



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU  
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL**

**JOÃO CARLOS DA SILVA**

**HIBERNAÇÃO DE CALDEIRAS A VAPOR COM ÊNFASE EM  
CORROSÃO ATMOSFÉRICA**

SALVADOR,  
2011

**JOÃO CARLOS DA SILVA**

**HIBERNAÇÃO DE CALDEIRAS A VAPOR COM ÊNFASE EM  
CORROSÃO ATMOSFÉRICA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu da Faculdade Tecnologia SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Carla Dalmolin; Co-orientador  
Prf. Dr. Lourenço Gobira Alves

SALVADOR,

2011

Ficha catalográfica

**JOÃO CARLOS DA SILVA**

**HIBERNAÇÃO DE CALDEIRAS A VAPOR COM ÊNFASE EM  
CORROSÃO ATMOSFÉRICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial, Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec

Aprovada em 19 de Dezembro de 2011.

Banca Examinadora

Orientador: Prof<sup>a</sup> Carla Dalmolin, Doutora em Química pela Universidade de São Carlos, São Carlos, Brasil

Co-orientador: Prof. Dr. Lourenço Gobira Alves, Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil

Membro externo da Banca Marcio Luis ferreira Nascimento , Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade de São Carlos, São Carlos, Brasil

Membro Interno da banca; Manoel Carreira Neto, Doutor em Ciência e Engenharia dos materiais pela Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil

Dedico este trabalho a meus filhos Victor Hugo e Giovanna, e a minha esposa Jerusa, pelos momentos de paciência e abdicção em nosso convívio, para que eu pudesse me dedicar a este projeto.

## **AGRADECIMENTOS**

A meus orientadores Carla Dalmolin e Lourenço Gobira, pelos conhecimentos transmitidos e apoio nas dificuldades encontradas ao longo deste projeto.

À minha esposa, pelo apoio e compreensão ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

A meus pais, Lelita e Raimundo, que me educaram e prepararam para a vida.

Aos meus amigos pela compreensão e apoio em todos os momentos.

A meus pares que, no ambiente de trabalho, me ajudaram dentro das suas limitações.

Ao engenheiro Gustavo Werneck, que participou deste processo de maneira essencial para que os experimentos e análises deste trabalho pudessem ser feitos.

Ao engenheiro Emerson Sanches que desde o início deste projeto esteve ao meu lado, como amigo, coach e apoiador.

Finalmente agradeço aos meus colegas de turma pelo respeito e companheirismo demonstrados durante o curso, no qual nos empenhamos.

“ É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar; é melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-se fazendo nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver ...”

*Martin Luther King*

## RESUMO

Em função de uma parada para atender a uma necessidade de uma empresa do ramo siderúrgico, tornou-se obrigatório conduzir um trabalho voltado para a preservação dos equipamentos, também chamado de hibernação industrial. Buscou-se dar ao trabalho uma abordagem que permitisse sua aplicação em outras indústrias que pretendam, por quaisquer motivos, interromper suas atividades temporariamente e retornar quando for mais conveniente, em função das necessidades internas. O foco do estudo foi a hibernação de uma caldeira a vapor, que é o principal equipamento do *site* siderúrgico avaliado. Dentro desse panorama de preservação do equipamento, tratou-se da avaliação dos mecanismos de deterioração que causavam mais impacto nas condições físicas da caldeira. No processo de hibernação, os equipamentos passam por períodos parados, que podem variar de poucos meses a muitos anos. A possibilidade de avaliação dos mecanismos de deterioração possibilita uma tratativa de prevenção e, assim, podem ser minimizados ou eliminados possíveis danos aos equipamentos. A corrosão atmosférica, entre outros mecanismos, foi o principal ponto de atenção durante o estudo da hibernação. Foram monitoradas, no ambiente da caldeira, a taxa de absorção do íon  $\text{Cl}^-$ , a concentração de  $\text{SO}_2$ , bem como a umidade do ambiente. Para avaliação do impacto da corrosão, foi efetuada uma medida indireta da taxa de corrosão através da medição de espessura. Complementar a essa informação, foi feita uma análise dos produtos de corrosão através do MEV. Para monitorar o sistema de proteção da caldeira, preparado com o objetivo de preservar a caldeira, foi criado um plano de manutenção preventiva e preditiva. Esse plano teve como objetivo garantir, de forma sistêmica, que o sistema de proteção operasse e mantivesse a caldeira preservada e isenta de danos por corrosão.

**Palavras-chave:** Hibernação. Caldeira. Corrosão. Umidade. Manutenção.



## **ABSTRACT**

Due to a closure to meet the company's requirement in the steel business, it became mandatory to conduct a study whose goal is the preservation of an equipment, also known as industrial mothballing. We tried to give the work an approach that would allow its application in other industries who want, for whichever reason, to stop their activities temporarily and return when convenient, according to internal requests. This study's focus was to mothball a steam boiler; the main equipment of the steel site evaluated. In this scenario of preserving the equipment, it was evaluated the deterioration mechanisms that caused most impact on the physical conditions of the boiler. In the process of mothballing, the equipment goes through periods of time that can vary from a few months to many years without operating. The possibility of evaluating a prevention deterioration mechanism allows a dealing with prevention, therefore, minimizing or eliminating possible damages to the equipment. The atmospheric corrosion, among other mechanisms, was the main point of interest during the study of mothballing. In the boiler's environment, there were monitored the rate of absorption of Cl-ion, the concentration of SO<sub>2</sub> and the humidity. To evaluate the impact of corrosion, it was made an indirect measurement of the corrosion rate by measuring the thickness of the pipes. Complementary to this information, an analysis of the corrosion products were made by the MEV process. To monitor the security system of the boiler a preventive and predictive plan of maintenance was prepared. This plan's goal is to ensure, in a systemic way, that the protection system is operational and the boiler is preserve and corrosion free.

Keywords: Sleep. Boiler. Corrosion. Moisture. Maintenance.

## LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Magnitude da velocidade de deposição do SO <sub>2</sub> em diferentes tipos de atmosfera tipos de atmosfera.	28
Tabela 2 – Concentração média de espécies agressivas no ar (ppb).	34
Tabela 3 – Estimativa da quantidade de água existente sobre as superfícies metálicas.	41
Tabela 4 – Número aproximado de monocamadas de água <i>versus</i> umidade relativa.	42
Tabela 5 – Variação da taxa de deposição do cloreto de sódio com a distância da fonte poluidora (o mar).	49
Tabela 6 – Classificação do ambiente corrosivo segundo Liesegang.	52
Tabela 7 : Corrosividade dos ambientes para o Aço carbono.	53
Tabela 8 – Graus de corrosão x deterioração do ambiente.	54
Tabela 9 – Fatores de escolha do ensaio mais apropriado para detecção de mecanismos de deterioração.	69
Tabela 10: Planilha de custo da energia elétrica gasta com o consumo das resistências elétricas e iluminação do local do experimento.	79
Tabela 11 – Informações técnicas relativas ao medidor de espessura.	83
Tabela 12 – Valores de cloretos encontrados na caldeira.	89
Tabela 13 – Dados obtidos com o medidor EAGLE.	90
Tabela 14: Determinação dos produtos de corrosão através do MEV.	91

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Gráfico da influência da umidade na ação corrosiva da atmosfera contendo CO <sub>2</sub> .	26
Figura 2 – Esquema ilustrando a corrosão úmida de um aço carbono em um eletrólito contendo oxigênio: o mecanismo eletroquímico.	29
Figura 3 – A perda de espessura do aço carbono em função do tempo de exposição em dez locais de diferentes agressividades.	32
Figura 4 – Efeito da umidade relativa na taxa de corrosão do ferro em três tipos de atmosfera: a – Ar puro; b – Ar sintético com 0,01% de SO <sub>2</sub> ; c – Ar sintético com 0,01% de SO <sub>2</sub> e partículas de carvão.	36
Figura 5 – Pontos de condensação de água na superfície de um metal por efeito de capilaridade.	37
Figura 6 – Gráfico de ensaios de corrosão com diferentes sais depositados sobre a superfície do aço, em função da umidade relativa.	38
Figura 7 – Diagrama de Moiller – Ilustração de um caso de umidade num ambiente a 25 °C e 60% U.R.	39
Figura 8 – Gráfico do efeito acumulado da corrosão, esquemático: velocidade de corrosão do aço carbono exposto à umidade relativa de 90%, com e sem umedecimento periódico.	40
Figura 9 – Variação da taxa de corrosão do aço carbono em função da distância da fonte geradora de SO <sub>2</sub> na atmosfera.	45
Figura 10 – Gráfico da adsorção de SO <sub>2</sub> em função do tempo. ferro, zinco, cobre e alumínio expostos à atmosfera com 90% de umidade relativa e com 0,10 ppm de SO <sub>2</sub> .	46
Figura 11 – Perda de material de uma amostra de aço carbono ASTM A 36 exposto a uma atmosfera contaminada por diferentes tipos de poluentes.	47

Figura 12 – Os dois enfoques fundamentais utilizados na classificação da corrosividade de uma atmosfera.	51
Figura 13 – Uma aplicação da ISO 9224: perda de espessura em função do tempo para o aço carbono em diferentes classes de corrosividade.	53
Figura 14 – Croqui de localização da planta.	73
Figura 15 – Desenho 3D da caldeira.	74
Figura 16 – Foto do frasco coletor.	75
Figura 17 – Desenhos indicando o posicionamento das lâmpadas na caldeira de acordo com as vistas em corte e lateral sul.	77
Figura 18 – Foto da disposição das lâmpadas na área interna da caldeira.	78
Figura 19 – Resistência de cerâmica de 1000w.	78
Figuras 20 a) e b) – Disposição das resistências dentro da caldeira.	79
Figura 21 – Foto área externa da caldeira.	82
Figura 22 – Desenho esquemático do posicionamento dos pontos de medição de espessura nos tubos da caldeira.	83
Figura 23 – Vista detalhada da posição entre os tubos da face norte da caldeira.	84
Figura 24: Planilha resumo manutenções no sistema das resistências.	87
Figura 25: Vista aérea de localização da caldeira em relação aos municípios de Simões Filho e Salvador.	88
Figura 26: Foto micrografias das amostras obtidas a partir dos produtos de corrosão retirados das paredes da caldeira após um ano de hibernação.	92
Figura 27: Variação da umidade e da temperatura dentro da caldeira no dia 13/06/2011.	93
Figura 28: Variação da umidade e da temperatura dentro da caldeira durante o período de 05/07/2011 a 08/07/2011.	94

Figura 29: Variação da umidade e da temperatura controladas dentro da caldeira durante o período de 14/07/2011 a 15/07/2011 e no dia 17/07/2011 com utilização de lâmpadas.	95
Figura 30: Variação da umidade e da temperatura controladas dentro da caldeira durante o período de 27/07/2011 a 29/07/2011 com utilização de resistências.	96
Figura 31: Variação da umidade e da temperatura controladas dentro da caldeira durante o período de 18/10/2011 a 22/10/2011 com utilização de resistências.	97
Figura 32: Fotografia das paredes externas da tubulação no interior da caldeira, mostrando o desprendimento de produto de corrosão após o abaixamento e controle da umidade por aquecimento.	98
Figuras 33: Perda de espessura entre medidas de 2010 e 2011(11 meses) – Local parede Oeste. Fonte: Acinor (2010).	100
Figura 34: Perda de espessura entre medidas de 2010 e 2011(11 meses) – Local parede Leste. Fonte: Acinor (2010).	100
Figura 35 : Comparativo da evolução entre as medidas executadas entre 2010 e 2011 e as medidas executadas entre os meses de agosto/novembro de 2011 lado Leste ponto P2 (4 meses) – Local parede Leste. Fonte: Acinor (2011).	101
Figura 36: Comparativo da evolução entre as medidas executadas entre 2010 e 2011 e as medidas executadas entre os meses de agosto/novembro de 2011 lado Oeste ponto P2 (4 meses) – Local parede Leste. Fonte: Acinor (2011).	101

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
UR	Umidade Relativa

ISSO	International Organization Standrdization
W	Watt
Ohm	Unidade de resistência elétrica
E	Diferença de potencial
I	Corrente Elétrica
R	Resistência elétrica
FARADAY	Unidade de carga elétrica
AISI	American Iron and steel institute
ppm	parte por milhão
ppb	parte por bilhão
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
API	American Pipe Institute
GPS	Global Positioning System

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1 PROBLEMA	20
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 <b>Objetivo Geral</b>	<b>20</b>
1.2.2 <b>Objetivos Específicos</b>	<b>20</b>
1.3 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA	21
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>23</b>
2.1 FUNDAMENTOS DA CORROSÃO	23
2.2 CORROSÃO ATMOSFÉRICA	25
2.2.1 <b>Mecanismos da corrosão do ferro e aço carbono</b>	<b>28</b>
2.2.2 <b>Velocidade da corrosão</b>	<b>30</b>
2.2.3 <b>Influência da composição da atmosfera no processo</b>	<b>32</b>
2.2.4 <b>A Atmosfera</b>	<b>33</b>
2.2.4.1 Umidade	35
2.2.4.2 Camadas adsorvidas	41
2.2.4.3 Camadas condensadas de orvalho	42
2.2.4.4 Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	44
2.2.4.5 Cloretos	48
2.2.5 <b>Temperatura</b>	<b>50</b>
2.2.6 <b>Corrosividade Ambiental</b>	<b>49</b>
2.2.6.1 Classificação dos ambientes	51
2.2.6.2 Classificação dos ambientes segundo o índice de Deterioração de Brooks	54
2.3 MEIOS PROTETORES CONTRA A CORROSÃO	54
2.3.1 <b>Ventilação</b>	<b>56</b>
2.3.2 <b>Aquecimento</b>	<b>56</b>
2.3.3 <b>Desumidificação</b>	<b>57</b>
<b>3 MANUTENÇÃO</b>	<b>58</b>
3.1 METODOLOGIAS	59
3.1.1 <b>Manutenção Corretiva</b>	<b>59</b>
3.1.2 <b>Manutenção Preventiva</b>	<b>60</b>
3.1.2.1 Inspeção de Equipamentos e NR13	62
3.1.3 <b>Manutenção Preditiva</b>	<b>63</b>

3.2 O PROCESSO DE HIBERNAÇÃO	65
3.3 CALDEIRAS	67
3.3.1 Mecanismos de falha em sistema de vapor	68
3.3.2 Impacto da corrosão em uma caldeira	70
<b>4 TRABALHO EXPERIMENTAL E DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA</b>	<b>72</b>
4.1 REGIÃO DO MONITORAMENTO	73
4.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS	74
4.3 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO DIÓXIDO DE ENXOFRE	75
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CORROSÃO	76
4.5 PROCEDIMENTO DE PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO ATMOSFÉRICA	76
4.6 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	80
4.7 MEDIÇÃO DE ESPESSURA	82
4.8 IMPLANTAÇÃO DO PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA E PREDITIVA	84
<b>5 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES</b>	<b>88</b>
5.1 MONITORAMENTO DOS CONTAMINANTES	88
5.1.1 Teor de Cloretos	88
5.1.2 Teor de Sulfetos	90
5.2 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SISTEMA	92
5.3 SISTEMA DE PROTEÇÃO	95
5.4 MEDIÇÃO DE ESPESSURA	98
5.5 TAXA DE CORROSÃO	98
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES</b>	<b>103</b>
6.1 CONCLUSÕES	103
6.2 ATIVIDADES FUTURAS DE PESQUISA	104
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>106</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>109</b>
Anexo 1: Folha de Programação Preventiva	110
Anexo 2: Registro de Índice Pluviométrico da cidade do Salvador	111
Anexo 3: Registro da manutenção Preventiva no sistema SAP	112
Anexo 4: Determinação produtos de corrosão através do EDX	113



## 1 INTRODUÇÃO

O projeto desenvolvido neste estudo pretendeu avaliar as condições de uma planta petroquímica parada por um período superior a um ano e propõe um modelo de avaliação e procedimento para minimizar os riscos de possíveis interrupções do funcionamento de seus equipamentos na retomada para a operação contínua.

Entre dezembro de 2008 e outubro de 2009, em função da baixa demanda de mercado, a indústria siderúrgica enfrentou grandes dificuldades, necessitando reduzir seus custos internos. O preço do aço, tanto no mercado internacional quanto no nacional, despencou, obrigando as empresas do setor a se reestruturarem. A premissa básica para uma empresa se manter saudável em períodos de baixa demanda é a redução dos custos, diretos e indiretos. Nesse contexto, uma das ações mais adotadas pelas empresas para a redução de custos é a paralisação de Unidades Produtivas por um período não definido.

No presente estudo, tomou-se como base uma grande empresa do ramo siderúrgico que passou por situação descrita anteriormente e que paralisou uma Unidade de beneficiamento de minério de ferro durante esse período. Essa empresa identificou uma oportunidade de minimizar os custos na produção do aço através da hibernação de sua unidade de beneficiamento do minério de ferro (Redução Direta), que apresenta como produto final o ferro esponja. A unidade de beneficiamento utiliza como matérias-primas o minério de ferro e o gás natural. O ponto-chave dessa redução consiste em interromper o processamento da unidade, para uma alternativa mais barata dos custos de produção. Utilizando-se para a produção do aço a sucata ferrosa e o gusa, os custos de produção são em até 1,3 vezes menores do que com a utilização do ferro esponja.

Em função dessa parada para atender a uma necessidade da empresa, foi obrigatória a condução de um trabalho voltado para a preservação dos equipamentos, também chamado de hibernação industrial, de modo a mantê-los íntegros e a garantir que, no retorno da condição de produção da planta, esta possa voltar a produzir sem interrupções por falha dos equipamentos. Esta unidade teve sua parada operacional iniciada em março de 2009 e a maior parte de seus

equipamentos se encontram hibernados de acordo com orientações de seus fabricantes e de estudos realizados pelo próprio corpo técnico da empresa.

Uma das condições que impactam fortemente o custo operacional das plantas industriais são as paradas de equipamentos durante o *start up* e as paradas em plena operação. Com a crescente competitividade e o aumento da produtividade do setor produtivo, faz-se necessário o aumento da disponibilidade dos equipamentos.

Foram definidos alguns pontos básicos que motivaram o projeto proposto na dissertação, são eles: possibilidade de avaliação de mecanismos de deterioração de equipamentos fora de operação por longo período e os meios para atenuá-los; a possibilidade de minimizar e/ou eliminar possíveis danos aos equipamentos; diminuição do lucro cessante decorrente de uma parada operacional por quebra de equipamentos na retomada de produção. Buscou-se dar ao trabalho uma abordagem que permitisse sua aplicação em outras indústrias que pretendam, por quaisquer motivos, interromper suas atividades temporariamente e retornar quando for mais conveniente, em função das necessidades internas.

Os ativos das empresas são um fator extremamente relevante do ponto de vista dos custos de produção, fato este que se tem revelado uma preocupação na indústria mundial em relação aos impactos econômicos de uma hibernação mal avaliada ou mal conduzida dentro do âmbito industrial (AZEVEDO, 2007).

Para o estudo em questão, foi avaliado que os equipamentos caldeira auxiliar e reformador tiveram a situação mais crítica dentro do grupo de equipamentos críticos de toda a planta petroquímica de beneficiamento do minério de ferro (Processo de redução direta) que está em processo de hibernação.

A semelhança entre os dois equipamentos avaliados e escolhidos é muito grande, e, para a definição de um único equipamento, a caldeira foi escolhida como item mais crítico, pois o vapor é uma das matérias-primas para a produção de gás reformado (H<sub>2</sub> e CO), bem como o suprimento de energia para as turbinas e outras funções dentro do processo produtivo. A caldeira tem papel importante tanto do ponto de vista energético como do ponto de vista da matéria-prima que será usada na obtenção do produto final da planta a ser avaliada. Logo uma disfunção na caldeira gera no reformador um anômalia não só, do ponto de vista da produção, além de gerar um risco de dano físico.

## 1.1 O PROBLEMA

A caldeira por ser o equipamento gerador de uma dos insumos básicos para o processo, tem função crítica dentro da unidade. Por estar com o sistema sem operar, tem-se um processo de degradação da caldeira, degradação esta que deve avançar, pois o período da planta parada pode durar alguns anos

Em função dos diversos fornos que a planta possui, seus equipamentos e principalmente a caldeira devem operar continuamente e sem falhas nas condições de manter a sua função dentro do processo de geração de vapor

## 1.2 OBJETIVO

Baseando-se nas justificativas expostas acima, podem-se definir os objetivos desta dissertação, dividindo-os em um objetivo geral, que será atingido após a realização dos diferentes objetivos específicos.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Propor um modelo de avaliação e procedimento para minimizar os riscos de possíveis paradas de equipamentos críticos na partida de uma planta industrial que estava hibernada por período superior a um ano.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para conseguir alcançar o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Definir um equipamento crítico a ser avaliado como fator determinante no estudo de hibernação.
- Avaliar as características físicas do equipamento que podem sofrer interferência de mecanismos de falha durante o período de hibernação.
- Avaliar os agentes danosos presentes na atmosfera e sua interferência no processo de corrosão.
- Propor modelo de procedimentos para minimizar/eliminar possíveis causas de falhas no equipamento a ser estudado.

### 1.3 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

As degradações são comumente aceleradas em uma planta industrial quando da interrupção das suas atividades, podendo-se citar como exemplo: corrosão em estruturas metálicas; travamento de equipamentos rotativos e deformação dos seus respectivos eixos; oxidação em componentes eletrônicos; degradação de refratários por absorção de umidade; trancamento de válvulas de uma forma geral; etc. (TWIGG, 2002).

Ao determinar o(s) mecanismo(s) de degradação, cria-se a partir deste ponto um modelo de gestão que possa orientar as empresas e seus técnicos, quando se depararem com a necessidade da parada de produção. O modelo de gestão busca a garantia de que seus ativos possam ser mantidos de forma que, no retorno de suas atividades, as funções possam ser desempenhadas com confiabilidade igual ou melhor do que estavam no seu momento antes da parada.

Este estudo também vem coincidir com a fase de crise mundial iniciada em 2008. Um dos caminhos para que as empresas possam se adequar a essa nova realidade, é interromper suas atividades temporariamente, até que possam retornar à sua produção de forma natural (PRICE, 2009). Deve-se observar que, além da parada total das atividades em quaisquer que sejam os setores, muitas empresas interromperam parcialmente seus processos internos na área de produção, a depender de suas necessidades. A diminuição da produção permite compensar a perda de mercado ou mesmo alterando de alguma forma o seu produto, para este se tornar competitivo no mercado (GIAMBIAGI, 2009).

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos: Capítulo 1 – Introdução, Capítulo 2 – Revisão da Literatura Especializada, Capítulo 3 – Manutenção, Capítulo 4 – Trabalho experimental e desenvolvimento da pesquisa; Capítulo 5 – Resultados e discussão, Capítulo 6 – Considerações Finais e Conclusões.

O primeiro capítulo apresenta a introdução sobre o tema a ser abordado, ou seja, a hibernação industrial e a contextualização do trabalho dentro do âmbito da crise mundial.

O segundo capítulo trata da revisão da literatura, constando três pontos, sendo o primeiro uma revisão sucinta sobre os princípios da corrosão abordados no trabalho, e, de forma mais específica, analisado o estado da arte da corrosão atmosférica, detalhando os seus mecanismos, as variáveis ambientais, a classificação, a caracterização e os métodos de proteção contra a corrosão para aplicação em um sistema hibernado.

No terceiro capítulo, observamos a visão de manutenção, sendo que o primeiro ponto é apresentado o modelo de gestão da manutenção a ser aplicado para gerenciamento de unidades industriais, no segundo trata-se das caracterizações de um processo de hibernação de equipamentos e da definição sobre equipamentos. No terceiro fazemos referência ao equipamento a ser hibernado, características e modos de falha.

No quarto, é tratada a metodologia para a quantificação dos principais poluentes atmosféricos e simulação do meio protetor a ser usado no equipamento proposto para a preservação do equipamento, também estando especificado o modelo de gestão a ser aplicado para gerenciamento do sistema de proteção.

No quinto capítulo, são apresentados os resultados e a discussão dos experimentos, comparando-os com a revisão da literatura.

E, finalmente, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, relacionando os resultados obtidos com os objetivos propostos. São também propostas sugestões para outras linhas de trabalho relacionadas ao tema abordado.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A corrosão tem sua conceituação e base científica bem definidas. Inicialmente, é feita uma breve explanação dos mecanismos da corrosão e, posteriormente, faz-se uma abordagem detalhada da corrosão atmosférica, ressaltando sua importância. Num segundo ponto, é tratado o processo de hibernação dos equipamentos e, por fim, aborda-se o sistema de vapor, de forma a se ter uma perspectiva geral do equipamento, foco principal do tema estudado.

### 2.1 FUNDAMENTOS DA CORROSÃO

Para uma planta que está parada e sem operar, diversos artigos científicos e técnicos relativos à proteção dos sistemas de vapor exploram, de forma significativa e focada, a preservação dos componentes do sistema, tratando justamente a questão da corrosão. (TWIGG, 2002; NACE Corrosion, 1998; BRIGGS, 1997). A corrosão pode ser definida, de modo simples, como sendo a tendência espontânea do metal produzido e conformado de reverter ao seu estado original, de mais baixa energia livre. Outra definição amplamente aceita afirma que corrosão é a deterioração de propriedades e ocorre quando um material reage com o ambiente (PANNONI, 2004). A teoria eletroquímica descreve o processo de corrosão metálica como a combinação de uma reação de oxidação (anódica), como a dissolução metálica, com uma reação de redução (catódica), tais como a redução do oxigênio ou a evolução do hidrogênio. A existência do processo de corrosão está associada com a ocorrência simultânea dessas duas reações. Na reação anódica, ocorre a produção de elétrons, que são consumidos pela reação catódica.

O processo de corrosão consiste, então, num fluxo de elétrons entre o metal e as substâncias corrosivas existentes no meio, ou seja, há formação de uma corrente contínua, DC, cujos circuitos são expressos pela equação abaixo. (GENTIL, 1994):

$$E=I \cdot R$$

Equação (2.1)

Onde

E – É a tensão do circuito

R – É a resistência do circuito.

I – é a Corrente do circuito

Para medir a corrosão instantânea, basta medir a corrente do circuito de corrosão. O valor medido pode ser relacionado com a perda de massa do metal, dada pela segunda lei de Faraday (GENTIL, 1994).

$$M = \frac{k \cdot i \cdot t}{F} \quad \text{Equação (2.2)}$$

Sendo:

M: Massa perdida pelo metal

K: Equivalente eletroquímico do metal (è igual a massa atômica dividida pelo número de elétrons cedidos)

I: Corrente de corrosão

T: Tempo

F: Capacitância

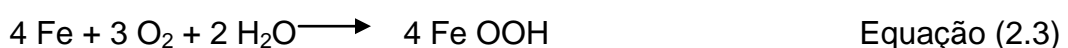
Essa perda de massa tem sua medida expressa sob a forma  $ML^2 T^{-1}$ :

$mg \, dm^{-2} \, dia^{-1}$ ;  $gm^{-2} \, h^{-1}$

O processo corrosivo é uma sucessão de etapas químicas e eletroquímicas. A classificação da corrosão pode ser feita tanto em relação a sua morfologia quanto a sua fenomenologia. Quanto à forma, os tipos de corrosão podem ser uniforme, localizado, seletivo e intergranular ou transgranular. Quanto à fenomenologia, a corrosão pode ser: galvânica; por célula oclusa, corrosão-erosão; por fadiga; sob tensão; atmosférica; microbiológica e ataque por hidrogênio. As formas mais comuns de corrosão que acometem o aço carbono são: corrosão uniforme, galvânica, por frestas e também por pites, menos comum, mas não menos importante (JAMBO, 2009). De uma forma geral, os tubos das caldeiras são compostas por aços ASTM A 106, que são tubos de aço carbono de baixa liga. Em função disso, são estudados apenas os tipos de corrosão que aparecem com mais facilidade nesse tipo de equipamento.

O potencial termodinâmico da reação é a tendência do ferro a se combinar com o oxigênio dissolvido em água. Na ausência de água e oxigênio, pode-se afirmar que o ferro não sofre corrosão.

Como observa Pannoni (2009), na presença desses dois componentes, a reação global é dada por:



Durante o processo de hibernação a prevenção para evitar a corrosão na superfície interna dos tubos, é injetado de  $N_2$  de maneira contínua e também por uma adição de cal seco de forma a absorver qualquer resíduo de umidade. A superfície externa dos tubos da caldeira está susceptível apenas à corrosão atmosférica, onde a umidade e oxigênio do ar podem iniciar a reação acima. Dessa maneira, torna-se essencial uma análise mais aprofundada sobre este tema.

## 2.2 CORROSÃO ATMOSFÉRICA

O termo "corrosão atmosférica" compreende o ataque de metais expostos ao ar ao invés do metal imerso num líquido. A corrosão atmosférica poderá ocorrer em qualquer metal exposto à atmosfera terrestre e em temperaturas normais. Estruturas, veículos, equipamentos de processo e eletrônicos estão sujeitos a esse tipo de corrosão (JAMBO, 2008).

É um dos fenômenos que causam maiores perdas em relação ao processo de degradação de estruturas e equipamentos em meios industriais, rurais e urbanos. Há um grande número de artigos e outras publicações científicas relacionados ao tema da corrosão atmosférica no Brasil, existindo diversos autores que desenvolveram trabalhos relacionados a este tema: Vianna e Dutra realizaram ensaios de corrosão em diferentes regiões e Pannoni e Marcondes estudaram o efeito da composição química da liga aço ante a corrosão atmosférica dos aços (apud GENTIL, 1996).

A corrosão atmosférica é um processo eletroquímico que ocorre em pilhas locais, sendo, assim, necessária a presença de eletrólito para que isso aconteça e, geralmente, é formada pela condensação da água sobre a superfície metálica. A formação do filme de água dependerá da umidade relativa do ar, ou seja, a razão da pressão parcial do vapor d'água pela pressão de saturação. Abaixo de certo valor de umidade relativa (umidade crítica), o filme de água condensada sobre a superfície metálica é extremamente fino. Acima da umidade crítica, a corrosão aumenta proporcionalmente à umidade relativa. A umidade crítica depende do metal e dos contaminantes atmosféricos, tais como agentes poluentes higroscópicos. A ação corrosiva da atmosfera depende essencialmente das seguintes variáveis: umidade relativa; substâncias poluentes (particulados e gases); temperatura e tempo de



permanência do filme de eletrólito na superfície metálica (GENTIL, 1996; ROBERGE, 2000; PANNONI, 2009).

O impacto da umidade relativa do ar na velocidade de corrosão do ferro, pode ser visualizado na Figura 1. Em atmosfera de baixa umidade, o metal praticamente não sofre corrosão.

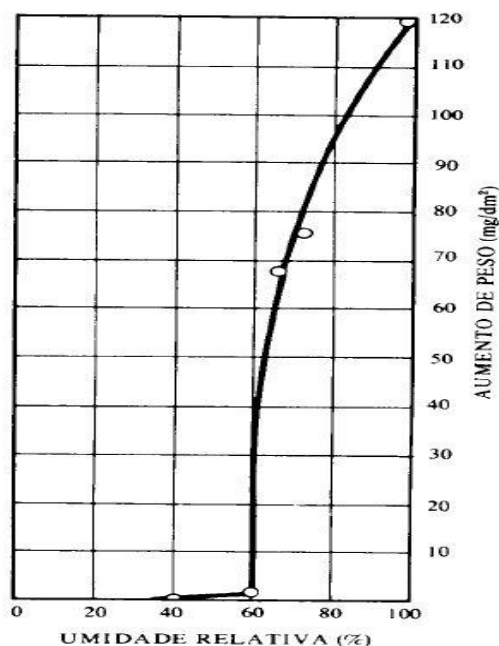


Figura 1: Gráfico da influência da umidade na ação corrosiva da atmosfera. Atmosfera contendo CO<sub>2</sub>. Fonte: Gentil (1996)

A taxa de corrosão aumenta consideravelmente quando a umidade relativa ultrapassa os 60%, tornando-se acelerada acima do valor de 70%. Porém, esta relação entre velocidade de corrosão e umidade, pode mudar em função dos contaminantes e do tipo de material (GENTIL, 1996; ROBERGE, 2000).

Em função do grau de umidade da superfície metálica, a corrosão atmosférica pode ser classificada em três níveis: seca, úmida e molhada. A corrosão seca ocorre sem a presença de água e sem a presença de filme eletrolítico na superfície. A oxidação do metal é lenta, com formação do filme de corrosão, sendo o mecanismo considerado puramente químico. A corrosão úmida ocorre em atmosferas com umidade relativa inferior a 100%. Há um fino filme de eletrólito, depositado na superfície metálica, e a velocidade do processo corrosivo depende da umidade relativa, poluentes atmosféricos e higroscopicidade dos produtos de corrosão. Já na

corrosão atmosférica molhada, a umidade relativa está perto de 100%, e ocorre condensação na superfície metálica, observando-se que a superfície fica molhada com eletrólito, como, por exemplo, chuva e névoa salina depositada na superfície metálica (GENTIL, 1996).

- **Classificação das atmosferas**

Em função da corrosão ser afetada pelas condições ambientais do local onde ela ocorre, as atmosferas são geralmente divididas nas seguintes categorias:

- Rural: é uma atmosfera ao ar livre, distante dos centros urbanos e de suas fontes poluidoras, com a característica de baixo teor de poluentes.
- Industrial: é uma atmosfera ao ar livre, porém dentro de ambientes das indústrias ou de sua periferia, caracterizada pelo alto teor de contaminantes tipo gases e cinzas. Como exemplo de seus contaminantes, temos o enxofre, oriundo do dióxido de enxofre ou sulfeto de hidrogênio, que são importantes para esse processo (SCHWEITZER, 1999). A queima de combustíveis fósseis é um grande gerador do dióxido de enxofre e enxofre contidos na mistura da queima. (SCHWEITZER, 2007).
- Marinha: constitui uma atmosfera ao ar livre, próximo à costa ou sobre ela. Esta atmosfera é rica em cloreto de sódio, que pode aparecer na forma de cristais ou como gotículas de água salgada. A influência da atmosfera está diretamente ligada à distância do ponto analisado até a beira do mar, ou seja, quanto maior a distância, menor o efeito dessa atmosfera no processo corrosivo, Como exemplo da influência da distância, constatou-se que a estação de teste atmosférico da praia de Kure, na Carolina do Norte, apresentou, em uma peça de aço a 24 metros da praia, uma corrosão 10 a 15 vezes mais rápida que uma peça que estava a 243 metros da praia (SCHWEITZER, 2007).
- Urbana: é uma atmosfera ao ar livre, nas cidades e seus centros populacionais, que contém normalmente impurezas que podem aparecer na forma de óxidos de enxofre ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ) e fuligem. A formação de  $\text{NO}_x$  se dá a partir da queima de combustíveis dos carros, sendo que esta mistura pode ser oxidada, transformando-se em  $\text{HNO}_3$  (PANOSSIAN, 1993; SCHWEITZER, 2007).

Na Tabela 1, podemos observar a velocidade de deposição do SO<sub>2</sub> em diferentes tipos de atmosfera.

Tabela 1: Magnitude da velocidade de deposição do SO<sub>2</sub> em diferentes tipos de atmosfera. Fonte: (PANNONI Apud ISO/DP 9223, 2009, p.13).

Tipo de atmosfera	Velocidade de deposição (mg SO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )
Rural	< 10
Urbana	10 – 100
Industrial	Até 200

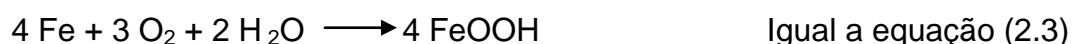
Por causa da variação das condições ambientais, um material que é resistente à corrosão em uma área, pode não ser em outra.

Para uma composição do problema, não há uma linha clara de demarcação entre os tipos de atmosferas. Em muitos casos, não existe uma atmosfera puramente rural ou urbana. A contaminação em atmosferas industriais e marinhas acha o caminho com base em ventos prevalentes e outras condições atmosféricas (SCHWEITZER, 2007).

### 2.2.1 Mecanismos de corrosão do ferro e aço carbono

O aço carbono polido, livre de qualquer contaminação, quando exposto em atmosferas limpas e temperaturas ambientes, sofre corrosão formando uma camada de produtos sobre a sua superfície. A composição destes produtos de corrosão depende da natureza do eletrólito presente na superfície do metal e das condições atmosféricas.

A corrosão atmosférica de um aço carbono pode ser descrita, de forma simplificada, pela reação (PANNONI, 2009):



O composto FeOOH designa, de modo genérico, a ferrugem. Na realidade, a ferrugem é uma mistura complexa de várias fases cristalinas e amorfas de óxidos e hidróxidos de ferro, cuja estequiometria corresponde aproximadamente à fórmula global FeOOH. Os três principais componentes da ferrugem são, respectivamente, a lepidocrocita ( $\gamma$ -FeOOH), a goethita ( $\alpha$ -FeOOH) e a magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) (PANNONI, 2009).

A composição da ferrugem varia em função das condições climáticas, da natureza do eletrólito presente na superfície do metal e da duração da exposição. Ela também varia, morfológica e quimicamente, do interior para o exterior da camada. A parte exterior é geralmente porosa, desagregada e friável, sendo constituída principalmente de goethita e lepidocrocita. A parte interior, adjacente ao metal, é, em geral, relativamente densa e mais aderente, sendo formada por magnetita e fases amorfas de FeOOH. (PANNONI, 2009).

A Figura 2 mostra o esquema, ilustrando o mecanismo de corrosão de um aço carbono com as semi reações indicadas. Quando a superfície de aço é exposta à atmosfera, é rapidamente recoberta por uma fina camada de produtos de corrosão. Esta reação acontece tão mais rapidamente quanto mais úmida e contaminada com poluentes atmosféricos for a superfície. O oxigênio existente no ar possui uma solubilidade apreciável (8,1 mg.L<sup>-1</sup>, a 25 °C, nível do mar) na película líquida de água depositada sobre o metal (PANNONI, 2009). Esse oxigênio é reduzido a íons OH<sup>-</sup> na superfície metálica, enquanto o ferro é oxidado a íon Fe<sup>2+</sup>, solúvel no eletrólito.

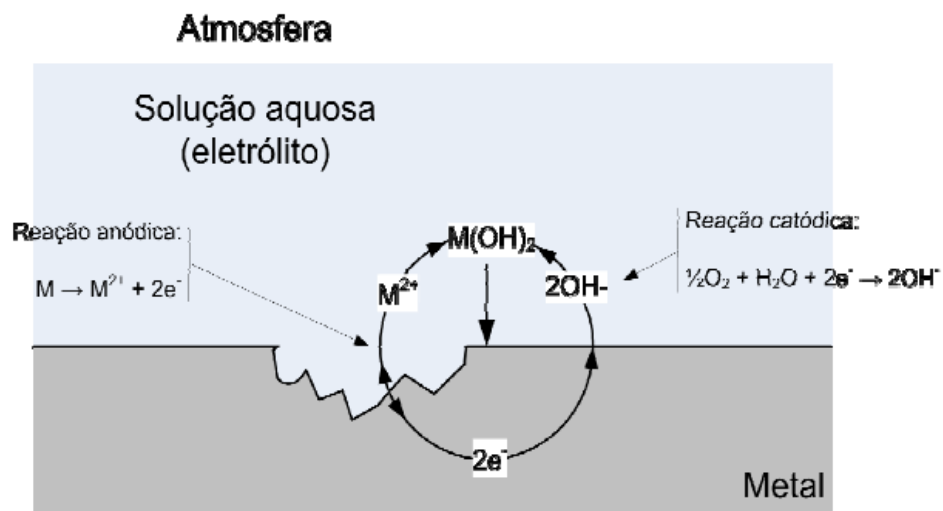
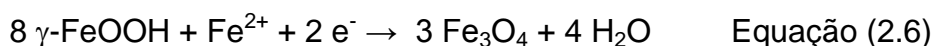


Figura 2: Esquema ilustrando a corrosão úmida de um aço carbono em um eletrólito contendo oxigênio: o mecanismo eletroquímico. Fonte: Pannoni (2009, p. 8).

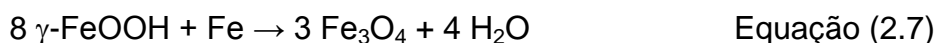
Os íons ferrosos em solução reagem com as hidroxilas, formando, após uma série de etapas,  $\gamma$  FeOOH, segundo a reação abaixo (PANNONI, 2009).



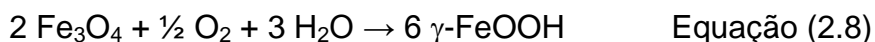
Desse modo, a camada de lepidocrocita é desenvolvida, recobrando a superfície e levando à diminuição dos sítios ativos onde ocorre a oxidação do ferro a íon ferroso. Ao mesmo tempo, a difusão do oxigênio vai sendo limitada pela barreira de lepidocrocita formada e depositada. Quando a concentração de oxigênio se torna suficientemente pequena, a lepidocrocita reage, por sua vez, com os íons  $\text{Fe}^{2+}$  em fase aquosa, gerando uma camada de magnetita, segundo a reação (PANNONI, 2009):



Como reação global, temos:



Essa reação acontece, costumeiramente, em períodos chuvosos, quando há excesso de água. A fase  $\gamma\text{-FeOOH}$  se comporta, desse modo, como um agente oxidante do ferro, semelhante ao oxigênio do ar, dissolvido na água. Durante os períodos secos, quando há pouca água e a concentração de oxigênio é alta, a magnetita reage com o oxigênio do ar, de acordo com Pannoni (2009):



Assim, observa-se um fenômeno cíclico entre as fases “úmidas” e “secas”, levando à transformação da lepidocrocita a magnetita (e, em seguida, da magnetita a lepidocrocita), com consumo metálico contínuo, prosseguindo o processo de enferrujamento. Mais detalhes sobre o mecanismo de corrosão podem ser encontrados em literatura específica (PANNONI, 2009).

### 2.2.2 Velocidade da corrosão

De forma geral, o processo de corrosão atmosférica depende da disponibilidade de oxigênio e água sobre a superfície metálica, como visto anteriormente. Quando produtos de corrosão são depositados sobre a superfície metálica, eles podem causar uma redução do suprimento de oxigênio que chega à interface metal/eletrólito sobre a superfície metálica. O oxigênio deve-se difundir através desses depósitos, que formam, de modo geral, uma camada mais ou menos contínua. Como a velocidade de dissolução do metal é igual à velocidade de redução do oxigênio, um suprimento limitado deste levará à redução da velocidade

de corrosão metálica. Neste caso, diz-se que a corrosão está sob controle catódico. Este é um mecanismo muito comum de contenção da corrosão ou seja o abaixamento do potencial de um metal para a região de imunidade, sendo este o princípio básico da proteção catódica(Ex: Com ânodo de sacrifício; Corrente impressa). Entretanto se os produtos de corrosão forem removidos da superfície metálica através da passagem de um líquido, a velocidade de corrosão voltará a crescer (GENTIL, 1996; PANNONI, 2008).

Em certas situações rotineiras, os produtos de corrosão formam uma película superficial bastante densa e contínua de óxidos cujas estruturas cristalográficas são bastante aparentadas àquelas apresentadas pelo metal (Epitaxia). Películas desse tipo dificultam em muito a saída de íons metálicos para a solução aquosa, de modo que a velocidade de corrosão, nestas condições, costuma ser muito pequena (PANNONI, 2002). Nestes casos, o controle da reação é anódico, e este fenômeno é chamado de passivação; frequentemente observado em materiais como os aços inoxidáveis e o alumínio quando expostos a ambientes naturais. De forma geral, a taxa de corrosão varia de acordo com a agressividade da atmosfera: em atmosferas de baixa e média agressividade.

A Figura 3 mostra a avaliação da velocidade de corrosão, resultado de ensaios durante o período de três anos realizados em dez localidades de diferentes agressividades da cidade de São Paulo e áreas vizinhas, que permitiram caracterizar os ambientes quanto a sua agressividade ao material ensaiado (aço carbono AISI 1005). Para esta experiência, foi adotado o método da perda de massa de um material tomado como referência, sendo o aço carbono o mais comumente utilizado. Verificou-se que, das dez localidades avaliadas, em sete delas havia a diminuição da taxa de perda de espessura do aço carbono. Por outro lado, em três locais de alta agressividade foi observado o comportamento oposto (PANOSSIAN, 1993). A taxa de corrosão do aço carbono, no início do processo de exposição, é muito alta. Com a passagem do tempo, observa-se uma diminuição da velocidade, principalmente em ambientes menos poluídos, pois no início do processo corrosivo, os óxidos e hidróxidos formados como resultado do metal/meio são muito porosos, não dispendo de propriedades protetoras. Com o decorrer do tempo, a camada de óxido e hidróxido cresce, transformando em uma barreira entre o metal e o meio.

Sendo tanto mais eficiente quanto maior for sua espessura. Entretanto, em ambientes de alta agressividade, pode-se observar o aumento da taxa de corrosão.

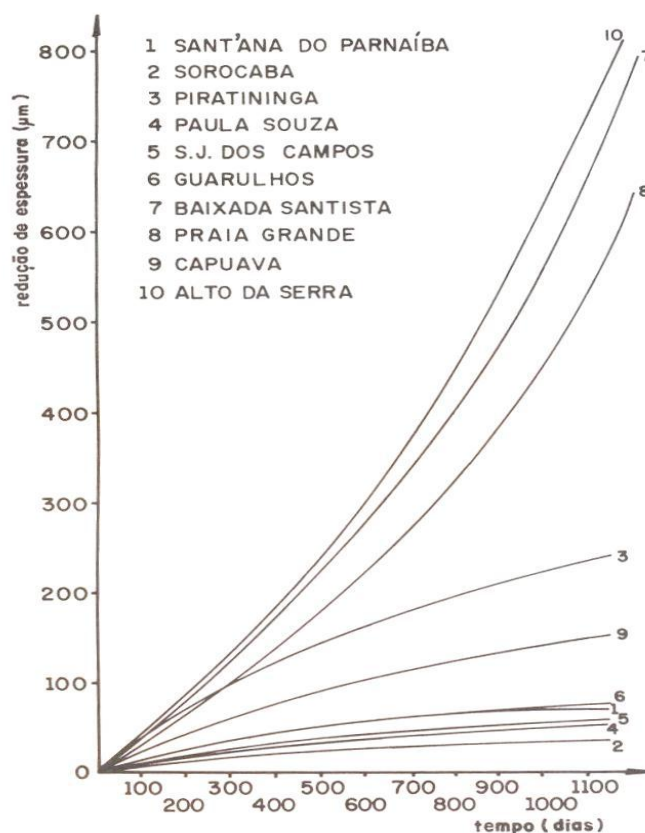


Figura 3: A perda de espessura do aço carbono ( $\mu\text{m}$  em função do tempo de exposição em dez locais de diferentes agressividades)(ABNT 1005). Fonte: Panossian (1993, p.328).

### 2.2.3 Influência da composição da atmosfera no processo de corrosão

Quando expostos à atmosfera, à temperatura ambiente, em um ambiente seco, os metais, em sua maior parte, formam espontaneamente uma película muito fina de óxidos sólidos. Se o óxido é estável, a velocidade de crescimento cessa após determinado tempo, e o óxido atinge uma espessura máxima, estável, de 1 a 5 nm, entretanto os poluentes atmosféricos podem alterar drasticamente este quadro (GERHARDUS, 2002).

Foi o trabalho pioneiro de Vernon e Hudson em 1927 com a descoberta do “Princípio da umidade relativa crítica” que levou a área da corrosão atmosférica ao nível de ciência. Ele descobriu que a velocidade de corrosão de diferentes metais

crece rapidamente acima de certo nível de umidade relativa – a chamada “umidade crítica”; ele também foi o primeiro cientista a demonstrar o efeito acelerador combinado da umidade relativa com o SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre) sobre a velocidade da corrosão atmosférica de metais. Em anos subsequentes, Evans, Rozenfeld, Kaesche e outros demonstraram que os processos eletroquímicos desempenham papel fundamental no processo. Evans teve como proposta inicial a oxidação do aço como processo eletroquímico, sendo o primeiro artigo datado de 1963 e o último, em colaboração com C.A.J. Taylor, em 1974. Tornou-se, então, evidente que a corrosão atmosférica dos metais envolve um grande número de processos eletroquímicos, químicos e físicos de corrosão (PANNONI, 2009; MIRANDA, 1980).

#### **2.2.4 A atmosfera**

Os principais constituintes da troposfera – a região da atmosfera mais próxima ao solo – são o nitrogênio (N<sub>2</sub>), o oxigênio (O<sub>2</sub>) e os gases raros (Ne, Kr, He e Xe). Esses gases compreendem mais de 99,9% em peso de todas as moléculas envolvidas. Entre essas, o nitrogênio e os gases raros não apresentam importância no processo de corrosão atmosférica, devido à sua incapacidade de reagir com as superfícies metálicas (SCHWEITZER, 2007).

O oxigênio é, entre os materiais da troposfera, o único que desempenha um papel no processo de corrosão, devido à sua participação na reação catódica e seu envolvimento nas transformações químicas que ocorrem na atmosfera. Outras espécies que interferem no processo de corrosão atmosférica são a água (H<sub>2</sub>O) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A água age como um eletrólito, enquanto o dióxido de carbono, que está presente na atmosfera numa concentração de aproximadamente 330 ppm, é altamente solúvel em água e contribui para a acidez da camada aquosa.

Do ponto de vista prático, o efeito estimulador do SO<sub>2</sub> é observado em áreas urbanas com grande população, grande número de veículos automotores, de indústrias e de estruturas. De modo geral, a corrosão atmosférica estimulada pelos compostos de enxofre está restrita às áreas (cidades; indústrias) de onde esses compostos se originam. O SO<sub>2</sub> é considerado um gás muito reativo, assim, ele reagirá com metais e materiais diversos localizados em pontos próximos à sua emissão, ficando aí retido. (PANOSSIAN, 1993).



A ordem de grandeza da deposição do SO<sub>2</sub>, em diferentes tipos de atmosfera, está descrita na Tabela 11.

Traços de outros gases presentes com um total de concentração menores do que 10 ppm, incluindo O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl; Cl<sub>2</sub>; HCHO, E HCOOH, são também importantes na corrosão atmosférica. É natural que os processos causados pelo homem sejam responsáveis pelo aparecimento desses gases, porém estes podem sofrer uma variação média de sua presença na atmosfera (SCHWEITZER, 2007). A Tabela 3, a seguir, traz a concentração média, no ar, dessas substâncias.

A presença dessas espécies pode ser devida tanto a processos naturais quanto antropogênicos, e elas podem sofrer uma série de transformações durante seu transporte na troposfera. Como todas as espécies são reativas, elas possuem certo valor de vida média, que muitas vezes é limitada pela habilidade dessas espécies em reagir com oxidantes atmosféricos, principalmente o radical hidroxila (OH<sup>·</sup>) e o ozônio (O<sub>3</sub>).

Tabela 2: Concentração média de espécies agressivas no ar (ppb). Fonte: Pannoni (2009, p.12)

Espécie	Ambiente Externo	Ambiente interno
O <sub>3</sub>	4 -12	3 – 30
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	10 - 30	5
SO <sub>2</sub>	1 – 65	0,3 – 14
H <sub>2</sub> S	0,7 – 24	0,1 – 0,7
NO <sub>2</sub>	9 – 78	1 – 29
HNO <sub>3</sub>	1 – 10	3
NH <sub>3</sub>	7 – 16	13 – 259
HCl	0,18 – 3	0,05 – 0,28
Cl <sub>2</sub>	< 0,005 – 0,008	0,001 – 0,005
HCHO	4 – 15	10
HCOOH	4 - 20	20

### 2.2.4.1 Umidade

A umidade relativa do ar ( $\Phi$ ) é definida como sendo a razão entre a fração molar do vapor de água no ar e a fração do vapor de água no ar saturado à mesma temperatura a pressão total (STOECKER, 1982). Esta umidade relativa pode ser expressa em função da pressão, sendo P1 a pressão parcial do vapor d' água no ar e P2 a pressão de vapor saturado, na mesma temperatura; ela é expressa em percentagem (Gentil 1996):

$$UR = \left( \frac{P_1}{P_2} \right) * 100 \quad \text{Equação (2.9)}$$

De acordo com a umidade relativa, podemos caracterizar o ar como sendo:

- Seco                                      UR até 30%
- Normal                                   UR entre 50 e 60%
- Úmido                                    UR entre 80 e 90%
- Saturado                                UR de 100%

A umidade do ar possui um papel de mais alta importância entre os fatores que afetam a velocidade da corrosão atmosférica, porém somente a presença de água não é suficiente para termos uma corrosão agressiva. A Figura 4 mostra a variação da taxa de corrosão do ferro de acordo com a umidade relativa em três atmosferas distintas (ar puro, presença de 0,01% de SO<sub>2</sub> e ar sintético com 0,01% de SO<sub>2</sub> e partículas de carvão). Ao se adicionar contaminantes na atmosfera, observamos as seguintes situações: Apesar de a umidade estar muito elevada no ponto A (99%), por um longo tempo, a corrosão permanece baixa, verificando que o ambiente está isento de poluentes. Em oposição à curva "A", a curva "B", que tem uma composição de ar com 0,01% de SO<sub>2</sub> de contaminantes, apresentou um aumento significativo da velocidade. No ponto C apesar de termos uma umidade ainda alta, porém sua velocidade de corrosão foi acelerada de forma vertiginosa com a adição de 02 contaminantes o SO<sub>2</sub> e partículas de carvão. Concluímos com este gráfico que a adição de elementos poluidores agressivos acelera a corrosão de forma acentuada.

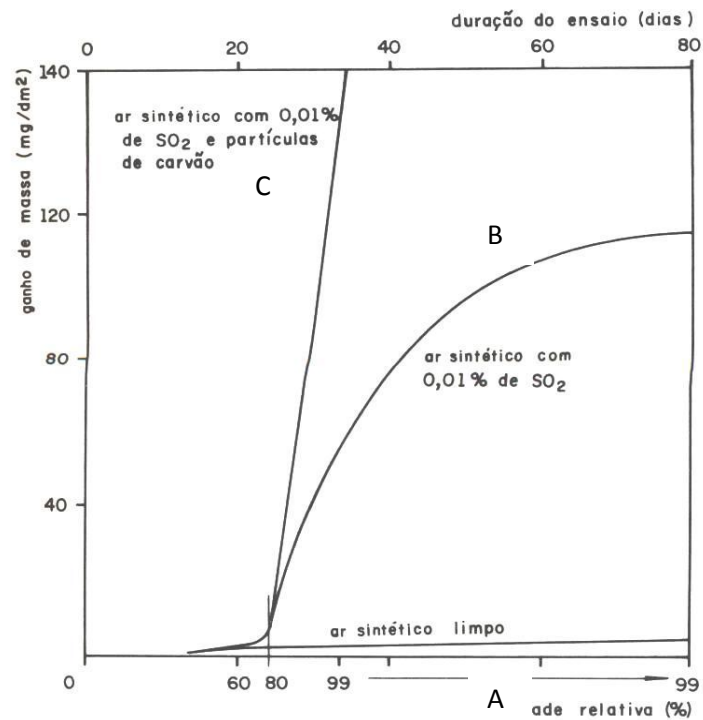


Figura 4: Efeito da umidade relativa na taxa de corrosão do ferro em três tipos de atmosferas a – Ar puro; B Ar sintético com 0,01% de SO<sub>2</sub>; Ar sintético com 0,01% de SO<sub>2</sub> e partículas de carvão. Fonte: Woly nec (1992, p.4)

A umidade crítica é definida como o valor de umidade relativa acima da qual o metal começa a se corroer de maneira apreciável. Em um determinado meio, a umidade crítica para um metal depende das propriedades higroscópicas dos produtos de corrosão formados. Várias observações mostraram que existe uma relação definida entre a velocidade de corrosão de um metal na atmosfera e a frequência, no tempo, com que se alcança essa umidade crítica. Esta é, indubitavelmente, a razão pela qual a corrosão é acelerada em um clima úmido (PANOSSIAN, 1992).

Segundo Woly nec (apud BOYD), o tipo de acabamento superficial também tem influência na umidade crítica, sendo que a superfície rugosa condensa a umidade a uma pressão de vapor menor que a superfície lisa. Diferentes metais têm comportamento variado com relação corrosão. (WOLYNEC, 1992).

O aumento considerável da taxa de corrosão dos metais, a partir da umidade crítica está relacionado com a formação de uma camada de água presente na superfície do metal, como resultado da adsorção de vapor d'água presente na atmosfera. Esta adsorção é caracterizada pelos seguintes fatores (PANOSSIAN, 1993):

Na Figura 5, verifica-se que os pontos de condensação de água na superfície de um metal por efeito de capilaridade.

- a) Presença de imperfeições na superfície do metal; a adsorção é favorecida por efeito da capilaridade.
- b) Presença de depósitos na superfície do metal. A adsorção é favorecida tanto por efeito da capilaridade (frestas na interface metal/depósito), quanto pela capacidade de adsorção de vapor d'água de certos tipos de depósitos (partículas higroscópicas).
- c) Presença de produtos de corrosão; neste caso, os poros presentes na camada de produtos podem facilitar a adsorção por efeito da capilaridade ou, ainda, os produtos de corrosão podem ser higroscópicos e, portanto, possuem capacidade intrínseca em absorver água.

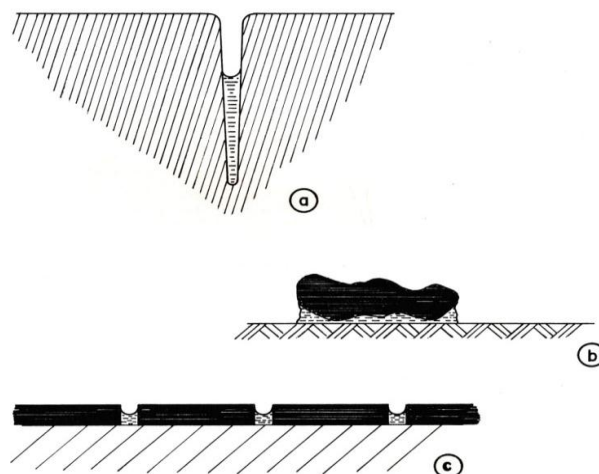


Figura 5: Pontos de condensação de água na superfície de um metal por efeito de capilaridade:. a) Causado por imperfeições na superfície do metal; b) causado pela adsorção de água favorecida em depósitos sólidos; c) Através de poros formados pelos produtos de corrosão. Fonte: Panossian (1993, p.320).

A natureza dos produtos de corrosão e das partículas sólidas presentes na superfície dos metais tem efeito marcante no valor da umidade relativa crítica, pois existe uma relação entre este parâmetro e o grau de higroscopicidade dos compostos presentes na superfície metálica. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos por Bukowiecki, citado no trabalho de Kucera e Talbot, com diferentes sais depositados sobre a superfície dos aços expostos em câmara de umidade controlada, sendo a temperatura mantida a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Pode-se observar que, quando sobre o aço estão presentes partículas de cloreto de zinco, a umidade relativa crítica é de 10% e, quando se tem sulfato de cálcio, a umidade relativa crítica é de 90% (PANOSSIAN, 1993).

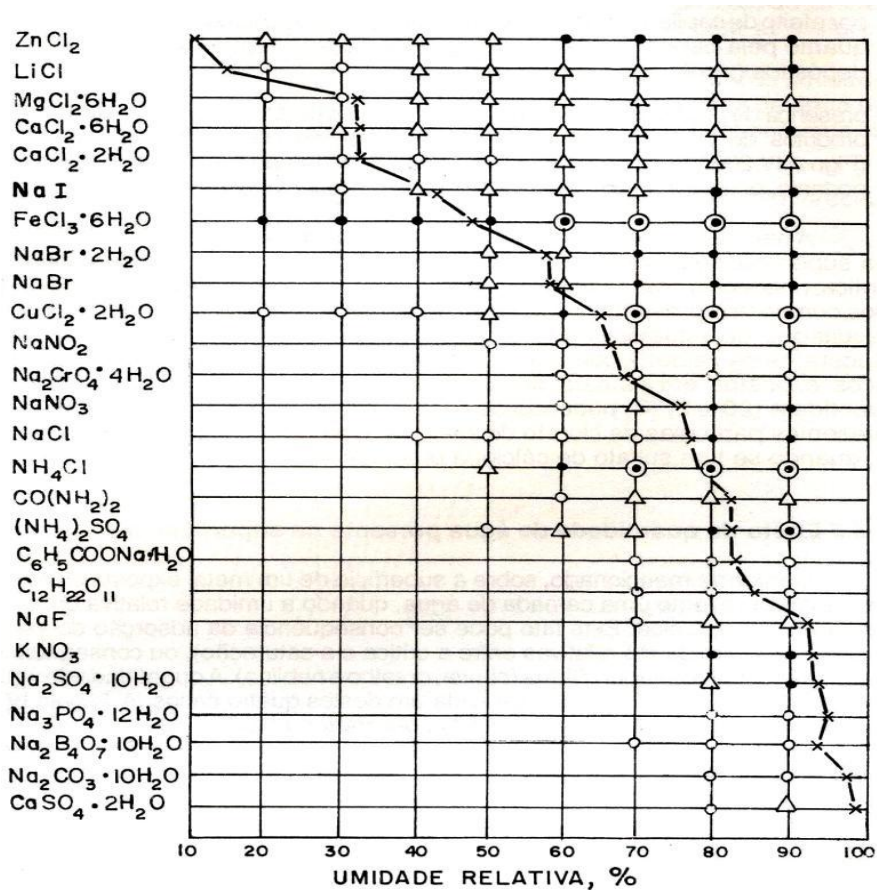


Figura 6: Gráfico de ensaios de corrosão com diferentes sais depositados sobre a superfície do aço, em função da umidade relativa. Ensaios com duração de sete dias x umidade relativa crítica na qual o sal se torna higroscópico ; ∅ não é observada corrosão ; Δ perda de massa = (2 – 5)MG; perda de massa = (6 – 20)MG; Θ perda de massa = (21 – 100)MG ; ∅ perda de massa > 100mg. Fonte: Panossian (apud KUCERA,1993, p.321).

A quantidade de vapor d'água presente na atmosfera varia de acordo com as condições climáticas e geográficas de cada região estudada. Para cada temperatura, existe um valor máximo de quantidade de vapor que uma atmosfera pode reter. Ao atingir esse valor máximo, dizemos que a atmosfera está saturada. Quando a superfície do metal é exposta a uma atmosfera úmida saturada, poderá haver condensação de água sobre ela se a sua temperatura for inferior à ambiente. Este evento pode ser evidenciado através do diagrama de Moiller. Conforme Figura 7, vemos que, se o ponto X representa as condições de 25°C e 60% de umidade relativa e se, à noite, ocorre possivelmente um abaixamento de temperatura para 15°C, tem-se um valor de 100% de umidade relativa e, como consequência, há a condensação.

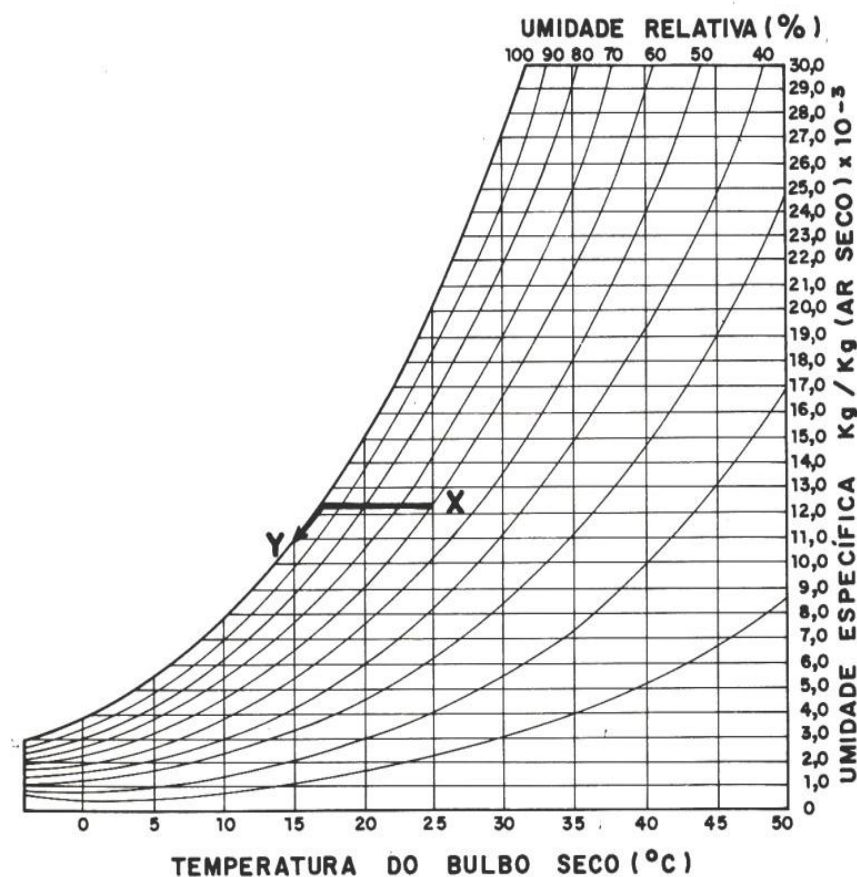


Figura 7: Diagrama de Moiller – Ilustração de um caso de umidade num ambiente a 25 °C e 60% U.R. (ponto x), quando a temperatura baixa para 15 °C (ponto y). Fonte: Panossian (1993, p.318).

O processo de corrosão atmosférica pode ser visto como um processo intermitente, descrito, de modo conveniente, pela equação (SCHWEITZER, 1999):

$$K = \sum_1^n \tau_n \cdot v_k(n) \quad \text{Equação (2.10)}$$

Onde:

$K$  = efeito acumulado da corrosão;

$\tau_n$  = tempo de umedecimento, isto é, o período de tempo que uma superfície metálica fica recoberta por uma camada de eletrólitos, como a água;

$v_k$  = velocidade média de corrosão durante os períodos individuais de umedecimento.

Assim, o efeito total da corrosão ao longo de um período de tempo é determinado pelo tempo total de umedecimento e pela composição do eletrólito, que, em conjunto com a temperatura, determinam a velocidade de corrosão. A Figura 8 ilustra efeito do umedecimento na corrosão do aço. Os parâmetros que afetam o tempo de umedecimento e a composição da película de eletrólitos superficiais são brevemente descritos a seguir.

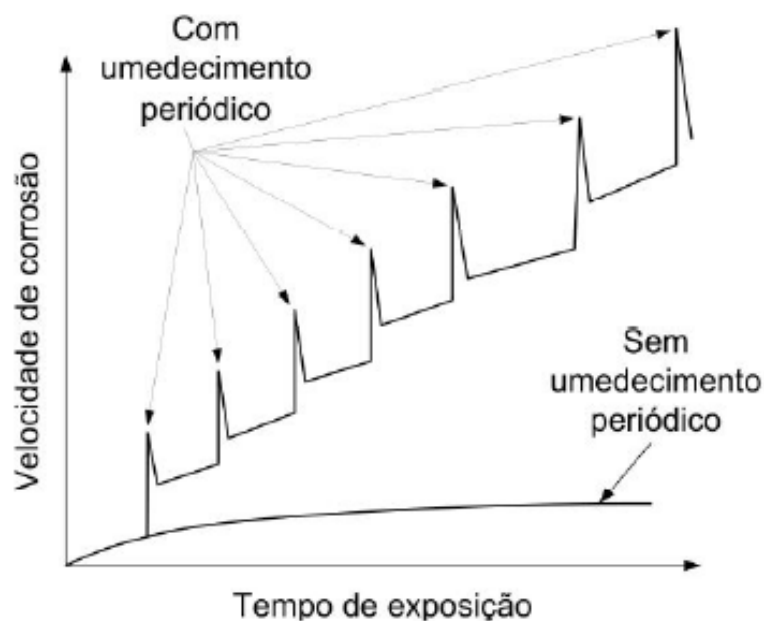


Figura 8: Gráfico do efeito acumulado da corrosão, esquemático. Velocidade de corrosão do aço carbono exposto à umidade relativa de 90%, com e sem umedecimento periódico. Fonte: Pannoni (2003, p.12)

O termo tempo de umedecimento corresponde ao tempo decorrido durante o qual a superfície metálica fica coberta por uma película de água líquida, o que torna a corrosão atmosférica possível (sendo maior quando a umidade relativa é  $\geq 80\%$ ). O tempo de umedecimento varia com as condições climáticas locais, depende da umidade relativa da atmosfera, da duração e frequência da chuva, neblina e orvalho, da temperatura do ar e da superfície metálica (acima de  $32^{\circ}\text{F}/0^{\circ}\text{C}$ ), assim como da velocidade dos ventos e horas de insolação. Em relação à chuva, a situação é benéfica, pois pode haver a solubilização dos sais presentes na superfície metálica. Entretanto, se houver frestas ou regiões de estagnação, as soluções dos sais podem ficar depositadas e aumentam a condutividade do eletrólito, acelerando o processo corrosivo (GENTIL, 1999).

#### 2.2.4.2 Camadas adsorvidas

A quantidade de água adsorvida sobre a superfície metálica depende da umidade relativa da atmosfera e das propriedades químicas e físicas dos produtos de corrosão. A superfície metálica pode ser umedecida por sais higroscópicos que, depositados ou formados através do processo de corrosão, retêm água. A corrosão cresce muito quando a umidade relativa é alta, fazendo com que o sal absorva água e se dissolva sobre o metal. A umidade crítica relativa corresponde à pressão de vapor acima de uma solução saturada do sal presente (Pannoni 2009).

A absorção de camadas de eletrólito na superfície do metal pode ser resultado da condensação capilar (A taxa de corrosão é diretamente influenciada pela quantidade de água presente na superfície de corrosão. Vários pesquisadores têm mostrado que a velocidade de corrosão acima da umidade relativa crítica cresce drasticamente com o acréscimo da umidade relativa e da concentração dos agentes poluentes (PANNONI, 2009 ; PANOSSIAN, 1993; SCHWEITZER, 2007). .

A quantidade de água presente em uma superfície metálica em relação às condições de umidade foram estimadas aproximadamente da seguinte forma, conforme Tabela 3 (SCHWEITZER, 1999):



Tabela 3: Estimativa da quantidade de água existente sobre as superfícies metálicas para diferentes condições climáticas. Fonte: Schweitzer (1999, p.16)

Condições	Quantidade de água (g/m <sup>2</sup> )
Umidade relativa crítica	0,01
100% de umidade relativa	1
Coberto por orvalho	10
<b>Molhado pela chuva</b>	<b>100</b>

Os constituintes gasosos da atmosfera se dissolvem nas camadas de água adsorvida na superfície metálica. Num estudo utilizando microbalança de cristal de quartzo, Schweitzer (1999) determinou o número de monocamadas de água adsorvidas em aço, quando exposto a ambientes com diferentes umidades relativas. Observou-se que, em atmosferas com valores de umidade acima de 60%, ocorre adsorção de água suficiente para a dissolução dos contaminantes gasosos como o SO<sub>2</sub>, causando variação na umidade crítica e, conseqüentemente, acelerando os processos de corrosão. Monocamadas são filmes finos nano estruturados ou películas com espessura monomolecular que se formam sobre uma superfície de uma subfase aquosa. Elas são formadas pelo espalhamento de pequenas quantidades de moléculas com características anfífilas na interface ar-água, seja por soluções diluídas ou pelo pequeno volume aplicado. (GUIMARÃES 2009).

A Tabela 4 refere-se ao número aproximado de monocamadas de água a 25°C e condições estáveis a diferentes umidades relativas.

Tabela 4: Número aproximado de monocamadas de água *versus* umidade relativa  
Fonte: Schweitzer (1999, p.17)

Umidade relativa(%)	Número de monocamadas
20	1
40	1,5 – 2
60	2 – 5
80	5 – 10

A maneira como cada contaminante dissolvido no filme aquoso vai influenciar na corrosão depende da sua natureza e concentração. Os contaminantes mais críticos, SO<sub>2</sub> e cloretos, serão discutidos nos sub itens 2.2.2.4 e 2.2.4.5.

### 2.2.4.3 Camadas condensadas de orvalho

A formação de orvalho ocorre quando a temperatura da superfície metálica está abaixo do ponto de orvalho da atmosfera. Isso pode ocorrer em áreas externas, durante a noite, quando a temperatura da superfície diminui através da transferência de calor radiante entre a estrutura metálica e a atmosfera. Outra razão para a formação do orvalho pode ser encontrada no início das manhãs, quando a temperatura do ar aumenta mais rapidamente que a temperatura do metal, especialmente se a massa do metal for grande, portanto, sua capacidade calorífica será alta. O orvalho também pode-se formar durante a estocagem em locais fechados, mais aquecidos do que o ambiente (frio) existente durante o transporte (PANNONI, 2009).

A concentração de contaminantes no orvalho é maior que na água da chuva, o que leva a menores valores de pH. Em áreas industriais pesadas, existem relatórios que indicam o valor do pH do orvalho como aproximadamente 3 ou menor (PANNONI, 2009).

Os períodos de orvalho são considerados muito agressivos, pois o efeito benéfico da lavagem da superfície, ocasionada pela chuva, em geral, não acontece. Como o orvalho seca, esses contaminantes remanescentes repetem na superfície sua atividade corrosiva, após a formação do próximo orvalho (SCHWEITZER, 2007).

O orvalho é considerado uma causa muito importante da corrosão, especialmente sob condições de abrigo. A quantidade de água sobre uma superfície coberta pelo orvalho é de aproximadamente  $10 \text{ g.m}^{-2}$ , é consideravelmente maior do que aquela observada em camadas de adsorção. Um fator que contribui para a alta corrosividade do orvalho pode ser a grande quantidade de contaminantes atmosféricos nele presentes. Orvalhos muito ácidos ( $\text{pH} < 3$ ) têm sido encontrados em atmosferas industriais muito poluídas. Concentrações de 0,35 g/L de cloro e 0,20 g/L de sulfato têm sido relatadas. Os valores são aproximadamente cem vezes mais altos que a água da chuva para o mesmo local (SCHWEITZER, 2007).

#### 2.2.4.4 Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)

O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) tem sido reconhecido, já há muito tempo, como o mais importante estimulante gasoso no processo de corrosão atmosférica dos metais em geral. Ele é originado de muitas fontes antropogênicas (produzidos pelo homem), como a combustão de carvão e derivados de petróleo que contenham enxofre (como a gasolina), e as emissões de certas indústrias, como a petroquímica e a de papel e celulose. Naturalmente, o SO<sub>2</sub> é originado da atividade vulcânica.

O dióxido de enxofre é um gás bastante solúvel em água; sua solubilidade é de 9.4 g/100 ml (a 25° C). Ele se dissolve facilmente nas gotas de chuva ou no orvalho formado sobre as superfícies metálicas.

Quando dissolvido, o SO<sub>2</sub> reage com água e oxigênio para formar ácido sulfúrico, regendo a reação:



Essa reação é catalisada por íons Fe<sup>2+</sup> e Mn<sup>3+</sup>, ou ainda em eletrólitos com pH alcalino. A chuva ou o orvalho, grandes centros urbanos ou regiões industriais, onde as emissões de dióxido de enxofre são significativas, apresentam uma agressividade ambiental bastante distinta daquela observada em ambientes rurais.

A chuva ou o orvalho, umedecendo superfícies oxidadas (que contêm íons férricos e manganosos), acabarão por gerar eletrólitos bastante ácidos (isto é, uma solução de ácido sulfúrico). Assim, metais que corroem em eletrólitos ácidos (p.ex., o zinco) não se mostram adequados à exposição em atmosferas industriais muito poluídas, sem a proteção adequada, como a oferecida pelas tintas.

O dióxido de enxofre pode estar presente na atmosfera também na forma de ácido sulfúrico ou de sulfatos. Os principais processos de deposição desses compostos sobre a superfície dos metais são: primeiro, por adsorção de gás por superfície gasosa; segundo, por deposição de partículas de sais por ação da gravidade e terceiro, por deposição de gás, sais ou ácido sulfúrico através de chuvas contaminadas. Os dois primeiros processos de deposição denominam-se de deposição seca, e o terceiro, de deposição úmida. Os dois últimos independem da natureza do metal e são menos significativos que o primeiro.

A deposição por adsorção constitui o meio mais importante da contaminação das superfícies metálicas expostas, sendo fortemente dependente tanto da umidade relativa do ar, como da natureza do metal e dos produtos presentes na sua superfície. A taxa de adsorção do  $\text{SO}_2$  é tanto maior quanto maior for a umidade relativa, citando-se como exemplo o aço. Quando esse metal está exposto à atmosfera contendo 0,1 ppm de  $\text{SO}_2$ , apresenta uma taxa de adsorção de 0,01  $\mu\text{g}$  de  $\text{SO}_2/\text{cm}^2$  para uma umidade relativa de 80% e de 0,14  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  para uma umidade relativa de 98%. A influência do  $\text{SO}_2$  no processo de corrosão, entretanto, também é bastante influenciada pela distância do metal da fonte poluidora. A Figura 9, a seguir, mostra como a taxa de corrosão do aço carbono reduz conforme o material é afastado da fonte geradora do gás. Isso ocorre porque a deposição por adsorção é o processo que possui menor alcance, pois a vida do  $\text{SO}_2$  é relativamente curta (cerca de  $\frac{1}{2}$  a 2 dias), após o que se transforma em ácido sulfúrico por oxidação sobre partículas úmidas, passando a deposição a ocorrer na forma de partículas sólidas ou chuva ácida. Os dois últimos processos têm maior alcance, dependendo das condições climáticas e de poluição (por exemplo, direção e velocidade dos ventos, índice pluviométrico, presença de amônia). Mesmo estes têm alcance limitado, conforme também pode ser observado na Figura 9.

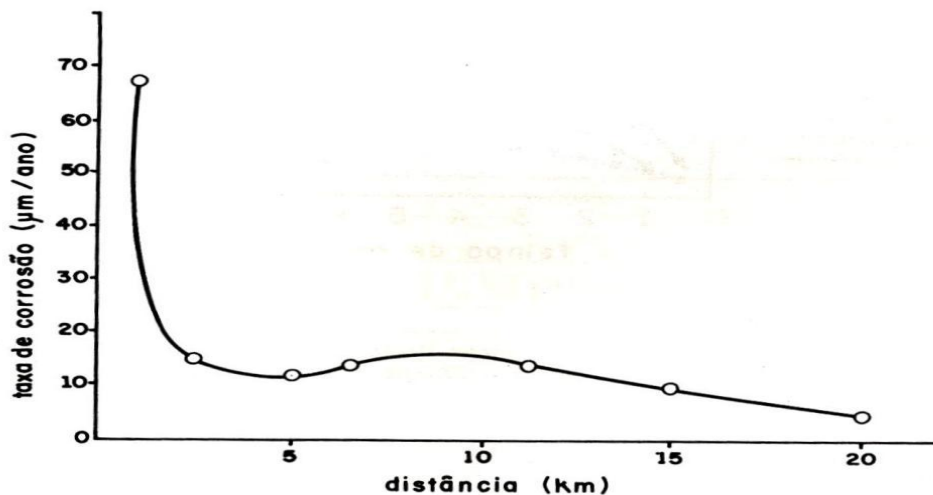


Figura 9: Variação da taxa de corrosão do aço carbono em função da distância da fonte geradora de  $\text{SO}_2$  na atmosfera. Fonte: Panossian (1993, p.325).

A velocidade de adsorção do  $\text{SO}_2$  depende também da superfície metálica. A Figura 10 mostra como a quantidade de  $\text{SO}_2$  adsorvido varia com o tempo de exposição para diversos metais, como o ferro (Fe), cobre (Cu), alumínio (Al). Pelo gráfico da Figura 10, observa-se que, no início da exposição, a capacidade de adsorção dos metais aumenta. Esse aumento é pouco pronunciado no alumínio e muito no ferro. O cobre e o zinco apresentam comportamento intermediário. Essa diferença de comportamento é atribuída à natureza dos produtos de corrosão. Após 6 a 7 horas de exposição, o alumínio ainda apresenta baixa capacidade de adsorção, seguido pelo cobre e zinco, sendo que o ferro apresenta maior capacidade.

Além desses fatores, a taxa de deposição depende também da concentração de dióxido de enxofre na atmosfera, sendo tanto maior quanto maior for a concentração deste poluente no ar (PANOSSIAN, 1999).

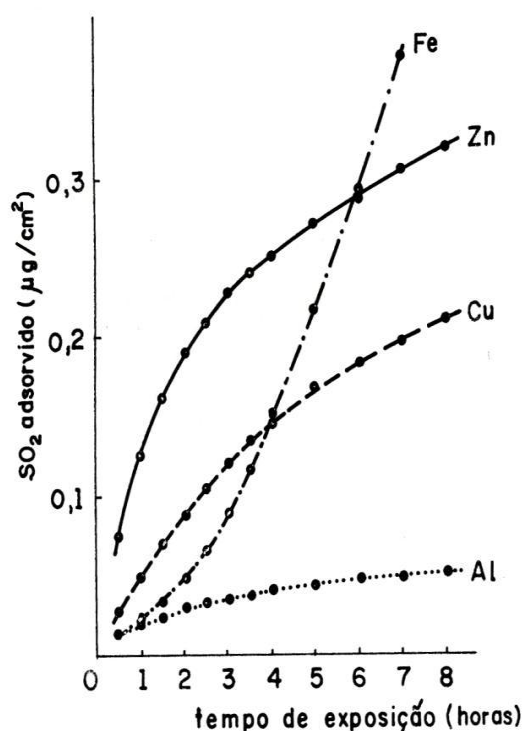


Figura 10: Gráfico da adsorção de  $\text{SO}_2$  em função do tempo. Ferro, zinco, cobre e alumínio expostos à atmosfera com 90% de umidade relativa e com 0,10 ppm de  $\text{SO}_2$ . Fonte: Pannosian (1993, p.326).

A concentração do  $\text{SO}_2$  varia de acordo com o tipo de atmosfera que está sendo medido. Pela Tabela 1 já apresentada, observa-se que as regiões de alta atividade industrial são as mais contaminadas por esse gás, tendo valores intermediários na urbana e mínima na rural.

O efeito somado da umidade do  $\text{SO}_2$  na corrosão do ferro (e, naturalmente, no aço carbono) também pode ser visualizado na Figura 4, já apresentada no item 2.2.4.1. Se a superfície metálica estiver completamente limpa e não houver poluição na atmosfera, nenhuma corrosão significativa ocorrerá em umidades relativas abaixo de 100%.

Na realidade, entretanto, o aço corrói quando a umidade relativa excede 50/70%. Isto ocorre parcialmente devido aos produtos de corrosão (que são higroscópicos e se hidrolisam, gerando acidificação da superfície metálica). Quando o  $\text{SO}_2$  esta presente na atmosfera, observa-se um valor razoável da taxa de corrosão, que é bastante aumentado quando a concentração do gás também aumenta (PANNONI, 2009).

Na Figura 11, podemos verificar a velocidade de corrosão com uma concentração de 0,5 ppm de  $\text{SO}_2$  e umidade em torno de 90%.

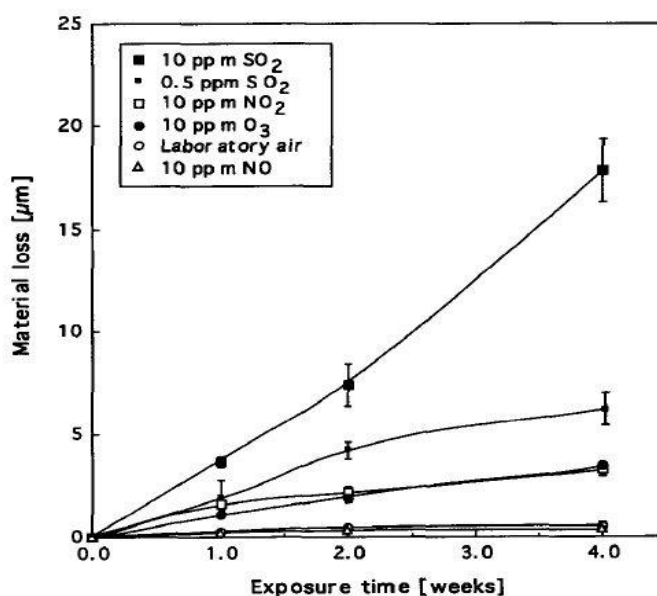


Figura 11: Perda de material de uma amostra de aço carbono ASTM A 36 exposto a uma atmosfera contaminada por diferentes tipos de poluentes ( $\text{SO}_2$ ;  $\text{NO}_2$ ;  $\text{O}_3$ ;  $\text{NO}$ ; Ar de laboratório) a 25 °C e 90% de umidade relativa. Fonte: Oesch (2009).

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB) fornece relatórios anuais onde o valor da deposição de  $\text{SO}_2$  que pode ser encontrado para diversas regiões – rurais, urbanas e industriais (PANOSSIAN, 1991). Na Bahia o órgão oficial que regula as emissões atmosféricas é o Instituto do meio ambiente e recursos Hídricos (INEMA), que obedece a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) na resolução n. 3 de 28.06.1990. Atualmente outros estados brasileiros possuem empresas assemelhadas, cujos relatórios anuais também são disponibilizados na Internet, tornando possível, assim, a obtenção de resultados reais, válidos para muitas regiões brasileiras

O padrão da qualidade do ar de São Paulo, mantida pela CETESB, prescreve valores máximos de  $80 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$  (de ar). Estes valores não têm sido ultrapassados já há muito tempo no Estado de São Paulo. Como exemplo, os valores médios, medidos na cidade de Cubatão (ambiente industrial) e na Região Metropolitana de São Paulo (ambiente urbano), no ano de 2007, são inferiores a  $20 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ . (Pannoni aud Cetesb). Na região que esta localizada a caldeira deste estudo, os valores de emissão de  $\text{SO}_2$  estão em torno de 1,5 % (Região do Porto de Aratu) (INEMA 2011).

#### 2.2.4.5 Cloretos

Normalmente, as atmosferas marinhas são consideradas extremamente agressivas à maioria dos metais utilizados em equipamentos e estruturas expostos. A agressividade dessas atmosferas deve-se à alta umidade e à presença no ar de partículas sólidas de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) e/ou gotículas de água contendo o sal dissolvido. As gotículas de água entram em suspensão na atmosfera em forma de névoa e são carregadas pelas correntes de ar. A evaporação da água resulta na formação de partículas sólidas deste sal no ar. A concentração de cloretos nas atmosferas marinhas é maior em regiões onde o mar apresenta intensas rebentações de ondas, sendo muito menor em locais de mar calmo. Outra fonte de emissão de cloretos é aquela oriunda da queima de carvões fósseis (PANOSSIAN, 1993).

A deposição de cloretos aumenta, de modo muito característico a velocidade de corrosão do aço carbono. Além de proporcionar um aumento na condutividade dos eletrólitos superficiais, os sais  $MgCl_2$  e  $NaCl$  são higroscópicos, isto é, têm a capacidade de absorver água. Entretanto o íon cloreto participa da ativação da corrosão de forma ainda mais importante. Para os metais ferrosos, os íons cloretos competem com as hidroxilas para se combinar com o cátion ferroso, produzido na reação anódica. No caso do grupo hidroxila, os produtos de corrosão tendem a promover, em maior ou menor grau, a passivação do substrato, através da formação da ferrugem comum ( $FeOOH$ ). Em contraste, os complexos de ferro e cloreto, que são formados em ambientes marinhos, tendem a ser solúveis, resultando no aumento da velocidade de corrosão. Com base nesse fato, metais tais como o zinco e o cobre, cujos cloretos são menos solúveis que os de ferro, são menos susceptíveis ao ataque por cloretos. Essa observação é confirmada pela prática (PANNONI, 2009).

Em ambientes marinhos, a deposição de cloretos usualmente decresce fortemente com o acréscimo da distância da praia, pois as gotículas que compõem a névoa salina são decantadas por gravitação ou são filtradas quando o vento passa pela vegetação e edificações. A Tabela 5 apresenta a variação da taxa de deposição do cloreto de sódio no aço com a distância do mar.(PANOSSIAN, 1993).

Tabela 5: Variação da taxa de deposição do cloreto de sódio com a distância da fonte poluidora (o mar). Fonte: Panossian (1993, p.331)

Distância do mar(metros)	Taxa de deposição do cloreto de sódio(mg de $NaCl/(m^2 \cdot dia)$ )
45	800
180	230
360	140
1170	85
16000	22
29000	7



### **2.2.5 Temperatura**

A influência da temperatura sobre a corrosão atmosférica é complexa, porém ter sido estudada de forma não conclusiva. A influência da temperatura a corrosão do aço carbono é maior do que sobre outros metais, como o zinco ou o cobre (WOLYNEC, 1993). Por um lado, a taxa de corrosão dos metais eleva-se com o aumento de temperatura, pois favorece a velocidade das reações eletroquímicas, acelerando os processos de difusão. Uma combinação de temperatura elevada com prolongado contato da superfície metálica com um eletrólito provoca corrosão severa.

Por outro lado, o aumento da temperatura facilita a evaporação da água presente na superfície metálica, de modo a promover a secagem da superfície com a consequente diminuição no tempo de molhamento. Além disso, a solubilidade do oxigênio e de outros gases corrosivos diminui com o aumento de temperatura, promovendo a diminuição da taxa de corrosão dos metais.

### **2.2.6 Corrosividade ambiental**

Dois enfoques fundamentais têm sido utilizados na classificação da corrosividade de uma atmosfera. Eles são ilustrados na Figura 12. O primeiro deles trata de medir o tempo de umedecimento, o teor de dióxido de enxofre e o de cloretos de uma dada atmosfera. Trata, assim, do levantamento dos parâmetros ambientais que sabidamente influenciam diretamente no processo de corrosão. O segundo caminho trata da obtenção da taxa de corrosão de espécimes metálicos padronizados segundo norma, isto é, trata da experimentação.

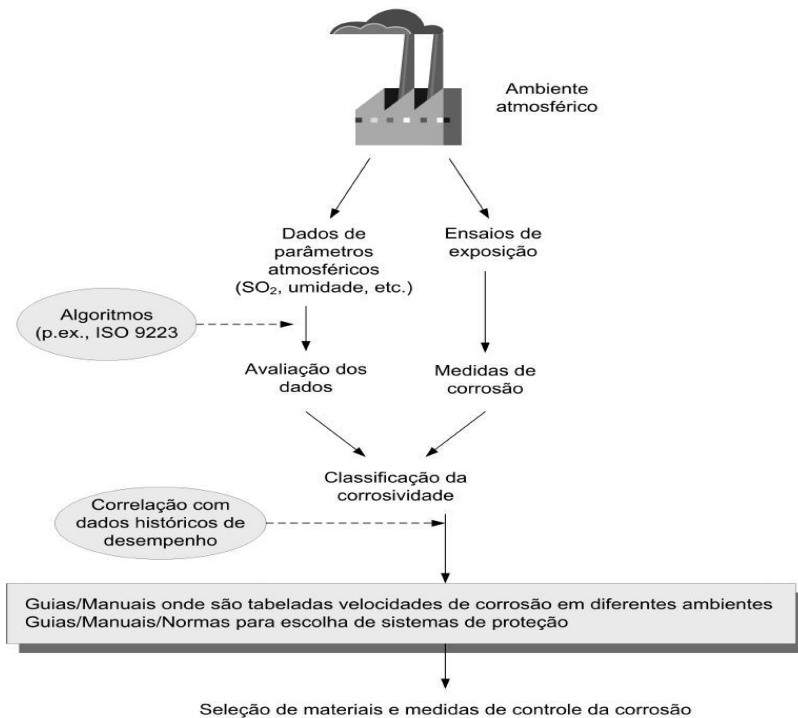


Figura 12: Os dois enfoques fundamentais utilizados na classificação da corrosividade de uma atmosfera. Fonte: Pannoni (2009)

Os caminhos para a classificação da corrosividade atmosférica podem ser utilizados de modo individual ou complementar, na derivação de relações entre as velocidades de corrosão atmosférica e as variáveis atmosféricas dominantes. A seguir, será apresentada a rota proposta pela ISO 129442 23, baseada em resultados de exposição de espécimes padronizados (PANNONI, 2009).

#### 2.2.6.1 Classificação dos ambientes

Para a finalidade da ISO 129442, os ambientes atmosféricos são classificados em seis categorias de corrosividade:

- C1 Muito baixa agressividade
- C2 Baixa agressividade
- C3 Média agressividade
- C4 Alta agressividade
- C5I Muito alta agressividade (industrial)
- C5M Muito alta agressividade (marinha)

A Tabela 6 define as categorias de agressividade em termos da perda de massa (ou espessura) de espécimes padronizados, confeccionados em aço de baixo carbono ou em zinco, expostos à atmosfera e retirados após o primeiro ano de exposição. Os detalhes da confecção dos corpos de prova, assim como o tratamento anterior e posterior à exposição podem ser encontrados na ISO 9226. Não é permitida a extrapolação da perda de massa ou da espessura para o tempo de um ano, a partir de tempos de exposição menores ou maiores do que este. As perdas de massa ou espessura obtidas para os espécimes de aço e de zinco expostos lado a lado podem, a princípio, pertencer a diferentes categorias de agressividade. Em tais casos, a categoria de agressividade mais elevada deverá sempre ser considerada. O gráfico da Figura 13 apresenta um exemplo de perda de espessura em função do tempo para o aço carbono para diferentes corrosividades, ao longo do tempo, verifica-se velocidades maior para o ambiente tipo C5 com a progressiva diminuição até C1.

Tabela 6: Classificação do ambiente corrosivo segundo Liesegang. Fonte: Sica (2006)

Ambiente corrosivo	SO <sub>3</sub> (mg/100 cm <sup>2</sup> .dia)	SO <sub>2</sub> - Calculado (mg/m <sup>2</sup> .dia)	Cl (mg/m <sup>2</sup> .dia)
1. Rural	0,12 – 0,37	9,6 – 29,6	< 30
2. Urbano	0,37 – 1,25	29,6 – 100	< 30
3. Industrial	1,25 – 2,50	100,0 - 200,0	< 30
4. Marinho	0,12 – 0,37	9,6 – 29,6	30 – 3000
5. Marinho industrial	1,25 – 2,50	100,0 – 200,0	30 – 3000

Tabela 7: Corrosividade dos ambientes para o Aço carbono. Fonte (Pannoni apud Morcillo 1998)

Categoria de corrosividade	Perda de massa por unidade de superfície/perda de espessura para o aço de baixo carbono (Após o primeiro ano de exposição)	Exemplo de ambientes típicos		
	Perda de massa (g.m <sup>-2</sup> )	Perda de espessura (μm)	Exterior	Interior
C1 (muito baixa)	<= 10	<= 1,3		Edificações condicionadas para o conforto humano residências;escritórios;lojas;escolas;hotéis)
C2 (baixa)	>10 até 200	>1,3 a 25	Atmosferas com baixo nível de poluição. A maior parte das áreas rurais	Edificações onde a condensação é possível, como armazéns e ginásios cobertos
C3 (Média)	>200 até 400	>25 a 50	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por dióxido de enxofre. Áreas costeiras de baixa salinidade	Ambientes industriais com alta umidade e alguma poluição atmosférica, como lavanderias, fábricas de alimentos, cervejarias e laticínios.
C4 (Alta)	>400 até 650	> 50 a 80	Áreas industriais e costeiras com salinidade moderada	Ambientes como indústrias químicas e coberturas de piscinas.
C5 – M (muito alta marinha)	>650 até 1500	> 80 a 200	Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição
C5 – M (muito alta marinha)	>650 até 1500	> 80 a 200	Áreas costeiras e offshore com alta salinidade.	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição.

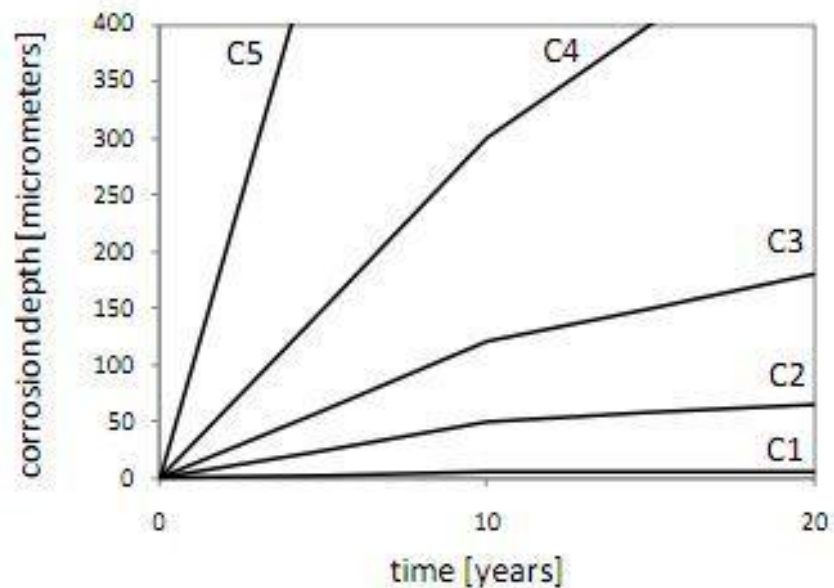


Figura 13: Uma aplicação da ISO 9224. Perda de espessura em função do tempo para o aço carbono em diferentes classes de corrosividade. Fonte: Landolfo (2010).

Se, porventura, não for possível a exposição de corpos de prova padronizados no ambiente de interesse, a categoria de agressividade poderá ser estimada através da simples consideração de ambientes típicos, também descritos na Tabela 6.

### 2.2.6.2 Classificação dos ambientes segundo o Índice de Deterioração de Brooks

Condições locais de umidade em conjunto com altas temperaturas favorecem notavelmente os processos de degradação dos materiais expostos à atmosfera. A disponibilidade de valores destas duas variáveis auxilia em muito na avaliação do risco potencial da corrosão. O denominado Índice de Brooks 25 é obtido a partir de uma simples equação, desenvolvida a partir de dados meteorológicos (PANNONI, 2009):

$$I = ((UR - 65) * P) / 100 \quad \text{Equação (2.12)}$$

- Onde I é o Índice de Deterioração,
- UR é a umidade relativa média anual, em %, e,
- P, a pressão de saturação do vapor de água na atmosfera, em mbar, correspondente à temperatura média anual.

Os graus de deterioração x agressividade do ambiente são classificados como descrito na Tabela 7.

Tabela 8: Os graus de deterioração x agressividade do ambiente. Fonte: ISO 9226 (apud PANONNI, 2009).

I índice de deterioração	I agressividade do ambiente
<1 Muito Baixo	0 – 1 Não agressivo
1 -2 baixo	1 – 2 Muito pouco agressivo
2 – 5 Moderado	2 – 4 Pouco agressivo
➤ 5 Alto	4 -5 Agressivo

### 2.3 MEIOS PROTETORES CONTRA A CORROSÃO

A seleção de um sistema de proteção adequado ao ambiente e à utilização de uma dada estrutura depende do conhecimento prévio de certo número de fatores, tais como: agressividade do ambiente circundante e interno à estrutura; dimensão e forma dos componentes metálicos estruturais; possibilidade de intervenções periódicas de manutenção; possibilidades de tratamento existentes no fabricante da estrutura, ou no local da construção e montagem, para obras *in situ*.

Entretanto, para o estudo da corrosão atmosférica num equipamento específico como a caldeira, deve-se considerar que o metal (aço carbono) pode estar dentro de uma edificação ou constituir seção fechada ou tubular.

A corrosão de estruturas em aço localizadas internamente nas edificações abrigadas do ambiente externo é considerada, de modo geral, insignificante. Se o interior de uma edificação for, entretanto, parcialmente – e não completamente – abrigado do ambiente externo, deve-se considerar, então, que a estrutura estará sujeita à mesma agressividade ambiental imposta pelo ambiente externo. O efeito da corrosão em um ambiente interno pode ser agravado pelo uso da edificação. Como exemplos, temos as coberturas de piscinas, criadouros de animais e outras edificações especiais. Regiões da estrutura que apresentem “pontos frios” poderão promover a condensação de água, acarretando localmente o processo de corrosão.

Componentes tubulares hermeticamente fechados não estão sujeitos à corrosão interna. O projeto deve, assim, garantir a estanqueidade (isto é, não se devem utilizar soldas descontínuas, as juntas devem ser bem parafusadas, etc.). Se esta precaução não for tomada, poderá haver a penetração e retenção de umidade (oriunda da condensação ou precipitação). Se houver alguma probabilidade de que isto aconteça, as superfícies internas deverão ser protegidas, com um sistema de pintura adequado à agressividade do ambiente.

Assim, a proteção ideal para um equipamento exposto numa atmosfera industrial é o controle rígido dos principais causadores de corrosão: umidade e presença de contaminantes como  $\text{SO}_2$  e cloretos. A eliminação dessas espécies, além de uma manutenção adequada, pode reduzir as taxas de corrosão a valores próximos a zero.

O controle de cloretos é necessário apenas em ambientes muito próximos do litoral, enquanto as emissões de  $\text{SO}_2$  são, em geral, rigidamente controladas por órgãos ambientais. Dessa maneira, o principal método de proteção acaba sendo o controle da umidade, evitando a condensação da água na superfície metálica. Para proteção contra a corrosão, podem ser utilizados os seguintes métodos de controle de umidade:

- Ventilação
- Aquecimento
- Desumidificação

### **2.3.1 Ventilação**

Em ambientes que não possuem controle da umidade, deve-se ter uma boa ventilação, quer por processo natural ou forçado, a fim de mantermos a uniformidade da umidade do ambiente a ser controlado e impedindo-se a condensação. Este método visa a evaporação da umidade condensada. É importante que os componentes do ambiente estejam bem aerados de forma a evitar a aeração diferencial, que podem originar processos corrosivos. Um outro fator importante é a distancia que se deve manter tanto do piso quanto das paredes dos ambientes, o recomendado é uma distância de pelo menos 1 metro tanto do solo, quanto das paredes. Este procedimento visa além de uma ventilação mais eficiente, evita que seus componentes fiquem em contato com o piso que é normalmente mais frio e propenso a causar condensação.

### **2.3.2 Aquecimento**

O aquecimento consiste em manter a umidade relativa dentro dos ambientes em valores relativamente baixos, geralmente menores que 60% por aumento da temperatura. Este método baseia-se no aquecimento do ar interno do ambiente, em particular, durante os períodos em que a temperatura externa tende a flutuar consideravelmente, favorecendo a condensação da umidade, como nas noites frias que sucedem aos dias quentes.

O processo de equalização da temperatura consiste em reciclar o ar quente, que é lançado na parte superior e recolhido na parte inferior, através de um sistema mecânico. Cuidados devem ser tomados quanto ao processo de aquecimento, uma vez que os produtos de combustão de gás, óleo ou carvão utilizados contêm quantidades apreciáveis de umidade e fumos corrosivos, os quais criam condições para a aceleração da corrosão, se não forem devidamente conduzidos para fora da caixa ou recipiente a ser aquecido. O aquecimento feito por eletricidade, por água quente ou vapor d água pode, eventualmente, ser mais vantajoso.

O aquecimento é regulado por termostatos e, para um melhor controle da umidade relativa, deve ser utilizado um higrômetro (WOLYNEC, 1992).

### 2.3.3 Desumidificação

A desumidificação atua em várias situações e para diversos produtos. Tanto a ventilação como o aquecimento, não são suficientes para eliminar os problemas de corrosão, pois estes métodos, como já foi visto, não eliminam totalmente a possibilidade de condensação da umidade. Um das maneiras efetivas de prevenir a condensação consiste em eliminar parte da umidade do ambiente em que se encontra o produto armazenado, com um sistema de desumidificação. A manutenção da umidade baixa não permite a ocorrência de condensação, mesmo quando se tem uma queda brusca da temperatura. A eliminação de parte da umidade de recintos pode ser conseguida através de desumidificadores mecânicos, os quais são classificados de acordo com o processo utilizado para a desumidificação, a saber: os que agem por resfriamento, diminuindo a temperatura abaixo do ponto de orvalho, ou o uso de espécies que agem por adsorção e/ou absorção de água.

Conforme dito em parágrafos anteriores, a formação de uma película de água sobre as superfícies metálicas, por condensação da umidade existente no ar, é o fator básico do processo de corrosão, que normalmente tem lugar durante o processo de hibernação. As variações climáticas têm grande influência neste processo de condensação, e as medidas a serem adotadas para o seu controle podem ser explicadas através do diagrama de Moillier, conforme explicado no sub item 2.2.4.1, qualquer processo que se oponha à condensação, que na prática pode ocorrer com umidades relativas menores ou iguais a 100%, o método de prevenção contra a corrosão poderá ser efetivo.

Desumidificação por refrigeração – Baseia-se no resfriamento de uma superfície a uma temperatura abaixo da temperatura do ponto de orvalho do ar.

Desumidificação por adsorção - Baseia-se na adsorção de vapor de água na superfície de determinada substância que tem apreciável afinidade físico química pela água (sílica gel; alumina-gel; alumina ativada).

Desumidificação por absorção - Baseia-se na absorção do vapor de água por determinadas substâncias que tem afinidade química pela água (cloreto de lítio e cálcio; ácido sulfúrico e o trietileno-glicol).



A diferença entre os desumidificadores de adsorção e absorção é que no primeiro a fixação da água se dá na superfície da substância adsorvente, o segundo a absorção se dá no interior da substância absorvida, sendo que o processo químico na substância absorvedora é muito mais forte (milhares de vezes).

Os equipamentos mecânicos que compõem os sistemas de desumidificação são basicamente: Ventiladores de ar seco; área de reativação (aonde se localiza as substâncias (absorvente ou adsorvente); Ventilador de reativação; sistema de tubulações de entrada de ar seco e saída de ar úmido; motor elétrico; aquecedor do ar de reativação. O sistema de capacidade e dimensões de acordo com o ambiente a ser desumidificado.

### 3 MANUTENÇÃO

A origem do termo manutenção vem do vocabulário militar e significava manter, nas unidades de combate, o efetivo e o material num nível constante. O surgimento da palavra manutenção na indústria ocorreu em 1950 nos Estados Unidos da América. Na França, por exemplo, esse termo está mais associado à palavra “conservação” (MONCHY, 1989).

Manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em estado no qual possa desempenhar uma função requerida (ABNT, 2004); ou seja, manter o desempenho da função de um equipamento, para a função para a qual foi projetado, dentro de parâmetros operacionais preestabelecidos.

A história da manutenção acompanha o desenvolvimento técnico-industrial da humanidade. No fim do século XIX, com a mecanização das indústrias, surgiu a necessidade dos primeiros reparos. Até 1914, a manutenção tinha importância secundária e era executada pelo mesmo efetivo da operação. Após o advento da Primeira Guerra Mundial, a implantação da produção em série, instituída por Ford, as fábricas passaram a estabelecer programas mínimos de produção e, em consequência, sentiram necessidade de criar equipes que pudessem efetuar reparos em máquinas operatrizes no menor tempo possível (TAVARES, 1999).

As atividades de manutenção devem ter um escopo mais diversificado do que simplesmente o de manter as condições originais dos equipamentos, e, em função disso, as atividades de manutenção dos equipamentos nas empresas podem ser divididas em dois tipos:

- Atividades de melhoria
- Atividades de manutenção.

As atividades de melhoria objetivam melhorar as condições originais de operação, desempenho e confiabilidade intrínseca dos equipamentos, através da incorporação de modificações ou alterações no seu projeto ou configuração original.

As atividades de manutenção dos equipamentos visam manter suas condições originais de operação e seu desempenho através do restabelecimento de eventuais deteriorações dessas condições, nunca excedê-las.

### 3.1 METODOLOGIAS

A maneira pela qual é feita a intervenção nos equipamentos, sistemas ou instalações caracteriza os vários tipos de manutenção existente. A classificação adotada a seguir abrange, de forma suficiente, todas as tarefas que compõem as atividades de manutenção. Observa-se que há um consenso, com algumas variações irrelevantes, em torno da seguinte classificação: (KARDEC, 2001; XENOS, 1998):

- MANUTENÇÃO CORRETIVA
- MANUTENÇÃO PREVENTIVA
- MANUTENÇÃO PREDITIVA
- MANUTENÇÃO DETECTIVA

#### 3.1.1 Manutenção Corretiva

É a manutenção efetuada após a ocorrência da falha. Ao atuar em um equipamento que apresenta um defeito ou um desempenho diferente do esperado, estamos fazendo manutenção corretiva. Assim, a manutenção corretiva não é, necessariamente, uma manutenção de emergência.(KARDEC, 2001).

Existem duas condições específicas que levam à manutenção corretiva:

- Desempenho deficiente apontado pelo acompanhamento das variáveis operacionais.
- Ocorrência de falha ou quebra.

A função principal da manutenção corretiva é corrigir/restaurar as condições de funcionamento do equipamento ou sistema.

A manutenção corretiva pode ser dividida em duas classes:

- Corretiva Não Planejada
- Corretiva Planejada.

A corretiva não planejada é caracterizada quando o fato da falha/quebra ocorreu ou um desempenho menor que o esperado aconteceu. Este tipo de manutenção incorre em altos custos (perda de produção; perda de qualidade; custos indiretos como: hora extra; transporte); além de danos custosos aos equipamentos

A manutenção corretiva planejada é a correção menor que o esperado ou a da falha, por decisão gerencial, isto é, pela atuação em função de acompanhamento ou pela decisão de operar até a quebra (KARDEC, 2001).

Um trabalho planejado é menos custoso, protege a máquina de danos maiores e a produção pode-se programar para essa interrupção, de modo a garantir uma segurança do processo e de forma controlada.

### **3.1.2 Manutenção Preventiva**

É a manutenção efetuada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento do item (NBR 5462, 1994).

Esse tipo de manutenção é realizada para manter o desempenho da função dentro dos níveis operacionais requeridos e de confiabilidade.

Ele surgiu com o objetivo de conseguir maior disponibilidade e, principalmente, de disponibilidade dos ativos empresariais. É necessário manter as unidades operacionais em pleno funcionamento para se manter competitivo (PEREIRA, 2009)

Existem fatores que devem ser considerados para a adoção de uma política de manutenção preventiva:

- Quando não é possível a manutenção preditiva.
- Aspectos relacionados com a segurança das equipes e da instalação/equipamento, normalmente para substituição de componentes:
- Por oportunidade, em equipamentos críticos de difícil liberação operacional.
- Em virtude de riscos de agressão ao meio ambiente
- Em sistemas complexos e de operação contínua (Indústrias petroquímica; siderúrgica; automobilística).

Como ponto negativo é a introdução de possíveis defeitos imputados às máquinas ou sistemas decorrentes da intervenção preventiva:

- Falha humana
- Falha de sobressalentes
- Contaminações introduzidas no sistema de óleo
- Danos durante a partida ou parada
- Falha dos procedimentos de manutenção

As atividades de manutenção preventiva são ligeiramente postas em prática com uma frequência periódica baseada na idade cronológica (mensal; semanal, etc.), no tempo de operação e nas quantidades processadas.

Os intervalos da manutenção preventiva podem ter as seguintes categorias:

- Por idade cronológica
- Por tempo de operação
- Por condição operacional

A identificação dos ativos de uma organização é considerada primordial para a decisão de implantar ou não os sistemas preventivos.

A elaboração de um plano de manutenção preventiva deverá ser baseada em informações possíveis sobre o equipamento, que deve conter as tarefas preventivas e suas respectivas frequências. É importante um plano bem enxuto, com tarefas importantes com ações em pontos que são fundamentais para o bom funcionamento do equipamento. Definir tarefas com a maior eficiência possível para que o ativo esteja disponível e com maior confiabilidade (PEREIRA, 2009).

### 3.1.2.1 Inspeção de equipamentos e NR13

Consistem em inspecionar os equipamentos em intervalos regulares de modo a permitir que se produzam ações para prevenir as falhas funcionais ou evitar as suas conseqüências.

Com o objetivo de reduzir custos, minimizar perdas e maximizar a operação da planta com segurança, melhorar a disponibilidade e a continuidade do processo produtivo, as metodologias de inspeção visam identificar pontos críticos nos processos e nos equipamentos e desenvolver uma programação de inspeção voltada à confiabilidade operacional de forma a garantir a integridade dos

equipamentos com menor custo de manutenção. Como técnicas utilizadas para este sub item da manutenção preventiva, destacamos algumas como exemplo: os ensaios não destrutivos disponíveis: inspeção visual, ensaio de emissão acústica, medição de espessura por ultra-som, MFL, Ultra Long Range Ultrasonics (Lorus). (Nicácio 2009)

A norma regulamentadora NR13 que se refere a caldeiras e vasos de pressão, como uma das mais importantes normas de referencia, estabelecendo medidas de segurança e operação devido ao grande risco que as caldeiras e vasos de pressão podem produzir tanto ao processo como a vida das pessoas .

A NR13 é um fator determinante para a segurança da pessoas e o patrimônio da empresa , não só na industria como em outros segmentos que utilizem este tipo de equipamento. Existe também um conteúdo de aumento da confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, em função dos mesmos serem instalado, operados, inspecionados e reparados dentro de padrões estabelecidos Esta norma esta respaldado no âmbito jurídico a nível de legislação ordinária, através dos artigos da CLT 187 e 188.

A NR 13 exige um prontuário com documentação original do fabricante, abrangendo no mínimo: especificação técnica, desenhos, detalhes, provasse a pressão máxima de trabalho permitida. O proprietário da caldeira deverá organizar, manter atualizado e apresentar quando solicitado pela autoridade competente, o Registro de Segurança no qual serão anotados sistematicamente , as indicações das provas efetuadas, reparos, inspeções e quaisquer outras ocorrências .

Foram criados alguns critérios após a sua última revisão tais como: Profissional habilitado; Pressão máxima de trabalho permitida (PMTP), ou pressão máxima de trabalho admissível (PMTA); Risco grave e iminente na falta qualquer um dos alguns seguintes itens: Válvula de segurança com pressão de abertura em valor igual ou menor a PMTA; Instrumento que indique pressão de vapor acumulado; injetor ou outro meio de alimentação de água, independente do sistema principal, em caldeiras a combustível sólido; sistema de drenagem rápida de água, em caldeiras de recuperação.

Ao atendermos esta norma estaremos garantindo um funcionamento de forma a não termos riscos de acidentes com máquinas ou pessoas.

### 3.1.3 Manutenção Preditiva

Manutenção que permite garantir a qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (NBR 1994).

A manutenção preditiva é a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática.

Seu objetivo é prevenir falhas nos equipamentos ou sistema através de acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível. Na realidade, o termo preditiva se relaciona com a ideia de prever as condições do equipamento. Esse tipo de manutenção tem como foco principal a disponibilidade dos equipamentos, à medida que não promove a intervenção nos equipamentos ou sistema e que verificações são efetuadas com o equipamento produzindo (KARDEC, 2001).

A inspeção “*on line*” é uma técnica que estima uma hierarquia dos elementos internos de um sistema com base na observação de fenômenos externos .

Em muitos casos, a máquina demonstra sintomas antes da avaria e, assim sendo, um estudo analítico especializado pode permitir o reconhecimento precoce desse tipo de sintoma e permitir a previsão do “caminho” da avaria.

As condições básicas para a adoção da manutenção preditiva são as seguintes:

- O equipamento sistema ou instalação permite algum tipo de monitoramento/medição.
- O equipamento, sistema ou instalação deve merecer este tipo de ação em função dos custos envolvidos.
- As falhas devem ser oriundas de causas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada.
- Seja obedecido um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico, sistematizado.

Os fatores indicados para análise da adoção de política de manutenção preditiva são os seguintes (KARDEC, 2001):

- Aspectos relacionados com a segurança pessoal e operacional
- Redução de custos pelo acompanhamento constante das condições dos equipamentos, evitando intervenções desnecessárias.
- Manutenção dos equipamentos operando, de modo seguro, por mais tempo.

A tecnologia disponível atualmente permitiu o desenvolvimento de dezenas de técnicas de manutenção preditiva, algumas bastante caras e sofisticadas. Algumas técnicas de manutenção preditiva atualmente usadas na indústria são as seguintes:

Ultra-som – Segundo a norma NBR 1594F(2004), este ensaio de como finalidade a determinação da espessura, inspeção de chapa grossa e inspeção de solda, através de aparelhagem semi automática, utilizando técnica pulso-eco. Sua aplicação como ferramenta para localizar e dimensionar descontinuidades que tenham sido formadas durante a fabricação ou o processo de operação já é bastante dominada. Para a inspeção de peças metálicas, este ensaio apresenta um grande poder de penetração (até cerca de 6m), uma elevada sensibilidade e a capacidade de localizar descontinuidades com precisão.

Para execução deste ensaio, o profissional (inspetor) deve estar qualificado/certificado, autorizado a executar , interpretar resultados e emitir laudo em END (ensaio não destrutivo), respeitando as limitações específicas estabelecidas na norma NBR 1590.

- Termografia – Técnica de ensaio não destrutivo que permite o sensoriamento remoto dos pontos ou superfícies aquecidas por meio da radiação infravermelha.
- Análise de óleo – Permite analisar as condições físicas de um óleo e determinar o desgaste de componentes de uma máquina ou das condições físicas de um óleo de um sistema hidráulico.
- Análise de vibração – Avaliação de parâmetros como velocidade, amplitude e aceleração dos equipamentos rotativos. Essa avaliação permite-nos prever se as vibrações em excesso acima de um valor limite está provocando desgastes ou fadiga das máquinas; folga de mancais e empeno de eixos.



### 3.2 O PROCESSO DE HIBERNAÇÃO

Hibernação é um estado em que um equipamento está sem desempenhar suas funções por um período definido de modo a retornar quando necessário. Ou seja, a hibernação tem como base a preservação dos equipamentos fora de operação. Para manter a plena integridade durante períodos de baixa demanda de produção, as máquinas podem ser "desativadas", colocadas em galpões e protegidas para que fiquem prontas para operar quando necessário. É parar de usar (uma peça de equipamento ou um prédio), mas mantê-lo em boas condições para que ele possa ser facilmente utilizado novamente (TWIGG, 2002).

A hibernação se aplica quando existe a necessidade de parada do(s) equipamento(s), sendo esta uma decisão estratégica da empresa, geralmente em função de uma condição de mercado em que o preço do produto final não é competitivo, ou em função das legislações vigentes, que devem ser obedecidas e que não estão sendo atendidas. Uma condição de mercado em função de demanda abaixo da capacidade de uma planta pode fazer com que sua produção oscile e não seja necessário que todos os equipamentos tenham de operar. A capacidade de produção pode ser de 80% um dia, em 50% seis meses depois e, em seguida, 90% em dois anos. Essas mudanças de capacidade podem, às vezes, ser antecipadas, geralmente devido a políticas governamentais ou condições de mercado além do controle de uma empresa. Durante essas flutuações, geralmente se reduzem os custos operacionais em função de se colocar os equipamentos a serem protegidos em armazenamento e, depois, trazê-los de volta ao serviço quando necessário (TWIGG, 2002).

Essa preservação é caracterizada por dois aspectos distintos: gerencial e técnico. O aspecto gerencial envolve definições de prazos para a preservação, risco de descontinuidades operacionais, segurança, obsolescência técnica do equipamento ou unidade. O aspecto técnico envolve as providências a serem tomadas, visando atender de maneira econômica às definições de origem gerencial (PETROBRAS, 1982).

Os aspectos técnicos e gerenciais se inter-relacionam e se interdependem, tornando complexa a decisão sobre o caminho a ser adotado para uma melhor preservação dos ativos da empresa. Constata-se que existem experiências

dispersas nas diversas empresas que passaram ou ainda estão passando pelo processo de hibernação (CORUS, 2010). Com base nessas questões, verifica-se a necessidade de identificar o equipamento mais crítico para estabelecer um foco neste trabalho.

Os equipamentos a serem colocados em estado de preservação podem tê-la de forma custosa, complexa, que irá requerer várias etapas processuais para salvaguardar esse ativo das empresas. A tarefa é multiplicada quando há a necessidade de armazenar um sistema, toda a linha de produção ou uma planta industrial.

Dependendo da complexidade do equipamento, isso pode acarretar uma série de procedimentos. Em muitos casos, no entanto, a hibernação pode fornecer uma solução completa, total ou parcialmente, por encapsular as áreas vulneráveis de um equipamento, impedindo qualquer deterioração em pontos específicos deste.

A hibernação se aplica a todo tipo de indústria, plantas químicas; petroquímicas; refinarias; plantas nucleares; Indústrias de exploração de petróleo; siderúrgicas e até em residências, havendo bastante literatura a respeito deste último setor (TWIGG, 2002). De uma forma geral, a hibernação é um processo em que se trabalha com a conservação de máquinas e, sendo esta componente de algum sistema, a hibernação poderá ser implementada.

Os períodos de proteção dos equipamentos das plantas podem ser classificados com a expectativa do prazo em que os equipamentos ficarão parados. Estes prazos são divididos da seguinte forma:

- Prazo curto – 1 a 18 meses
- Prazo médio – 19 a 60 meses
- Prazo longo – 60 meses em diante (TWIGG, 2002).

Deve-se ressaltar que os prazos e as expectativas de definição dos períodos são, na maioria das vezes, determinados pelo porte das instalações das empresas, pela experiência dos seus técnicos e também pelo porte do negócio em questão, pois, em muitas delas, por trabalharem com o mercado externo, variações bruscas no cenário econômico mundial afetam diretamente as decisões de retomada da produção de forma repentina (TWIGG, 1985).

### 3.3 CALDEIRAS

A quantidade de energia química gerada pelos combustíveis mais comuns, necessária à transformação em energia térmica ou mecânica utilizada no funcionamento de equipamentos como bombas, geradores, ventiladores, etc, é extremamente alta, provocando uma série de problemas de solução sofisticada e difícil. Basicamente é por isso que se utilizam geradores de vapor ou caldeiras nos quais a transformação de energia química dos combustíveis em energia térmica dos gases ocorre através da combustão. O vapor d'água, então, funciona como um simples veículo e transporta a energia térmica do gerador de vapor para os equipamentos. Nos equipamentos, tem-se a transformação de energia térmica em energia mecânica, para o caso das turbinas ou máquinas alternativas, ou a simples transferência da energia térmica do vapor para o produto, nos equipamentos de aquecimento e processamento.

A aplicação do vapor é de extrema importância no processo industrial, tanto do ponto de vista energético como da matéria-prima. O equipamento utilizado na geração de vapor em maior escala são as caldeiras, que são classificadas como: caldeiras de combustão e elétricas (DANTAS, 1995).

As caldeiras industriais são empregadas na produção de vapor de água ou aquecimento de fluidos térmicos e sistemas associados de condução e transferência de calor. Podem ser flamotubulares, em que os fluidos são gases que passam através dos tubos, ou aquatubulares que, como o nome indica, possuem água circulando em seus tubos. (KERN, 1980).

#### **3.3.1 Mecanismos de falha encontrados em sistemas de vapor**

Estão presentes, nas normas API – American Petroleum Institute: API 580 (*Risk Based Inspection*); API 579 (*Fitness for Service*) e API 573 (Boiler and heaters) a maior parte das informações necessárias para determinar, de forma antecipada, quais mecanismos de falha podem atuar no equipamento a ser avaliado, com a devida quantificação e avaliação dos aspectos críticos dos mecanismos de falha no equipamento. Para uma verificação mais adequada, devem-se avaliar os equipamentos próximos da condição normal de operação, porém, neste caso,

deseja-se avaliar os mecanismos de danos que são geradores de degradação em uma condição de equipamento parado, ou seja, a mesma condição em que o mecanismo de deterioração está presente. Nessas condições, fatores como a degradação por fadiga térmica e a fluência não serão detectados.

Outro fator a ser levado em conta é quantos pontos devem ser inspecionados para se ter uma real condição do mecanismo de dano. A resposta depende das características do dano, pois alguns deles têm características dispersas (ex.: corrosão uniforme) e outros, não (corrosão pontual). A decisão se uma avaliação amostral será feita e como isso deverá ocorrer deve ser tratada de forma cuidadosa para não alterar a avaliação global do trabalho. Por exemplo, se for realizada uma avaliação de todos os cordões de solda de uma tubulação de uma caldeira, um mecanismo de corrosão por ataque de hidrogênio pode afetar regiões fora dos cordões de solda.

A Tabela 8 descreve os diversos modos de deterioração que podem ser encontrados em uma caldeira e os ensaios mais apropriados para inspeção do equipamento.

Tabela 9: Fatores de escolha do ensaio mais apropriado para detecção de mecanismos de deterioração.

Fonte: <http://inspecaoequipamentos.wordpress.com/category/ensaios-nao-destrutivos/>

Mecanismo de deterioração	Tipo de descontinuidade	Locais mais prováveis	Ensaio mais indicados
Fadiga	Microtrincas superficiais	Pontos de concentração de tensão (Ex.: Soldas, ZTA de solda, Canto reto de bocais, Soldas de suporte, etc.)	Partículas magnéticas ou Líquidos penetrantes.
Fluência	Trincas superficiais e deformações	Regiões de altas temperaturas com carregamento de tensões	Partículas magnéticas ou líquidos penetrantes, dimensionais e medições de espessura
Choque térmico	Trincas superficiais e deformações	Locais sujeitos a grandes variações de temperatura.	Partículas magnéticas ou líquidos penetrantes
Corrosão sob tensão	Trincas superficiais	Pontos de concentração de tensão e meio propício (geralmente locais com altas concentrações de cloretos)	Medições de espessura ou Radiografia ou Gamagrafia.
Corrosão	Perda de material	Frestas sob depósitos, regiões com tensões diferenciais, bocais de pequeno diâmetro, locais com deficiência na proteção superficial	Partículas magnéticas ou líquidos penetrantes e medição de espessura
Deterioração pelo hidrogênio	Trincas superficiais e internas	Chapas com segregações, tensões superficiais e dupla laminação.	Medições de espessura ou Radiografia ou Gamagrafia.
Erosão	Perda de material	Regiões por mudança de fluxo, região com turbulência, bocais de pequeno diâmetro e equipamentos que trabalhem com fluidos abrasivos.	Partículas magnéticas ou líquidos penetrantes, Ultrassom, réplica metalográfica e dureza.
Alterações metalúrgicas	Trincas superficiais e internas e alterações micro estruturais	Pontos de concentração de tensão ou regiões quentes	Partículas magnéticas ou líquidos penetrantes, Ultrassom, réplica metalográfica e dureza.
Sobre pressão	Trincas superficiais e internas	Pontos de concentração de tensão	Partículas magnéticas ou líquidos penetrantes, Ultrassom

Para um sistema parado, como é a situação estudada em nosso caso, alguns modos de deterioração estão mais explícitos e constituem o foco deste estudo. Um sistema de vapor possui diversos componentes que podem ter os mecanismos de falha relacionados à sua função ou à composição de material (válvulas; tubos; flanges; drenos; etc.). Na situação atual em que se encontra a planta, tomamos a decisão de avaliar os seguintes itens:

- Vazamento em tubos
- Trancamento de válvulas de um modo geral.

O item vazamento pode ter duas causas diferentes. O termo “vazamento” refere-se a itens avaliados justamente quando a planta voltar a operar com seus fluidos, logo o mecanismo de falha só atuará após a partida dos equipamentos. As possíveis causas de um vazamento são:

- Falha em juntas de amianto ressecadas
- Falha de componentes emperrados
- Rompimento de linhas.

As válvulas e os purgadores são os equipamentos em que ocorrem os trancamentos dos componentes, sendo que, operacionalmente, as válvulas são críticas em termos de manobras e segurança para a planta. Basicamente, esses travamentos podem ser prevenidos com a remoção, manutenção e posterior acondicionamento dos componentes para utilização das válvulas, quando o sistema retornar à operação normal. A falha por ressecamento de juntas parte do mesmo princípio de prevenção, sendo que a melhor alternativa, neste caso, é a retirada da junta ressecada, limpeza da superfície de assentamento ou plano de junta e a colocação de um antioxidante sobre a superfície.

O rompimento de linhas é crítico, pois a base do equipamento caldeira está justamente em suas tubulações, que conduzem o vapor a toda à unidade industrial e que são formadas por tubos de aço carbono. A análise para definição de qual dos itens de falha de uma caldeira deve ser estudado, depende justamente de uma avaliação de aspectos críticos de cada item, porém, como é possível agir preventivamente e de forma simples do ponto de vista da intervenção, conclui-se que o aspecto crítico mais relevante está vinculado à corrosão associada aos tubos do sistema de vapor.

### 3.3.2 Impacto da corrosão em uma caldeira

Existem muitos tipos de corrosão normalmente encontrados na indústria e, em especial, num sistema exposto a uma atmosfera industrial agressiva como a siderúrgica. O processo de corrosão ocorre como uma reação natural entre uma estrutura metálica, qualquer que seja o componente ou o equipamento, e o seu ambiente. As caldeiras têm o processo de corrosão sob controle em função das medidas de proteção que as cercam, concernente à qualidade da água que circula em suas tubulações (Nas suas superfícies internas) e como a superfície externa esta exposta ao calor, consideramos como nulo o processo eletrolítico, porém, quando a caldeira passa por um período de parada, suas tubulações não são protegidas por nenhum processo anticorrosivo, iniciando-se uma aceleração do processo corrosivo. O processo de corrosão dos componentes de uma caldeira atinge principalmente as tubulações, tanto dentro da caldeira como nas linhas que levam o vapor a toda a unidade.

#### Região Dentro Da Caldeira e na superfície interna dos Tubos

Ao ficarmos com a caldeira em processo de hibernação, a superfície de um tubo de aço que esta exposta à atmosfera, é rapidamente recoberta por uma fina camada de produtos de corrosão, produzidos de acordo com o exposto na Figura 5. Essa reação tem uma velocidade que aumenta com a umidade da superfície e a presença de contaminantes, como poluentes atmosféricos. Em plantas que estão operando normalmente, internamente, os tubos são protegidos pela adição de produtos anticorrosivos na água e no vapor circulantes, exibindo, portanto, uma baixa taxa de corrosão. Nesta planta em especial foi determinado pela empresa a adoção de injeção de N<sub>2</sub> e Cal seco dentro dos tubulões coletores de água de modo a manterá superfície interna isenta de umidade.

#### Região Dentro Da Caldeira e na superfície externa dos tubos

Na região interna da caldeira e na superfície externa aos tubos, o processo corrosivo mesmo livre de intempéries, está exposto a um ambiente de alta umidade e baixa aeração, fatores importantes no processo da corrosão atmosférica dos tubos. As figuras 30 e 31 evidenciam o grau de corrosão na superfície externa dos tubos, com uma capa de oxidação bem visível.

Conforme a literatura especializada, o processo de conservação dos equipamentos em plantas que estão paradas (hibernação), consiste basicamente na proteção dos equipamentos contra os mecanismos de corrosão em diversos componentes do sistema: tubulações, eixos, válvulas, vasos de pressão, equipamentos rotativos, sistemas elétricos e eletrônicos (TWIGG, 2002; BRIGGS, 1997; NACE; CORROSION, 1998), porém dentro de uma caldeira os

Em uma planta fora de operação, o fator preponderante para acelerar o processo de degradação, tomando como base os mecanismos de falha de corrosão, é a condição atmosférica em que se encontram os equipamentos, que é agravada pela paralisação das funções operacionais. As cinzas, o material refratário e a umidade do ar propiciam uma condição para o processo de corrosão avançar e, assim, acelerar a degradação do equipamento.

Conforme citado na introdução a atual planta esta em processo de hibernação desde março de 2009, tendo parte de seus equipamentos protegidos de acordo com a recomendação de seus fabricantes. Para a caldeira foi definido como um dos meios de preservação da caldeira e de vasos da planta, a utilização de N<sub>2</sub>, a 99% e a uma pressão constante de 0,2 bar, que é lançado nos tubos e nos vasos. O segundo procedimento usado na preservação foi a utilização de cal virgem para a absorção de umidade dentro das tubulações da caldeira. O cal é substituído a cada três meses e o nitrogênio tem sua pressão verificada por um operador da utilidades semanalmente.(Betz 2008)

## 4 TRABALHO EXPERIMENTAL E DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Este capítulo mostra os detalhes dos procedimentos utilizados para a verificação dos níveis de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_2$  e umidade relativa, suas coletas, análise das amostras bem como a metodologia para a sua obtenção. São descritos os métodos de proteção contra os mecanismos de corrosão atmosférica, suas especificações e instalações de campo. Para finalizar, é mostrada a metodologia de atuação do gerenciamento da manutenção na rotina para a sistematização do processo.

A metodologia aplicada consistiu basicamente na determinação do meio protetor a ser utilizado na hibernação da caldeira. Foram feitas análises de fatores importantes que tem influência direta no processo de corrosão dos tubos localizados no interior do equipamento, de modo que este levantamento de dados fosse base para esta tomada de decisão. Foram levantados os dados de umidade e dos principais contaminantes ( $\text{SO}_2$  e cloretos) de forma a se obter valores quantitativos e qualitativos. A presença destes contaminantes foi avaliada por serem os mais agressivos. Para a parte de gestão foi adotada de forma direta as metodologias de manutenção preventiva e preditiva em função da própria condição de equipamento parado.

De posse dos dados dos contaminantes e da umidade, definiu-se o método de aquecimento no interior da caldeira como medida preventiva do controle da corrosão. A eficiência do método foi avaliada através do monitoramento da umidade e da variação da espessura dos tubos, antes e depois da aplicação do método.

### 4.1 REGIÃO DE MONITORAMENTO

O objeto de estudo é uma caldeira da marca Swindell Dresser Company com as seguintes características:

#### DADOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS

Fabricante : Swindell – Dressler Company

Capacidade de produção de vapor : 32,2 Ton/h



Pressão máxima de trabalho : 21,8 Kgf/cm<sup>2</sup>

Pressão de operação : 18,0 Kgf/cm<sup>2</sup>

Pressão de teste : 30,0 Kgf/cm<sup>2</sup>

Temperatura de operação : 365°C

Norma de fabricação : ASME SEÇÃO I edição 1.968.

Fabricação : 1971

Categoria : B

O interior da caldeira foi definido para se fazer o monitoramento das principais variáveis ambientais que influenciam no processo de corrosão atmosférica no equipamento, visto que seu principal componente, que são os tubos, se encontram dentro dela. A caldeira se localiza a 240 metros, em uma região a oeste de uma aciaria figura 14 e também de um pátio de sucata, o que pode influenciar fortemente devido aos gases provindos dessa área. Na Figura 15 temos um desenho 3D que mostra a disposição dos tubos e queimadores com o indicativo dos many folds de entrada e saída d água.

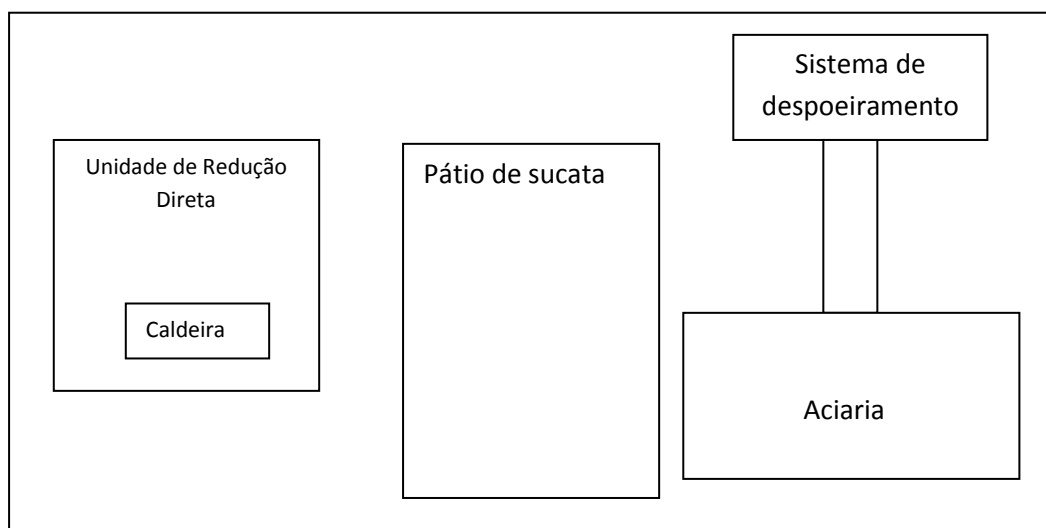


Figura 14: Croqui de localização da planta.

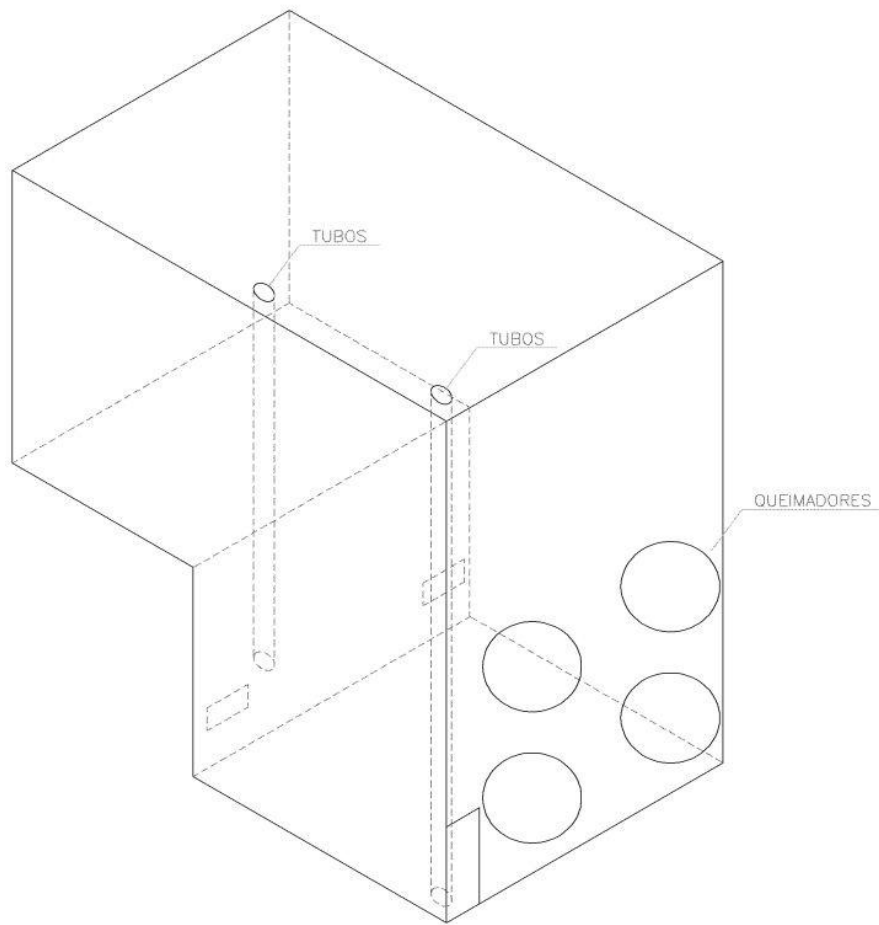


Figura 15: Desenho 3 D da caldeira, indicando tubulações, queimadores e bocas de visita.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS

A taxa de absorção do cloro, no interior e exterior do equipamento, foi avaliada utilizando a metodologia da vela úmida, descrita na norma NBR 6211. Este método aplica-se especificamente à determinação de cloro (Cl) proveniente de atmosferas poluídas e de cloretos solúveis em água como os existentes em aerossóis de atmosferas marinhas e industriais depositados sobre a superfície de uma área conhecida, durante um período de 30 dias.

A vela coletora de cloretos atmosféricos foi montada conforme descrito na norma NBR 6211 a partir de um cilindro de vidro envolvido com gaze cirúrgica com área de 100 cm<sup>2</sup> conforme se observa na Figura 16. As extremidades da gaze foram mergulhadas na solução coletora, formada por: uma solução de 20% de Glicerol em água destilada, com a finalidade de aprisionar o conteúdo absorvido pela gaze.



Figura 16: Foto do frasco coletor

Foram posicionados dois frascos coletores um fora da caldeira, localizado a 3 m da boca de visita principal e um amostra no interior da caldeira localizado a 1m do piso e no centro entre as paredes leste oeste e norte sul. As amostras foram coletadas dentro e fora da caldeira, para avaliar o potencial agressivo dos contaminantes atmosféricos nas regiões em que os tubos estão expostos e também na área externa permanecendo por um período de 30 dias.

Terminado o tempo de exposição, o material coletado foi enviado ao CEPED (Centro de pesquisa e desenvolvimento do estado da Bahia), para a determinação de cloreto através de titulação com solução diluída de nitrato de mercúrio.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE ENXOFRE

Foi realizada conforme a Norma L9. 226 CETESB, a qual prescreve o método de determinação do dióxido de enxofre do fluxo gasoso em dutos e chaminés de fontes estacionárias e que se aplica a nos casos em que o fluxo não contém gotículas. Esse procedimento foi realizado pela empresa MCA Engenharia Ambiental, utilizando um detector de gases do tipo Eagle (Multi-Gas Detector) com um limite de 0,1 ppm de SO<sub>2</sub>, programado para coletas a cada minuto, obtendo-se um total de 150 medições para compor uma amostra. Foram realizadas 3 amostras, duas no interior e a terceira no exterior da caldeira.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CORROSÃO

Os óxidos presentes na superfície externa do tubo foram caracterizados através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Raios-X (EDX) para identificação dos produtos de corrosão. A MEV, foi escolhida para esta análise, por ter capacidade de avaliar de forma qualitativa e semi-quantitativa a composição de uma amostra de óxido, podendo indicar se há produto de corrosão formado devido à influência do SO<sub>2</sub> e cloretos. Esta análise foi feita pelo CEPED (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Bahia).

#### 4.5 PROCEDIMENTO DE PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO ATMOSFÉRICA

Foram testados dois métodos de aquecimento para a redução de umidade: por lâmpadas e por resistências elétricas. Inicialmente foram 4 lâmpadas de vapor de sódio de 1000 w cada, perfazendo um total de 4000 w. Essas lâmpadas foram instaladas na posição onde ficam os atuais queimadores, ao sul da caldeira, com duas lâmpadas a 1,5m de altura do piso e as outras duas a 3,5m, dispostas em formação de quadrado, conforme representação em vermelho na Figura 17 abaixo:

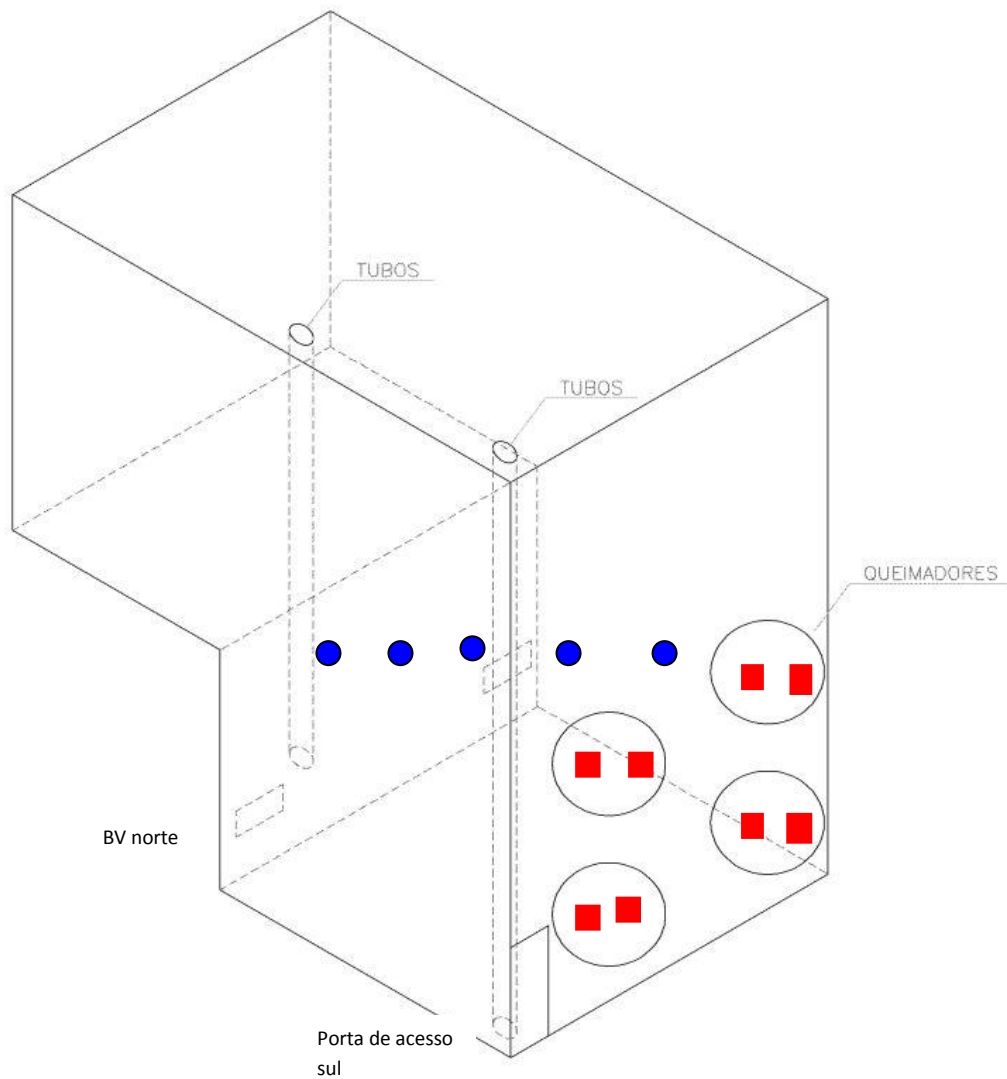


Figura 17: Desenhos indicando o posicionamento das lâmpadas na caldeira.

Inicialmente a carga térmica testada foi de 4 kW. Variáveis como o nível de umidade do refratário e as condições atmosféricas não permitiram uma condição exata para o cálculo da carga de energia necessária para um aquecimento do ambiente capaz de conduzir ao abaixamento da umidade a valores inferiores a 65%, por isso foram feitos os testes com maior carga térmica e a eficiência do método foi avaliada através do monitoramento da umidade.

Foram adicionados mais 5 lâmpadas de 2000W/cada posicionadas uma ao lado da outra, distando entre si 1,5 m e a uma altura de 3,5 m do piso (Figura 17, círculos em azul). A Figura 18 mostra a disposição das lâmpadas no interior do equipamento.



Figura 18: Foto da disposição das lâmpadas na área interna da caldeira.

As lâmpadas permaneceram durante 15 dias dentro da caldeira e não houve um aumento significativo da temperatura do ambiente.

Em função da baixa carga térmica emitida pelas lâmpadas de vapor de sódio, optou-se por substituí-las por resistências de cerâmica de 1000 W (modelo CQZ 250 x 1000W ), num total de 15 unidades de resistência, perfazendo um total de 15 kW, a figura 19 mostra o desenho construtivo das resistências. As resistências de cerâmica possuem maior capacidade de dissipação de calor e eficiência térmica. Foram posicionadas 6 placas na posição dos queimadores e 9 placas transversalmente na diagonal a 3,5 metros do piso, conforme mostram as Figuras 20 a) e b). A disposição das resistências foi escolhida de modo que se conseguisse de maneira simples e fácil de posicioná-las de acordo com o espaço e a geometria da área interna da caldeira.

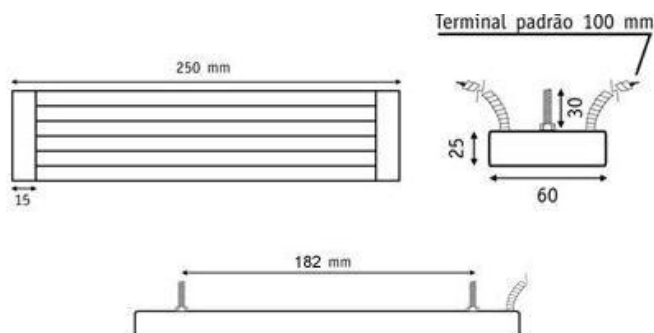


Figura 19: Resistência de cerâmica de 1000 w modelo CQZ 250 x 1000w. Fonte: Site Corel 2011



Figuras 20 a) e b) – Disposição das resistências dentro da caldeira

#### Cálculo do consumo de energia

O consumo de energia foi calculado observando os dois tipos de demanda para uma siderúrgica; a primeira de 21 às 18h e a segunda das 18 às 21h. Os valores do custo da energia são valores específicos desta siderúrgica. Segue planilha de cálculo para o consumo de energia relativo a iluminação e resistências no local do experimento:

Tabela 10: Planilha de custo da energia elétrica gasta com o consumo das resistências elétricas e iluminação do local do experimento

CUSTO DA ENERGIA *	TEMPO POR DEMANDA (h)	ENERGIA GASTA DIA (MW/h)	CUSTO DA ENERGIA POR DEMANADA (R\$)
68,1 R\$/Mwh	21-18	21	0,357
96,23 R\$/Mwh	18-21	3	0,051
CUSTO TOTAL DIA			29,22
CUSTO TOTAL MÊS			876,58

O custo de preservação mensal utilizando a técnica de aquecimento por resistências elétricas tem um valor mensal de R\$ 876,00 por mês. O cálculo foi baseado no horário normal de 21 às 18h e o horário de ponta de 18 às 21h. Um serviço de parada da planta para uma intervenção simples de manutenção (recuperação por solda em trinca de um dos tubos internos da caldeira), chega a custar R\$ 700.000,00(setecentos mil reais) para uma interrupção de 16 horas (entre o momento da parada e o momento da partida da planta).

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

A determinação de umidade foi feita no interior da caldeira em estudo utilizando-se um medidor termo-higrômetro digital (equipamento com capacidade de medir temperatura e umidade) conectado a um notebook que possua capacidade para armazenamento dos dados (PC com RAM de no mínimo 128Mb e HD com no mínimo de 20Mb livre). O termo-higrômetro possui as seguintes características: Faixa de temperatura de 0 a 60°C com precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , faixa de umidade relativa de 0 a 100%  $\pm 2,5\%$ . Foi utilizado o software MTH<sup>®</sup> (Minipa) para a transmissão dos dados do medidor para um *notebook*.



Figura 21: Foto do medidor e note book para coleta de dados de umidade

O instrumento de medida e o *notebook* foram posicionados no piso da caldeira sobre uma base refratária conforme figura 21. Tanto as bocas de visita (existem duas bocas no lado norte, na dimensão de 30x20cm) como uma porta de acesso (2,5x1m, localizada na posição sul) ficaram fechadas durante a medição. Esta caldeira possui um sistema de tiragem a 50% da altura do equipamento, atrás dos tubos da radiação, que permaneceu aberto para a atmosfera.

As verificações da umidade e temperatura foram efetuadas em 5 períodos, sendo 2 períodos de medições antes da colocação do sistema de proteção e os demais logo após a instalação dos meios de proteção e os demais após a instalação do sistema de proteção da caldeira, conforme indicado abaixo:



- Dia 13 de junho de 2011 (Caldeira hibernada há 18 meses)
- De 5 a 8 de julho de 2011 (Após a instalação de telhado e reparo do assoalho superior)
- Dias 14/15 e 17 de julho de 2011 (Após a instalação do sistema de aquecimento por lâmpadas)
- Dias 26 e 27 de julho de 2011 (Após a instalação do sistema de aquecimento por resistências)
- Dias 18 a 22 de outubro de 2011 (3 meses após a instalação do sistema de aquecimento por resistências)

Obs: Após a parada da caldeira e com chuvas constantes foram detectadas trincas no assoalho superior, durante a medição de umidade realizada nos dias 11 a 13 de junho. Através destas trincas havia entrada de água para dentro do equipamento.

A caldeira não possuía um telhado, fato determinante para o acúmulo de água e degradação acelerada da sua estrutura metálica externa e, por consequência, interna.

Para minimizar os efeitos de entrada de água através de fissuras do teto da caldeira, foi construído do dia 15 ao dia 5 de julho de 2011, um telhado na região superior do equipamento conforme indicado na Figura 22 abaixo.



Figura 22– Foto da área externa da caldeira.

As medidas foram realizadas sem interrupções nos períodos especificados. Nota-se que foram escolhidos períodos aleatórios variando dias chuvosos e secos conforme tabelas de índice pluviométrico medidas pela defesa civil de da cidade do Salvador (Anexo 2).

#### 4.6 MEDIÇÃO DE ESPESSURA

Foi utilizada a técnica de ultra-som para medição de espessura. Foi avaliado o grau de integridade das tubulações da caldeira e sua evolução ao longo do tempo. Essas medidas foram utilizadas para estimar indiretamente a taxa de corrosão dos tubos. Para a execução destas medições foi feita a contratação de uma empresa especializada em inspeção de equipamentos (Acinor Inspeções e Serviços Técnicos). Para se efetuar as medidas, houve a necessidade de liberação por parte da segurança do trabalho em função do espaço a ser utilizado, ser um ambiente confinado. Após a medição dos níveis de oxigênio e outros gases do ambiente e ter a liberação por parte do técnico de segurança e engenheiro responsável da área, o

serviço de medição pode ser iniciado. As medições de espessura foram efetuadas por um técnico habilitado que efetuou as medições nos tubos das laterais leste/oeste e norte da região na área interna da caldeira. A medição consistiu em primeiro verificar com bloco padrão a verificação da medida, de modo a certificar-se que o instrumento estava calibrado de forma correta; depois foi feita a limpeza da superfície para a remoção dos óxidos, com a posterior passagem sobre esta superfície de um gel (acoplante) de modo que o sensor possa ser deslizado sobre o local a ser efetuada a medição.

As medições foram efetuadas e registradas pelo técnico em uma tabela a cada medição efetuada. Ao final das medições que duraram 02 dias, as mesmas foram levadas a empresa, que nos retornou com o relatório da execução do serviço.

Foram executados 03 ensaios de medição nos tubos da área interna da caldeira segundo indicado abaixo:

Primeira medida entre 14 e 27 de setembro de 2010 (Planta com 18 meses de hibernação).

Segunda medida entre os dias 03 e 04 agosto de 2011 (Planta com 29 meses de hibernação).

Terceira medida entre os dias 21 e 22 de novembro de 2011 (Após a colocação do sistema de proteção).

A tabela 11 mostra os detalhes técnicos relativos ao aparelho, à norma e ao transdutor utilizados na medição de espessura dos tubos da caldeira.

Tabela 11 – Informações técnicas relativas ao medidor de espessura : Fonte Acinor

INFORMAÇÕES TÉCNICAS			
Norma de Ref: ASME VIII – DIV -1	APA RELHO		TRANSDUTOR
PROCED. / PI-END-003	MODELO	SONAGE III	MODELO: SIDP COATING
MATERIAL; AÇO CARBONO	FABRICANTE:	SONATEST	FABRICANTE: SONATEST
TEMPERATURA: AMBIENTE	Nº DE SÉRIE	50134	Nº SÉRIE N 696
ACOPLANTE METIL	BLOCO PADRÃO	ESCALONADO	FREQUENCIA: 5MHZ

Para as medições realizadas em agosto de 2011, conforme figura 23, foi avaliada apenas a primeira elevação, ou seja, os pontos P1 e P2. Em função de todo o sistema de preservação já estar em andamento, não havia possibilidade de montagem de andaime de acesso aos níveis superiores.

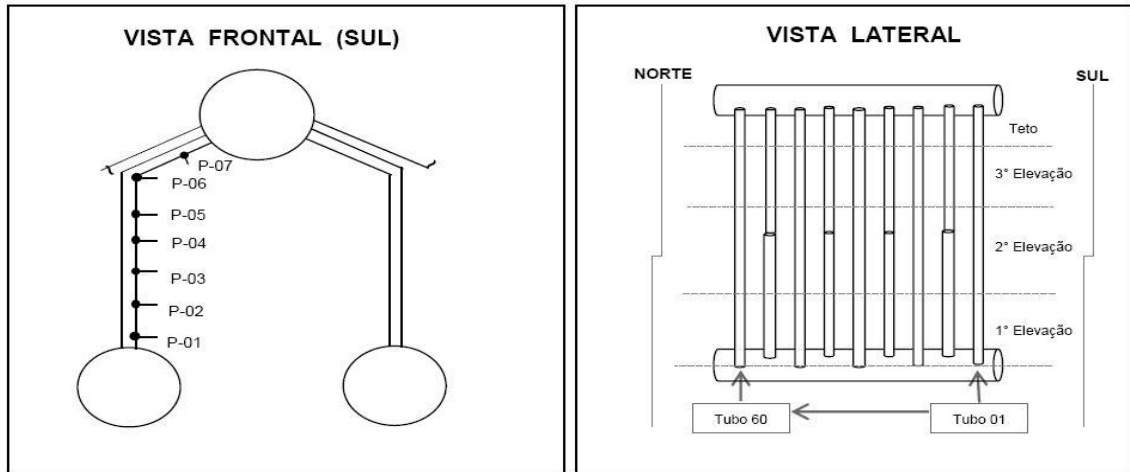


Figura 23 – Desenho esquemático do posicionamento dos pontos de medição de espessura nos tubos da caldeira. Fonte: Acinor (2010).

Os tubos estão posicionados em três profundidades distintas (figura 24), sendo que as segunda e terceira fileiras de tubos são de difícil acesso, fator que dificulta a medição de espessura. Os tubos de difícil acesso não tiveram suas medições executadas.

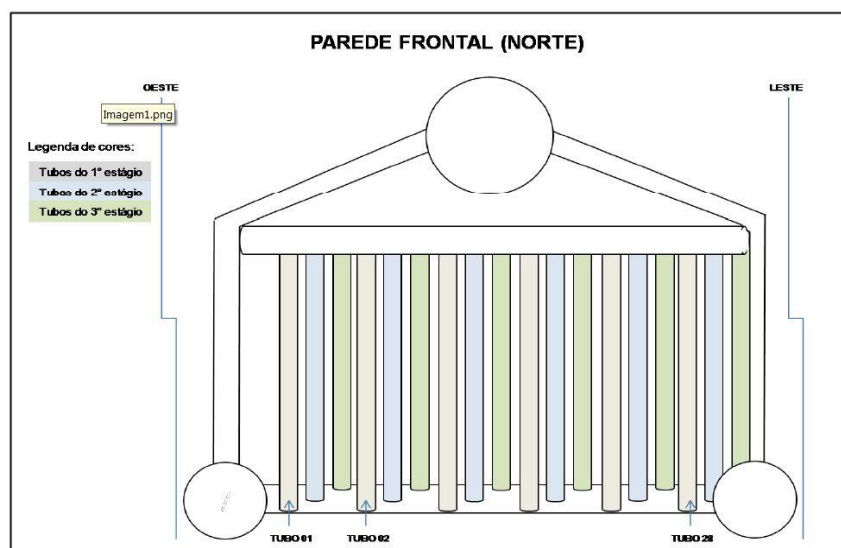


Figura 24 – Vista detalhada da posição entre os tubos da face norte da caldeira. Fonte: Acinor (2010).

#### 4.8 IMPLANTAÇÃO DO PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVO E PREDITIVO

Para o controle do monitoramento das condições físicas da caldeira, foi implantado no sistema SAP no dia 01/09/2011 um plano de preventiva semanal e um plano de preditiva semestral, de modo a monitorar as variáveis que mais afetam o processo de corrosão dentro da caldeira (parte externa dos tubos), que são temperatura do ambiente, local onde se encontram as resistências e a espessura dos tubos da caldeira, variável que reflete a integridade do equipamento este plano teve como data base de início o dia 15/09/2011, de modo a treinarmos a equipe de operadores das utilidades sobre o plano e o mesmo deveria ser executado em campo.

Através da análise e das características do sistema, foram criados planos de manutenção preventiva e preditiva, e estes foram implantados no *software* de gerenciamento da manutenção (Módulo de Manutenção do SAP), com os seguintes textos descritivos:

- Verificação da temperatura nos pontos 01/02/03 no indicador digital .Faixa de trabalho entre 33 e 41 °C
- Verificação das condições físicas das resistências (Observar visualmente o funcionamento das resistências, que devem estar em rubro; Cabos elétricos deformados, ressecados ou com trincas aparentes).
- Observar abertura das bocas de visita (Fechadas 100%).
- Observar e corrigir entradas de ar falso (pontos de entrada de ar na carcaça do equipamento, aberturas com dimensões maior que 10mm).
- Conforme descrito na folha do plano a periodicidade desta atividade é quinzenal. Verificar folhas das preventivas no anexo 1.

Esse plano é executado semanalmente por um operador especializado ligado à área de utilidades da empresa, para checagem dos parâmetros pedidos na preventiva. Caso haja anomalias, o operador pode corrigi-las de imediato se for possível e, se houver necessidade de apoio, ele deve programar uma manutenção corretiva para corrigir o problema (principalmente envolvendo a parte das resistências e o sistema de força que alimenta o sistema elétrico).

Foi criado, no sistema SAP, um plano de manutenção preditiva de medição de espessura no dia 29/09/2011, que gera uma ficha de monitoramento para a

verificação da medição de espessura dos tubos internos da caldeira. A detecção de evolução do desgaste dos pontos medidos leva a uma verificação das variáveis de preservação do sistema (temperatura e umidade) e por consequência, resistências, corrente do sistema elétrico, entrada de ar falso, etc.

- Frequência – a cada 6 meses
- Descritivo – medição de espessura em dois níveis diferentes, conforme a figura 24, nos pontos P1 e P2. Em cada nível, deverá ser medida espessura em cada um dos tubos, ou seja, 60 medidas por lateral, posição norte e sul e 24 na parede norte. Os locais de medição já estão com superfície pré-limpa e com identificação numérica.

O procedimento deverá ser efetuado por 2 pessoas habilitadas no procedimento de medição de espessura, conforme norma ASME VIII DV - 1. A empresa em que a caldeira se encontra não possui nos seus quadros de manutenção, uma equipe específica para a inspeção de equipamentos, fato este que leva a equipe de manutenção a terceirizar este tipo de serviço.

As ordens de manutenção são baixadas mensalmente pela a equipe responsável e executadas de acordo com o planejamento de cada área, neste caso a equipe de operadores da utilidades (Operadores/mantenedores). Após a execução da preventiva, a mesma deverá ser registradas no sistema SAP, no local de instalação do equipamento, com os dados obtidos do serviço.

Como a execução da preditiva depende de um serviço terceirizado de contratação, a ordem de preventiva que for baixada no mês, deverá ser encaminhada ao planejador que irá fazer uma programação de contratação para a vinda da empresa de medição de espessura. Esta empresa já possui um contrato específico para este tipo de serviço, o qual facilitará a sua contratação.

Após o recebimento do relatório por parte da contratada, o mesmo será avaliado pela engenharia de manutenção e posteriormente registrado no sistema SAP. Os arquivos em mídia e papel do relatório serão arquivados em local de fácil acesso para consultas futuras.

- **Aspectos de segurança**

Os seguintes aspectos de segurança devem ser observados PA a execução do procedimento de medição de espessura no interior da caldeira:

As pessoas para acessar a caldeira deverão estar habilitadas em NR 33 (Espaço confinado).

Deve ser emitida PT (permissão de trabalho) de acesso a espaço confinado, liberado por pessoal habilitado, técnico de segurança e engenheiro responsável da área. Itens de verificação para liberação do equipamento: Linhas de entrada de gás aos queimadores com raquete; Iluminação de 24V; maca de resgate próximo.

Para a execução do ensaio o inspetor deverá utilizar os EPI's (Equipamentos de Proteção Individual) necessários para garantir a sua segurança pessoal, em atendimento às normas no Ministério do trabalho e da empresa para a qual os serviços estiverem sendo prestados.

O inspetor somente executará o ensaio se o equipamento sob ensaio tiver condições plenas de segurança quanto ao acesso, queda de objetos, existência de gases ou líquidos tóxicos ou explosivos, etc.

Devem ser consideradas as recomendações ambientais aplicáveis no local do ensaio, tais como destinação seletiva de: escovas rotativas usadas; lixas ou outro material de descarte a ser usado neste ensaio.

OBS; Como a porta de visita tem dimensões de  $(2 \times 1) \text{m}^2$ , praticamente paralela ao assoalho inferior, não se necessita de tripé de resgate para este serviço.

Segue na planilha da figura 25 um resumo das atividades de manutenção para verificação das condições físicas e situação do sistema de preservação da caldeira.

Planos de Manutenção Hibernação Caldeira					Períodos de Inspeção:		Legenda de Marcação:																					
Área: Redução Direta		Célula: Manutenção		Equipamento: Caldeira 201B		Mês/Ano		<input type="checkbox"/> -Programação das inspeções <input type="checkbox"/> -Inspeção sem anomalias <input checked="" type="checkbox"/> -Inspeção com anomalias																				
AÇÃO	IMPLANTAÇÃO	PERIODICIDADE	FORMA DE ACOMPANHAMENTO	Verificar / Parâmetro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	31		
Plano de manutenção Preventiva	01/09/2011	Quinzenal	Verificação de temperatura	Indicador digital / Temperatura na faixa de (33 a 41 °C)																								
			Funcionamento das resistências(Visual)	Cor vermelha																								
			Visual	Condição física do costado do equipam																								
			Visual	Condição da bocas de visita																								
			Medição de amperagem	Corrente elétrica ( 68 amperes)																								
Plano de manutenção Preditiva	15/09/2011	Semestral	Medição de espessura	Espessura da parede dos tubos da caldeira 1 ° elevação);Pontos P1 e P2																								

Figura 25: Planilha resumo manutenções no sistema das resistências.



## 5 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo, estão reunidos todos os resultados alcançados, sendo devidamente avaliados e discutidos em relação aos padrões de referência, dados da literatura e objetivos previstos na dissertação.

### 5.1 MONITORAMENTO DOS CONTAMINANTES

A maior parte da corrosão dos materiais encontra-se associada à concentração de íons presentes na atmosfera, principalmente, quando expostos na proximidade de regiões marítimas e próximos às zonas de arrebentação das ondas do mar, bem como nos contornos das regiões industriais ou próximos a zonas de queima de combustíveis fósseis. O atual sistema avaliado encontra-se situado na Região Metropolitana da Cidade do Salvador, Bahia, dentro de uma área industrial situada nas proximidades do bairro de Valéria (o bairro é a divisa entre os municípios de Salvador e Simões Filho). Desta maneira, a concentração de cloretos e de  $\text{SO}_2$  foi investigada na região próxima e no interior da caldeira para avaliação do real risco de corrosão do equipamento, acelerado por esses contaminantes.

#### 5.1.1 Teor de cloretos

A Tabela 12 mostra os teores de cloreto medidos nas amostras dentro e fora da caldeira. Observa-se que foram encontrados valores distintos entre os dois casos, indicando uma menor contaminação na região interna. A análise de detecção do cloreto, pela Norma NBR 6211, foi realizada pelo CEPED-Bahia.

Tabela 12: Valores de cloretos encontrados na caldeira Fonte: CEPED (2011).

AMOSTRA 01 – REGIÃO INTERNA DA CALDEIRA			
Ensaio	Resultado	Unidade	Método
Cloreto	0,049	mg Cl/m <sup>2</sup> * dias	ABNT 6211/2001
BRANCO – ÁREA EXTERNA DA CALDEIRA			
Cloreto	0,105	mg Cl/m <sup>2</sup> * dias	ABNT 6211/2001

Segundo a Tabela 6 de corrosividade de Liesegang sub item 2.2.4.5, os valores obtidos estão na faixa de baixa corrosão, comprovando a baixa presença deste material entre os contaminantes atmosféricos que podem acelerar o processo de corrosão dos tubos da caldeira. Os baixos valores de cloretos também estão relacionados com a própria distância do equipamento avaliado, em relação à fonte marítima, perfazendo um total de 5,4 km. O fechamento da porta de visita da caldeira evidencia uma forma eficiente na redução dos contaminantes, pois, ao efetuarmos as medidas com a porta fechada, existe uma diferença de 50% dos valores encontrados na área interna e na área externa da caldeira.

### 5.1.2 Teor de sulfetos

O teor de SO<sub>2</sub> avaliado na região da caldeira está expresso em ppm de SO<sub>2</sub>. Esses valores estão descritos nas tabelas 13, sendo estas medidas feitas com a utilização do medidor digital.

Tabela 13: Dados de SO<sub>2</sub> obtidos com o medidor EAGLE (unidade ppm). Fonte: MCA 2011

Número de coletas	No interior da caldeira		No exterior da caldeira	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
150	0,0	0,3	0,0	0,4

Pelos valores obtidos e fazendo-se uma comparação com as referências de corrosividade, constatamos que, segundo a Tabela 12, existe uma alta taxa de concentração de enxofre com uma concentração de 0,4 ppm, oriunda dos gases queimados do forno elétrico que se encontra localizado a oeste da caldeira.

O valor máximo de enxofre encontrado no sistema pode ser correlacionado com o gráfico de perda de material apresentado no gráfico da Figura 11 no sub item 2.2.4.4, no qual verificamos uma perda de material grande, pois o período de exposição é muito curto igual a um mês na faixa de 0,5 ppm de SO<sub>2</sub>. Os atuais níveis de SO<sub>2</sub> detectados na caldeira também podem ser correlacionados com o

gráfico da figura 10, pois a velocidade de corrosão para o ferro para uma atmosfera de 0,1 ppm e 90% de umidade ocorre quase que exponencialmente e em horas.

Na tabela abaixo verificamos o resultado da análise dos produtos de corrosão. Pode-se observar na tabela 14, que dos componentes encontrados nesta análise, o enxofre foi o que apareceu em maior percentual, perfazendo um total de 2,7%. Foram detectados dois tipos de superfície das amostras entregues ao laboratório, uma amarelada e outra vermelha. Na figura 28 a) e b) podemos verificar as fotografias dos produtos de corrosão para a superfície amarelada e avermelhada obtidas através do MEV.

Tabela 14: Determinação dos produtos de corrosão através do EDX Fonte: CEPED 2011

<b>RESÍDUOS DE CORROSÃO – Superfícies amareladas</b>			
<b>Elementos detectados</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método</b>
Silício	0,2	% Si	MEV
Manganês	1,3	%Mn	MEV
Enxofre	0,2	%S	MEV
Cálcio	0,1	%Ca	MEV
Ferro	98,2	%Fe	MEV
<b>RESÍDUOS DE CORROSÃO – Superfícies avermelhadas</b>			
<b>Elementos detectados</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método</b>
Silício	0,4	% Si	MEV
Manganês	2,7	%S	MEV
Enxofre	0,2	%Mn	MEV
Ferro	96,4	%Fe	MEV

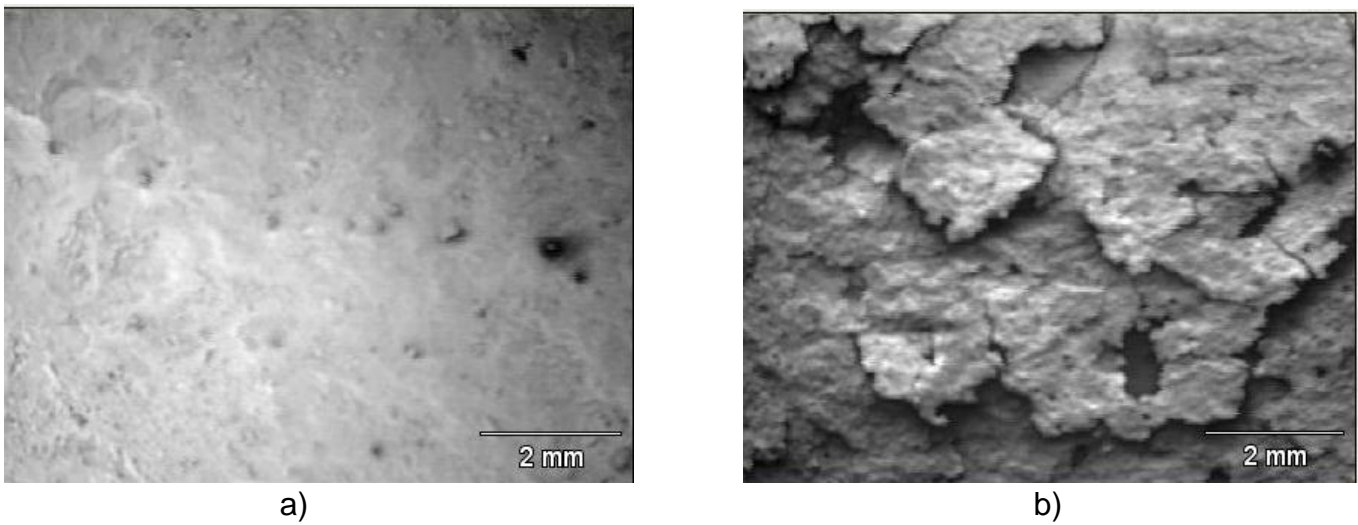


Figura 26: Fotomicrografias das amostras obtidas a partir dos produtos de corrosão retirados das paredes da caldeira após um ano de hibernação; (a) superfície que apresentava coloração amarelada; e (b) superfície que apresentava coloração avermelhada.

## 5.2 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SISTEMA

Os valores de umidade foram coletados nos meses de junho e julho, meses em que existe uma maior atividade pluviométrica na Cidade do Salvador. O site industrial, região onde se encontra a caldeira, está localizada na Região Metropolitana da Grande Salvador, e temos, no período entre abril e julho, o maior índice pluviométrico do ano, com concentração de 52,5% (1101,4mm) das chuvas que ocorrem durante o ano (Defesa civil 2011). As medições foram feitas justamente para evidenciar os valores de umidade em seu ponto mais crítico.

A seguir, podemos verificar os gráficos que mostram os valores de umidade e temperatura em cada período medido.

Foram feitas medidas de umidade antes e depois da colocação do sistema de proteção. O gráfico da Figura 29 com dados coletados no dia 13 de junho de 2011, efetuados dentro do ambiente da caldeira, apresentou valores de umidade relativa entre 88,9% e 94,7%, enquanto a temperatura permaneceu entre 22,4 °C e 24,1 °C. Houve 1 ponto abaixo da faixa de 90% e a grande maioria entre 93% e 94%, indicando um ambiente de umidade extrema e nociva em relação a preservação do equipamento.

Durante esse processo de medição da umidade, pode-se observar a existência de uma camada úmida em excesso na parede do tubo. Os tubos na entrada da porta de visita possuíam um valor de umidade que pode ser sentido no toque das mãos. Foi feita uma inspeção mais detalhada e constataram-se entradas de água pelo assoalho superior proveniente de furos na chaparia da caldeira.

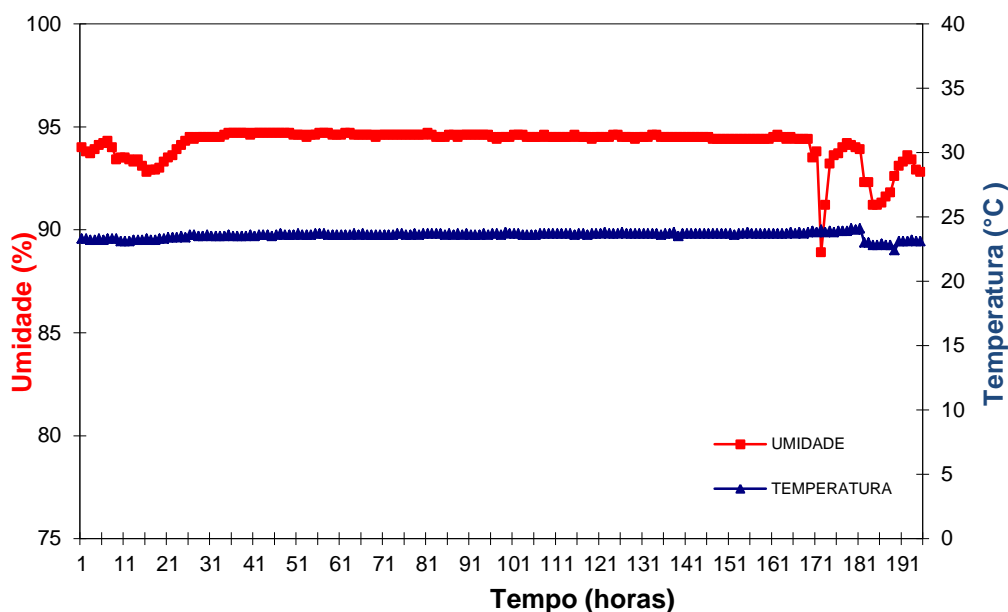


Figura 27: Variação da umidade e da temperatura dentro da caldeira no dia 13/06/2011.

Foram executados os reparos de caldeiraria na chaparia do teto e construção de um telhado entre os dias 15 de junho e 05 de julho de 2011, de forma a proteger o equipamento de possíveis infiltrações de água.

Foram executadas novas medições de umidade de forma a não mascararmos as medições por condições inadequadas do equipamento. As novas medidas foram realizada no período de 5 a 8 de julho de 2011. O que se pode avaliar no gráfico da Figura 30 é que os valores de umidade chegam a atingir 97,1%, enquanto a temperatura se mantém baixa, não ultrapassando valores de 26,3 graus centígrados.

Mesmo para períodos diferentes de medição, verificamos os altos valores de umidade dentro do equipamento mesmo em dias ensolarados e quentes. A região de monitoramento conforme explicada no parágrafo anterior, foi monitorada em um período de chuvas intensas. Mesmo após serem feitos os reparos, a umidade continuava alta, conforme as medidas feitas no ambiente da caldeira. As variações

de umidade observados no gráfico da figura 30, tem influência das condições de entrada e saída de ar entre a porta de visita e da chaminé de tiragem que possa ter ocorrido, em função da entrada e saída de pessoas para montagem do sistema de aquecimento dentro do ambiente da caldeira( a montagem do sistema de lâmpadas se intercalou entre os dias 5 e 13 de julho).

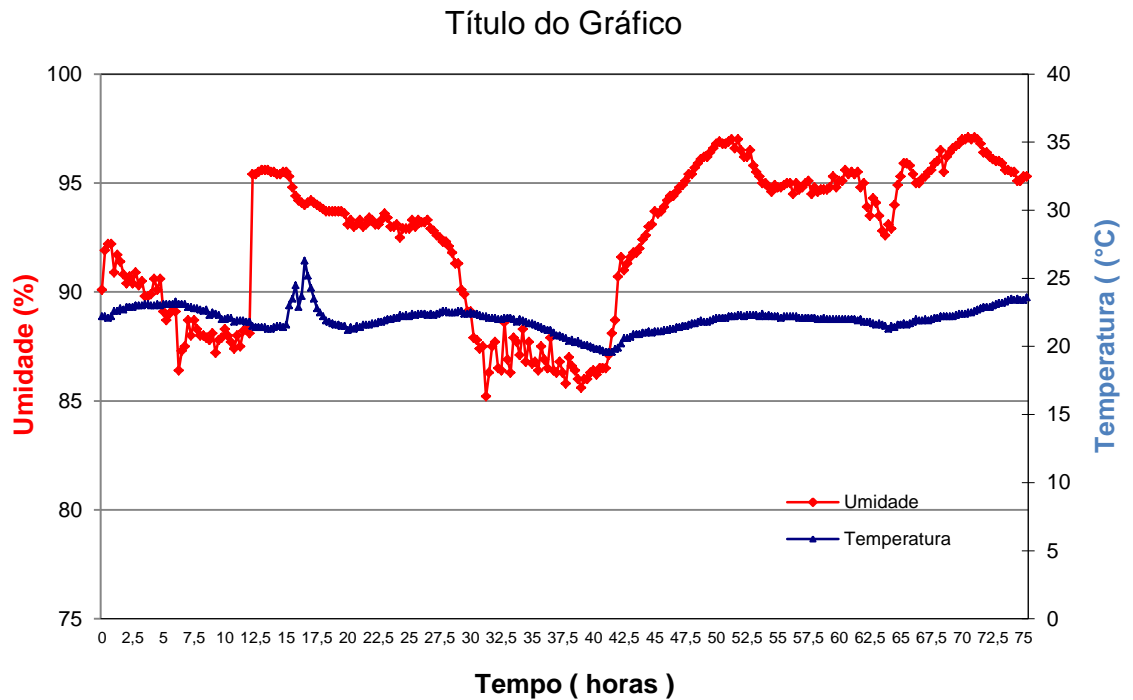


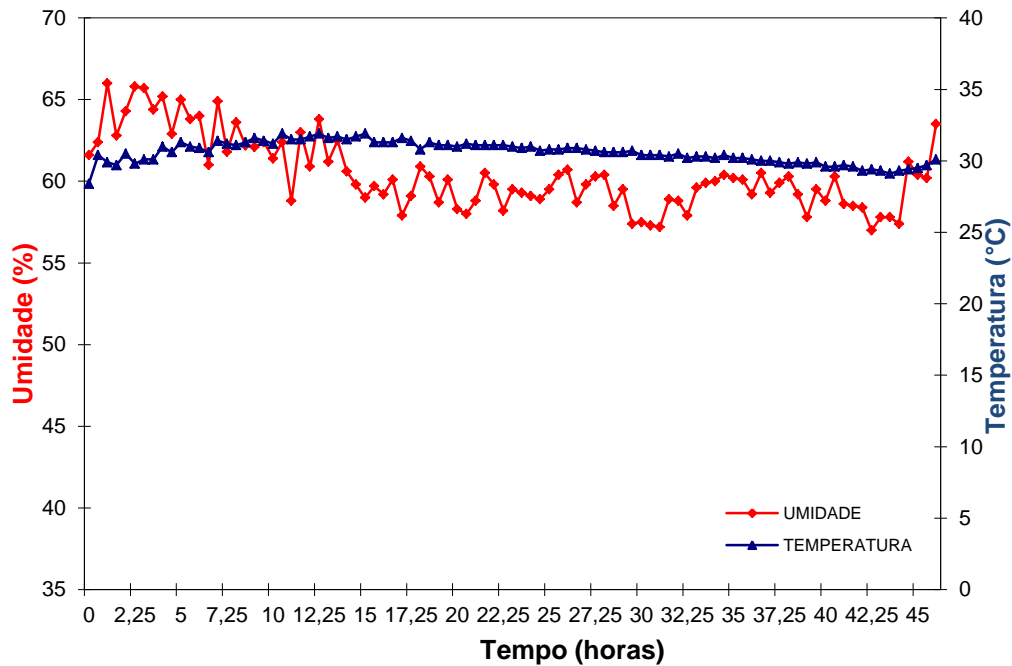
Figura 28: Variação da umidade e da temperatura dentro da caldeira durante o período de 05/07/2011 a 08/07/2011.

As condições de umidade no qual a ambiente interno da caldeira se encontrava possuem uma alta tendência de corrosão, e para ambientes que possuem componentes metálicos a atmosfera é altamente danosa.

### 5.3 SISTEMA DE PROTEÇÃO

A montagem do sistema de proteção inicialmente com lâmpadas, conforme descrito anteriormente foi montado entre os dias 5 e 13 de julho. Com a instalação do sistema de aquecimento na área interna da caldeira, tivemos um gradual aumento da temperatura e queda da umidade. Conseguimos atingir uma umidade mínima de 53,5% e máxima de 63,5%. A temperatura do sistema oscilou de um valor máximo de 31,9 °C e mínima de 27,8°C. Como podemos ver no gráfico da

Figura 31, a umidade possui uma tendência de queda inicialmente e, depois, uma estabilidade. Como nosso objetivo era o de redução da umidade a valores menores que 50%, buscamos um meio mais eficiente de transmissão de energia. Podemos colocar duas hipóteses, a primeira de que parte da energia fornecida pelo sistema de aquecimento, foi necessário para absorver parte da umidade



Figura

Figura 29 : Variação da umidade e da temperatura controladas dentro da caldeira durante o período de 14/07/2011 a 15/07/2011 e no dia 17/07/2011 com utilização de lâmpadas.

As resistências elétricas foram instaladas entre os dias 18 e 22 de julho. Após a instalação das resistências elétricas, foram coletados os dados de umidade, sendo constatado os seguintes valores que foram registrados no gráfico da Figura 32: a umidade alcançou valor máximo de 49 e mínimo de 42, e a temperatura obteve um máximo de 38,8°C e um mínimo de 28,7°C. Ficou evidenciado que, conforme a aumento da temperatura, há um decréscimo na umidade relativa. Ao entrarmos para fazermos essa medição, verificamos um abaixamento na faixa de um grau na temperatura, em função da corrente de ar que circulava neste momento.

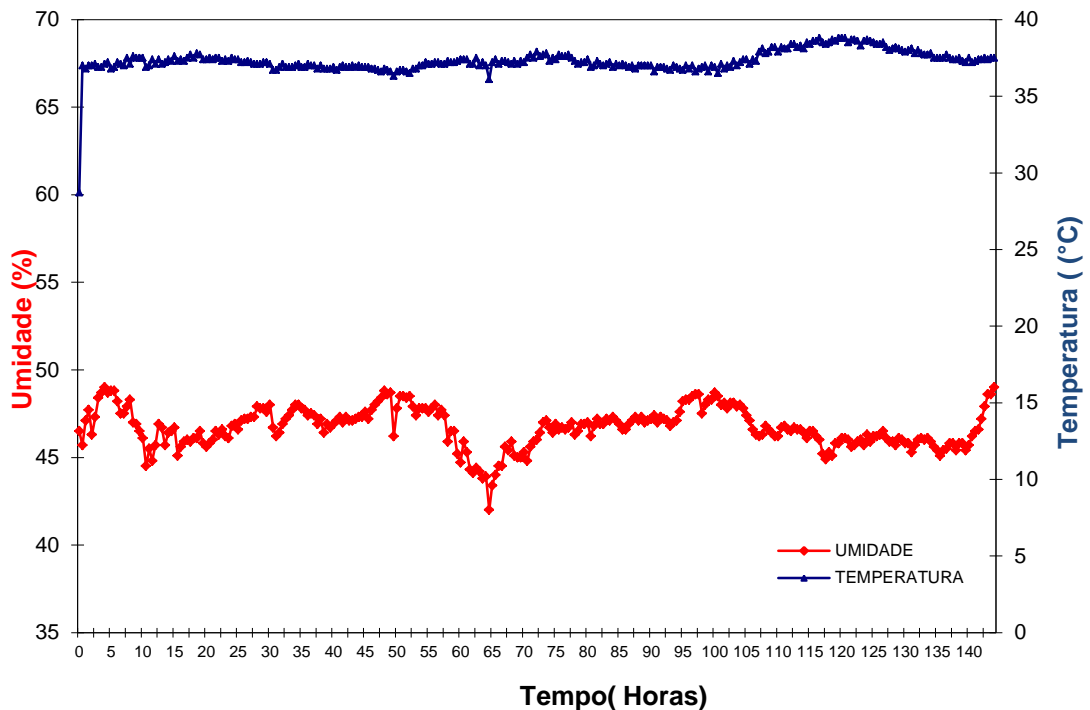


Figura 30 : Variação da umidade e da temperatura controladas dentro da caldeira durante o período de 27/07m2011 a 29/07/2011 com utilização de resistências.

Foram feitas novas medidas de umidade no período de 18 a 22 de outubro conforme gráfico da figura 33, com uma temperatura externa da caldeira no valor de 22 ° C. Podemos observar um valor de umidade máximo de 52,6 e no mínimo de 37,2 , com temperaturas no máximo de 42,6 °C e mínimo de 31° C. A variação da umidade tem relação com as baixas temperaturas da região que teve fortes chuvas durante este período. A variação interna de temperatura durante a semana da medição ficou em torno de 11,6 °C, fator que influenciou no resultado da umidade.

Com o aquecimento do ambiente e diminuição da umidade os óxidos que estavam aderidos às paredes dos tubos estão se desprendendo de forma gradativa das paredes. Estes óxidos estão visualizados nas fotos das figuras 33 a) e b).



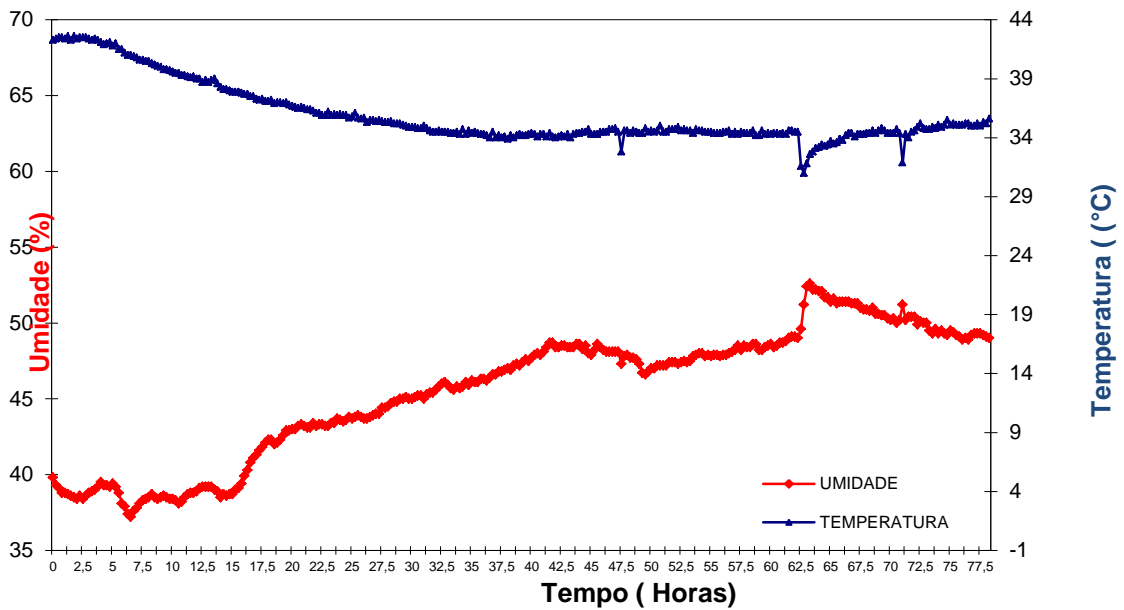


Figura 31: Variação da umidade e da temperatura controladas dentro da caldeira durante o período de 18/10/2011 a 22/10/2011 com utilização de resistências.



Figuras 32: Fotografia das paredes externas da tubulação no interior da caldeira, mostrando o desprendimento de produto de corrosão após o abaixamento e controle da umidade por aquecimento.

#### 5.4 MEDIÇÃO DE ESPESSURA

Não foi possível realizar as medições de espessura nas duas zonas superiores dos tubos da caldeira, impactando em uma avaliação mais completa do grau de desgaste dos tubos da caldeira. Com uma comparação entre as temperaturas dentro da caldeira em relação às zonas de medição, temos que os pontos mais altos ou seja as zonas que não foram feitas as medidas de espessura,

são os pontos de maior temperatura ou seja locais onde deveríamos ter uma menor perda de espessura. Como foi medido na elevação 1 que é a de menor temperatura, a medição de perda de espessura nos dá uma boa avaliação de tendência da perda de material nos tubos. Além da relação das elevações com a temperatura, a comparação das medidas de perda de massa são comparadas com os mesmos pontos anteriores medidos anteriormente, ou seja, temos condição de avaliar de maneira consistente a progressão ou estabilização no próprio ponto.

#### 5.4 TAXA DE CORROSÃO

Ficou demonstrado o grau de agressividade do ambiente da caldeira, conforme podemos verificar nos gráficos das Figuras 35 e 36, sendo essas perdas medidas em um período de 11 meses, sendo uma medida realizada dia no período de 14 a 27 de setembro de 2010 e a segunda medida realizada no período de 01 a 03 agosto de 2011. Os valores de perda de espessura podem ser classificados como um ambiente agressivo, pois os valores de perda de massa estão na categoria 5 do índice da Norma ISO 9224, fato evidenciado no gráfico da Figura 13, fato de correlação com zonas temperadas de alta umidade. As medições de espessura evidenciaram a perda de massa num período de 11 meses e foram executadas nos pontos P1 e P2 da 1ª elevação dos pontos medidos da caldeira, conforme figura 24. A corrosão foi acentuada em 72 % dos pontos medidos e, nos 27% restantes, houve preservação da medida da parede.

Seguem algumas hipóteses para este comportamento de preservação de alguns pontos:

- Corrosão por pite em pontos específicos.
- Falha de medição (deficiência na remoção dos óxidos ou falha do próprio equipamento de medição).

A parede original do tubo do tipo A 106 grau B é de 5,16mm, e o atual valor de perda máxima representa uma redução de 15% da parede do tubo. Para um equipamento que não tem data prevista para retorno de operação imediata, a atual taxa de corrosão que atinge um valor máximo em um dos pontos no valor de 0,9 mm em 11 meses entre o período de setembro de 2010 a agosto de 2011, se revela agressiva.

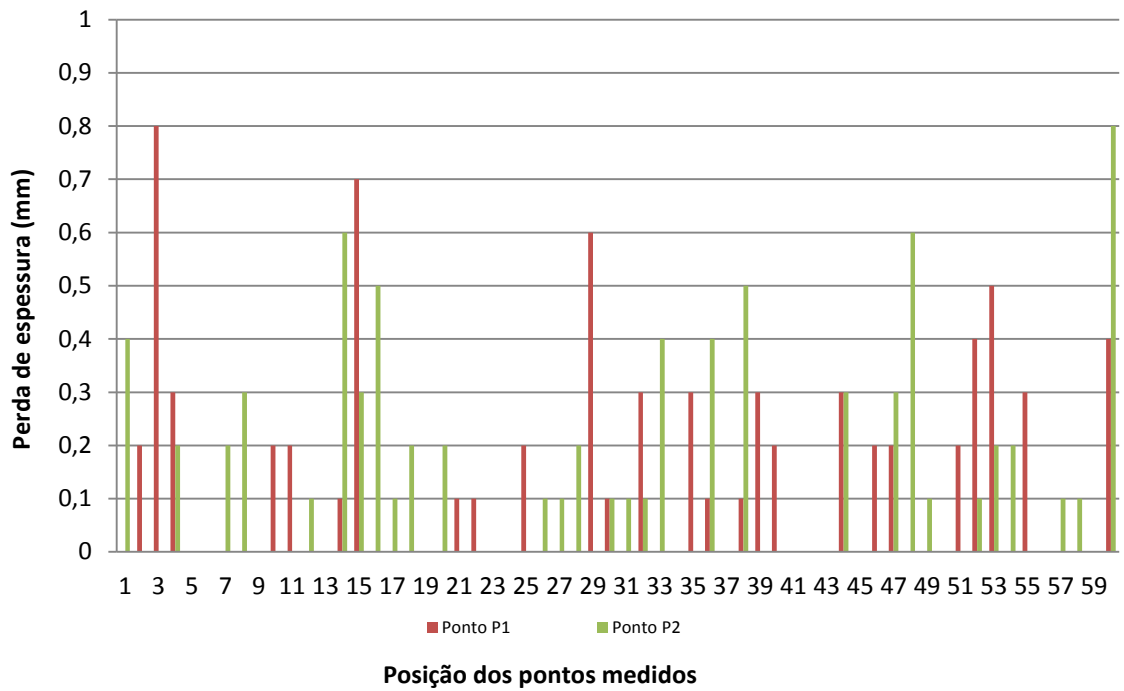


Figura 33: Perda de espessura entre medidas de 2010 e 2011(11 meses) – Local parede Oeste. Fonte: Acinor (2010).

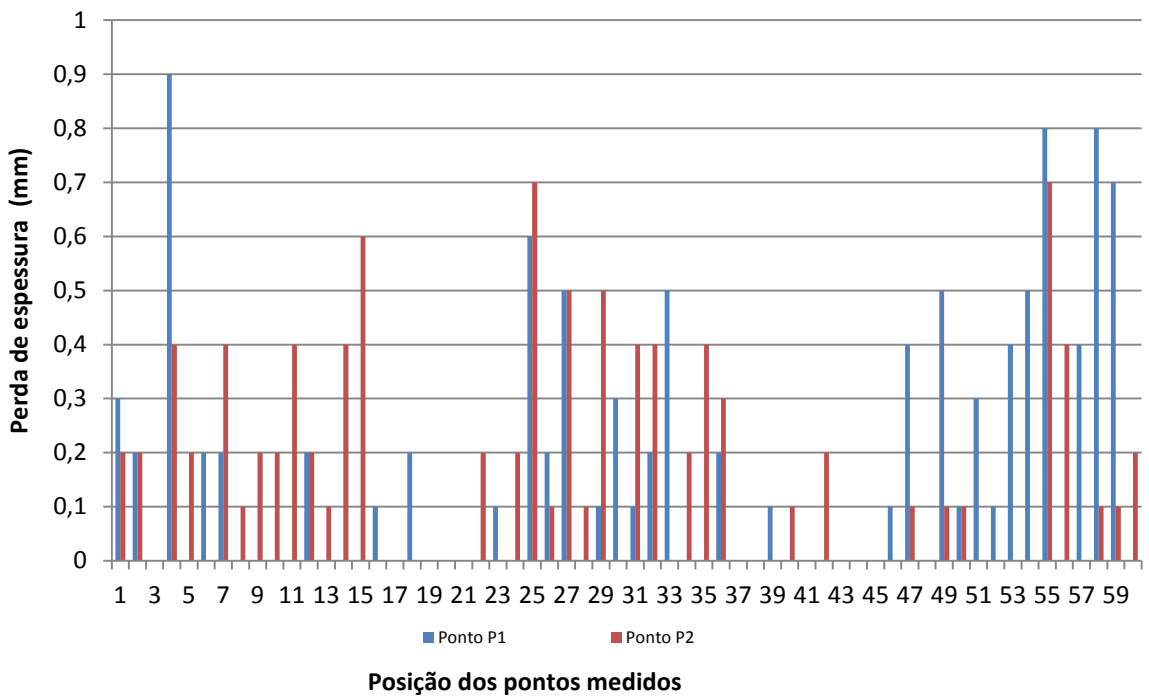


Figura 34: Perda de espessura entre medidas de 2010 e 2011(11 meses) – Local parede Leste. Fonte: Acinor (2010).

Foram executas novas medidas de medição de espessura no período de 21 e 22/12 e as medições tiveram valores de perda de espessura similares aos executados entre o período 2010 e 2011. As figuras 37 e 38 revelam perdas de corrosão similares ao ano anterior.

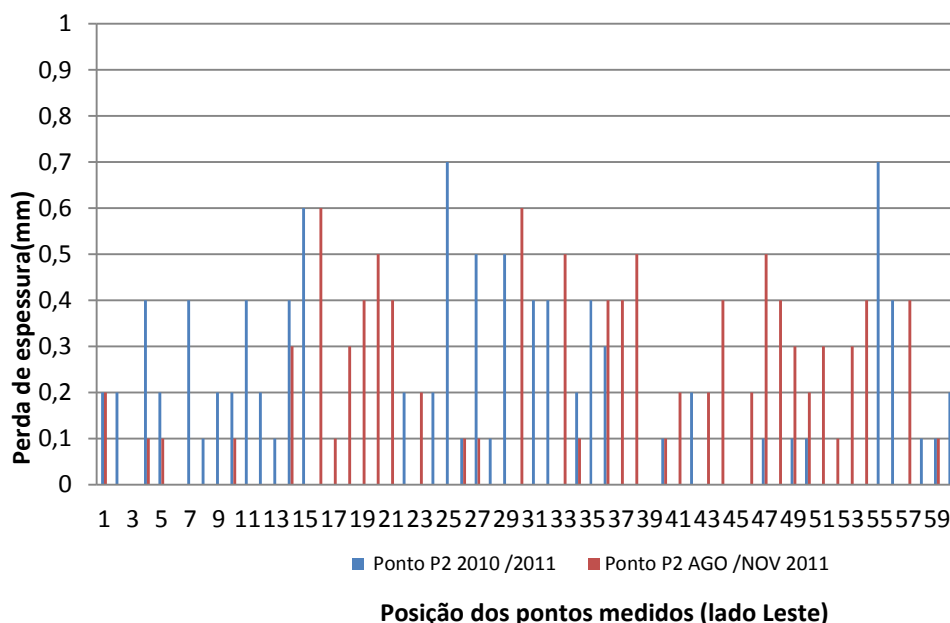


Figura 35: Comparativo da evolução entre as medidas executadas entre 2010 e 2011 e as medidas executadas entre os meses de agosto/novembro de 2011 lado Leste ponto P2 (4 meses) – Local parede Leste. Fonte: Acinor (2011).

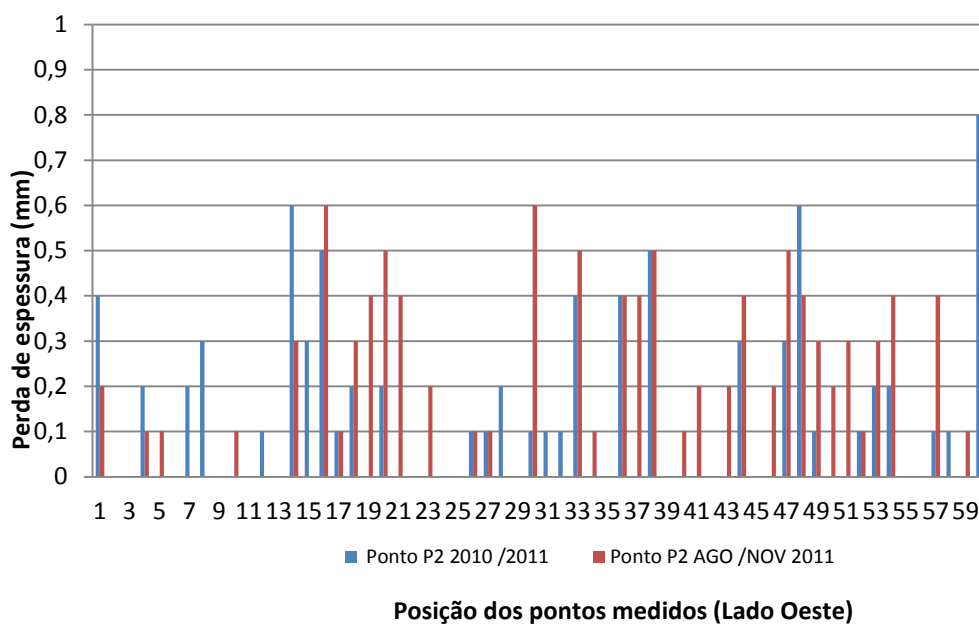


Figura 36: Comparativo da evolução entre as medidas executadas entre 2010 e 2011 e as medidas executadas entre os meses de agosto/novembro de 2011 lado Oeste ponto P2 (4 meses) – Local parede Leste. Fonte: Acinor (2011).

### Plano De Manutenção

Após o início das inspeções preventivas realizadas pela equipe de mantenedores operadores da utilidades, não houve detecção de anomalias. Estes resultados das inspeções batem com os resultados das medições de umidade realizados entre os dias 18 a 22/10/2011.

O sistema de preditiva foi executado nos dias 21 e 22 de novembro de 2011

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Com a instalação do sistema de aquecimento, a umidade do sistema ficou em patamares abaixo dos 50%.

Dos contaminantes avaliados como os principais no ambiente da caldeira, o cloro obteve valores praticamente irrisórios, enquanto o teor de enxofre já pode ser um valor agressivo, conforme foi demonstrado na parte experimental. O contaminante enxofre sofre forte influência dos gases queimados de uma Aciaria.

Mesmo sob condições adversas de temperatura, conforme dados coletados no período de 18 a 22 de outubro, período de fortes chuvas e temperatura ambiente indicando 22 °C, o valor máximo alcançado pela umidade ainda atende a uma condição de aceitável em relação a umidade crítica.

Os teores de enxofre detectados nas amostras de óxidos retirados das paredes dos tubos comprovam a absorção deste componente químico, como agente de corrosão no ambiente interno da caldeira.

O fechamento das bocas de visita, portas de acesso e os sistemas de tiragem contribui para um isolamento com relação a agentes agressivos, bem como a estabilidade térmica do ambiente interno da caldeira.

O decréscimo e a estabilização do valor de umidade na faixa inferior a 50% de umidade colocam o ambiente em uma zona que se pode considerar como segura contra os efeitos da umidade na corrosão, conforme Figura 4.

Não foi feito um controle da temperatura do sistema em função da carga térmica aplicada. Este fato se evidencia com uma diferença de temperatura entre pontos distantes entre a parte superior a uma posição em torno dos 8 metros do piso inferior. Na parte superior, as temperaturas foram maiores que nos patamares inferiores.

Há dentro da caldeira zonas mais e menos aquecidas e, por conseguinte, umidades relativas diferentes nesses pontos após o aquecimento do ambiente interno da caldeira.

Para manutenção das condições de preservação do ambiente interno da caldeira de forma sistêmica, deve-se manter os planos de manutenção preventiva e preditiva, de modo a termos acompanhamento das variáveis temperatura e espessura dos tubos sob controle.

O custo de preservação é um valor extremamente baixo em comparação com uma possível falha de um dos tubos da caldeira quando em operação.

A comparação entre os resultados da medição de espessura realizada entre os dias 21 e 22 de novembro de 2011 e os resultados da medição de espessura realizados entre 2010 e 2011, não fica claro que o sistema de proteção esta sendo eficiente. O tempo entre as medições de agosto e novembro de 2011, ou seja 4 meses, é muito curto para verificarmos a regressão da taxa de corrosão. O período em que a caldeira passou sem proteção desde março de 2010 e o início do processo de aquecimento, pode ter influência nessa taxa de corrosão encontradas na última medição.

## 6.2 ATIVIDADES FUTURAS DE PESQUISA

Considerando os bons resultados no controle da umidade da atmosfera da caldeira, recomendamos um trabalho voltado para a utilização do sistema de adsorção para diminuição da umidade do ar. Um sistema de adsorção gerará uma opção de preservação quando da dificuldade de uso de resistências elétricas.

Trabalhar o tema de hibernação para equipamentos rotativos, pois são equipamentos caros e que ficam expostos em locais abertos e sujeitos a intempéries e poluição atmosférica com mais facilidade.

Avaliação de forma qualitativa e quantitativa a progressão ou estabilização do processo corrosivo para os sistemas que estão sendo preservados com a utilização do N<sub>2</sub>, tanto nas linhas como nos vasos de pressão do sistema da planta em estudo.

Investigar de forma mais detalhada os produtos da corrosão gerados na superfície dos tubos de modo a podermos relacionar estes produtos de corrosão com o desgaste heterogêneo na superfície de alguns tubos para pontos similares de medição.

Verificar a evolução da corrosão utilizando cupons, de forma a se ter maior precisão no acompanhamento corrosão dentro do ambiente da caldeira, com períodos de seis meses a um ano.



## REFERÊNCIAS

Aoki, I,V ; Técnicas de Análise De superfície na caracterização De produtos de Corrosão Sobre metais;Congresso latino Americano de Corrosão2006 .

Acinor Serviços e Inpeções Ltda – Empresa especializada em inspeção de equipamentos localizada em Camaçari Bahia .

Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6211: determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

AZEVEDO, C. Se as máquinas falassem. São Paulo: Saraiva,2007,18p.

BARTON, K. Protection against atmospheric corrosion. London: John Wiley , 1976. 85p.

BETZ, G.E. Preservação de caldeiras BWT – p 8/05-019E . South America, 2002.

BOYD, W,K.; FINK, F.W. Corrosion of metals in the atmospheres. Columbus; metals and Ceramic Information; BS 4672: 1974 77p (MCIC 74-23).

BRIGGS, M.; BUCK, S.; SMITH, M. Decommissioning Mothballing and Revamping; Houston; Institution Of Chemical Engineers; 1997.

Ceped – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do Estado da Bahia;Km 0 da BA 512;Camaçari Bahia; CEP 42810 440; <http://www.ceped.ba.gov.br/>.

Corel Resistências Elétricas ; [http://www.corel.ind.br/infravermelho\\_ceramica.php](http://www.corel.ind.br/infravermelho_ceramica.php).

DANTAS, E. Geração de vapor e água de refrigeração. Rio de Janeiro: José Olympio, 1995

GENTIL, V. Corrosão. 3.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996.;278p

GERHARDUS, H.K.; BRONGERS, M.P.H.; THOMPSON, N.G.; VIRMANI, Y.P.; PAYER, J.H. Corrosion costs and preventive strategies in the United States. Materials Performance (Suppl.), Federal Highway Administration, McLean, VA, July 2002. Report n. FHWA-RD-01-156.

GIAMBIAGI, F.; BARROS, O, TORRES, E.T.; PUGA, F. Brasil pós-crise: Agenda para a próxima década. Rio de Janeiro: Elsevier, Editora; 2009.

Guimarães J. A. ; Tese de mestrado: Estudo de filmes de Langmuir e Langmuir-Blodgett visando o desenvolvimento de biosensor de colesterol. COPPE ;RJ;Abril 2009.

Inema – Instituto do meio Ambiente e recursos Hídricos; International Organization For Standardization. Corrosion of metals and alloys: Corrosivity of atmospheres:

Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity. Genève, 1992.

Índices Pluviométricos de Salvador <http://www.defesacivil.salvador.ba.gov.br>

*INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS:*

<http://inspecaoequipamentos.wordpress.com/category/ensaios-nao-destrutivos/>

Acessado em 12/11/2011.

JAMBO, H. C. M. Fófano S.: Corrosão, Fundamentos, Monitoração e Controle. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

JONES, D. A. Principles and preservation of corrosion. 2.d. 1996.

JONES, A. Denny. Corrosion: principles and prevention of corrosion. 2.ed.

KARDEC A.; J N; Manutenção função estratégica; 2. Edição; ed. Rio de Janeiro; Qualitymark; 2007.

KERN, D. Q. Processo de transmissão de calor. Rio de Janeiro: Guanabara, 1987.

KRUGMAN, P. A crise de 2008 e a Economia da Depressão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

Landolfo. F.; L.C. Modeling of Metal Structure Corrosion Damage: A State of the Art Report. Disponível em: < [www.mdpi.com/journal/sustainability](http://www.mdpi.com/journal/sustainability) >. Acesso em: 20 ago. 2011.

LARRY, G. Combined use of vapor corrosion inhibitors and dehumidification for plant and equipment mothballing or lay-up: Paper NACE 98244. Corrosion 98.

MCA Engenharia Ambiental – Empresa especializada em medições atmosféricas, localizada na cidade de Aracaju, Sergipe.

Miranda L.R. ; Desenvolvimento e Importância do Estudo da corrosão atmosférica- 1 coloquio nacional De Corrosão Atmosférica.

Nicácio ;J. A. P.; Técnicas de Inspeção em tanques de armazenamento ; 4° Seminário nacional de sistemas e Automação ;Belo Horizonte;Mg;Novembro 2009

OECH, S. The effect of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO and O<sub>3</sub> on the corrosion ;of unalloyed carbon steel and weathering steel-the results of laboratory exposures. Elsevier Pergamon; 1996

PANNONI, F. D. Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio. 2. Edição, Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia: Centro Brasileiro da Construção em Aço; 2004.

PANOSSIAN, Z. K. Corrosão atmosférica de metais no Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1993.

PANOSSIAN, Z. K. Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas. São Paulo: IPT;1993.

PASTORE, C. P.; PINOTTI, M. C. A crise internacional e o Brasil. In: FÓRUM NACIONAL – NA CRISE GLOBAL: O Novo Papel Mundial dos BRICS e as oportunidades do Brasil, 21., 2009. Anais. 2009. p.1-2.

PEREIRA M. J. Engenharia de Manutenção: Teoria e Prática. Rio de Janeiro: Moderna; 2009.

PRICE, B. Mothballing Require More Than Idle Thought. British Library, Sept. 2009.

QUALIDADE do Ar no Estado de São Paulo: Relatório da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. São Paulo: Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 10 ago. 2010.

RAMANATAN, L.V. Corrosão e seu controle. São Paulo: Editora Eemus, 2010.

ROBERGE P. R.; TULLMIN M. Uhlig's Corrosion Handbook. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

ROZENFELD, I.L. Atmospheric corrosion of metals, Houston: National Association of Corrosion Engineers, 1972.

SCHWEITZER, P. E. Atmospheric degradation and corrosion control. New York: CRC Press, 2007.

SHREIR, L. L. Corrosion. 3. ed. London: Boston: Newnes-Butterworths,1976. v.2.

SICA, C. S. Mapeamento da corrosividade atmosférica de São Luís e a correlação das variáveis ambientais que influenciaram na degradação dos materiais metálicos. Dissertação; Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. Refrigeração e ar condicionado. São Paulo: McGraw Hill, 1982.

TAVARES, L. Administração Moderna da Manutenção. Rio de Janeiro; Novo Polo, 1999.

TEESSIDE Cast Products (TCP), a company run by Corus, a subsidiary of the Tata Group. Disponível em: <<http://www.wsws.org/articles/2010/feb2010/coru-f23.shtml>>. Acesso em 21 nov 2010.

TWIGG, R. J. Guidelines for the Mothballing of process plants: Materials Technology Institute of the Chemical Process Industries, St. Louis ;Materials Technology Institute; Publication N-34 ;2002. Pg 2/3/4.

XENOS, H. G. Gerenciando a Manutenção Produtiva. Belo Horizonte: EDG, 1998.

WOLYNEC, Stephan; WEXLER, Silvana B. ; FENILI, Célio. Proteção contra corrosão durante o armazenamento e transporte. 2.ed. São Paulo: IPT;1992.

## **ANEXOS**



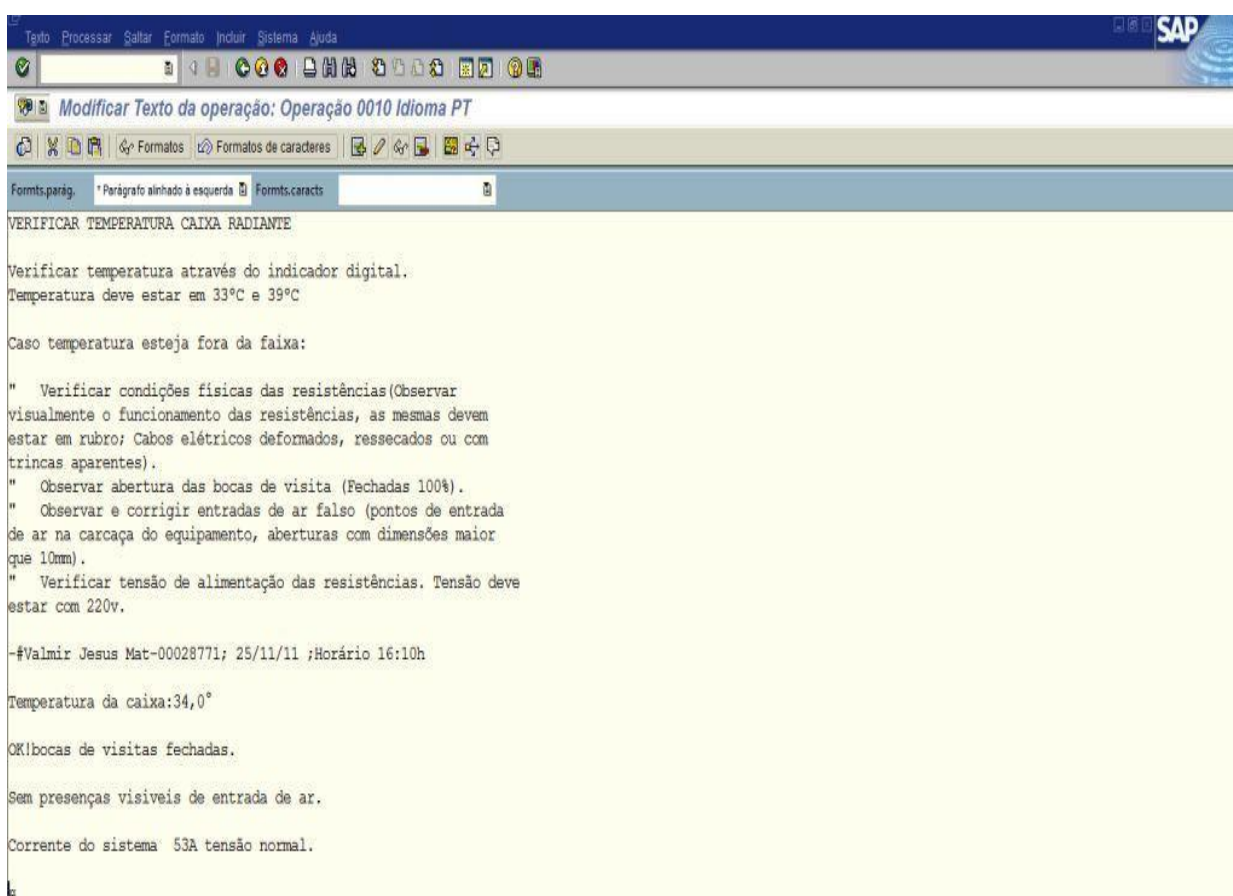
## Anexo 2: Registro de Índice Pluviométrico da cidade do Salvador

A tabela abaixo mostra o registro de índice pluviométrico da cidade do Salvador no ano de 2011. Podemos observar que os meses de maior índice pluviométrico se concentra nos meses de abril maio e junho. Fonte: Defesa civil da cidade do Salvador 2011.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
1993	12,6	7,7	12,3	107,7	394,5	180,8	117,4	165,6	66,7	98,1	52,1	14,3	1.229,80
1994	30	65,2	236,7	423	197,4	477,8	362,9	197,5	100,1	117,8	49,2	44,9	2.302,50
1995	18,9	31,6	81,3	286,2	472,6	236,8	175,7	79,1	65,7	16,5	152,9	41,9	1.659,20
1996	55,9	101,9	59,9	758,6	187,5	178,5	200,4	124	207	106,9	228,6	73,8	2.283,00
1997	38,3	225,6	276,6	346,9	165,5	166,8	183,1	52	36,7	130,1	26,8	20,3	1.668,70
1998	62,9	53,1	117,3	203,9	250,4	358,3	306,4	155,4	62,1	111,8	65,3	34,5	1.781,40
1999	99,3	102,9	313,9	376,6	376,9	185	224,6	323,5	141,1	163,9	275,5	94,2	2.677,40
2000	29,5	85,5	191,9	365,4	241,3	310,4	201,1	136,3	154,6	15,8	74,3	88	1.894,10
2001	94,6	28,3	264	103,5	199,2	195,8	220,3	149,7	190,8	202,3	30,3	112,1	1.790,90
2002	252,4	95,1	102,1	69,2	351,6	208,5	253,7	162,8	258,8	15,4	25,2	24,1	1.818,90
2003	26,7	97,3	206,3	187,1	550,5	237,5	186,5	136,7	168,7	71,5	132,8	14,9	2.016,50
2004	319,4	165,3	122,3	278,4	158,3	327	218,4	129,5	40	82	167,6	10,8	2.019,00
2005	42,9	349,4	349,4	415	198,2	421,1	204,1	117,1	50,6	32,9	72,8	75,5	2.329,00
2006	40,1	7,1	35	587,4	397,1	401,4	91,7	117,7	126,9	258,9	220	30,3	2.313,60
2007	20	282,6	86,8	139,8	211,2	134	130,4	109	86,7	78,9	19,1	18,8	1.317,30
2008	17,8	182,6	132,8	154,3	203,6	178,2	148,8	58,7	37,8	31,7	78,4	103,5	1.328,20
2009	30,3	122,1	25,6	506,6	549,3	155,1	158,9	93,8	56,1	162,4	48,1	5,8	1.914,10
2010	78,3	19,2	122,8	448,8	243,8	96,7	492,5	176,3	56,8	56,7	22,6	102,2	1.916,70
2011	170,3	46,2	200,7	331,0	304,2	277,7	57,3	91,3	62				1.540,7
<b>Média Climatológica</b>	<b>102,2</b>	<b>122,1</b>	<b>148</b>	<b>326,2</b>	<b>349,5</b>	<b>251</b>	<b>184,9</b>	<b>134,1</b>	<b>109,5</b>	<b>123</b>	<b>119</b>	<b>130,6</b>	<b>2.100,30</b>

### Anexo 3

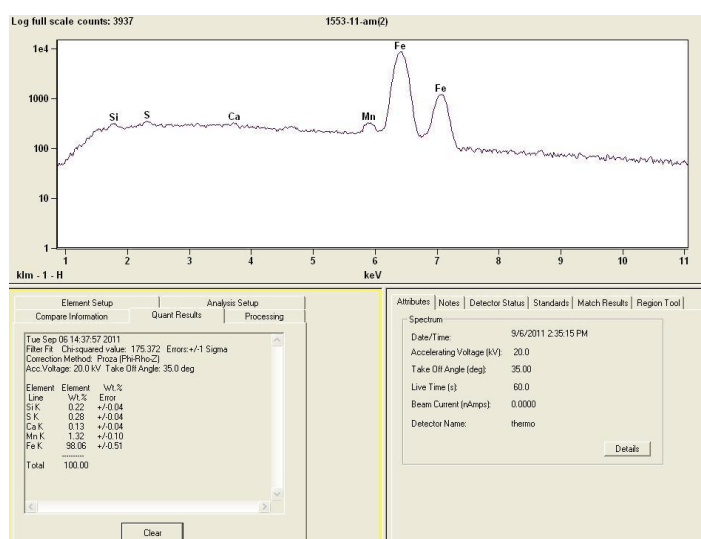
A figura do anexo mostra o registro da execução do plano de manutenção preventiva de acompanhamento das condições do sistema de aquecimento por resistências. Este serviço foi executado por um dos operadores da utilidades. O registro foi feito no sistema SAP da empresa. A cada ordem de serviço executado serão feitos registros das condições do sistema. Caso se detecte alguma anomalia, o operador abrirá uma ordem de manutenção para programação e correção desta anomalia.



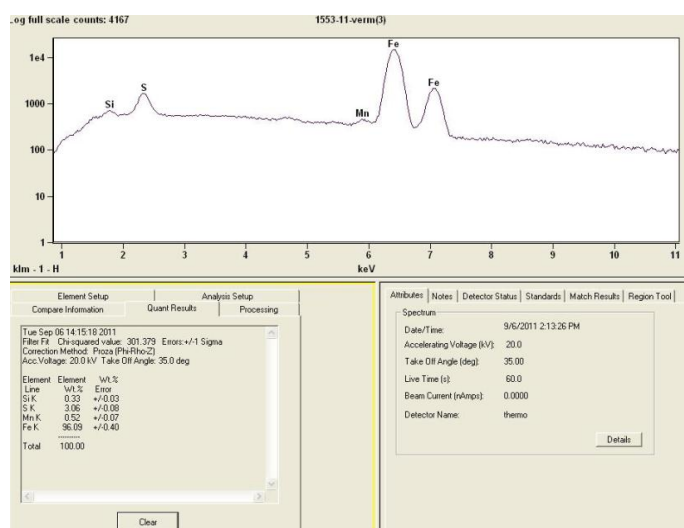


## Anexo 4

Gráficos abaixo representam os espectros dos quantitativos dos contaminantes nas amostras de óxidos que estavam aderidos as paredes dos tubos da caldeira. Nos espectros das análises das superfícies, o enxofre aparece com mais intensidade. Determinação dos produtos de corrosão através do EDX Fonte: CEPED 2011



Superfície amarelada



Superfície avermelhada