sua corrosão, principalmente se, como no caso de cloretos, podem originar produtos de corrosão solúveis, em lugar dos poucos solúveis que se formam na água pura. Por outro lado, os cloretos dissolvidos na camada de umidade aumentam consideravelmente a condutividade da película do eletrólito sobre o metal e tendem a destruir eventuais películas passivantes. É perfeitamente evidente o efeito desse íon na corrosão metálica. Entretanto, as informações quantitativas no caso dos cloretos é menos abundante do que no caso do  $\text{SO}_2$ . Para que o íon cloreto acelere a corrosão faz-se necessário que a superfície metálica esteja úmida. O valor da umidade relativa a partir do qual o sal começa a adsorver água da atmosfera (capacidade higroscópica) parece ser crítico do ponto de vista da corrosão. Alguns autores comprovaram que a umidade de 78%, que é a de equilíbrio com uma solução saturada de NaCl, coincidia com uma forte aceleração da corrosão do aço carbono [11].

A salinidade das atmosferas marinhas varia dentro de amplos limites, desde valores extremos em regiões de águas muito agitadas a valores baixos em zonas de águas calmas. Dentre as variáveis que influenciam a salinidade atmosférica destacam-se o

regime de ventos dominantes (direção e velocidade), distância da costa, topografia da região, altitude, entre outros [12].

Outros tipos de contaminantes ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , poeiras, ácidos orgânicos, etc.) também podem ter um efeito sobre a corrosividade de atmosferas específicas [11].

*b3) temperatura;*

Condições de altos teores de umidade em conjunto com altas temperaturas favorecem notavelmente os processos de deterioração dos materiais na atmosfera (ataque por fungos e bactérias, corrosão atmosférica, entre outros) [11].

*b4) tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica.*

O tempo de superfície úmida, não corresponde necessariamente ao tempo de superfície úmida real experimental e pode ser determinado diretamente por vários sistemas de medição. A norma NBR 14643 – “Corrosão Atmosférica – Classificação da Corrosividade de Atmosfera” [20] descreve esse procedimento.

Ainda podem ser considerados: o regime de ventos variações cíclicas de temperatura e umidade, chuvas e insolação [11].

*c) corrosividade da atmosfera*

A norma NBR 14643 [20] classifica a corrosividade atmosférica conforme mostrado na Tabela 5 [20], e estabelece os critérios para essa classificação:

Tabela 5 - Categorias de Corrosividade Atmosférica [20].

<b>Categoria de Corrosividade</b>	<b>Agressividade</b>
C1	Muito Baixa
C2	Baixa
C3	Média
C4	Alta
C5	Muito Alta

*d) avaliação da corrosividade atmosférica*

Uma Estação de Corrosão Atmosférica é composta por um módulo de coleta de poluentes e um módulo de intemperismo natural, a fim de se determinar a

agressividade do ambiente por meio do levantamento de parâmetros relevantes tais como sulfatos e cloretos, bem como a corrosividade do meio sobre diferentes materiais metálicos. A estação deve contar basicamente com um “rack” para exposição dos corpos de prova, uma guarita para alojar os instrumentos de medição das variáveis meteorológicas e os dispositivos de medida dos contaminantes atmosféricos que interessem. As estações de coleta têm como finalidade medir o índice de poluição e agressividade do meio sobre os diversos materiais, por meio de parâmetros tais como taxa de sulfatação ( $\text{SO}_2$ ) e teor de cloretos (Cl<sup>-</sup>), aliados a parâmetros meteorológicos tais como temperatura, umidade, precipitação, pressão, radiação global, bem como direção e velocidade dos ventos. Para a monitoração dos poluentes são utilizadas as seguintes normas:

ABNT NBR 6211 [21] – “Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida”;

ABNT NBR 6921 [22] – “Sufatação total na atmosfera – Determinação da taxa pelo método da vela de dióxido de chumbo”.

É importante ressaltar que o local de instalação da estação deve ser cuidadosamente selecionado, a fim de evitar vandalismo e contaminação da população por contato direto às velas coletoras de cloretos e sulfatos. Para instalação da estação devem ser analisados os atuais e relevantes problemas de corrosão registrados na área, bem como a provável origem dos poluentes na região de interesse. A direção e velocidade dos ventos são parâmetros importantes na escolha do local, pois influenciam diretamente na dispersão e sinergia dos poluentes.

*d1) determinação de Cloretos (Cl<sup>-</sup>) na atmosfera;*

A norma ABNT NBR 6211[21], prescreve o método, através de análise volumétrica, para determinação do teor de cloretos inorgânicos na atmosfera que irá se depositar sobre o material. O método aplica-se especificamente à determinação de ácido clorídrico (HCl) proveniente de atmosferas diluídas e de cloretos solúveis em água como os existentes em atmosferas marinhas.

A aparelhagem dos coletores de cloretos é composta de vela coletora (Figura 17) [23], frasco coletor, suporte do frasco coletor e proteção da aparelhagem. De acordo com a norma, os resultados devem ser expressos em  $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ .



Figura 17 - Vela Coletora de Cloretos e Suporte da Vela [23].

O princípio do método consiste na adsorção do cloreto na superfície da gaze e posterior absorção em água contendo glicerol. O íon cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) resultante é titulado com solução diluída de nitrato de mercúrio na presença de indicador misto difenilcarbazona-azul de bromofenol. O ponto final da titulação torna-se evidente através do indicador misto pela formação do complexo mercúrio-difenilcarbazona, de azul-violeta, em  $\text{pH } 2,3\sim 2,8$ . Enquanto adiciona-se  $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , este reage formando preferencialmente o cloreto mercúrico  $\text{HgCl}_2$ , e após reagir completamente obtêm-se o ponto de viragem, evidenciando a formação do complexo. Os resultados devem ser expressos em  $\text{mg}$  de cloreto por unidade de área, por dia, especificando-se sempre o início e o término do ensaio, bem como o local de exposição.

#### *d2) determinação da taxa de sulfatação na atmosfera.*

A norma ABNT NBR 6921 [22] prescreve o método para determinação gravimétrica da taxa de sulfatação total na atmosfera, obtida pela oxidação ou fixação, em uma superfície reativa, de compostos de enxofre como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . A aparelhagem dos coletores de sulfatos é composta de vela coletora de  $\text{PbO}_2$ , abrigo

da vela e embalagem para transporte das velas. De acordo com a norma, os resultados devem ser expressos em mg de  $\text{SO}_3/100 \text{ cm}^2 \cdot \text{dia}$ . As fotos da Figura 18 [23], mostram uma estação coletora de sulfatos.

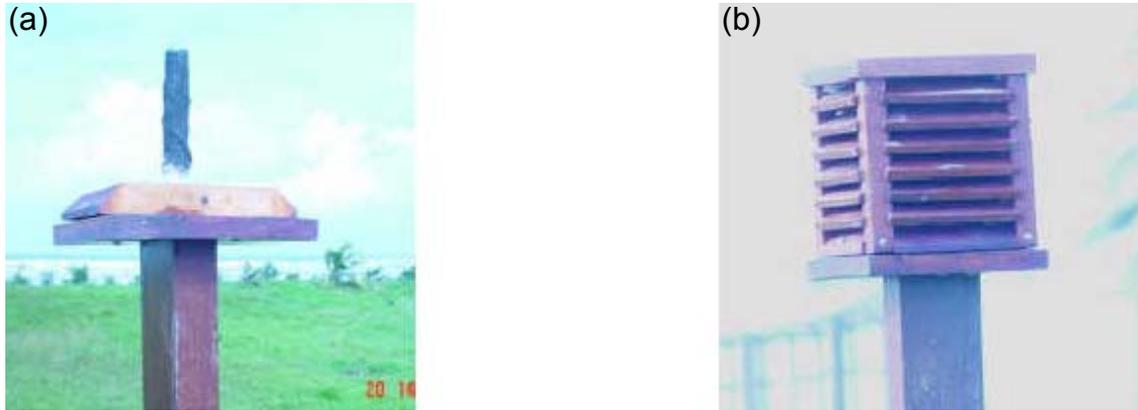


Figura 18 - Fotos da Vela Coletora de Sulfatos (a) e do Suporte da Vela (b) [23].

O princípio do método consiste na oxidação ou fixação de compostos contendo enxofre por uma superfície reativa de dióxido de chumbo ( $\text{PbO}_2$ ) em um determinado período de tempo, devendo ser referida a unidade de tempo e a unidade de área exposta. Após o período de coleta, usualmente 30 dias, realiza-se a extração da vela de sulfato. O sulfato insolúvel resultante é solubilizado com carbonato de sódio, sendo precipitado a quente, em meio ácido, com solução de cloreto de bário. A massa de sulfato de bário assim obtida é utilizada no cálculo da taxa de sulfatação.

### 2.2.6.2. Corrosão Pelas Águas

#### *a) corrosão pelas águas naturais (rios, lagos e do subsolo)*

As águas naturais contêm componentes sólidos e gases dissolvidos, além de substâncias coloidais em suspensão. Cada um destes componentes pode acelerar ou inibir a corrosão dos metais, tornando essencial o conhecimento da natureza de cada componente e o modo pelos quais estes agem na corrosão dos metais.

Os constituintes mais importantes da água são os gases dissolvidos (oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono, amônia e gases sulfurosos), constituintes minerais (sais de ácido, magnésio, sódio cloretos, sulfatos, nitratos, bicarbonatos, sais de metais pesados, sílica,), matéria orgânica (tanto de origem vegetal e animal, e

também as produzidas pela atividade humana, como óleos e detergentes) microrganismos e algas. Além desses constituintes, fatores como pH, temperatura e velocidade de escoamento têm influência no comportamento dos metais com relação à corrosão pela água [11].

*a1) efeito dos gases dissolvidos;*

Dentre os gases dissolvidos nas águas naturais, o oxigênio é o que mais significativamente afeta a corrosão de aço carbono. O dióxido de carbono, a amônia, nitrogênio e os gases sulfurosos também estão presentes nas águas naturais. Destes, o dióxido de carbono apresenta um efeito mais significativo. O nitrogênio é inerte e quase não apresenta influência na corrosão do aço carbono. A amônia terá efeito muito prejudicial se na água estiverem presentes nitratos, pois eles determinam a formação do complexo  $(\text{Fe}(\text{NH}_3)_6)(\text{NO}_3)_2$ . Gases sulfurosos, como o gás sulfídrico e o dióxido de enxofre causam acidificação das águas, acelerando a corrosão dos aços carbono.

*a2) efeito do pH;*

O pH das águas naturais, normalmente varia de 4,5 a 8,5. Águas com pH maiores do que 8,5 são pouco agressivas ao aço, pois ocorre a sua passivação. Águas com pH inferiores a 4,5 são muito agressivas. Porém, situações extremas são raramente encontradas em águas naturais.

*a3) efeito da presença de cloretos, nitratos, sulfatos, nitritos e fosfatos;*

A presença de cloretos nas águas naturais acelera a corrosão do aço, tanto por determinar um aumento da condutividade da água, como por influenciar nas características da camada de óxidos e/ou hidróxidos.

*a4) efeito da dureza – índice de saturação;*

As águas comumente contêm sais de cálcio e magnésio, em concentrações variadas, que dependem da origem. Quando a concentração destes sais é alta, diz-se que a água é dura, quando baixa que a água é mole. A classificação usual de uma água, de acordo com a sua concentração e carbonato de cálcio, é a seguinte:

Águas moles: < 50 ppm de  $\text{CaCO}_3$ ;

Águas moderadamente moles: (50-100)ppm de  $\text{CaCO}_3$ ;

Águas levemente duras: (100-150)ppm de  $\text{CaCO}_3$ ;

Águas moderadamente duras: (150-250) de  $\text{CaCO}_3$ ;

Águas duras: (250-350)ppm de  $\text{CaCO}_3$ ;

Águas muito duras: >350 ppm de  $\text{CaCO}_3$ .

Inicialmente, a dureza da água era considerada como sendo fator determinante da intensidade de corrosão de um metal. No entanto, posteriormente, verificou-se que a dureza apenas não é o único fator que governa a agressividade da água. O pH, a temperatura e o conteúdo dos sólidos dissolvidos são fatores que também apresentam influência nesta agressividade.

#### *a5) efeito da temperatura.*

De maneira geral, ocorre o aumento da taxa de corrosão do aço carbono com o aumento da temperatura das águas naturais.

Em meios desaerados, nos quais a redução do cátion hidrogênio é a principal reação catódica para cada acréscimo de  $30^\circ\text{C}$  de temperatura da água, tem-se um aumento superior a duas vezes da taxa de corrosão.

Como comprovação, verifica-se que a velocidade de corrosão do aço doce, em água potável, aumenta cerca de 30% entre  $20$  e  $30^\circ\text{C}$ .

Em águas aeradas, tem-se também, um aumento significativo da taxa de corrosão, sendo este efeito menos pronunciado do que no caso anterior.

Em sistemas fechados, nos quais não se tem possibilidade de escape do gás de oxigênio, o aumento da temperatura acarretará um contínuo aumento da taxa de corrosão do aço carbono. Em sistemas abertos verifica-se, em temperaturas próximas aos  $80^\circ\text{C}$ , um decréscimo nesta taxa. Este decréscimo é devido à diminuição da solubilidade de oxigênio na água, com o aumento da temperatura.

#### *b) corrosão pela água do mar*

Estas águas contêm uma quantidade apreciável de sais, o que determina inicialmente a sua corrosividade. Uma análise da água do mar apresenta em média os constituintes apresentados na Tabela 6 [12]. A água do mar, em virtude da presença acentuada de sais, é um eletrólito por excelência. Outros constituintes, tais como gases dissolvidos, podem acelerar os processos corrosivos.

Tabela 6 – Composição da Água do Mar (gramas por litro de água) [12].

Cloreto (Cl <sup>-</sup> )	18,9799
Sulfato (SO <sup>2-</sup> )	2,6486
Bicarbonato (HCO <sup>-</sup> )	0,1397
Brometo (Br <sup>-</sup> )	0,0646
Fluoreto (F <sup>-</sup> )	0,0013
Ácido Bórico (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> )	0,0260
Sódio (Na <sup>+</sup> )	10,5561
Magnésio (Mg <sup>2+</sup> )	1,2720
Cálcio (Ca <sup>2+</sup> )	0,4001
Potássio (K <sup>+</sup> )	0,3800
Estrôncio (Sr <sup>2+</sup> )	0,0133

### 2.2.6.3. Corrosão Pelo Solo

O solo tem sua origem na desagregação de rochas, através de processos de intemperismo. Sua composição física e mineralógica resulta da origem, decomposição e deposição das rochas constituintes, da vida vegetal e animal existente e da topografia do solo.

Fatores que influenciam na corrosividade do solo [11-12]:

#### *a) presença de água;*

Solos compostos de partículas maiores permitem o acesso da água e oxigênio, conseqüentemente, o mecanismo de corrosão do aço será em tudo semelhante à corrosão dos metais imersos em meios aquosos (corrosão eletroquímica). Solos contendo constituintes mais finos são menos permeáveis ao oxigênio e podem reter, como regra, mais água. De modo geral, a velocidade de corrosão do aço é menor em solos bem aerados do que em solos pouco aerados. Um solo homogêneo, de mesma constituição e distribuição granulométrica, apresentam diferenças de concentração de oxigênio com a profundidade, que pode levar ao aparecimento de pilhas de aeração diferencial. A passagem da estaca por solos distintos também pode propiciar a formação de tais células, assim como a criação de solos com diferentes níveis de compactação, criados pelo remanejamento mecânico [11].

*b) presença de sais;*

Alguns solos são naturalmente mais corrosivos do que outros. Os solos que merecem maior atenção são aqueles que produzem substâncias solúveis em água que possuam características alcalinas, tais como os elementos químicos Sódio, Potássio, Cálcio e Magnésio, e os que possuem constituintes formadores de ácidos, tais como os carbonatos, bicarbonatos, nitratos e sulfatos. Solos potencialmente mais corrosivos, em contraste com solos arenosos, são aqueles classificados como silte e argila, solos ricos em materiais orgânicos e solos pouco aerados [11].

*c) acidez do solo (pH);*

A acidez do solo, ou pH, tem grande influência em sua corrosividade. Solos extremamente ácidos (pH menor ou igual a 4) causam corrosão severa na maioria dos metais enterrados. A corrosão acontece, neste caso, na ausência do oxigênio, pois o hidrogênio gasoso pode ser liberado por difusão diretamente no solo. Neste caso específico, a resistividade do solo não é importante, pois a região catódica, onde o hidrogênio é formado, estará próximo à área anódica onde acontece o ataque corrosivo. Em solos insuficientemente ácidos para liberar o hidrogênio (solos fracamente ácidos, neutros e alcalinos), e onde não se espera corrosão microbiológica, a resistividade do solo se torna uma variável importante, pois a corrente iônica tem que fluir a grandes distâncias das áreas catódicas (onde existe um suprimento de oxigênio) até as regiões anódicas. Solos muito ácidos não são, todavia, comuns. Os solos costumadamente apresentam pH's variando entre 5 e 8. O pH do solo depende da composição da rocha de origem, das condições climáticas durante sua formação, da presença de material orgânico e da poluição causada pela atividade humana [12].

*d) disponibilidade de oxigênio;*

Em adição à existência de água o oxigênio também deve estar presente para que o processo de corrosão possa acontecer. Uma das reações catódicas de grande importância no processo de corrosão dos metais no solo é a de redução do oxigênio dissolvido na água, gerando hidroxilas. Assim, a aeração do solo, ou seja, a capacidade de penetração do ar atmosférico no solo, é fator de grande importância no processo. No entanto, na maioria dos casos de corrosão pelo solo (na condição

em que a redução do oxigênio é a reação catódica predominante), os produtos de corrosão formados são insolúveis e criam uma barreira protetora, uma "atmosfera" junto ao metal, ou seja, o metal sofre algum tipo de passivação. A presença de oxigênio torna-se, assim, necessária para a formação desta barreira. A intensidade da velocidade de corrosão é um indicativo do grau de deterioração da estrutura enterrada. No entanto, deve-se levar em consideração o valor da velocidade em função do tempo, ou seja, a continuidade do processo corrosivo deve ser verificada. Se a velocidade de corrosão, com o decorrer do tempo, se mantiver constante e for elevada, certamente as estruturas metálicas sofrerão deterioração de modo acelerado. Se, entretanto, diminuir com o decorrer do tempo, o desempenho do aço pode ser muito bom, mesmo que, no início da cravação, as velocidades sejam elevadas. A continuidade do processo corrosivo é função da natureza dos produtos de corrosão que se formam. Se estes forem solúveis e facilmente removidos da interface metal/solo, a corrosão terá continuidade. Se, no entanto, os produtos de corrosão forem insolúveis e capazes de se aderirem à superfície metálica, formando uma barreira protetora, a velocidade de corrosão poderá diminuir a níveis desprezíveis. Em grandes profundidades (maiores do que 10 m), a velocidade de corrosão deixa de ser controlada preferencialmente pela resistividade do solo, e passa a ser determinada pela disponibilidade de oxigênio dissolvido nas águas subterrâneas, isto é, a difusão limita a velocidade de corrosão [12].

*e) resistividade elétrica do solo;*

Assim como a acidez, a resistividade elétrica tem grande influência na corrosividade dos solos. Quanto maior a resistividade, menor a corrosão das estruturas enterradas. A resistividade do solo está diretamente relacionada com a quantidade e qualidade dos sais dissolvidos, temperatura, teor de umidade, compactação e da presença de materiais inertes. Como regra geral, quanto maior a quantidade de sais solúveis, menor será a resistividade, e, portanto, maior será a corrosividade do solo (ver Tabela 7) [24].

*f) potencial redox (presença de bactérias);*

Uma prática bastante adotada para verificação da possibilidade da ocorrência de corrosão microbiológica é a medição do potencial de oxiredução do solo denominado potencial redox. Esta medição consiste na determinação do potencial

de uma lâmina de platina enterrada no solo, no local desejado. Pode-se usar um eletrodo de referência qualquer, porém é indispensável a conversão do valor encontrado para o valor correspondente ao eletrodo padrão de hidrogênio. Panossian [11], apresenta maiores detalhes dessa medição. A Tabela 8 mostra uma classificação dos solos em função do potencial redox.

Tabela 7 – Grau de Agressividade do Solo em Relação à Resistividade [24].

Resistividade Elétrica ( $\Omega\text{cm}$ )	Grau de Agressividade
< 1000	Extremamente Agressivo
1000 – 2000	Fortemente Agressivo
2000 – 3500	Moderadamente Agressivo
3500 – 5000	Pouco Agressivo
5000 – 10000	Ligeiramente Agressivo
> 10000	Não Agressivo

Tabela 8 – Classificação dos Solos em Função do Potencial Redox [11].

Potencial Redox $E_h$	Possibilidade de Ocorrência de Corrosão Bacteriológica
Até 100 mV	Severa
100 – 200 mV	Moderada
200 – 400 mV	Leve
Acima de 400 mV	Ausente

#### 2.2.6.4. Corrosão Por Produtos Químicos

Os produtos químicos, desde que em contato com água ou com umidade e formem um eletrólito, podem provocar corrosão eletroquímica e ação dependerá fortemente da composição desse produto.

#### 2.2.6.5. Meios Corrosivos a Altas Temperaturas

Os principais meios corrosivos a altas temperaturas, que caracterizam a corrosão química são [25]:

a) *oxigênio e gases contendo enxofre;*

Estão presentes em fornos, caldeiras, unidades de processo, nas chamadas atmosferas sulfurosas. O enxofre e o  $H_2S$  formam sulfetos de metal que não são protetores e agravam o processo corrosivo por formarem eutéticos de baixo ponto de fusão com os óxidos de metal. Em ligas contendo níquel, o sulfeto localiza-se nos contornos de grão formando um eutético  $Ni_3S_2 - Ni$  que funde a  $645\text{ }^\circ\text{C}$  tornando estas ligas pouco resistentes a atmosferas sulfurosas.

*b) vapor d'água;*

Em temperatura elevada o vapor d'água pode atacar certos metais formando óxido e liberando hidrogênio que pode provocar fragilização pelo hidrogênio.

*c) cinzas;*

A queima de combustível em fornos, caldeiras, turbinas a gás, pode provocar sérios problemas de corrosão devido a cinzas contendo vanádio e sulfato de sódio.

*d) vanádio;*

Estando presente no combustível oxida-se a  $V_2O_5$  e forma eutéticos de baixo ponto de fusão com os óxidos do metal destruindo as películas protetoras das superfícies metálicas.

*e) sulfato de sódio;*

Origina-se de reações de  $SO_2$  com o  $NaCl$  presente no combustível. Esse sulfato de sódio reage posteriormente com os óxidos formados destruindo também, as películas protetoras. A ação combinada do vanádio e sulfato de sódio é muito mais acentuada, sobretudo em cinzas contendo cerca de 85% de  $V_2O_5$  e 15% de  $Na_2SO_4$ .

Alguns casos especiais de corrosão em altas temperaturas [25]:

A corrosão chamada catastrófica é um tipo de corrosão que se manifesta em alguns aços e outras ligas onde ocorre uma oxidação extremamente rápida, conduzindo à destruição da liga. A corrosão ou oxidação catastrófica ocorre, particularmente em aços contendo molibdênio e aços com alto teor de vanádio devido ao baixo ponto de fusão de seus óxidos.

A corrosão por metais líquidos ocorre em situações em que se trabalha com um metal líquido em contato com outro sólido, como por exemplo em reatores nucleares. Esse tipo de corrosão pode ocorrer devido a dissolução do metal sólido no líquido ou

a penetração intergranular do metal líquido no sólido do recipiente. Em ambos os casos há a formação de uma liga com a perda de material do recipiente.

Carbonetação e descarbonetação; consiste na entrada de carbono (carbonetação) ou saída daquele elemento (descarbonetação). O primeiro caso ocorre quando ligas ferrosas são aquecidas em atmosferas contendo hidrocarbonetos ou monóxido de carbono. O carbono vai se difundindo para o interior do metal, formando uma camada rica em carbono na superfície. O segundo caso ocorre quando ligas, principalmente o aço baixa liga são colocados em ambientes com agentes descarbonetante como o  $H_2$  e o  $CO_2$ . Neste caso, a liga vai se deteriorando e perdendo a dureza superficial. A carbonetação e a descarbonetação podem ser causa importante de falhas em alta temperatura com perda de material e por esta razão podem ser associadas à corrosão.

### **2.2.7. Fatores Que Contribuem Com o Processo Corrosivo**

#### *a) esforços mecânicos;*

Atuando sobre o componente geram tensões no metal acelerando o processo corrosivo (corrosão sob tensão).

#### *b) degradação assistida mecanicamente;*

São formas de ataque onde a velocidade, abrasão hidrodinâmica são as maiores influências, atacando o material ou removendo a camada passivadora.

#### *c) erosão;*

É a remoção do material superficial pela ação de vários impactos de partículas líquidas ou sólidas.

#### *d) fricção;*

Atrito entre duas superfícies metálicas ou não.

#### *e) cavitação;*

O fenômeno cavitação ocorre em áreas com alta velocidade de fluxos e rápidas mudanças de pressão. Isto causa colapso de bolhas de gás ou vapor projetando

forças na superfície metálica removendo a camada de passivação e desta forma potencializando a corrosão.

f) *fadiga*.

Deterioração do material provocada por cargas cíclicas.

### **2.3. A Metodologia de Dennies**

Segundo Dennies [1], as falhas podem ser definidas em duas categorias: a) quando há uma parada em um componente, máquina ou processo; b) quando um componente, máquina ou processo deixa de atingir o desempenho previsto em projeto, incidindo em limitações de operação, diminuição de vida útil, entre outros. No mesmo artigo, este autor sugere uma seqüência lógica para se chegar à causa-raiz de uma falha, na qual o processo de solução de problemas é classificado em quatro passos e a análise do tipo de falha em nove passos, conforme apresentados a seguir.

#### **2.3.1. Os Quatro Passos Para A Solução de Um Problema**

- a) *qual é o problema?*
- b) *qual é a causa-raiz do problema?*
- c) *quais são as potenciais soluções?*
- d) *qual é a melhor solução?*

#### **2.3.2. Os Nove Passos Para A Análise da Falha Segundo Dennies [1]**

##### **2.3.2.1. Entender e Negociar as Metas da Análise**

Toda análise de falha deve estabelecer, inicialmente, quatro itens: a) *prioridade da análise*; b) *recursos disponíveis*; c) *obstáculos impostos*; e d) *meta da análise*. Estes quatro itens devem ser negociados por todas as partes envolvidas, no começo da análise.

### 2.3.2.2. Obter Claro Entendimento da Falha

“Qual é o problema”? Esta deve ser a primeira pergunta a ser feita na análise de uma falha. As informações sobre a mesma é um ponto crucial. Deve-se conhecer o máximo possível do componente, sistema ou processo e, neste caso, a realização de um *brainstorming* é uma boa ferramenta para auxiliar a procura da causa da falha, pois esta prática origina um grande número de informações. O local da falha é também muito importante. Se não for possível visitá-lo constantemente, deve-se fotografar e/ou desenhar o local da falha antes e depois da mesma ocorrer. Igualmente importante é a declaração de alguma testemunha, a qual poderá ser inquirida com respeito a (por exemplo):

*a) percebeu-se alguma mudança recente na forma de operação dos equipamentos, em termos de comportamento pessoal, etc.?*

*b) o problema já acontecera antes?*

Existem ainda cinco pontos que devem ser documentados ou registrados para evidenciar a causa da falha:

*a) posição;*

Fragmentos, equipamento, peças, pessoas (testemunhas, pessoas envolvidas), controles e fotografias;

*b) pessoas;*

Descrições do trabalho, testemunhas, contabilidades e especialistas;

*c) documentos;*

Desenhos, alterações de projeto, dados de processo, procedimentos de operação, histórico de falhas, dados de manutenção, fotografias, dados de inspeção, análise de tensão, não conformidades anteriores;

*d) processo;*

Projeto de processo, processo operacional, aprovações de alterações de processos, ambiente, clima;

*e) peças;*

Material especificado, material utilizado, propriedades mecânicas e físicas dos materiais da máquina, aparência da fratura (se houver), análise microscópica, resíduos da máquina na qual ocorreu a falha, análise de tensão, análise metalúrgica.

### **2.3.2.3. Objetividade e Clareza ao Identificar Todas as Causas-Raiz Possíveis**

De acordo com o disposto na seção 2.1.1, uma ferramenta comum para identificar as possíveis causas-raízes é a Análise de Árvore de Falha (TFA – *Tree Failure Analysis*, Figura 1, pg. 7) [1]. Novamente, a realização de um *brainstorming* é um procedimento adequado. Primeiramente, pergunta-se por que a falha ocorreu (este é o topo da Árvore de Falha). Abaixo, aparece a primeira causa-raiz, em seguida pergunta-se por que esta primeira causa-raiz ocorreu. Então continuam as indagações até se exaurirem as idéias, de acordo com as regras do *brainstorming*.

Quando a Árvore de Falha for completada, existem mais duas perguntas a serem feitas:

a) *O que há de diferente nessa falha?*

b) *Do que se está esquecendo?*

Há várias razões pelas quais uma Árvore de Falha é importante. Primeiro, porque ela é um documento onde todas as idéias de causas-raiz sugeridas pela equipe foram incorporadas. Segundo, porque ela é uma lista “viva” na qual idéias novas podem ser adicionadas a qualquer momento, devendo ser utilizada durante toda a inspeção da falha. Terceiro, porque ela pode ajudar a simplificar a análise de uma falha complicada, pois é mais fácil analisar e aprovar (ou reprovar) cada causa-raiz isoladamente do que a falha resultante.

### **2.3.2.4. Avaliar Objetivamente a Probabilidade de Cada Causa-Raiz**

Uma boa ferramenta para se avaliar objetivamente a probabilidade de cada causa-raiz listada na Árvore de Falhas é a Tabulação do Modo da Falha (FMA – *Failure Mode Assessment*), conforme já exemplificado na Figura 4, pg. 11. Para que a mesma seja preenchida, os seguintes passos devem ser seguidos:

a) *determinar a probabilidade de cada causa-raiz em potencial, denominando-a de provável, possível ou improvável;*

*b) determinar a prioridade de cada causa-raiz em potencial;*

*c) documentar as razões pelas quais foram determinadas a probabilidade e a prioridade das causas-raiz.*

Há pelo menos três bons motivos que tornam importante a elaboração de uma Tabela FMA. O primeiro é que se trata de um documento detalhado, o segundo é que ela é também uma lista “viva” que pode ser alterada a qualquer momento, e o terceiro é que a lista de prioridades de uma Tabela FMA indica a ordem em que cada causa-raiz será comprovada. Portanto, ela auxilia a organizar melhor a análise de uma falha.

### **2.3.2.5. Atuar na Causa-Raiz Mais Provável**

A resposta à pergunta “Qual é a causa-raiz do problema?” pode ser facilitada pelo Plano Técnico para Resolução (TPR – *Technical Plan for Resolution*), conforme exemplificado na Figura 5, pg. 12.

O TPR assegura que o teste ou a análise seja realizado(a) visando alcançar a melhor eficiência. A prioridade de alguns testes ou análises pode ser alterada pelo aparecimento de muitas outras causas-raiz.

Nesta fase, pode-se responder a três perguntas:

*a) O que se sabe?*

Listar os fatos e determinar quais causas-raiz são aplicáveis;

*b) O que se pode achar?*

Listar teorias (histórico, experiência, etc...), idéias e possíveis relações causa e efeito;

*c) O que se pode provar?*

Para cada teoria, idéia ou causa-raiz, relacionar a evidência física que seria esperada que ocorresse.

Adicionalmente, a Tabela TPR indica de quem é a responsabilidade em realizar os testes ou análises, o prazo e os resultados. A relevância da mesma baseia-se na

possibilidade de registro de cada teste ou análise que será feito (a), da pessoa indicada, do prazo e do resultado, com alguns comentários.

#### **2.3.2.6. Identificar Claramente Todas as Ações Corretivas Possíveis**

É necessário determinar as ações corretivas para prevenir que as falhas não ocorram novamente. Para isso é necessário repetir as instruções do Passo 2.3.2.3 (Objetividade e Clareza ao Identificar Todas as Possíveis Causas-Raiz) e criar a Árvore de Ações Corretivas, que é semelhante à TFA. Neste caso, porém, são apontadas possíveis soluções e não possíveis causas.

#### **2.3.2.7. Avaliar Objetivamente Cada Ação Corretiva**

Devem-se seguir as mesmas instruções do Passo 2.3.2.4 (Avaliar Objetivamente a Probabilidade de Cada Causa-Raiz) e criar a Tabela de Avaliação de Ações Corretivas (CAA – *Corrective Action Assessment*).

#### **2.3.2.8. Selecionar as Melhores Ações Corretivas**

Devem-se seguir as mesmas instruções do Passo 2.3.2.5 (Atuar na Causa-Raiz Mais Provável). A equipe envolvida deve planejar o plano técnico, determinar a melhor ação corretiva e criar a Tabela de Plano Técnico para Avaliação (TPE – *Technical Plan for Evaluation*).

#### **2.3.2.9. Avaliar a Efetividade das Ações Corretivas**

Passado um determinado tempo, o qual deve ser definido pela equipe de trabalho envolvida, deve ser feita uma avaliação das ações corretivas selecionadas. Pela metodologia proposta, os registros das ações permitem que a qualquer tempo seja possível se retornar a uma das etapas do processo, seja para revisão ou para se tomar um outro caminho durante a análise.

### 3. TÉCNICA PROPOSTA

Estudando a metodologia de Dennis [1], verifica-se a oportunidade de se agregar à terceira etapa do processo (Figura 19) [1], uma vez que é ali que as possíveis causas são levantadas, um conjunto de ações resultantes de uma classificação de modos de corrosão. Tais ações visam permitir uma composição mais simplificada e ordenada dos fatos que comporão a Árvore de Falhas.

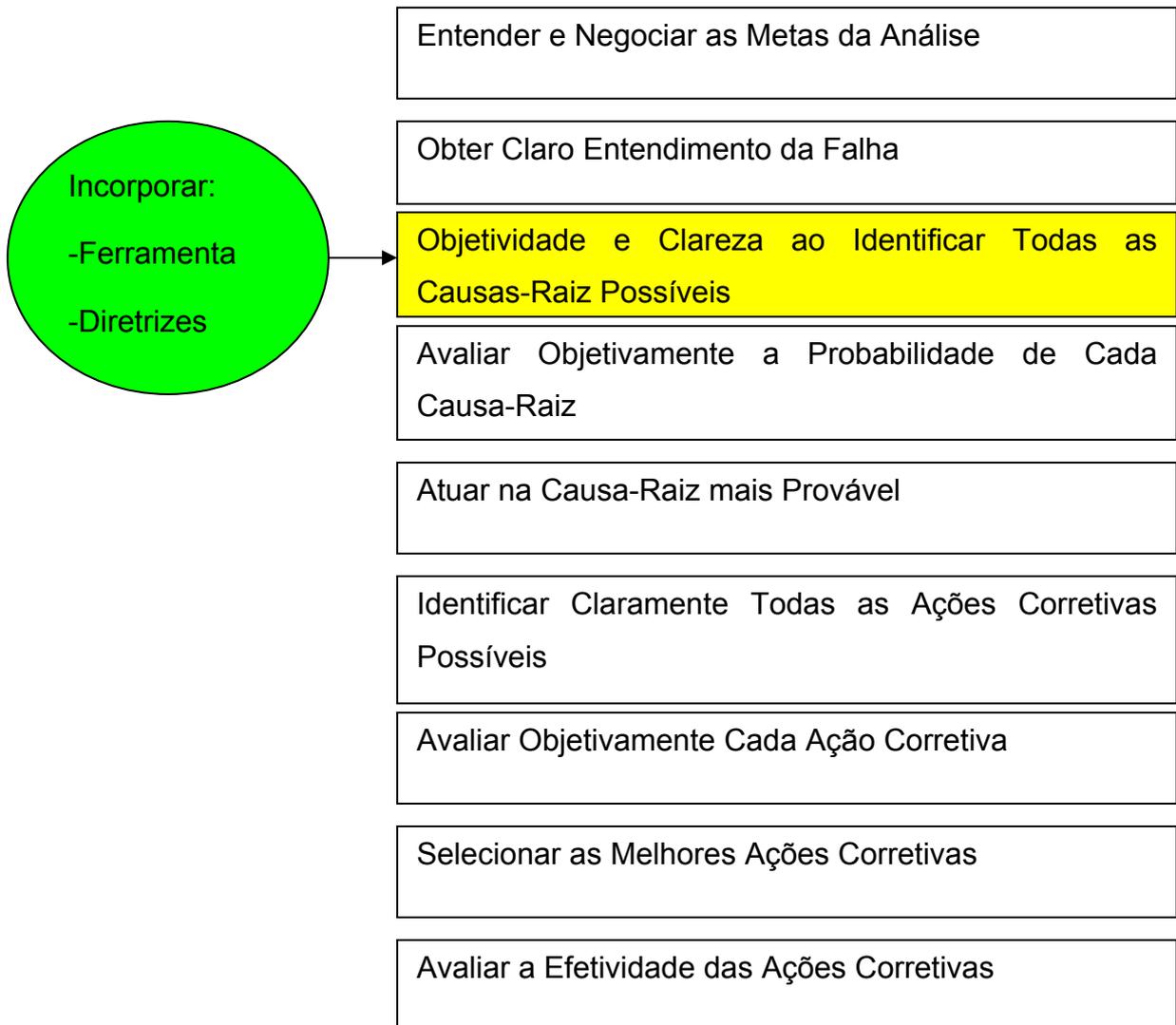


Figura 19 – Fluxograma da Análise de Falha [1].

A elaboração de uma metodologia dedicada à execução de uma determinada tarefa pressupõe determinar “o que fazer” e “como fazer” tal tarefa. As revistas

especializadas apresentam estudos de casos práticos de análise de falha. Boa parte deles sugerem, inclusive, como corrigir a referida falha. A rotina de laboratório de uma empresa especializada em prestar serviços em análise de falha em componentes também foi observada. Muitas ações são semelhantes nos casos estudados, porém não se percebe uma seqüência e ordem dos fatos padronizada.

### **3.1. O que é normalmente executado em uma Análise de Falha por Corrosão**

Tendo por objetivo relacionar as ações executadas em uma análise de falha foram estudados relatórios gentilmente cedidos pela Spectroscan Tecnologia de Matérias Ltda [26], empresa atuante nesse segmento, além de casos sobre o assunto selecionados da literatura.

#### **3.1.1. Determinação do Número de Casos Verificados**

Como a quantidade de estudos de caso é impossível de se quantificar, principalmente porque a grande maioria não é publicada, o critério para se definir quantos deles representariam uma amostra foi a de consulta a um especialista na área. Em entrevista, o Professor César Lúcio Molitz Allenstein [26] profissional com mais de 25 anos de experiência em análise de falha em materiais, Diretor da Spectroscan Tecnologia de Materiais Ltda. e sendo responsável por diversos laudos, sugeriu que a observação minuciosa de trinta estudos de caso, tomados de forma aleatória, representariam de forma satisfatória o universo de estudos de caso de análise de falha por corrosão.

#### **3.1.2. Casos de Análise de Falha por Corrosão**

Dentre os trinta casos estudados serão descritos três julgados significativos e, para os demais, serão citadas as fontes de pesquisa. A apresentação será feita mantendo-se os padrões adotados pelos autores, a fim de preservar a originalidade dos trabalhos.

##### **3.1.2.1. Análise de Caso 1**

###### *a) Relatório*

Autor: Spectroscan Tecnologia de Materiais Ltda.

RELATÓRIO DE INSPEÇÃO No 4438/2002

CLIENTE: (não revelado)

DATA: 25 de Novembro de 2002.

### OBJETIVO

Analisar a falha ocorrida em tubos e chapa fornecidas pelo cliente, utilizando espectrometria de emissão óptica, análise metalográfica e espectroscopia de fotoelétrons para análise química — ESCA (XPS) *Electron Spectroscopy for Chemical Analysis* – (*X-ray Photoelectron Spectroscopy*), empregando radiação com varredura de 0 a 1100 eV.

### DESCRIÇÃO DA FALHA

As amostras em estudo apresentaram vazamento do gás de refrigeração por perfuração do tubo devido à corrosão (iniciando externamente) no contato com a chapa de fundo do refrigerador.

O tempo estimado de operação do equipamento foi de 6 meses.

As fotografias abaixo (Figuras 20 e 21) apresentam as amostras enviadas para análise.

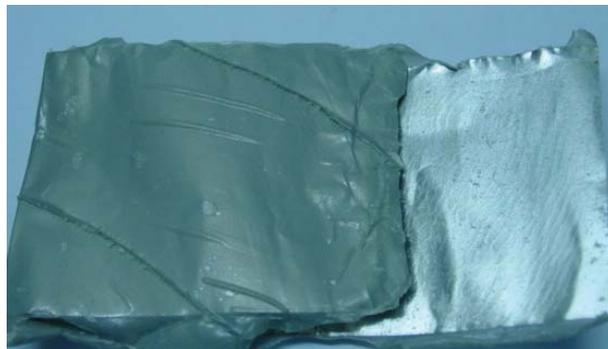


Figura 20 - Fotografia 01 - Fita Adesiva [26].

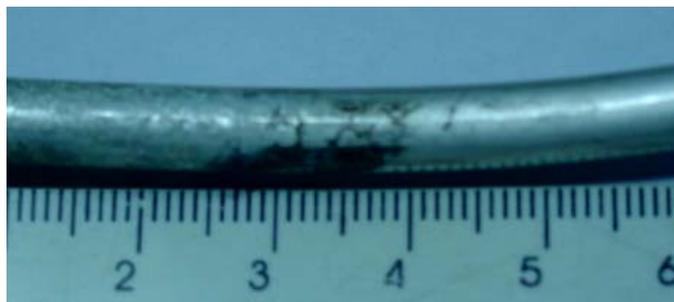


Figura 21 - Fotografia 02 – Tubo [26].

A fotografia 01, à esquerda, apresenta a amostra da fita de isolamento como recebida e a foto 02 o local onde ocorreu corrosão no tubo. A fotografia 03 - amostra S-8817 – Chapa (Figura 22) – indica que nos pontos circundados estão os locais de maior incidência de corrosão e objeto deste estudo.

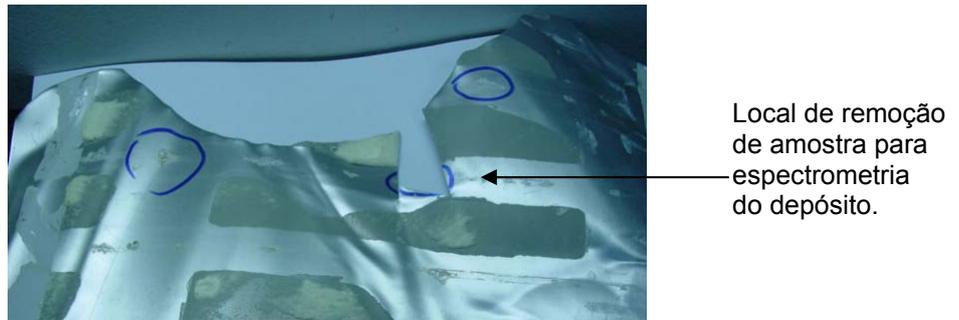


Figura 22 - Fotografia 03 - Amostra S-8817 – Chapa [26].

#### IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

S-8815: Tubo  $\phi$  6,4 mm

S-8816: Tubo  $\phi$  6,4 mm

S-8817: Chapa do fundo

#### ANÁLISE METALOGRÁFICA

Nesta etapa, a amostra S-8815 foi submetida ao procedimento metalográfico padrão, tendo sido cortada manualmente para análise na seção transversal. O corte foi realizado na região onde ocorreu o vazamento, sendo esta a condição mais crítica no tocante a falha. Após o ataque com reagente Keller's, as amostras foram submetidas à análise em microscopia óptica.

#### ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA

Para caracterização foi removido material do tubo sendo a composição medida por espectrômetro de emissão óptica. Os valores medidos dos elementos específicos estão em % de massa. O resultado da análise é apresentado na Tabela 1.

#### ESPECTROSCOPIA DE FOTOELÉTRONS XPS

Equipamento: vg microtech

Radiação utilizada: alumínio com espectro amplo (*survey*) de 0 a 1100 eV.

#### PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

As amostras foram cortadas nos pontos de maior concentração de depósito, seguido de limpeza com uso de solvente. As análises foram realizadas diretamente no depósito sobre o tubo, tornando o mesmo a base de apoio para a análise.

#### ANÁLISE

Espectros tipo “*wide scan*” foram obtidos para as camadas depositadas e as respectivas quantificações estão expressas nas Tabelas 1 a 5. Segundo esta análise, a composição superficial contendo tais elementos indica tratar-se de corrosão por par eletroquímico.

Tabela 9 – Amostra S-8816: Tubo  $\phi$  6,4 mm.

ELEMENTO	VALOR ENCONTRADO	VALOR ESPECIFICADO PARA LIGA 1050
Si	0,0947	0,25 máx.
Fe	0,1260	0,40 máx.
Cu	0,0041	0,05 máx.
Mn	0,0055	0,05 máx.
Mg	0,0155	0,05 máx.
Ni	0,0063	-
Zn	0,0079	-
Ti	0,0124	-
Pb	0,0016	-
Sn	< 0,0020	-
Cr	< 0,0010	-
V	-	0,05 máx.
Outros	-	0,03 máx.
ALUMÍNIO	99,73	99,50 mín.

#### DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O tubo S-8816-diâmetro 6,4 mm em estudo cumpre requisitos de norma quanto à composição para o alumínio: ALUMINUM ASSOCIATION Liga 1060 ou superior em pureza no alumínio. Equivalente: ASTM B 234, ASME SB234, SAE J 454.

Tabela 10 – Elementos encontrados após análise XPS (% em massa).

10.1-Fita adesiva colada na serpentina do refrigerador.						
Al	P	Cl	Na	C	N	O
8,483	0,918	0,499	1,017	57,586	1,189	30,309
10.2 - Tubo de Alumínio corroído (parte interna).						
Al	Cl	Na	C	O		
24,256	1,28	0,186	46,381	27,897		
10.3 - Chapa de alumínio com manchas brancas de depósitos estranhos.						
Al	Cl	C	N	O		
14,942	1,536	42,551	2,709	38,262		
10.4 - Chapa de alumínio – Distante da falha por corrosão e sem lixamento.						
Si	C	N	O			
2,266	76,937	1,955	18,841			
10.5 - Chapa de alumínio - Distante da falha por corrosão e removida camada por lixamento.						
Al	C	N	O			
35,564	30,552	1,772	32,113			

### MECANISMO DA FALHA

A falha principal que ocasionou o vazamento de gás, iniciou-se na superfície externa do tubo decorrente de corrosão eletroquímica entre a chapa e o tubo.

Quando analisada, observou-se na chapa a existência de um filme polimérico de revestimento, que provavelmente foi rompido pelo depósito de material que provém do armazenamento dos produtos, permitindo que a chapa e o tubo entrassem em contato direto formando, desta forma, o que se denomina por eletroquímico ou corrosão galvânica, que vai corroendo os metais em contacto até que se perfure o tubo.

A vibração do sistema como um todo pode igualmente romper o filme por abrasão e ocorrer o contato físico entre o tubo e a chapa.

Portanto, o processo corrosivo observado na superfície do tubo, bem como nas demais partes internas da carcaça (chapa) do equipamento foi devido à diferença de

composição entre a chapa e o tubo que, formando um par eletroquímico, provoca a corrosão dos materiais (sobretudo no metal menos nobre – o anodo).

As fotos que seguem mostram o aspecto da corrosão ocorrida no tubo e na chapa, quando ocorreu a falha no isolamento desta última, iniciando desta forma a corrosão no par eletroquímico (provavelmente auxiliado pelo tipo de material armazenado e a umidade que favoreceu a reação).

Nota-se que os depósitos na chapa são pontuais e alinhados (ver Figura 22) e no tubo ocorrem na posição que entra em contato com a chapa e expandindo nos demais sentidos.

A Figura 23 mostra o depósito de material como produto da reação eletroquímica ocorrida entre a chapa e o tubo ao romper-se o filme isolante existente na peça.

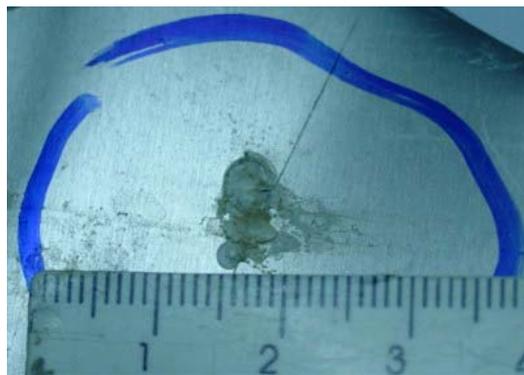


Figura 23 - Fotografia 04 - Depósito de Material entre Chapa e Tubo [26].

A Figura 24 mostra a Corrosão ocorrida no tubo decorrente da reação eletroquímica com a chapa, ocasionando o vazamento do gás de refrigeração.

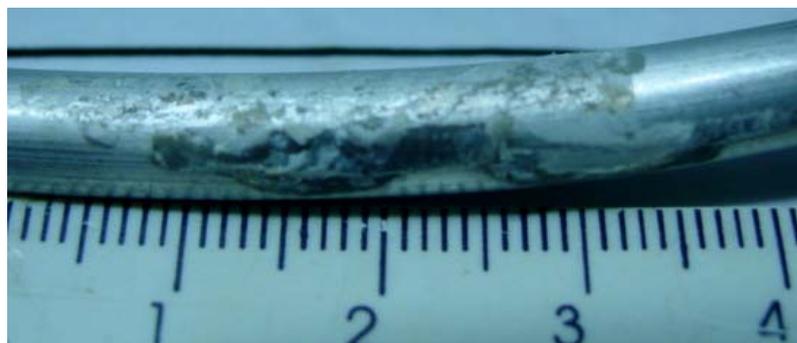


Figura 24 - Fotografia 05 - Corrosão Ocorrida no Tubo [26].

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem concluir o seguinte:

O mecanismo de falha operante é corrosão galvânica entre o tubo e a chapa.

O filme polimérico aplicado na chapa possui espessura e resistência ao atrito insuficiente para isolar (separar) as peças, bem como também não apresenta boa resistência a corrosão devido às condições de utilização e do ambiente gerado pela eventual presença dos produtos armazenados.

A análise por espectroscopia de fotoelétrons (ESCA - XPS) revelou a existência dos elementos cuja combinação resultou em um composto de corrosão galvânica.

Possibilidade de estar sendo rompido o filme polimérico da chapa na montagem dos tubos ou em serviço na colocação dos produtos no equipamento.

Possibilidade de outros materiais empregados no revestimento juntamente com eventuais restos de produtos armazenados (sólidos e líquidos) e o ambiente com alta concentração de umidade estar rompendo o filme por dissolução ou corrosão permitindo desta maneira o contato entre o tubo e chapa e acelerando a corrosão.

## SUGESTÕES

No sentido de reduzir a ocorrência deste tipo de dificuldade ficam sugeridas as seguintes ações:

Rever o processo de aplicação do filme na chapa, visando o aumento da espessura e resistência à abrasão;

Avaliar causas de eventuais acúmulos de materiais (sólidos e líquidos) dissolvidos através de drenagem constante do sistema.

### *b) Levantamento das principais ações do caso 1*

b1) Ações Inerentes ao Sistema (entenda-se aqui por sistema o conjunto ou parte de onde a peça ou região corroída foi retirada).

- o tempo de atividade do sistema foi determinado

- o sistema onde está a amostra corroída foi identificado e fotografado

#### b2) Ações Inerentes ao Ânodo

- a amostra danificada foi identificada, coletada e fotografada
- a amostra danificada foi analisada visualmente a olho nu e/ou por microscopia
- a composição do material do tubo foi levantada e comparada com o especificado pela norma
- a composição do produto de corrosão foi levantada

#### b3) Ações Inerentes ao Cátodo.

- foram identificados no sistema possíveis cátodos ou regiões catódicas
- a composição dos possíveis cátodos foram levantadas

#### b4) Ações Inerentes ao Eletrólito

- foi revelado o contato de umidade com o sistema
- foi revelada a existência de produtos armazenados entre cátodo e ânodo

#### b5) Ações Inerentes à Ligação Elétrica entre Ânodo e Cátodo

- não existe isolamento suficiente entre cátodo e ânodo
- observou-se contato físico entre ânodo e possíveis cátodos

### 3.1.2.2. Análise de Caso 2

#### a) Relatório

#### CORROSÃO EM TUBULAÇÃO DE AÇO INOXIDÁVEL ASSOCIADA COM ISOLAMENTO TÉRMICO <sup>(1)</sup>

VICENTE GENTIL <sup>(2)</sup>

EVANDRO DANTAS <sup>(3)</sup>

#### RESUMO

Caso de corrosão sob tensão fraturante em aço inoxidável AISI 304, devido a presença de cloreto na interface superfície metálica e isolamento térmico.

## DADOS

- Equipamento

Sistema de aquecimento de água de fabricação de cerveja

- Tubo

Material – aço inoxidável AISI 304

Dimensões: diâmetro = 10 cm.

espessura da parede = 1,5 mm.

comprimento = 3m.

- Água no interior do tubo

Temperatura = 75 a 85° C.

Concentração de cloretos = 3,5 mg/l.

pH = 7,5.

Pressão de água = 3 kg/cm<sup>2</sup>.

- Isolamento Térmico.

Lã de vidro e massa de fixação.

## INSPEÇÃO VISUAL

Na inspeção visual realizada no trecho de tubo deteriorado, verificou-se:

- Ausência de corrosão na parte interna do tubo.
- Rompimento do tubo próximo ao cordão de solda.
- Ausência de corrosão no cordão de solda.
- Fratura do tubo no sentido longitudinal.
- O processo de deterioração teve início pela parte externa do tubo, isto é, aquela em contato com o isolamento térmico.
- Presença de depósito branco entre a superfície externa do tubo e o isolamento térmico.

## ANÁLISES

- Fratura Longitudinal e depósito branco existente sobre a parte externa do tubo (Figura 25).

Presença de cloreto com teor em torno de 0,1%.

- Análise da lã de vidro.

Ausência de cloreto.

- Análise metalográfica.

Presença de trincas transgranulares ou transcristalinas (Figura 26).

## FORMA DE CORROSÃO

Em decorrência dos dados do equipamento, das observações feitas na inspeção visual, dos resultados analíticos e das condições apresentadas, relacionadas com o comportamento do aço AISI 304 em presença de cloreto e temperatura, admitiu-se ter havido corrosão sob tensão fraturante, iniciando-se pela parte externa do tubo, isto é, aquela em contato com o isolamento térmico.

Em seguida, como no meio operacional não havia presença de substâncias contendo cloro ou cloreto, procurou-se verificar a origem do depósito branco na superfície externa do tubo. Por consulta ao setor de manutenção obteve-se a informação de que o depósito era devido ao adesivo, usado na montagem, para fixação do isolamento térmico. Esse depósito, umedecido por água, proveniente da condensação de umidade ambiental, que penetra no isolamento térmico, possibilitou, nas proximidades da solda, área termicamente afetada a corrosão sob tensão fraturante com formação de trincas transgranulares.

## CONCLUSÕES

O estudo da deterioração, verificada no tubo de aço inoxidável AISI 304, permitiu apresentar as seguintes conclusões:

- A corrosão por pite e a corrosão sob tensão fraturante, devem ser previstas quando se usa aço inoxidável em presença de condições favoráveis a essas formas de corrosão.

- A possibilidade desses processos corrosivos é aumentada com a elevação da temperatura e da concentração de cloreto.
  - Embora seja conhecido que o agente primário para o ataque por pite seja o cloreto não é possível estabelecer um valor limite de cloreto para cada caso, pois a ação corrosiva de uma particular concentração de cloreto pode ser profundamente afetada pela presença ou ausência de várias outras substâncias químicas e condições que podem acelerar ou inibir o processo corrosivo.
  - Devem-se evitar condições, que favoreçam a elevação da concentração de cloreto, como áreas de estagnação, frestas, baixas velocidades de água, aumento localizado de temperatura e depósitos.
  - O tubo de aço inoxidável AISI 304 sofreu corrosão sob tensão fraturante, devido a associação de temperatura elevada, cloreto e água, em área com tensões residuais.
  - O adesivo usado para fixação da lã de vidro, usada como isolante térmico, foi o causador direto do processo corrosivo.
  - Para evitar a ação corrosiva de cloretos, sob isolamento térmico, é recomendável a aplicação de revestimento, com tinta a base epóxi, sobre o aço inoxidável.
- (1) Trabalho apresentado no 17º Congresso Brasileiro de Corrosão.
  - (2) Professor Titular da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Consultor da Ecolab Química Ltda.
  - (3) Consultor da Ecolab Química Ltda.



Figura 25 – Ampliação do Trecho do Tubo [12].

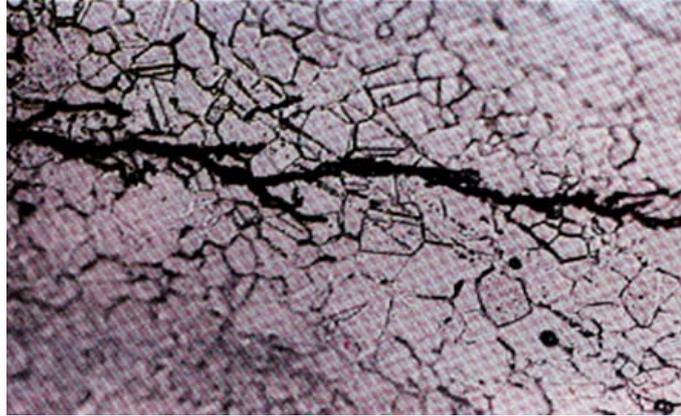


Figura 26 – Trinca Transgranular (Ampliada 206 X).

*b) Levantamento das principais ações do caso 2*

b1) Ações Inerentes ao Sistema (entenda-se aqui por sistema o conjunto ou parte de onde a peça ou região corroída foi retirada).

- o sistema onde está a amostra corroída foi identificado e fotografado.

b2) Ações Inerentes ao Ânodo

- a amostra danificada foi identificada, coletada e fotografada.

- a amostra danificada foi analisada visualmente a olho nu e/ou por microscopia.

- a composição do material do tubo foi levantada e comparada com o especificado pela norma.

b3) Ações Inerentes ao Cátodo.

- foram identificados no sistema possíveis cátodos ou regiões catódicas.

b4) Ações Inerentes ao Eletrólito

- foi revelado o contato de umidade com o sistema.

b5) Ações Inerentes à Ligação Elétrica entre Ânodo e Cátodo

- observou-se contato físico entre ânodo e possíveis cátodos

### 3.1.2.3. Análise de Caso 3

#### a) Relatório

## CORROSÃO INDUZIDA POR BACTÉRIAS EM TANQUES DE AÇO INOXIDÁVEL PARA TRANSPORTE DE PRODUTOS QUÍMICOS

Manfred E. Suess, Technimet Corp., New Berlin, Wisconsin

#### MATERIAL

Aço inoxidável austenítico – 316L

#### SITUAÇÃO GERAL

A superfície interna de tanques de aço inoxidável para transporte de produtos químicos e alimentos mostrou evidências de pites em menos de um ano de uso.

#### APLICAÇÕES

Tanques usados no transporte de produtos químicos e alimentos são geralmente produzidos em aço inoxidável 316L. Na fabricação desses tanques a superfície interna é polida e são tomados devidos cuidados para se evitar frisos e frestas que venham a se transformar em regiões favoráveis à corrosão. Todavia, frequentemente os produtos transportados não são puros, contém impurezas que agridem o aço inoxidável.

Falhas associadas à presença de bactérias em substâncias aquosas também são comumente observadas. Essas bactérias se encontram incubadas em determinadas condições, porém na presença de determinados nutrientes e ambientes atacam rapidamente o aço inoxidável desenvolvendo pilhas localizadas. É uma prática padrão, na companhia de transporte, a lavagem dos tanques entre as viagens, e nos tanques que ficam vazios por muitos dias ocorre a oportunidade para o ataque das bactérias iniciar. O ataque pode ser muito extensivo e frequentemente não é descoberto até que o interior do tanque seja examinado na rotina de manutenção.

#### SELEÇÃO DAS AMOSTRAS

Dois pedaços de metal com aproximadamente 300 mm<sup>2</sup> foram removidos do interior do tanque contendo típicos pites ao longo dos cordões de solda.

## EXAME VISUAL E PECULIARIDADES GERAIS

A superfície interna das amostras apresentaram severa corrosão. A corrosão por pites é maior e mais concentrada nas áreas de solda. Significante quantidade de corrosão é evidente ao longo das soldas em ambas amostras. As superfícies externas das amostras não apresentaram evidências de deterioração ou ataque.

## PROCEDIMENTO DE TESTE E RESULTADOS

### - Exame de superfície

Partes da superfície foram examinadas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) equipado com um espectrômetro de energia dispersiva (EDS), este instrumento permite levantar a composição química dos produtos (resíduos e partículas) de corrosão dos pites.

O exame mostrou que os pites localizados na solda Figura 27, preferencialmente ocorreram na fase do metal que consiste de ferrita e austenita.

O exame também mostrou que os pites que ocorreram nas adjacências da solda são típicos de ataque por bactérias (Figura 28).

Nenhuma evidência de ataque em contorno de grão ou outro ataque do metal de base imediatamente às adjacências do pite foi notada indicando que o ataque não foi consequência do metal ter sido exposto a substância severamente agressiva ao material do tanque.

A análise do EDS da superfície do aço adjacente ao pite, revelou não haver evidências de elementos contaminantes.

A análise dos resíduos junto aos pites indicou uma quantidade significativa de enxofre em todos os casos. A presença de enxofre revelou a presença de bactérias redutoras de sulfato atacando o aço.

### - Análise química

O metal de base e áreas de solda foram submetidos a análise química e teste de dureza.

Em ambos os casos o metal de base estava em conformidade com a especificação do aço inoxidável AISI 316L – baixo carbono.

O metal de solda da amostra 1 estava com teor de carbono ligeiramente maior que o identificado no tipo 316, porém este desvio não foi considerado significativo para o dano por corrosão exibido no tanque.

A dureza do metal de base e da solda também estavam normais.

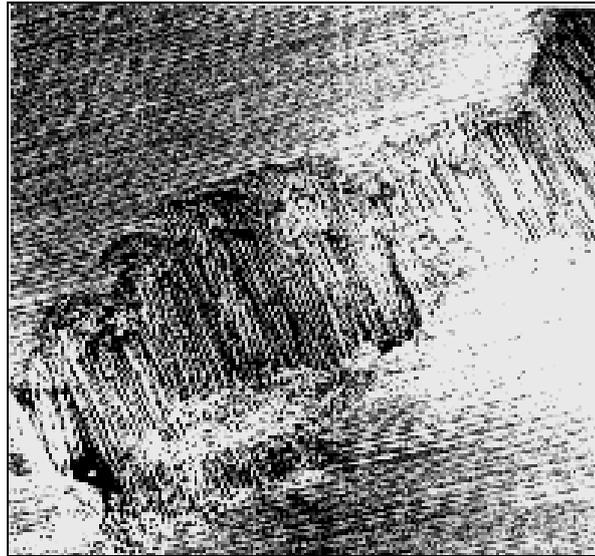


Figura 27 – Pite na Solda [27].

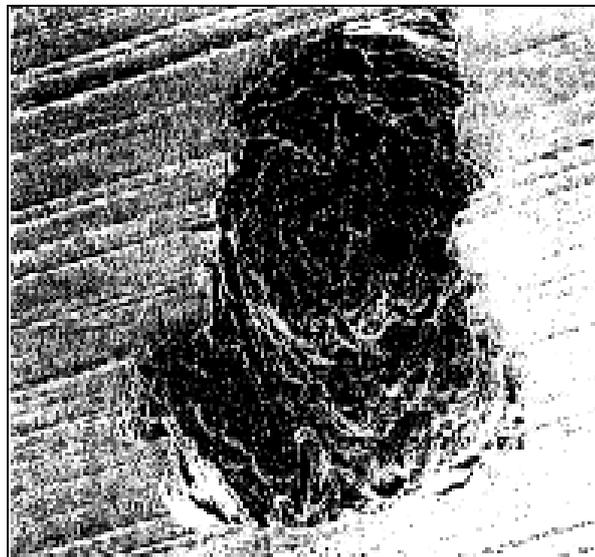


Figura 28 – Pite nas Adjacências da Solda [27].

#### - Metalografia

As seções transversais são vistas ao longo das regiões de solda através da metalografia. A seção transversal revelou a profundidade dos pites e muitos dos

pites estavam com diâmetro maior abaixo da superfície do que na superfície, condição característica de ataque de bactérias no aço inoxidável (todavia condições similares têm sido atribuídas ao pite provocado por cloretos). A Figura 29 mostra uma vista ampliada da seção do pite com um “túnel” interno produzido pela escavação da bactéria no seu esforço em buscar regiões de baixo teor de oxigênio. As bactérias que causa este tipo de ataque são as anaeróbicas, que buscam áreas de baixo teor de oxigênio deixando grandes vazios internos no material com pequenas aberturas.

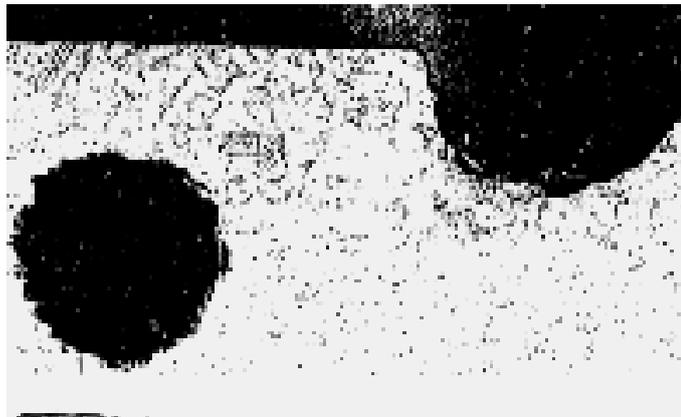


Figura 29 – Metalografia [27].

## DISCUSSÃO

A microestrutura do aço inoxidável 316 L, usado no tanque aço não apresenta evidências de defeitos de material que poderiam reduzir sua resistência à corrosão e explicar o dano exibido pelas duas amostras submetidas ao exame.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- Causa mais provável

A falha foi causada por corrosão induzida por bactérias. Pites superficiais, cavernas abaixo das superfícies, e altos teores enxofre nos pites indicaram o ataque de bactérias anaeróbicas.

- Ação corretiva recomendada

Foi recomendado que a água usada na estação de lavagem fosse testada na presença de bactérias redutoras de sulfatos e que fosse feita a medição do controle de bactérias.

Também foi recomendado o uso de desinfetante imediatamente após a lavagem dos tanques.

*b) Levantamento das principais ações do caso 3*

b1) Ações Inerentes ao Sistema (entenda-se aqui por sistema o conjunto ou parte de onde a peça ou região corroída foi retirada).

- o tempo de atividade do sistema foi determinado.
- o sistema onde está a amostra corroída foi identificado e fotografado.

b2) Ações Inerentes ao “Ânodo”

- a amostra danificada foi identificada, coletada e fotografada.
- a amostra danificada foi analisada visualmente a olho nu e/ou por microscopia.
- a composição do material do tubo foi levantada e comparada com o especificado pela norma.
- a composição do produto de corrosão foi levantada.

b3) Ações Inerentes ao “Cátodo”

A primeira vista pareceu que a corrosão predominante fora eletroquímica, porém constatou-se que houve o ataque principalmente por bactérias, portanto na causa principal não há a formação de pilha.

a4) Ações Inerentes ao “Eletrólito”

- foi revelado o contato de umidade com o sistema.

a5) Ações Inerentes à “Ligação Elétrica entre Ânodo e Cátodo”

Na causa principal não há a formação de pilha.

### **3.1.3. O Que Foi Executado em Outras Análises de Falhas**

O mesmo procedimento dos casos anterior foi feito para 30 casos práticos e da literatura envolvendo corrosão eletroquímica, dando origem à Tabela 12.

Esses casos foram tomados aleatoriamente de um universo formado pelas seguintes fontes: a) Gentil [12]; b) Laudos Técnicos da Spectroscan - Tecnologia em Materiais Ltda. [26]; c) “ASM – *Handbook of Cases Histories in Failure Analysis*”, e d) Revista “*Practical Failure analysis*”.

Atribuiu-se pesos às ações conforme sua significância na decisão do autor da seguinte forma (Tabela 11):

Tabela 11 – Peso das Ações na Análise.

Existe a ação e esta é indicada como fundamental no resultado da análise	Peso 2
Existe a ação, porém é demonstrado que esta somente auxilia na análise	Peso 1
Não existe a ação	Peso 0

### 3.1.3.1. Estudos de Casos Selecionados

- a) Corrosão em Tubulação de Aço Inoxidável Associada com Isolamento Térmico, Vicente Gentil e Evandro Dantas [12];
- b) Corrosão em Pé de Torre de Transmissão – Vicente Gentil [12];
- c) *Bacteria-Induced Corrosion of a Stainless Steel Chemical Trailer Barrel* – Manfred E. Suess [27];
- d) *Galvanic Corrosion Failure of Austenitic Stainless Pipe Flange Assemblies*, Edward Lochanski [28];
- e) *Stress-Corrosion Cracking of a Brass Tube in a Generator Air Cooler Unit*, Mark Taner [29];
- f) *Transgranular Stress-Corrosion Cracking Failures in AISI 304L Stainless Steel Dished Ends During Storage*, D.K. Bhattacharya, J.B. Ghanamoorthy, e Baldev Raj,[30];
- g) *Stress-Corrosion Cracking of a Ship Propeler Tap Bolt*, R. Thomson [31]
- h) *Pitting Corrosion of Stainless Steel by Potable Municipal Water in a Organic Chemical Plant*, K. E. Perumal [32];

- i) *Corrosion Failure of a Chemical Process Piping Cross-Tee Assembly*, Peter F. Ellis [33];
- j) *Corrosion Fatigue and Subsequent Rupture of a Yankee Dryer Roll on a Modified Paper Machine*, Mark H. Gilkey [34];
- k) *Stress-Corrosion Cracking of a Teflon-Lined Steel Pipe in Sulfuric Acid Service*, Richard L. Colwell [35];
- l) *Corrosion Fatigue Failure of Stainless Steel Load Cells in a Milk Storage Tank*, Daryl C. Collins [36];
- m) *Single-Phase Erosion Corrosion of a 460 mm (18 in.) Diam Feedwater Line Break*, Carl J. Czajkowski [37].
- n) *Stress-Corrosion Cracking Caused by Residual Stresses in Chromium-Silicon Alloy Steel Helical Compression Springs* – Leland E. Shields, Robert A. Clark and Roland Huet [38];
- o) *Corrosion and Cracking of the Internal Surfaces of a Black Liquor Digest* – Robert D. Port [39];
- p) *Intergranular Corrosion Failure in Zn-Al Alloy Solenoid Valve Seats*, T. Jayakumar, D. K. Bhattacharya, Baldev Raj and P. Rodriguez [40];
- q) *Corrosion Failure of Stainless Steel Components During Surface Pretreatment*, R. K. Dayal and Gnanamoorthy e G. Srinivasan [41];
- r) *Intergranular Stress-Corrosion Cracking Failure in AISI Type 316 Stainless Steel Dished Ends Near Weld Joints*, D. K. Bhattacharya, T. Jayakumar and Baldev Raj [42];
- s) *Fatigue Fracture of a Helicopter Tail Rotor Blade Due to Field-Induced Corrosion* Richard H. McSwain [43];
- t) *Stress-Corrosion Cracking of a High-Strength Steel Frame in a Fighter Aircraft* Tommy N. White e Sam Kantimathi, [44];
- u) *Corrosion Failure of Stainless Steel Thermowells*, D. K. Bhattacharya, Baldev Raj, E. C. Lopez e Zenford Ziegler [45];

- v) *Stress-Corrosion Cracking in a Downcomer Expansion Joint*, Ralph D. Bowman [46];
- x) Tubo de Gás de Refrigeração – César Lúcio Molitz Allenstein [26];
- y) Equipamento para Lavanderia – César Lúcio Molitz Allenstein [26];
- z) Cilindro de Máquina Têxtil – César Lúcio Molitz Allenstein [26];
- a1) *Alloy 430 Ferritic Stainless Steel Welds Fail due to Stress-Corrosion Cracking in Heat-Recovery Steam Generator* – H. Krafft [47];
- b1) *Weld Features that Differentiate Weld and Plate Corrosion*, D.L. Olson, A. N. Lasseigne, M. Marya and B. Mishra [48];
- c1) *Damage of a Screw in the Seal Coupling*, B. Kosec, P. Skraba e F. Bizjan [49];
- d1) *Pitting Corrosion of Steel Tubes in an Air Preheater*, B. Vamsi Krishna e R. K. Sidhu [50];
- e1) *Water Chemistry and Processing Effects on the Corrosion Degradation of Cooper tubing in Cooling Water Systems*, J. L. McDougall, L. McCall e M. E. Stevenson [51].

Tabela 12 – Quadro Resumo das Principais Ações em Análise de Falha.

Caso Prático	Ações inerentes ao sistema		Ações inerentes ao ânodo					Ações inerentes ao cátodo		Ações inerentes ao eletrólito		Ações inerentes à ligação elétrica entre ânodo e cátodo
	Foi levantado o histórico do sistema	A fotografia do sistema foi tirada	A amostra corroida foi coletada e fotografada	A amostra foi observada visualmente	A amostra foi observada por aparelho	A composição e a dureza da amostra foram levantadas	A composição do produto de corrosão foi levantada	Foram identificados possíveis cátodos	A composição do cátodo foi levantada	Foi verificada a presença de umidade no sistema	A composição do eletrólito foi levantada	Foi caracterizada a ligação condutora de elétrons
a	1	0	2	2	2	0	0	0	0	2	2	2
b	2	2	2	2	0	0	0	2	0	2	2	2
c	2	0	2	2	2	2	2	0	0	2	0	0
d	2	0	2	2	1	2	0	2	2	2	2	2
e	2	0	2	2	2	2	0	2	0	2	2	2
f	2	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	2
g	1	2	2	2	2	0	0	2	0	2	2	2
h	2	2	2	2	0	0	0	2	0	2	2	1
i	2	2	2	2	2	0	0	2	0	2	0	1
j	0	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
k	0	2	2	2	2	0	0	2	1	2	2	2
l	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
m	0	0	2	2	2	2	0	2	0	2	0	0
n	0	2	2	2	2	0	0	1	0	0	2	2
o	0	1	2	2	2	0	2	2	0	2	2	1
p	0	2	2	2	2	2	0	2	0	2	0	1
q	2	2	2	2	2	2	0	2	1	2	0	2
r	2	0	2	2	2	0	0	1	1	2	0	2
s	0	2	2	2	2	0	0	2	0	2	1	2
t	2	2	2	2	2	1	1	0	1	2	2	2
u	2	2	2	2	2	0	0	2	0	2	0	2
v	2	2	2	2	0	0	0	0	0	2	2	2
x	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
y	2	0	2	2	2	2	0	1	0	2	2	1
z	2	2	2	2	0	2	0	0	2	2	1	2
a1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
a2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
a3	1	0	2	2	2	0	0	2	1	2	2	2
a4	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
a5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>Total</b>	<b>43</b>	<b>41</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>59</b>	<b>33</b>	<b>19</b>	<b>46</b>	<b>22</b>	<b>57</b>	<b>43</b>	<b>55</b>

### **3.1.4. Determinação das Ações Mais Comuns em Análise de Falha Por Corrosão**

Pode-se inferir, considerando o levantamento feito nos estudos de caso apresentados, que algumas ações comuns são tomadas pela grande maioria de pesquisadores em diferentes temas, como por exemplo, uma amostra da região anódica é, via de regra, coletada e registrada através de fotografia.

Por ordem de ocorrência nos casos estudados as principais ações são:

- a) a amostra da região anódica é coletada e fotografada;*
- b) é feita uma observação visual;*
- c) a amostra é observada por aparelho;*
- d) é constatada a presença de umidade no meio;*
- e) é identificado o tipo de pilha;*
- f) são analisados possíveis cátodos;*
- g) a composição do eletrólito é analisada;*
- h) o histórico do sistema é descrito;*
- i) a fotografia do sistema é apresentada;*
- j) a composição do ânodo é levantada;*
- k) a composição do cátodo é levantada;*
- l) a composição do produto de corrosão é levantada.*

### **3.2. Como Gerar Uma Seqüência Lógica Para Executar as Ações de Análise**

Após serem cumpridas as duas primeiras etapas da metodologia proposta por Dennies [1], e uma vez esclarecidas as tarefas a serem executadas na terceira etapa, o próximo passo é estabelecer uma seqüência padrão de tarefas. Além de ser sugerida pelo autor da metodologia a construção de Árvore de Falhas é baseada na hierarquia de eventos, portanto, esta ferramenta será adotada para este passo da análise. Ainda, a hierarquia de causas definirá as árvores como primárias, secundárias, terciárias e assim por diante.

### **3.2.1. Construção da Árvore de Falha Primária (ou Básica) Para Casos de Corrosão Eletroquímica**

Conforme anteriormente mencionado, para que a corrosão eletroquímica ocorra deve-se ter um ânodo E um cátodo E um eletrólito E uma ligação condutora de elétrons entre ânodo e cátodo. Baseando-se neste princípio será construído o Fluxograma Básico (Figura 30).

#### **3.2.1.1. Informações Referentes ao Ânodo**

- a) identificar o ânodo e fotografá-lo, e sendo possível, coletar uma amostra da região ou peça deteriorada;*
- b) comparar a imagem com os padrões visuais da Norma N2561[17] demonstrados no Anexo I (Figuras de a até z) e selecionar o mais próxima em aparência;*
- c) se necessário determinar a composição química e dureza do ânodo ou região anódica (isto é possível através de dados do fabricante ou análise de laboratório) e compará-lo ao material especificado;*
- d) preencher a célula1 do Fluxograma Básico com a foto padrão e se possível descrever a composição do metal coletado e do material especificado em projeto.*
- e) identificar a presença de solicitações mecânicas sobre a região anódica.*

#### **3.2.1.2. Dados Inerentes ao Tipo de Pilha**

Identificar o tipo de pilha de acordo com a classificação do item 2.2.5, e destacando a célula 2 na segunda coluna do Fluxograma Básico, na dúvida entre duas ou mais utilizar um portão “OU” e gerar mais células 2.

Numa abordagem prática, os tipos de pilhas são:

- a) pilha de eletrodos diferentes;*
- b) pilha ativa-passiva;*
- c) pilha de ação local;*
- d) pilha de concentração iônica diferente;*
- e) pilha de aeração diferencial;*

*f) pilha eletrolítica;*

*g) pilha de temperaturas diferentes.*

### **3.2.1.3. Dados Inerentes ao Cátodo**

*a) identificar possíveis cátodos ou regiões catódicas;*

*b) se possível levantar a composição química dos cátodos.*

*c) preencher a célula da coluna 3 com os dados dos cátodos (havendo mais de um cátodo usar um portão “OU” e gerar mais de uma célula 3).*

### **3.2.1.4. Dados Inerentes ao Eletrólito**

Classificar o meio corrosivo em um dos tipos do item 2.2.6 e preencher as células da coluna 4 do Fluxograma Básico (em havendo a possibilidade de mais de um cátodo usar um portão “OU” e gerar mais de uma célula 4).

a) atmosfera;

b) águas;

c) solo;

d) produtos químicos.

A construção do Fluxograma Básico com dados anteriormente descritos dará origem à Árvore de Falhas Primária (Figura 31).

### **3.2.2. Construção da Árvore de Falhas Secundária**

A partir das células selecionadas no Fluxograma Básico, será formada a árvore secundária. Neste caso, é importante observar que em cada coluna deve haver pelo menos uma célula destacada e a existência de mais de uma célula gerada em uma mesma coluna dará origem a um portão “OU”.

De acordo com as células selecionadas no exemplo da Figura 31 a Árvore de Falhas Secundária terá a seguinte configuração (Figura 32), onde serão novamente enumeradas as possíveis variáveis inerentes a cada coluna.

### 3.2.3. Árvore de Falha Terciária

É construída seguindo o mesmo raciocínio, a partir da Árvore de Falhas Secundária (Figura 32) e assim por diante até que se esgotem os dados ou se chegue a solução. Ao final da análise, serão levantadas possíveis causas-raízes, através de um *brainstorming* será eleita a causa potencial. Cumprido este passo deverá se retornar à metodologia de Dennies [1] em sua quarta etapa.

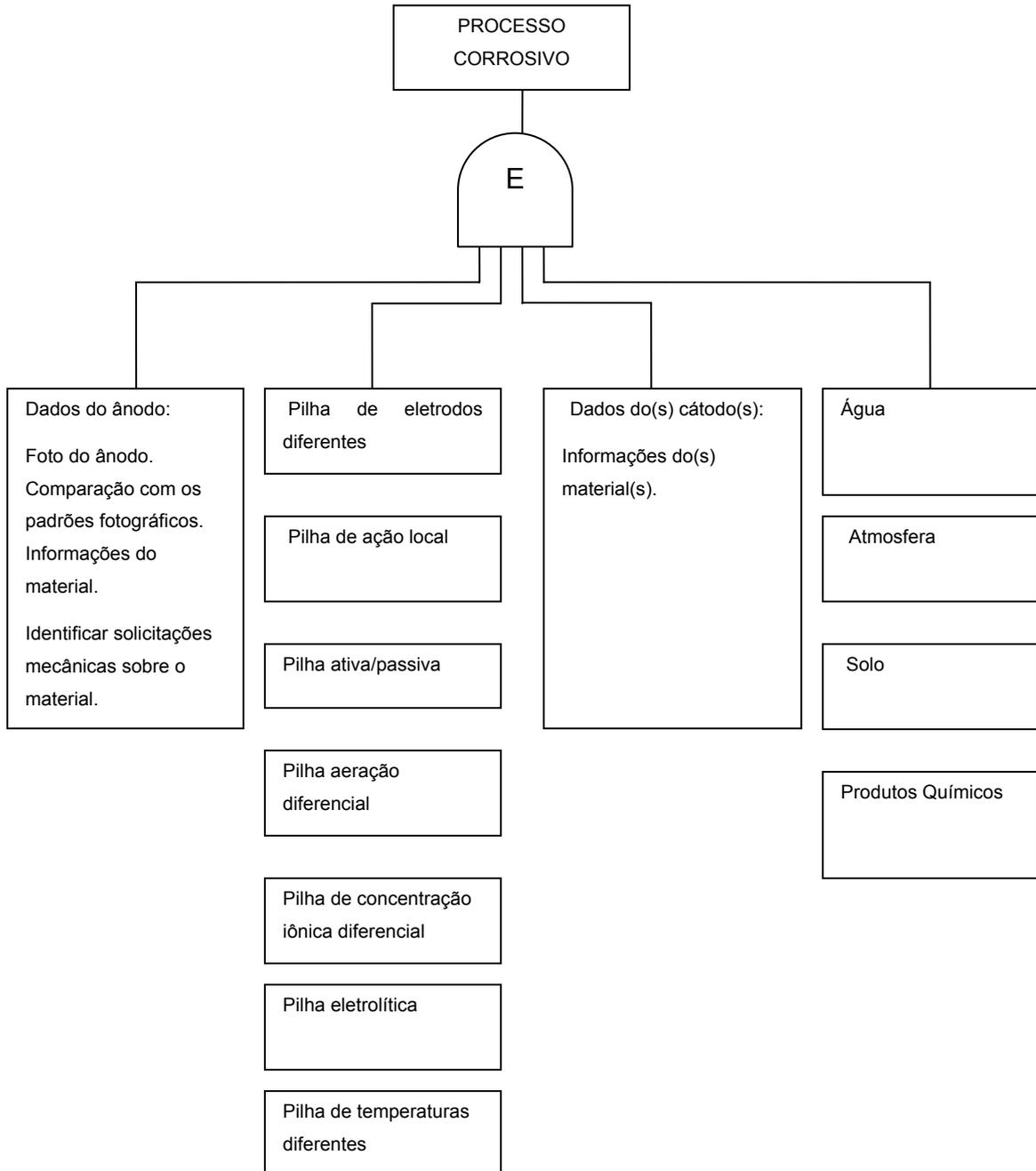


Figura 30 – Fluxograma Básico.

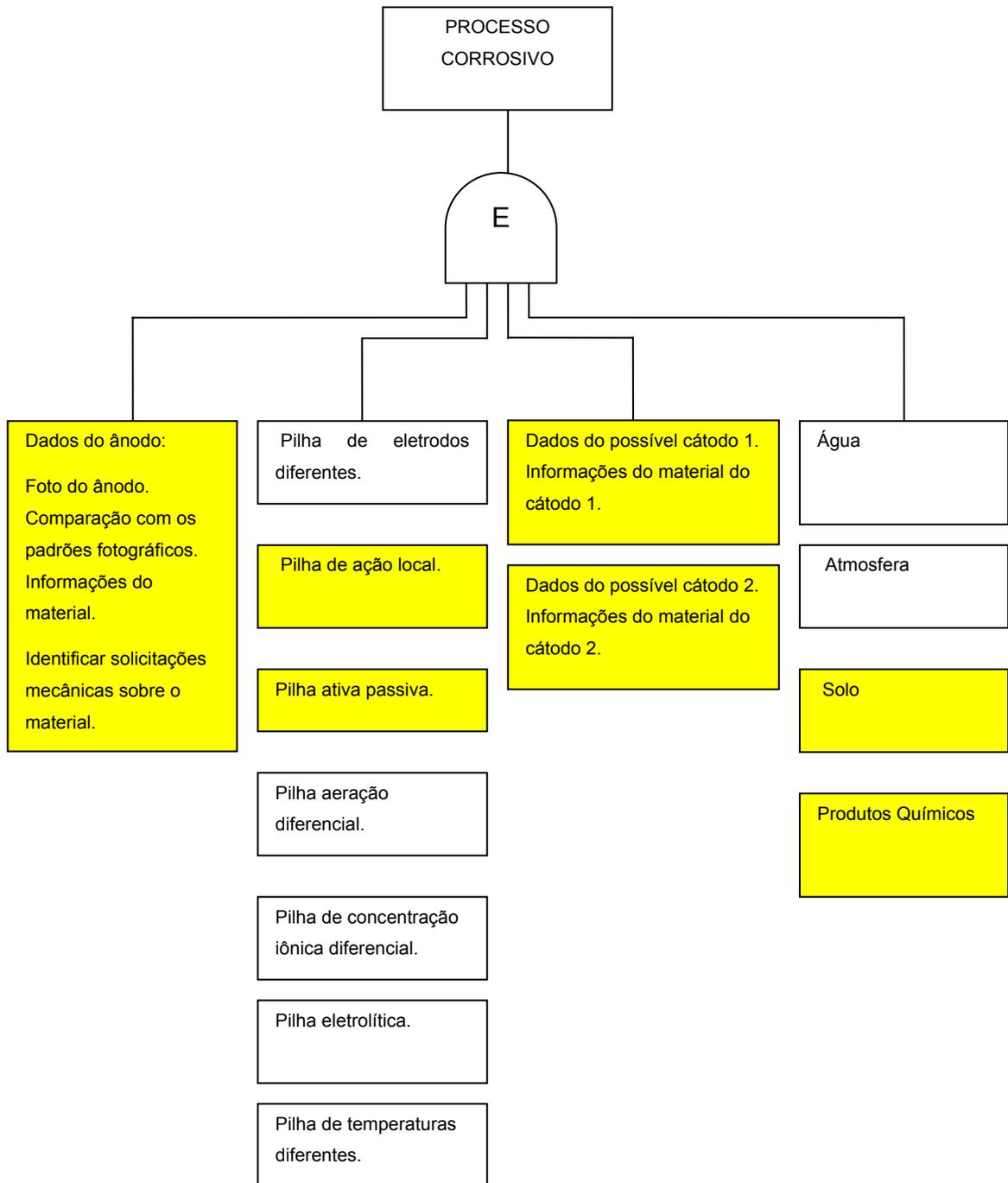


Figura 31 - Exemplo de Construção de Uma Árvore de Falhas Primária (ou Básica).

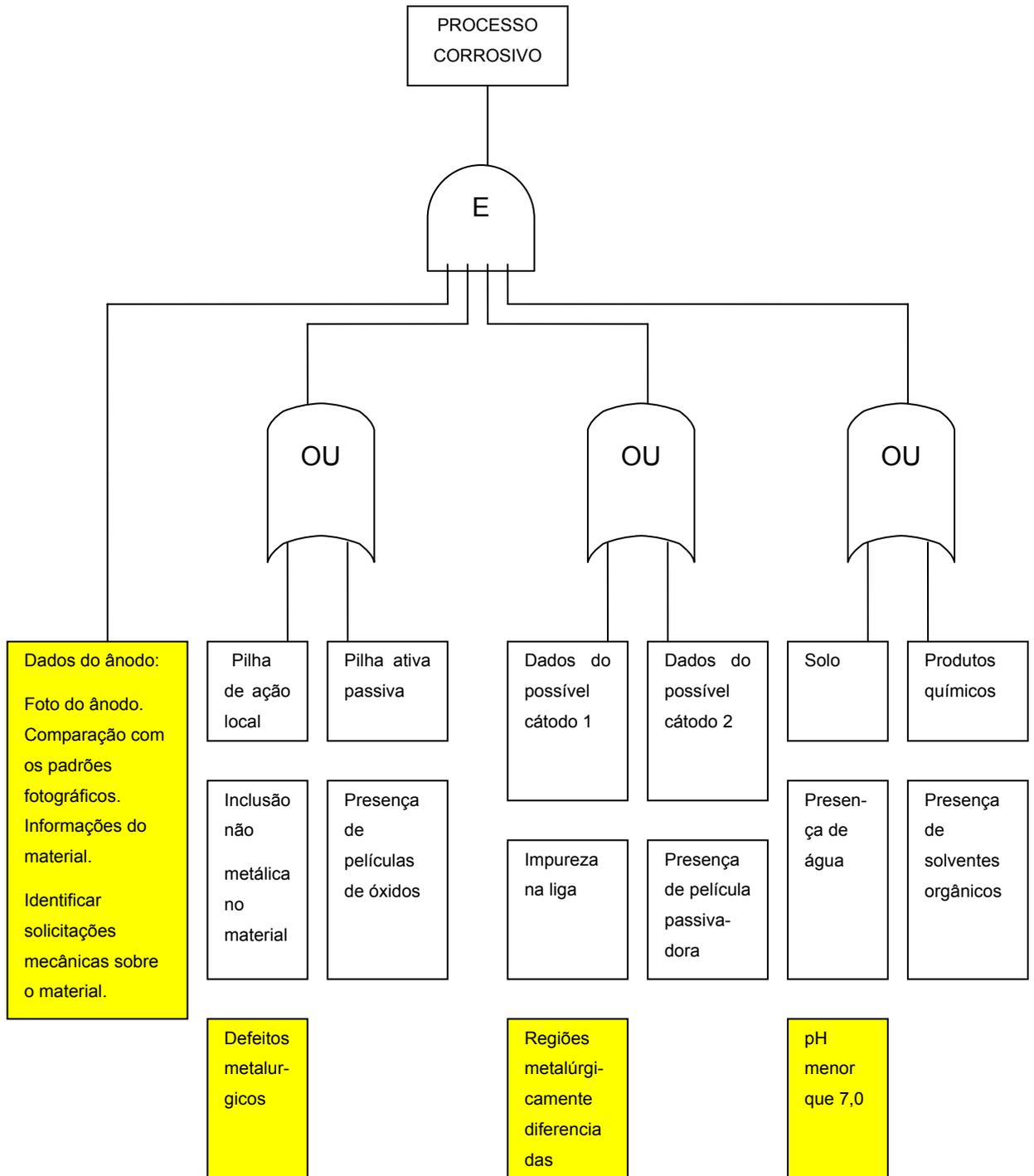


Figura 32 – Exemplo de Construção da Árvore de Falhas Secundária.

### 3.2.4. *Check List* de Análise

Conforme já mencionado, nos primeiros passos da Metodologia de Dennies sugere-se que se obtenha o máximo de informações a respeito do sistema em estudo, tais como: histórico; desenhos; condições operacionais (temperatura, fluxo, pressão); relatórios de manutenção, e; relatos de testemunhas.

De um modo geral, para a análise de falha por corrosão usando o terceiro passo dessa metodologia, deve-se executar o *check list* conforme apresentado na Tabela 13, a seguir.

Tabela 13 – *Check List*

1º	Fotografar o sistema que sofreu ataque corrosivo.
2º	Coletar uma amostra da região corroída e também fotografá-la.
3º	Observar visualmente a amostra corroída e compará-la a padrões.
4º	Determinar a composição e a dureza do material corroído.
5º	Comparar composição e dureza do material com sua especificação.
6º	Caracterizar o eletrólito e, se possível, verificar a sua composição.
7º	Verificar a composição do produto de corrosão.
8º	Identificar possíveis cátodos.
9º	Levantar a composição de possíveis cátodos.
10º	Caracterizar possíveis pilhas.
11º	Montar a <i>Árvore de Falhas Primária</i> .
12º	Havendo dúvida entre possíveis pilhas, cátodos ou eletrólitos, gerar uma <i>Árvore Secundária</i> .
13º	Gerar <i>Árvores Terciárias, Quaternárias</i> e assim por diante, conforme o nível da variável envolvida, até se chegar à causa-raíz.

## 4. APLICAÇÃO DA TÉCNICA

A técnica vem sendo submetida a alunos de graduação em Engenharia Industrial Mecânica do Campus Curitiba da UTFPR, os quais, para obterem aprovação na disciplina optativa de “Corrosão”, devem apontar de forma satisfatória as causas das falhas de alguns casos práticos de corrosão selecionados. A seguir, para efeito de ilustração, são apresentados três relatórios de alguns desses alunos, sendo mantida a originalidade dos mesmos.

### 4.1. Casos de Análise de Falha Por Corrosão de Acordo Com a Técnica

#### a) Caso 1

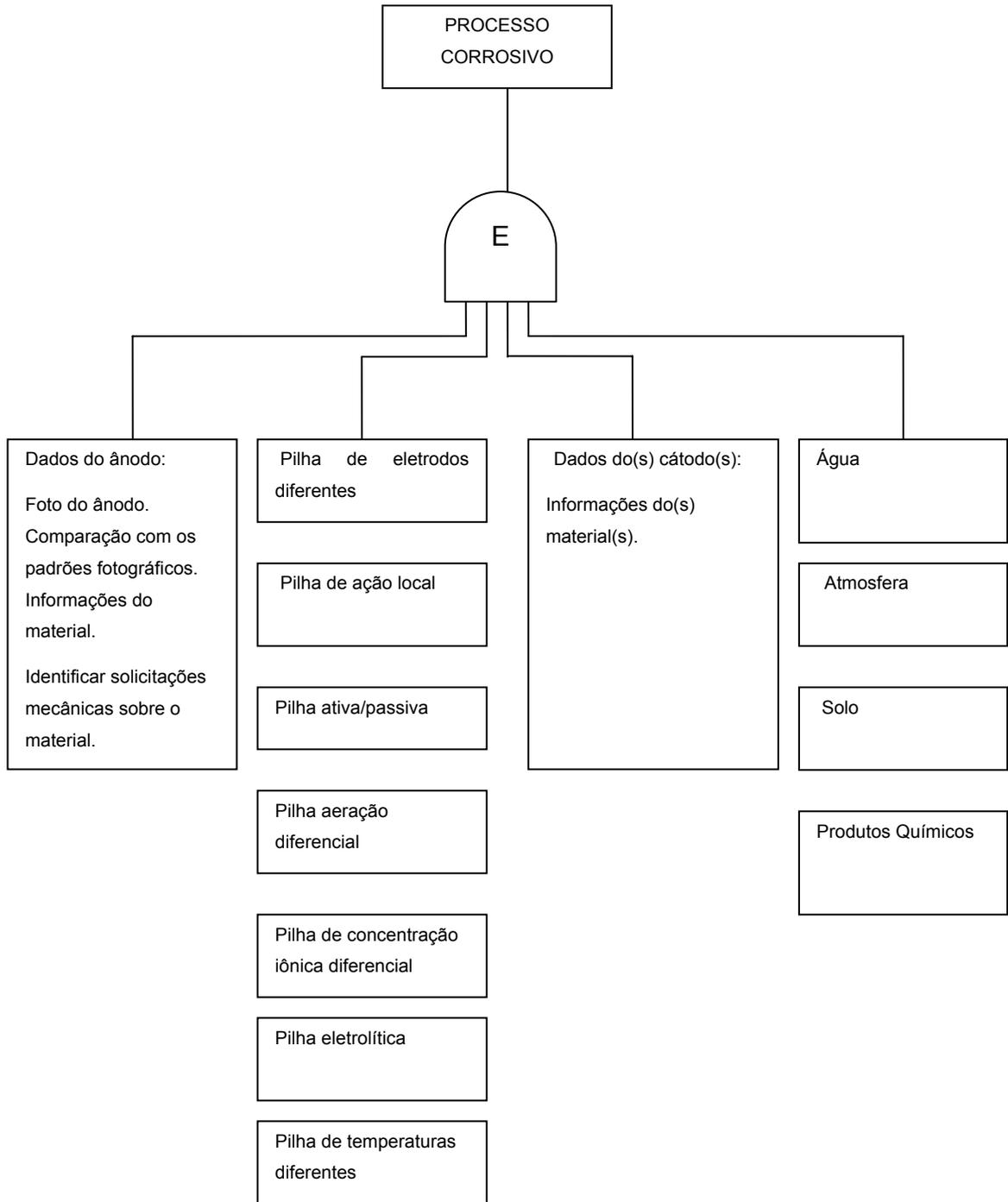
Caso de corrosão em junção metálica (Figuras 33 e 34) de uma tubulação de água destilada em uma passagem por motor-bomba para alimentação do circuito de água de uma das partes do Complexo Ayrton Senna, Renault do Brasil S.A., Fábrica de Motores.



Figura 33 - Foto do Sistema [52].



Figura 34 - Foto da Peça Corroída [52].



Fluxograma Básico.

### Causa do problema

Foi identificada uma ligação física entre dois materiais metálicos diferentes (Alumínio e Aço Galvanizado). Um tubo para condução de água destilada e um motor-bomba para bombeamento da mesma pelo circuito diretamente ligados, por meio de roscas (interna e externa, respectivamente).

A taxa de corrosão do metal de referencia (carcaça) sofre um aumento considerável pela conexão do metal de contato (tubo). Este aumento ocorre somente na presença de um eletrólito condutor. O que ocorre, pois está exposto ao ar livre, mas pode ter algum tipo de vazamento pela conexão.

A visualização das figuras caracteriza a ocorrência do fenômeno da corrosão do tipo galvânica, pois os materiais citados têm potenciais diferentes o que acarreta a deterioração de um em relação ao outro de maior potencial.

A área do cátodo e do ânodo é praticamente a mesma, podendo ser desconsiderada a relação entre as duas por serem praticamente equivalentes. Portanto a taxa de corrosão é normal, isto é, não há aceleração nem retardo no processo.

### Conclusão

Após avaliação do problema levantado, pode-se avançar o estudo com a construção das árvores de falha primária e secundária. Com todos os dados levantados nas mesmas construções, pode-se definir o tipo de corrosão que está afetando a região analisada e também definir algumas ações corretivas para se evitar falha no projeto em estudo e ações preventivas.

Como solução corretiva, deve-se isolar os materiais por uma flange isolante além do isolamento orgânico nas duas partes, ou seja, é necessário pintá-las.

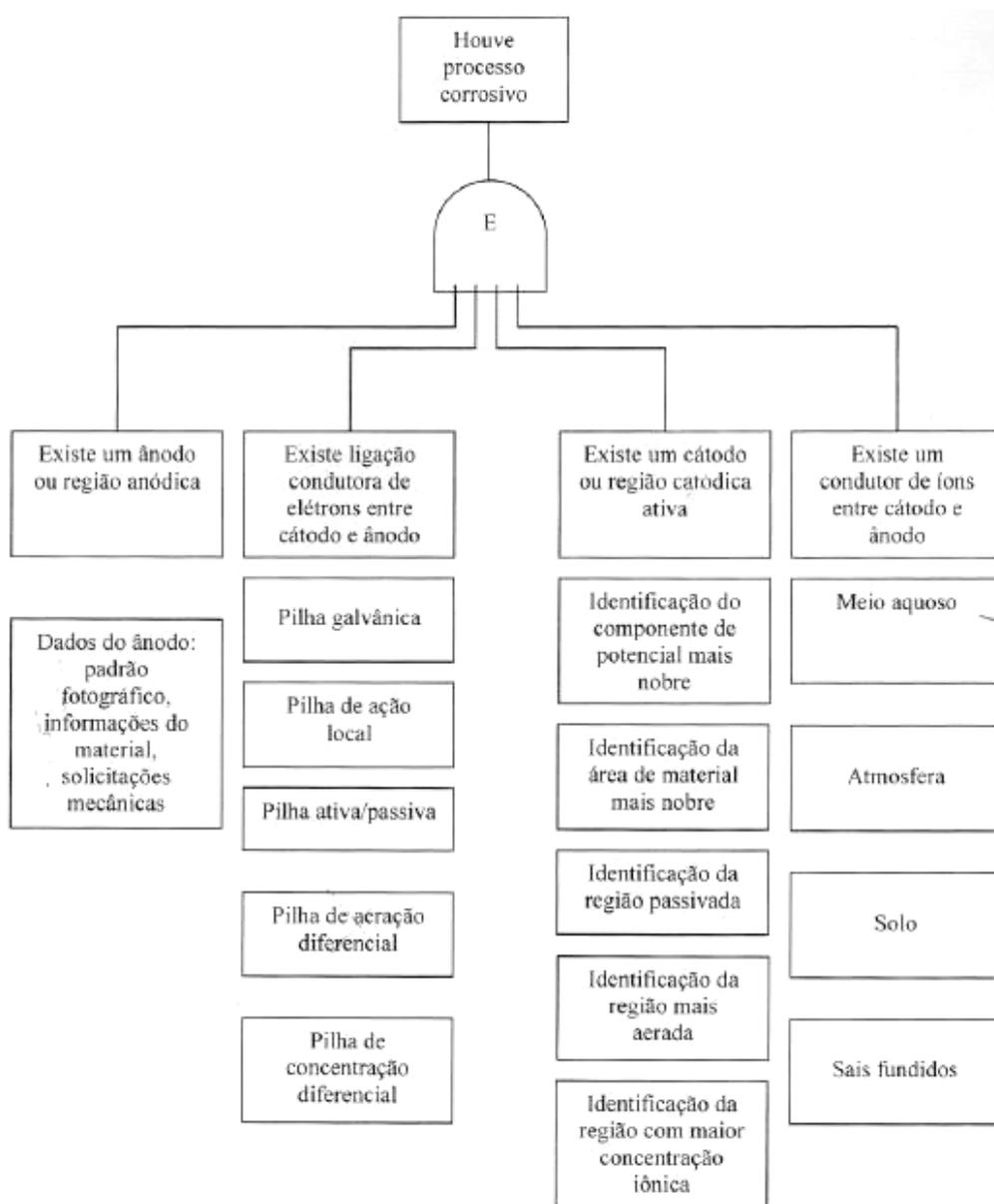
Como prevenção para novos projetos, deve-se prever materiais de potenciais similares, para evitar a corrosão galvânica.

Evandro Roberto Ropelatto; Roberta Arruda; Daniel Schibelbain [52].

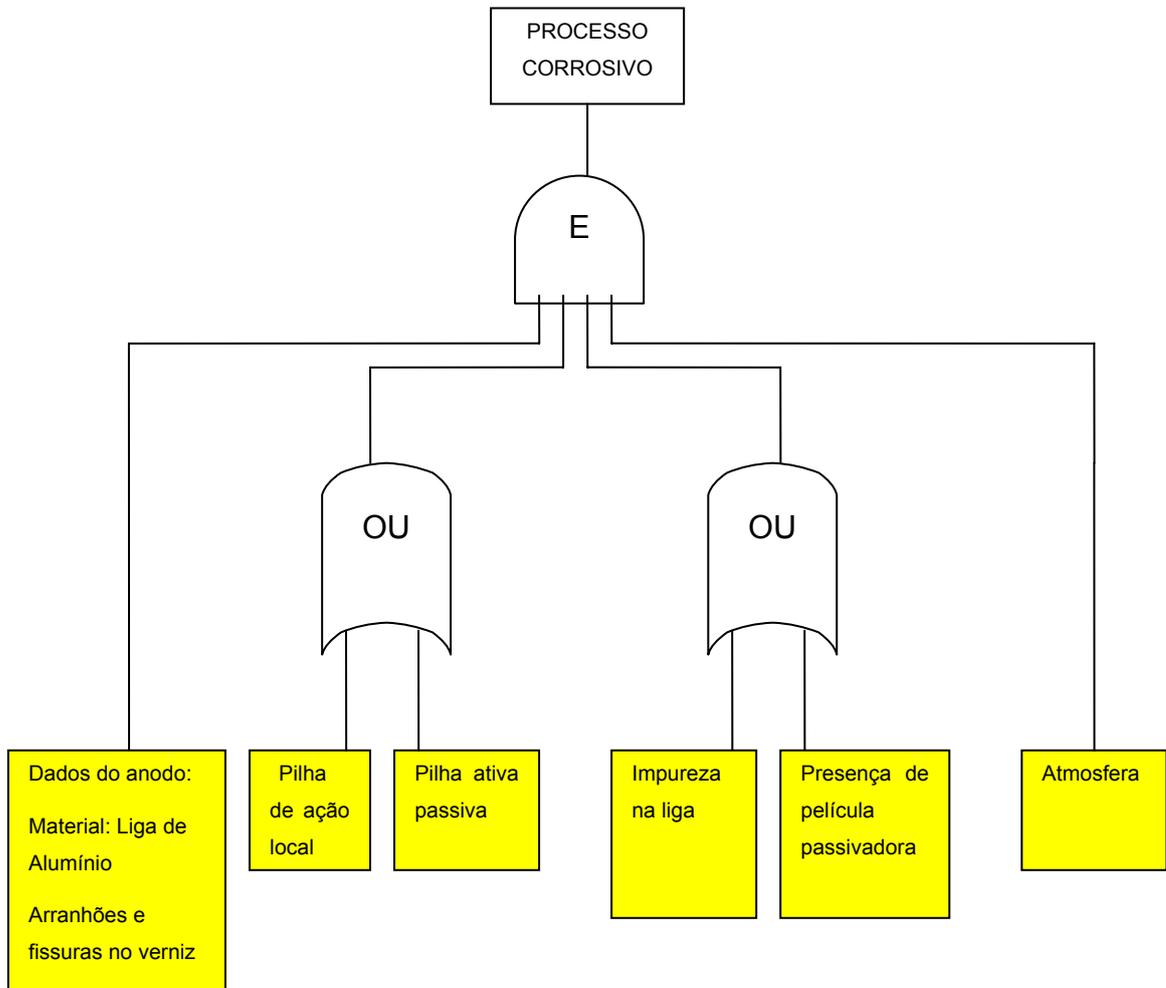
b) Caso 2



Figura 35 - Roda de Liga de Alumínio Corroída [53].



Fluxograma Básico.



Árvore de Falhas Secundária.

### Conclusões

Foram consideradas duas causas-raiz possíveis:

- a - A roda apresenta defeito de fabricação, proporcionando o surgimento de pilha de ação local;
- b- Regiões da roda tiveram desgaste da camada protetora, proporcionando o surgimento de pilha ativa/passiva, (causa mais provável).

Seria necessário um exame de espectrometria no material para se ter uma definição, porém, não é viável para este caso.

Realizado por:

Josane Akemi Gonçalves, Leandro D'Amico, Leonardo Ishimoto [53].

Curitiba, 18 de Fevereiro de 2006.

c) Caso 3

ESTUDO DE CASO CHAPAS METÁLICAS EM SITES DE TELEFONIA CELULAR

Alunos: Júlio Cezar E. Gonzalez; Renato Marchesi [54].

Curitiba, Fevereiro – 2006

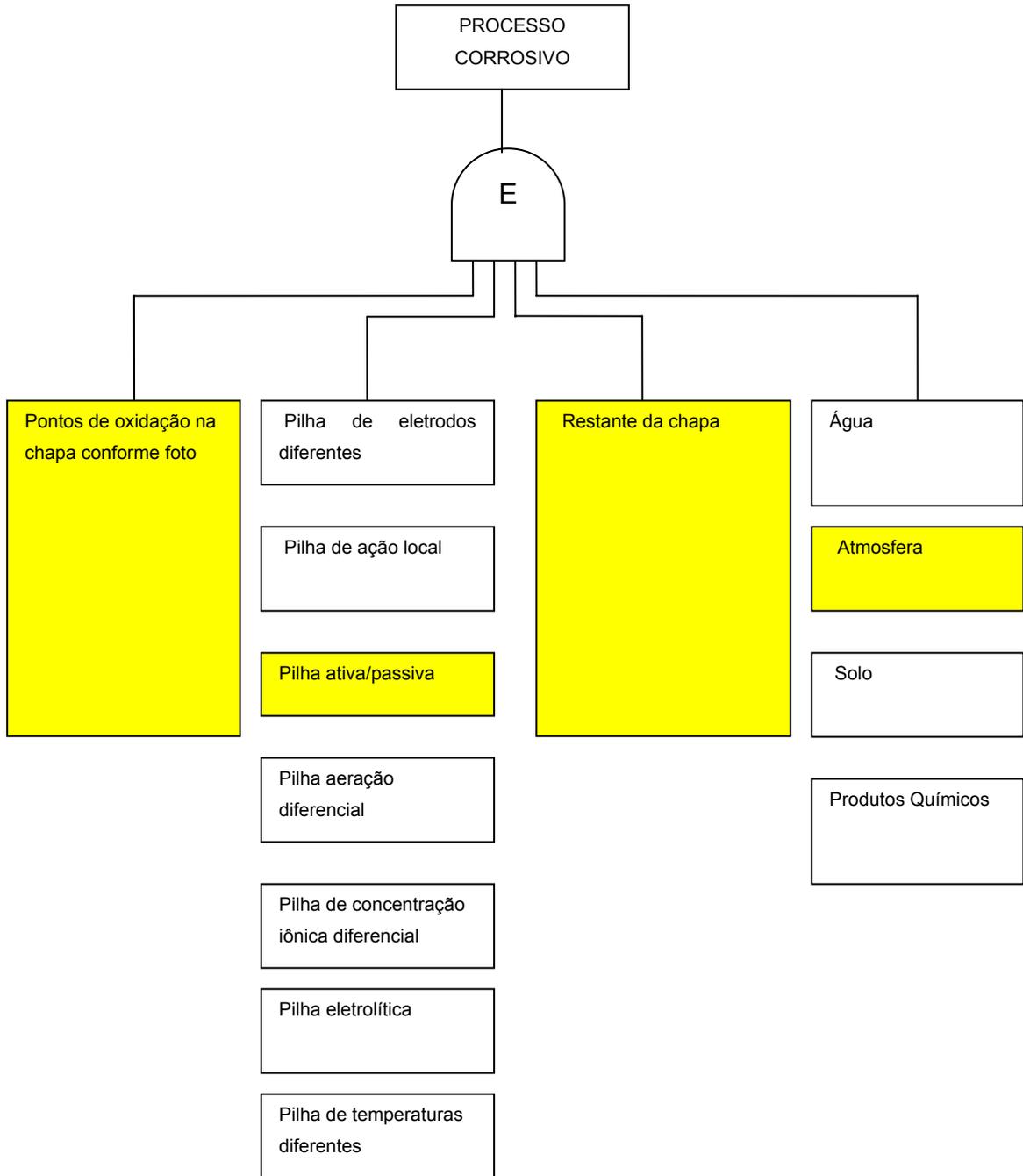
Este estudo de caso realizou-se em uma torre de telefonia celular, em Curitiba. Visitou-se o chamado “site”, que é o local aonde se situam torres de telefonia celular.

Ao se observar o local, percebe-se que existem vários focos de corrosão. Todas se devem, basicamente, por corrosão atmosférica. Escolhemos um ponto específico, a grade de proteção de cabos da torre, conforme observado abaixo.

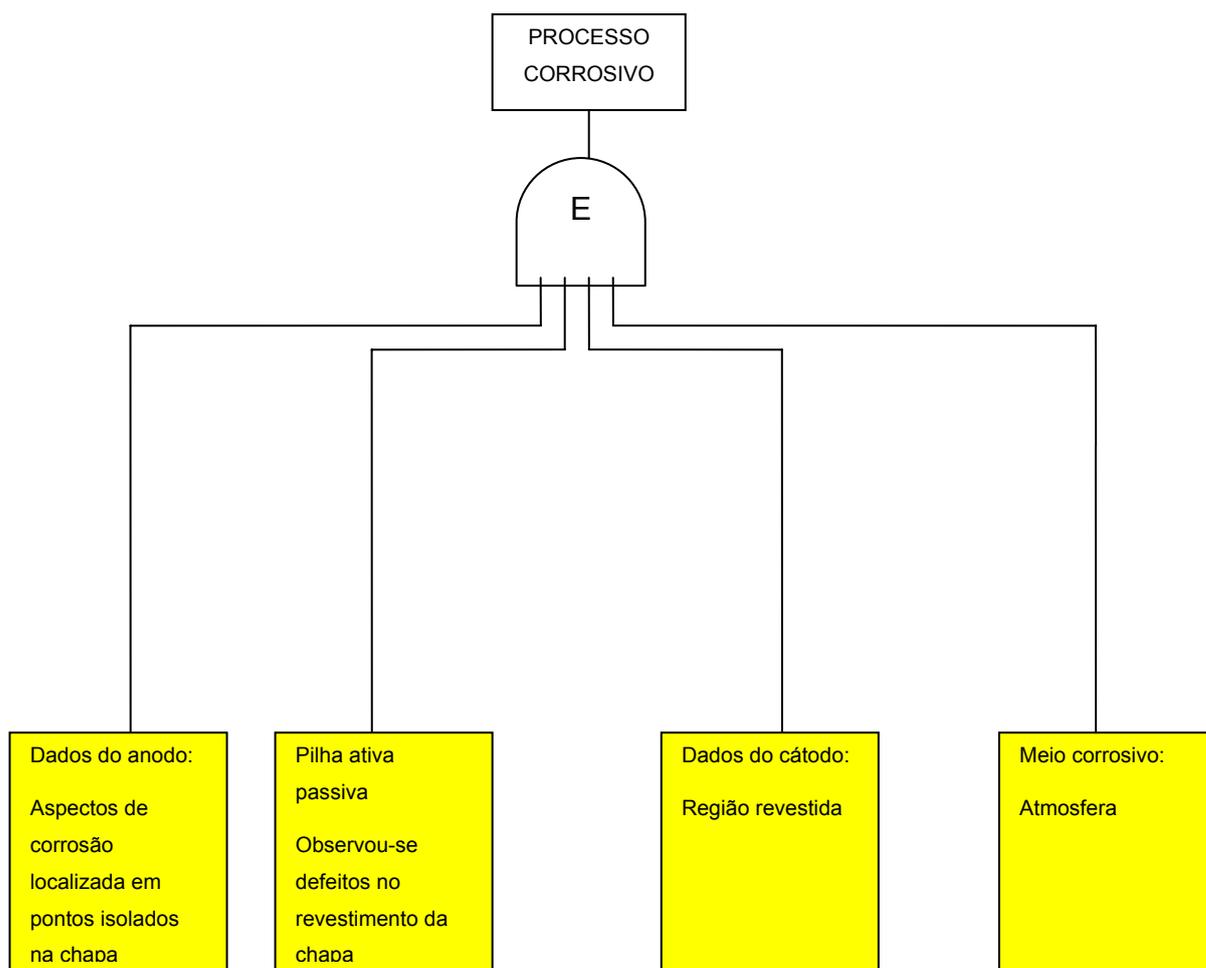


Fig. 36 – Exemplos de corrosão atmosférica em um site de telefonia celular [54].

É importante ressaltar que o seu mecanismo é essencialmente eletroquímico e, portanto, considera-se praticamente desprezível este fenômeno quando o material encontra-se em uma atmosfera seca à temperatura ambiente. A seguir, encontra-se o estudo de caso com a elaboração da árvore primária.



Fluxograma Básico.



Árvore de Falhas Secundária.

## CONCLUSÕES

A peça apresenta falhas bastante claras no seu revestimento, caracterizando a formação de pilha ativa passiva.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Conclusões

Verificou-se que a principal contribuição da metodologia de Dennies, quando aplicada à avaliação de causas de falha por corrosão, é a possibilidade de se dispor de uma seqüência ordenada e registrada de ações, o que faz com que profissionais com pouca experiência consigam conduzir a análise preliminar de forma satisfatória e, com isso, estimar possíveis causas.

A seqüência de raciocínio foi testada e apresentou resultados satisfatórios, quando aplicada na análise de casos práticos com o auxílio de alunos do curso de graduação em engenharia industrial mecânica da UTFPR.

Os resultados obtidos sugerem que uma sistemática similar à aqui descrita pode também ser empregada para as situações de corrosão química, apresentando-se neste caso bastante simplificada, pois a Árvore de Falha Primária pode ser iniciada com apenas duas colunas.

### 5.2. Trabalhos Futuros

Por se tratar de ferramenta probabilística, uma Árvore de Falha permite a geração de modelos matemáticos, podendo-se verificar a consistência do sistema em função da consistência das variáveis (características do meio corrosivo, por exemplo), deste modo se pode gerar um método de análise de confiabilidade para a fase de desgaste de produtos.

Desenvolvimento de um software, utilizando padrões visuais disponíveis associados a portais lógicos.

É possível agregar de forma similar às outras oito etapas da metodologia de Dennies, não exploradas neste trabalho, sugestões para análise de falhas.

A sistemática aqui proposta pode se utilizada em casos de falha não motivados por corrosão, ou seja, adaptá-la para falha por fadiga ou desgaste, por exemplo.

Este trabalho pode ser complementado ao ser ampliado o acervo de padrões visuais, com a caracterização de outros tipos de pilhas e demais variáveis.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] DENNIES, D. P., The Organization of a Failure Investigation, **Practical Failure Analysis**, ASM Internacional, Vol. 2, Jun. 2002, p. 11-41.
- [2] XENOS, Harilaus G. P., **Gerenciando a Manutenção Produtiva**, Belo Horizonte – MG: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998, 302 p.
- [3] LAFRAIA, J. R. B., **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**, Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, Petrobrás, 2001, 374 p.
- [4] V. GUERREIRO; H. ROZENFELD, “TFA – Conceitos Básicos” disponível em ([www.numa.org.br](http://www.numa.org.br)), acesso em 30 de setembro de 2005.
- [5] KLINGUELFUS, G. L. C. **Disciplina de Confiabilidade**. Curitiba – PR: III Curso de Especialização em Gerência de Engenharia de Manutenção, Curitiba - CEFET-PR, 1999, Notas de aula, 40 p.
- [6] PALADY, P., **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos: Prevendo e Prevenindo Problemas Antes Que Ocorram**, São Paulo, Inst. IMAN, 1997, 195 p.
- [7] TRANSMETH, **Diagrama de Causa e Efeito de Ishikawa**, disponível em ([www.numa.org.br](http://www.numa.org.br)), acesso em 10 de outubro de 2005.
- [8] GEMELLI, E., **Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização**, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001, 183 p.
- [9] SCHATT, W.; WORCH H, **Werkstoffwissenschaft**, Stuttgart:Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996.
- [10] SCHIEFLER Fo., M. F. O. **Estudo Microestrutural e Eletroquímico de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica**, 2004, 281 p., Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – UFSC, Florianópolis, 2004.
- [11] PANOSSIAN, Z., **Corrosão e Proteção contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas**, São Paulo: Manual: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, V. I E II, 1ª Ed., 1993, 630 p.

- [12] GENTIL, V., **Corrosão**, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 3.<sup>a</sup> Edição, 1996, 345 p.
- [13] CALLISTER JR., W. D., **Materials Science and Engineering: An Introduction**, New York, 3<sup>rd</sup>, John Wiley & Sons, 3<sup>rd</sup> Edition, 1994, 811 p.
- [14] JONES, D. A., **Principles and Prevention of Corrosion**, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2<sup>nd</sup> Edition, 1996, 572 p.
- [15] WEST, J. M., **Basic Corrosion and Oxidation**, Chichester, UK: Ellis Horwood Limited, 2<sup>nd</sup> Edition, 1986, 264 p.
- [16] NUNES, L. P.; DUTRA A. C., **Proteção Catódica – Técnica de Combate à Corrosão**, Rio de Janeiro-RJ: Ed. Interciência, 3<sup>a</sup> Ed., 1999, 246 p.
- [17] PETROBRÁS, N 2260 - Norma Técnica Interna, **Graus de Corrosão e Tipos de Superfícies Avariadas e Preparadas**, 1988, 10 p.
- [18] PETROBRÁS, N 2561 - Norma Técnica Interna, **Padrões Fotográficos para Avaliação de Formas de Corrosão**, 2001, 15 p.
- [19] PIMENTA, G. S., Tipos de Corrosão, disponível em ([www.abraco.org.br](http://www.abraco.org.br)), acesso em 17 de novembro de 2005.
- [20] ABNT, NBR 14643 - **Corrosão Atmosférica – Determinação da Corrosividade das Atmosferas**, 2001, 12 p.
- [21] Norma NBR 6211, **Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida**, 2001, 8 p.
- [22] Norma NBR 6921, **Sulfatação total na atmosfera – Determinação da taxa pelo método da vela de dióxido de chumbo**. 2001, 9 p.
- [23] VERGES, G. R., **Estudo do Desempenho de Pintura Para Materiais das Redes de Distribuição de Energia Elétrica Situadas em Regiões Litorâneas**, 2005, 212 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2005.
- [24] NEVEUX, M. **La Corrosion des Conduites d'Eau et de Gás – Causes et Reméds**, Paris: Ed. Eyrolles, 1968, 172 p.

- [25] IOPE – INSTRUMENTOS DE PRECISÃO, Meios Corrosivos a Altas Temperaturas, disponível em ([www.iope.com.br](http://www.iope.com.br)), acesso em 13 de junho de 2006.
- [26] ALLENSTEIN, C. L. M., Curitiba – PR, 10 de fevereiro de 2006. Entrevista concedida a Antonio Kozlik Junior.
- [27] SUESS, M. E., Bacteria-Induced Corrosion of a Stainless Steel Chemical Trailer Barrel, Technimet Corp., New Berlin, Wisconsin, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 71-73.
- [28] LOCHANSKI, E. C., Galvanic Corrosion Failure of Austenitic Stainless Pipe Flange Assemblies, Metalmax, Thiensville, Wisconsin, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 197-200.
- [29] TANER, G. M., Stress-Corrosion Cracking of a Brass Tube in a Generator Air Cooler Unit, Mechanical and Materials Engineering Department, Radian Corporation, Austin, Texas, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2., p. 107-110.
- [30] BHATTACHARYA, D. K., GHANAMOORTHY, J. B., RAJ, B., Transgranular Stress-Corrosion Cracking Failures in AISI 304L Stainless Steel Dished Ends During Storage, Metallurgy and Materials Program, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, India, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 135-137.
- [31] THOMSON, R., Stress-Corrosion Cracking of a Ship Propeller Tap Bolt, Metals Technology Laboratories, CAMNET Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canadá, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 338-341.
- [32] PERUMAL, K. E., Pitting Corrosion of Stainless Steel by Potable Municipal Water in a Organic Chemical Plant, Corrosion & Metallurgical Consultancy Centre Milund (W), Bombay, India, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 176-177.
- [33] ELLIS, P.F., Corrosion Failure of a Chemical Process Piping Cross-Tee Assembly, Radian Corporation, Austin, Texas, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 156-159.

- [34] GILKEY, M. H., Corrosion Fatigue and Subsequent Rupture of a Yankee Dryer Roll on a Modified Paper Machine, Mutual Research Corporation, Norwood, Massachusetts, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 132-135.
- [35] COLWELL R. L. Stress-Corrosion Cracking of a Teflon-Lined Steel Pipe in Sulfuric Acid Service Air Products and Chemicals Allentown, Pennsylvania, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 188-190.
- [36] COLLINS D. C. Corrosion Fatigue Failure of Stainless Steel Load Cells in a Milk Storage Tank, ETRS Pty Ltd., Australia, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 412-414.
- [37] CZAJKOWSKI C. J., Single-Phase Erosion Corrosion of a 460 mm (18 in.) Diam Feedwater Line Break, Department of Nuclear Energy, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 182-187.
- [38] SHIELDS L. E., CLARK R. A., HUET R., Stress-Corrosion Cracking Caused by Residual Stresses in Chromium-Silicon Alloy Steel Helical Compression Springs Failure Analysis Associates, Inc., Redmond, Washington, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 406-409.
- [39] PORT R. D., Corrosion and Cracking of the Internal Surfaces of a Black Liquor Digest, Nalco Chemical Company, Naperville, Illinois, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2., p. 128-131.
- [40] JAYAKUMAR T., BHATTACHARYA D. K., RAJ B., RODRIGUEZ P., Intergranular Corrosion Failure in Zn-Al Alloy Solenoid Valve Seats, Metallurgy and Materials Programe, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam, India, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2., p. 421-423.
- [41] DAYAL R. K., GNANAMOORTHY J. B - Metallurgy Division, SRINIVASAN G. – Reactor Group, Corrosion Failure of Stainless Steel Components During Surface Pretreatment, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam, India, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 506-508.

- [42] BHATTACHARYA, D. K., JAYAKUMAR T., RAJ B., Intergranular Stress-Corrosion Cracking Failure in AISI Type 316 Stainless Steel Dished Ends Near Weld Joints, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam, India, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 126-129.
- [43] McSWAIN, R. H., Fatigue Fracture of a Helicopter Tail Rotor Blade Due to Field-Induced Corrosion, McSwain Engineering Inc., Pensacola, Florida, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 30-32.
- [44] WHITE, T. N., Naval Air Systems Comand, Norfolk, Virginia, KANTIMATHI S. - Fatigue Concepts, Sacramento, California, Stress-Corrosion Cracking of a High-Strength Steel Frame in a Fighter Aircraft, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 51-55.
- [45] BHATTACHARYA, D. K., RAJ, B., Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam, India, LOPEZ E. C., ZIEGLER Z. - Pvt. Ltd., Melbourne, Austrália, SEETHARAMAN V. - Universal Energy Systems, Inc., Dayton, Ohio, Corrosion Failure of Stainless Steel Thermowells, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 160-162.
- [46] BOWMAN, R. D., Stress-Corrosion Cracking in a Downcomer Expansion Joint, Consulting Metallurgical Services, Inc. Marietta, Georgia, **Handbook of Cases Histories in Failure Analysis**, Vol. 2, p. 222-224.
- [47] KRAFFT, H., Alloy 430 Ferritic Stainless Steel Welds Fail due to Stress-Corrosion Cracking in Heat-Recovery Steam Generator, Bechtel Corporation, **Practical Failure Analysis**, ASM Internacional, Vol. 2, Ago. 2002, p. 39-46.
- [48] OLSON, A. N., LASSEIGNE, A. N., MARYA, M., MISHRA, B., Weld Features that Differentiate Weld and Plate Corrosion, Center for Welding, Joining and Coatings Research, The G. S. Department of Metallurgical and Materials Engineering, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, **Practical Failure Analysis**, ASM Internacional, Vol. 3, Out. 2003, p. 43-57.
- [49] KOSEC, B., SKRABA, P., University of Ljubljana, NTF – Department of Materials and Metallurgy, Ljubljana, Slovenia, BIZJAN, F. - University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia, Damage of a Screw in the Seal

Coupling, **Practical Failure Analysis**, ASM Internacional, Vol. 2, Out. 2002, p. 57-59.

[50] KRISHNA, B. V., SIDHU, R. K., Pitting Corrosion of Steel Tubes in an Air Preheater, Materials Science & Technology Division, Thapar Centre for Industrial Research and Development, Punjab, India, **Practical Failure Analysis**, ASM Internacional, Vol. 2, Out. 2002, p. 67-73.

[51] McDOUGALL, J. L., McCALL, L., STEVENSON, M. E., Water Chemistry and Processing Effects on the Corrosion Degradation of Cooper tubing in Cooling Water Systems, Metals & Materials Engineers, LLC, Suanee, GA, **Practical Failure Analysis**, ASM Internacional, Vol. 3, Out. 2003, p. 81-88.

[52] ROPELATTO, E. R.; ARRUDA, R.; SCHIBELBAIN, D., **Disciplina de Corrosão**. Curitiba – PR: Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Curitiba - CEFET-PR, 2006, Trabalho Acadêmico, 3 p.

[53] GONÇALVES, D'AMICO L., ISHIMOTO, L., **Disciplina de Corrosão**. Curitiba – PR: Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Curitiba - CEFET-PR, 2006, Trabalho Acadêmico, 2 p.

[54] GONZALEZ, J. C. E.; MARCHESI, E., **Disciplina de Corrosão**. Curitiba – PR: Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Curitiba - CEFET-PR, 2006, Trabalho Acadêmico, 3 p.

## ANEXO I

Padrões fotográficos Para Avaliação de Formas de Deterioração de Acordo Com a Norma N-2561 da Petrobrás.

### *a) abaulamento (laranja)*

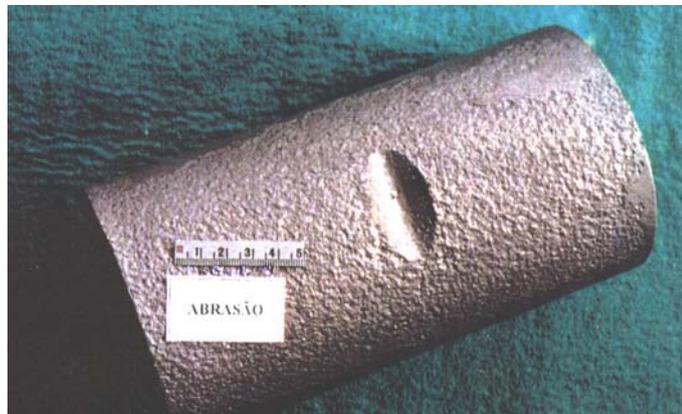
Protuberância localizada decorrente da deformação plástica do metal em função da diminuição de sua resistência mecânica pela ação prolongada do calor e esforço mecânico.



Abaulamento (Laranja) - Tubo de Forno de Destilação.  
Material: ASTM A-200 T5.

### *b) abrasão*

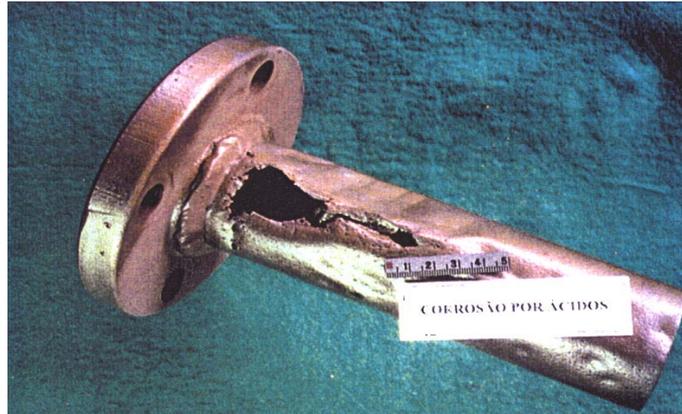
Desgaste pela fricção entre dois materiais sólidos em contato entre si.



Abrasão – Tubo de Condução.  
Material: API 5L Gr. B.

*c) corrosão por ácidos*

Corrosão progressiva que ocorre em meio ácido, forte ou fraco, concentrado ou diluído, causada pela dissolução da película de óxido do metal, ocorrendo como consequência desprendimento de hidrogênio em meio desaerado, ou água em meio aerado.

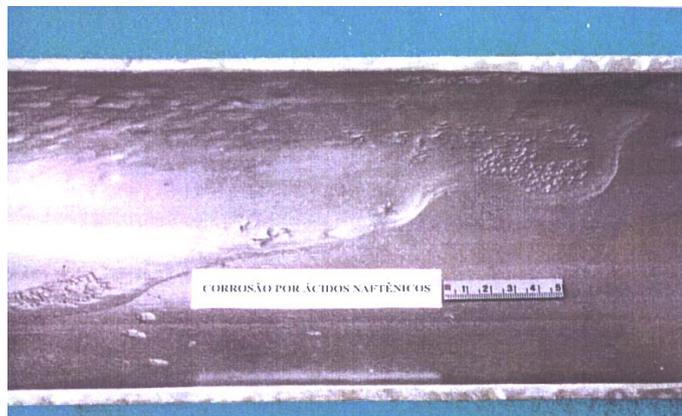


Corrosão por ácidos – Tubo de Condução.

Material: API 5L Gr. B.

*d) corrosão por ácidos naftênicos*

Corrosão provocada, por hidrocarbonetos contendo ácidos naftênicos, com grandes velocidades de fluxo em temperaturas na faixa de 220 °C a 400 °C.



Corrosão por Ácidos Naftênicos – Tubo de Destilação.

Material: ASTM A 200 T5.

*e) corrosão por cinzas fundidas*

Corrosão provocada sobre a superfície metálica por cinzas oriundas da queima de óleos combustíveis que contenham Enxofre, Vanádio e Sódio na forma combinada caracterizada pela perda de espessura do material.



Corrosão por Cinzas Fundidas – Tubo de Forno de Destilação.

Material: ASTM A 200 T5.

*f) corrosão sob contato (Fresta)*

Tipo de corrosão resultante da diferença de concentração de oxigênio entre regiões internas e externas de uma fresta formada por um metal e um não metal, ou entre duas peças metálicas.



Corrosão sob Contato (Fresta) – Tubo de Permutador de Calor.

Material: ASTM B 677.

*g) corrosão – erosão (Impingement)*

Corrosão associada ao efeito mecânico decorrente do fluxo turbulento de um fluido.



Corrosão-Erosão – Tubo de Condução.

Material: ASTM A 106 Gr. A.

*h) corrosão sob fadiga*

Consiste no aparecimento de trincas ou fraturas nos metais ou ligas, decorrentes da ação combinada da corrosão e de tensões cíclicas, quer de natureza mecânica ou térmica.

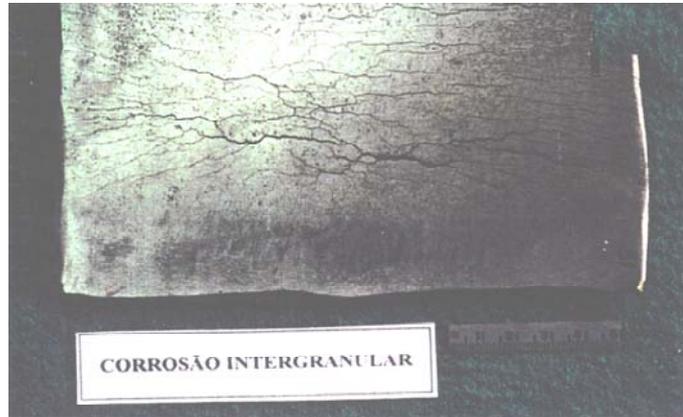


Corrosão sob Fadiga – Palheta de Rotor de Soprador.

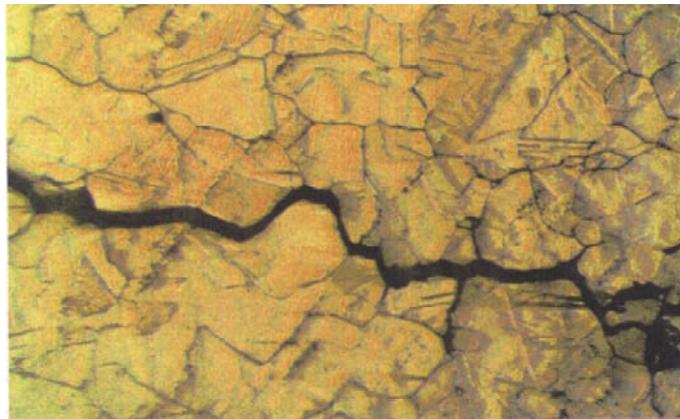
Material: AISI 403.

*i) corrosão intergranular ou intercristalina*

Deterioração seletiva e localizada nas adjacências do contorno de grão do material.



Corrosão Intergranular – Chapa de ponteira da Tocha.  
Material: ASTM A 240 TP 304.



Corrosão Intergranular – Chapa da Ponteira da Tocha.  
Material: ASTM A 240 TP 31 (Detalhe Microestrutural).

*j) corrosão sob depósito*

Corrosão que ocorre sob ou ao redor de um depósito descontínuo na superfície metálica.

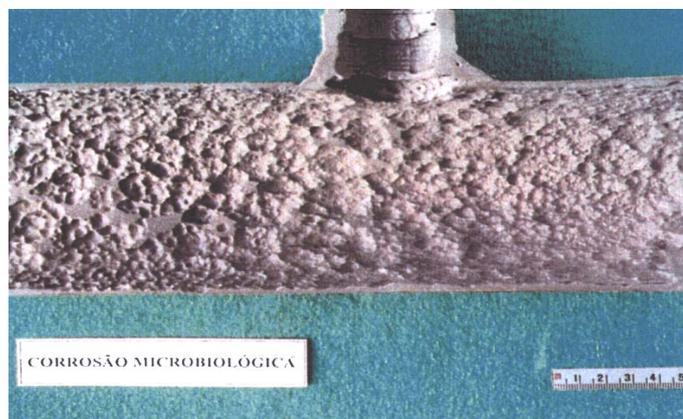


Corrosão sob Depósito – Tubo de Condução de Água.

Material: Tubo API 5L Gr. B.

*k) corrosão microbiológica*

Corrosão do metal que se processa sob a influência de microorganismos.



Corrosão Microbiológica (Alvéolos) - Tubo de Condução.

Material: ASTM A 106 Gr.

*l) corrosão por placas*

Quando o produto da corrosão forma-se em placas e vai se soltando progressivamente.



Corrosão por Placas – Chapa.

Material: ASTM A 285 C.

*m) corrosão pelo solo*

Deterioração da superfície externa de um metal, decorrente de contato com o solo.



Corrosão pelo Solo – Tubo de Condução.

Material: ASTM A 106 Gr. A.

*n) corrosão sob tensão*

Consiste no aparecimento de trinca nos metais ou ligas, decorrentes da ação combinada da corrosão e de tensões estáticas residuais, induzidas ou externas.



Corrosão sob Tensão – Tubo de permutador de Calor.  
Material: ASTM A 213 Tp 304.

*o) trinca transgranular ou transcristalina*

Forma de deterioração que se dá através dos grãos do material.



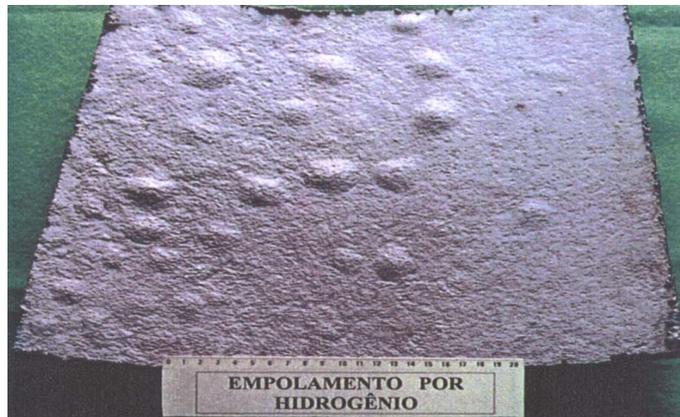
Trinca Transgranular – Tubo de Permutador de Calor.  
Material: ASTM A 213 Tp 304.



Trinca Transgranular – Tubo de Permutador de Calor.  
Material: ASTM A 213 Tp 304 (Detalhe Microestrutural).

*p) empolamento pelo hidrogênio*

Formação de protuberância superficial resultante da retenção do hidrogênio molecular nas descontinuidades internas do metal e que para lá migrou como hidrogênio nascente.



Empolamento por Hidrogênio – Tubulação da Tocha.  
Material: API 5L Gr. B.



Empolamento por Hidrogênio – Vaso de Blow Down.  
Material: ASTM A 285 Gr. C (Detalhe).

*q) erosão*

Desgaste de metais ou outros materiais pela ação abrasiva de fluidos em movimento, usualmente acelerado pela presença de partículas sólidas ou matéria em suspensão.



Figura 30 – Erosão – Tubo Interno de Conversor.  
Material: ASTM A 312 Tp 304.

*r) fadiga*

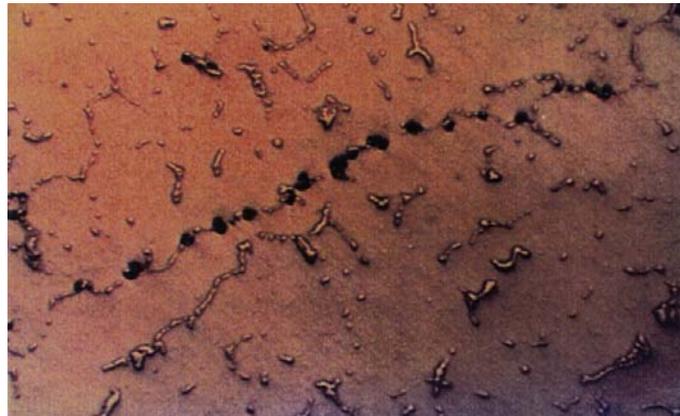
Condição que leva a trinca ou fratura de um material sob condições de tensões cíclicas ou flutuantes de valor máximo menor que o seu limite de resistência a tração.



Fadiga – Eixo de Motor de Bomba.

*s) fluência*

Fenômeno pelo qual metais e ligas têm a tendência a sofrer deformações plásticas contínuas, quando submetidos por longos períodos de tempo a tensões constantes, porém inferiores ao limite de resistência do material.



Fluência – Tubo de Forno de Reforma.  
Material: ASTM HK 40 (Detalhe Microestrutural).

*t) oxidação a altas temperaturas*

Conversão de porções superficiais de metal ou liga em seus óxidos, quando eles são aquecidos a altas temperaturas, em certos tipos de atmosferas contendo oxigênio.



Oxidação a Altas Temp. – Tubo de Forno de Destilação.  
Material: ASTM A 200 T5.

*u) ruptura por superaquecimento*

Ruptura que ocorre quando materiais metálicos são submetidos a temperaturas que causam redução de sua resistência mecânica, para valores menores que a necessária para suportar as tensões atuantes.



Ruptura por Superaquecimento – Tubo de Caldeira.  
Material: ASTM A 178 Gr. C.

*v) ruptura por tensão*

Fratura de um material produzida pela aplicação e manutenção de uma carga constante acima de seu limite de resistência a tração. Quando a fratura é

acompanhada por deformação plástica, a ruptura é dúctil. Quando a deformação é nula ou desprezível é considerada frágil.

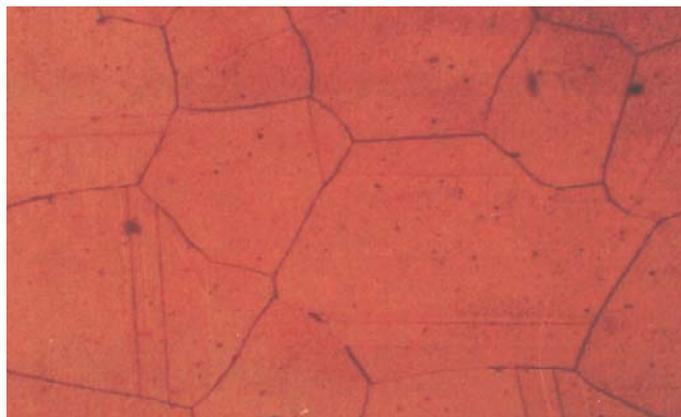


Ruptura por Tensão – Tubo de Forno de Desasfaltação.

Material: ASTM A 200 T5.

#### x) *sensitização*

Precipitação de carbonetos de cromo complexos que ocorre nos contornos dos grãos, de aços inoxidáveis austeníticos tornando-os suscetíveis à corrosão intergranular.

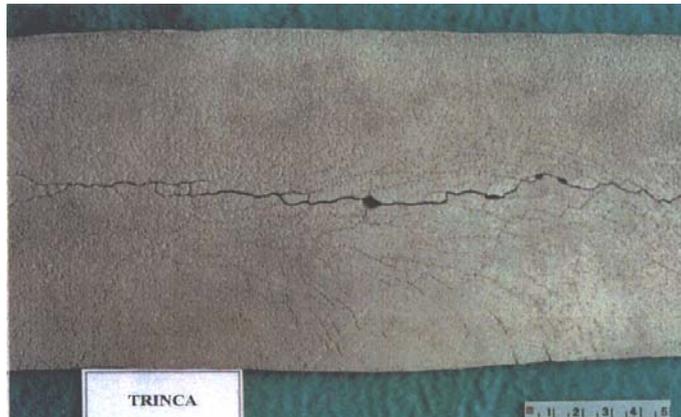


Sensitização – Chapa de Ciclone de Conversor.

Material: ASTM A 240 Tp 304.

z) *trincas*

Descontinuidades superficiais, ou internas, originadas das tensões localizadas, cujos valores excedem ao limite de ruptura do material.



Trinca – Chapa de Ponteira de Tocha.

Material: ASTM A 240 Tp 304.

Condições dos registros fotográficos:

Os registros fotográficos foram obtidos a partir de filmes ISO (ASA) 100, a cores;

Os registros fotográficos foram confeccionados no tamanho 10 x 7,5 mm;

A escala utilizada foi do tipo metálica com divisões em mm;

Abaixo dos registros fotográficos estão colocados os itens de identificação:

Numeração;

Descrição do tipo de corrosão e outras formas de deterioração;

Material.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)