

AVALIAÇÃO DE SISTEMA ALTERNATIVO DE PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO EM  
CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

Rodrigo de Castro Ferraz

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

---

Prof. Lúcio Sathler, D.Sc.

---

Prof. José Antonio da Cunha Ponciano Gomes, D.Sc.

---

Dr.<sup>a</sup> Denise Souza de Freitas, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
FEVEREIRO DE 2007

FERRAZ, RODRIGO DE CASTRO

Avaliação de Sistema Alternativo de  
Proteção Contra a Corrosão em Circuito de  
Água de Refrigeração [ Rio de Janeiro] 2007  
VII, 85p. 29,7cm (COPPE/UFRJ.  
M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais,  
2007)

Dissertação – Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, COPPE

1.Tratamento Físico em Água de Refrigeração

I.COPPE/UFRJ      II. Título (Série)

Agradecimentos:

Ao professor Lúcio Sathler pela grande ajuda, dedicação e excelente orientação durante o período do desenvolvimento dos trabalhos.

Aos professores, José Antônio da Cunha Ponciano Gomes e Luiz Roberto Martins de Miranda pela colaboração e amizade.

A todos os funcionários e colegas de classe do Laboratório de Corrosão COPPE/UFRJ pelo auxílio prestado nos experimentos.

À INFRAERO por disponibilizar o sistema de ar condicionado central do Prédio Anexo para estudos e ensaios. Agradeço aos colegas de trabalho Flávio Peres Amado, José Ricardo Lucena Rodrigues, Paulo Marques de Oliveira, Ricardo Peixoto, Nelson Muniz, Rosana Gomes, Renata Torres, Cláudio Anciães, Luiz Carlos Pereira, Luiz Antônio Araripe e Júlio César Belém pela grande ajuda e colaboração para elaboração dos ensaios e experimentos desenvolvidos no sistema industrial dentro do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro. – Galeão.

À minha esposa Cristiany Diniz Ferraz e minha filha Nina Diniz Ferraz pelo incentivo para realização deste estudo.

Aos meus pais Cecílio de Souza Ferraz e Vanda Lúcia de Castro Ferraz, ao meu irmão Ricardo de Castro Ferraz, aos familiares Paulo Roberto Diniz e Vera Lúcia da Costa pelo apoio, compreensão e auxílio que foram indispensáveis para concretização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## AVALIAÇÃO DE SISTEMA ALTERNATIVO DE PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO EM CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

Rodrigo de Castro Ferraz

Fevereiro / 2007

Orientador: Lúcio Sathler

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de uma técnica de tratamento físico em água de refrigeração, em alternativa aos procedimentos de prevenção por uso de inibidores. Foi verificada a emissão de sinais provenientes da fonte eletromagnética ao longo da tubulação, foram realizados ensaios de perda de massa através de corpos-de-prova instalados numa tubulação de *by pass* e análise da água de refrigeração. Os resultados de perda de massa indicaram taxas de corrosão de 1,91mpy de amostras submetidas à proteção, enquanto que corpos-de-prova não protegidos apresentaram taxas de 2,53mpy. O monitoramento durou aproximadamente 150 dias. Os estudos foram desenvolvidos na Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária (INFRAERO) no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro – Galeão - Antônio Carlos Jobim.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Master in Science (M.Sc.)

EVALUATION OF AN ALTERNATIVE PROTECTION SYSTEM TO AVOID CORROSION ON  
COOLING WATER SYSTEMS

Rodrigo de Castro Ferraz

February / 2007

Advisor: Lúcio Sathler

Department: Metallurgical Engineering and Materials Science

The present work had the objective to evaluate the efficiency of a technique of physical treatment in cooling water systems, in alternative to the procedures for corrosion inhibitor use. The emission of signals proceeding from eletromagnetic source was verified throughout the pipe. In a by pass pipe, weight-loss determinations using coupons had been carried out and samples of industrial water were collected from the units to analysis. The weight-loss results indicated rates of corrosion of 1,91mpy in samples submitted to the physical conditional, whereas coupons not protected had presented rates of corrosion around 2,53mpy. The field monitoring was conducted during, approximately, 150 days at Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária (INFRAERO), at Internacional Airport Rio de Janeiro – Galeão - Antônio Carlos Jobim.

## ÍNDICE

<b>I – INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	03
II.1 - Ação corrosiva da água.....	03
II.2 - Classificação de águas.....	04
II.3 - Formas de Corrosão.....	05
II.3.1 - Corrosão uniforme.....	05
II.3.2 - Corrosão galvânica .....	06
II.3.3 - Corrosão por crêvice .....	06
II.3.4 - Corrosão por pite .....	07
II.3.5 - Corrosão erosão/ cavitação .....	08
II.3.6 - Corrosão induzida por microrganismos .....	08
II.4 - Corrosão em sistemas de água de resfriamento.....	09
II.5 - Incrustações em Sistemas de Refrigeração de Água Industrial.....	11
II.6 - Principais Tipos de Incrustações em Sistemas de Resfriamento de Água Industrial .....	12
II.6.1 – Índice de Langelier.....	12
II.6.2 – Índice de Ryznar.....	14
II.6.3 – Índice de Puckorius.....	15
II.6.4 – Curva de Baylis .....	16
II.7 - Sistemas de resfriamento de água industrial.....	16
II.7.1 – Sistema Aberto.....	17
II.7.2 - Sistema Semi – Aberto.....	17
II.7.3 – Sistema Fechado de recirculação.....	18
II.8 -Torres de Resfriamento.....	18
II.9 - Considerações Importantes em Projetos de Torres de Resfriamento.....	21
II.10 - Tratamento Químico de Água de Refrigeração.....	22
II.10.1 - Inibidores Anódicos.....	23
II.10.2 - Inibidores Catódicos.....	24
II.10.3 - Inibidores Mistos.....	24
II.11 – Conceitos Básicos de Campo Elétrico e Campo Magnético.....	24
II.12 - Tipos de tratamentos físicos de água de refrigeração.....	26
II.12.1 - Imãs intrusivos.....	27
II.12.2 - Imãs do tipo grampo (braçadeira).....	28

II.12.3 - Eletroimãs intrusivos.....	28
II.12.4 - Eletroimãs não intrusivos.....	28
II.12.5 – Eletrolítico.....	30
II.12.6 – Sistema Eletromagnético .....	31
II.12.7 – Algumas Considerações Tecnicas.....	38
<b>III – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>57</b>
III.1 – Introdução.....	57
III.2 – Características do Sistema de Refrigeração de Serviço.....	57
<b>IV – RESULTADOS EXPERIMENTAIS e DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
IV.1 - Verificação dos Sinais Emitidos pelo Equipamento Eletromagnético em campo.....	63
IV.2 - Ensaio de Corrosão e Análises de Água.....	65
IV.3 - Potencial de Eletrodo.....	79
<b>V – CONCLUSÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>IV – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>84</b>

## **I – INTRODUÇÃO**

Muitos trabalhos de pesquisa que tratam da prevenção de corrosão em estruturas diversas vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos. Relativo às tubulações industriais de sistema de refrigeração, classicamente se utiliza a adição de inibidores para conter o avanço da corrosão.

O tratamento químico é utilizado largamente nas indústrias e são praticamente formados à base de inibidores de corrosão. Em tempos passados, as empresas tinham como opção, a utilização de inibidores simples e de custo relativamente baixo onde o cromato de sódio se apresentava como agente ativo principal. Tal tratamento tem sua eficiência comprovada no que tange à formação de camadas protetoras contra os efeitos corrosivos, e paralelamente, evita o crescimento microbiológico e reduz os níveis de incrustações nas tubulações.

Entretanto, verificou-se o tratamento a base de cromato era nocivo à saúde, assim, a legislação exigiu a redução da quantidade de metais pesados permitidos na água de refrigeração, isto posto, houve a necessidade da substituição deste componente por outros que fossem formados principalmente a base de substâncias orgânicas ou metais não-pesados.

Entretanto, para que haja uma alta performance durante o tratamento químico é necessário um permanente acompanhamento e avaliação dos parâmetros de dosagens que, muitas das vezes, são elevados ocasionando o aumento da concentração da solução. Durante a operação de purga parte dos constituintes do tratamento são eliminados ocasionando poluição ao meio ambiente.

Atualmente estudos de tratamentos alternativos vêm sendo desenvolvidos como forma de substituição ao tratamento químico. Um exemplo de tratamento alternativo seria o tratamento físico de águas, basicamente atuando segundo os princípios dos fenômenos eletromagnéticos para que haja a redução da corrosão.

Desta forma, a partir do exposto acima se estabelecem os objetivos deste trabalho: em primeiro lugar testar a efetividade de um sistema de tratamento físico de proteção contra corrosão em uma planta real de climatização.

Para alcançar os objetivos, esta dissertação estabelece no capítulo II uma revisão bibliográfica que apresenta uma análise da proteção anticorrosiva nas tubulações em sistema de refrigeração de expansão direta com condensação a água. No capítulo III são estabelecidos os materiais e métodos utilizados; no capítulo IV apresentamos os resultados de ensaios de campo e finalmente no capítulo V temos as conclusões do trabalho.

## **II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **II.1 - AÇÃO CORROSIVA DA ÁGUA**

A água pura, do ponto de vista químico, pode ser apresentada como o conjunto de moléculas associadas através de ligações de pontes de Hidrogênio. Desta maneira, qualquer tipo de substância que apareça em suspensão ou dissolvida pode ser considerada impurezas. Dentre elas podemos apresentar: sais, gases, bases, ácidos, microrganismos e sólidos em suspensão [1]. Dependendo do tipo de utilização da água, esta deve ser condicionada de maneira tal que sejam evitados processos corrosivos decorrentes das impurezas.

Os fatores mecânicos juntamente com a ação das impurezas podem ocasionar problemas sérios de corrosão. Isto pode ser exemplificado da seguinte forma: sólidos em suspensão associados à velocidade de fluxo do sistema eventualmente propiciam através de fatores químicos e mecânicos associados, erosão, cavitação, turbulência e impingimento.

Os principais contaminantes encontrados em águas industriais são:

- Microrganismos
- Matéria orgânica
- Sólidos em suspensão
- Cloreto de Sódio
- Cloreto de Ferro
- Cloreto de Magnésio
- Carbonato de Sódio
- Bicarbonato de Cálcio
- Bicarbonato de Magnésio
- Gases dissolvidos

Quando a análise de água é realizada para a constatação de processos e velocidades de corrosão, os seguintes parâmetros devem ser considerados: [2]

- pH;
- Temperatura;
- Velocidade de escoamento
- A influência da ação mecânica do fluxo de água sobre as tubulações e seus componentes.

## II.2 - CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS

As águas são classificadas de acordo com suas características relacionadas aos compostos que elas contêm. Geralmente são denominadas como “brandas” ou “duras”, alcalinas ou ácidas [5].

A Dureza da água é a propriedade que decorre da presença de metais alcalinos terrosos, e desta maneira, o cálcio e o magnésio são os principais elementos presentes nas águas naturais [3]. Desta maneira, medindo-se os teores de Ca e Mg, podemos identificar os níveis de dureza.

Os sais de cálcio e magnésio presentes na solução, são responsáveis pelos diversos níveis de dureza da água.

Podemos classificá-los como:

Dureza Total, em que é medido o total de sais de cálcio e magnésio.

Dureza Permanente, este parâmetro é medido após a ebulição da água onde o CO<sub>2</sub> dissolvido é liberado e há a transformação do bicarbonato de cálcio solúvel em carbonato quase insolúvel.

Dureza Temporária, que corresponde à diferença entre a Dureza Total e a Dureza Permanente. É proveniente do bicarbonato de cálcio.

Dureza Magnesiânica, este tipo de dureza é medida após a precipitação dos sais de cálcio pelo oxalato de amônia.

É fato que a água, na sua forma natural, ou seja, sem tratamento, contém íons de cálcio e magnésio que promovem as características de dureza, ordinariamente, a dureza é medida em grãos de dureza por galão de água (gpg), e suas impurezas podem ser medidas em partes por milhão (ppm) ou miligramas por litro (mg/L).

A correspondência entre essas duas unidades de medidas é: 01 gpg = 17ppm (mg/L) [6]

A tabela abaixo relaciona os níveis de dureza com as concentrações de minerais.

**Tabela 01** – Níveis de Dureza da água em relação à Concentração de minerais em (gpm) ou (ppm)

<b>CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS (GPG)</b>	<b>NÍVEL DE DUREZA</b>	<b>CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS (PPM)</b>
> 1,0	Leve	< 17
1,0 – 3,5	Levemente forte	17 – 60
3,5 – 7,0	Moderadamente Forte	61 – 120
7,0 – 10,5	Forte	121 – 180
> 10,5	Muito Forte	> 180

A corrosão é o principal fator a ser combatido quando a água de um determinado sistema apresenta níveis de dureza elevados, esta corrosão é proveniente das incrustações promovidas pela deposição dos carbonatos de cálcio e hidróxido de magnésio nas tubulações do sistema. Localizada abaixo das incrustações, é possível encontrarmos corrosão localizada (pites), provenientes do desenvolvimento de células de aeração diferencial.

### **II.3 - FORMAS DE CORROSÃO**

Podemos descrever os principais tipos de corrosão existentes no sistema de resfriamento tais como:

- Corrosão uniforme
- Corrosão galvânica
- Corrosão por fresta ou crêvice
- Corrosão por pite
- Corrosão Erosão / cavitação
- Corrosão induzida por microrganismos.

#### **II.3.1 - Corrosão Uniforme**

A corrosão uniforme, pode ser definida como a corrosão que ocorre de maneira uniforme, ou seja, a deterioração se processa aproximadamente igual em toda a superfície exposta ao meio corrosivo.

Esta forma de corrosão é comum em processos nos quais o produto de corrosão é solúvel no meio ou quando não há formação de produto de corrosão [4].

### **II.3.2 - Corrosão Galvânica**

Este tipo de corrosão ocorre quando dois metais ou ligas estão em contato direto, em meio agressivo, e cada um destes possuem potenciais diferentes. Desta forma o metal mais nobre (catodo) tende a se proteger catodicamente e o metal menos nobre (anodo) tende a sofrer o ataque corrosivo mais intenso.

Em outras palavras o metal que possuir um potencial mais negativo será considerado o anodo e irá sofrer ataque corrosivo. O metal que possuir potencial menos negativo irá se comportar como o catodo não sofrendo a ação corrosiva.

A intensidade da corrosão galvânica depende de vários fatores tais como: o tipo, a estrutura, o estado da superfície em questão, a passividade do metal e outras características dos materiais que estão em contato galvânico. Adicionalmente podemos incluir a composição, a concentração, o pH, a temperatura e outras características do eletrólito.

Fato importante a ser analisado neste tipo de corrosão é a relação entre as áreas anódica e catódica. Caso a área catódica seja bem menor que a área anódica, os efeitos de corrosão não serão tão prejudiciais. Se a situação se inverter, os efeitos de corrosão serão tão intensos quanto maior for a área catódica e menor a área anódica, isto porque, tem-se uma alta densidade de corrente elétrica na parte do metal anodo (metal que está se corroendo).

### **II.3.3 - Corrosão por Crévice**

Este tipo de corrosão ocorre devido à diferença do meio ocasionando o ataque eletroquímico do metal, isto refere-se à corrosão em frestas ou corrosão sob depósito, em áreas onde encontramos pequenos volume de água estagnada.

O processo contínuo de dissolução do metal cria nestas frestas ou fendas uma zona de alta carga positiva. Para equilibrar esta formação de cargas positivas, os íons cloreto migram para dentro da fenda resultando em cloretos metálicos.

Estes cloretos, após serem hidrolizados, resultam em um hidróxido metálico insolúvel e acidez livre. Desta maneira, os íons cloreto e o hidrogênio são os principais responsáveis pela corrosão acelerada na fenda. Quanto maior a quantidade de íons metálicos que se movem para a solução, mais íons cloreto migram e assim sucessivamente. O oxigênio, quando reduzido

catodicamente, protege as áreas externas consideradas amplas, isto se dá através do fornecimento de elétrons pela dissolução na fenda. Isto caracteriza e reforça o fato de termos dentro da fenda um pH baixo e uma concentração alta de íons cloreto do que no seio da solução.

A solução dentro da fresta torna-se desoxigenada devido à corrosão inicial, que consome através do processo catódico, o oxigênio em solução como indicado a seguir:  
$$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \Rightarrow 4\text{OH}^-$$

O processo catódico ocorre fora da fresta onde há oxigênio em abundância. Formam-se íons ferrosos dentro das frestas ( $\text{Fe} \Rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$ ) e as hidroxilas são formadas fora da região de frestas (áreas oxigenadas). A Hidrólise ocorrida nos íons ferrosos ( $\text{Fe}^{++} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})^+ + \text{H}^+$ ) diminui o pH dentro da fresta. Devido os fenômenos de transporte de massa e ao fluxo de corrente (balanço de massa e de cargas) os íons agressivos migram para dentro da fresta sob a influência do campo eletrostático e lá se concentram causando alteração nas condições químicas. Outro fato a ser considerado é a razão entre áreas da região catódica e da região anódica que são: externas e amplas e as outras internas e diminutas respectivamente.[12]

### II.3.4 - Corrosão por pite

Este tipo de corrosão é caracterizado por pontos de ataques corrosivos na superfície metálica. É uma forma de corrosão localizada, onde o ataque por pite é, sem dúvida, uma das maneiras mais destruidoras de corrosão e se apresenta de forma puntiforme sobre a superfície metálica.

A própria oxidação do metal forma a camada ou filme de proteção que vai se destruindo de maneira irregular pela ação de íons cloretos, o aparecimento da corrosão por pite é clara e evidente.

Algumas ações devem ser tomadas para diminuir a ação deste tipo de corrosão tais como:

- Manter a água uniformemente aerada;
- Remoção de imperfeições sobre a superfície;
- Prépassivar a superfície, para garantir a boa formação de filme protetor;
- Uso de inibidores anódicos garantindo assim a manutenção da película protetora;
- Manter a concentração de íons cloreto e outros íons agressivos em níveis aceitáveis;
- Boa seleção de material;

- Redução dos índices de cloro livre.

### **II.3.5 - Corrosão Erosão/Cavitação**

Este tipo de corrosão se dá principalmente em ligas macias tais como as de cobre que são freqüentemente encontradas em sistemas de refrigeração de água, caso o fluido tenha uma velocidade de operação alta e contenha sólidos abrasivos podemos observar corrosão também em ligas duras. Esta forma de corrosão ocorre devido às repetidas remoções da camada protetora de óxidos da superfície metálica, ocasionando a erosão.

Em trocadores de calor, a extremidade dos tubos é afetada de forma efetiva até as primeiras polegadas da tubulação devido ao fluxo turbulento. Este tipo de corrosão é conhecido como impingimento ou “corrosão na entrada do tubo”.

A corrosão cavitação é um tipo particular de corrosão erosão. Este tipo de ataque se promove principalmente em sistemas que utilizam bombas centrífugas, a cavitação é o fenômeno que ocorre na tubulação de sucção de bombas centrífugas não afogadas. Quando a bomba entra em operação e a pressão dentro da tubulação de sucção cai a níveis iguais ou abaixo da pressão de vapor do líquido bombeado, verifica-se a formação de bolhas de gás que vão entrar em colapso no impelidor da bomba.

Assim, quando estas bolhas entram em colapso junto às paredes do impelidor, a camada de óxido protetora vai sendo sucessivamente destruída e formada. Este efeito de destruição e recomposição da camada resulta em graves danos ao equipamento, tais como profundos sulcos e a superfície metálica apresenta-se de forma esponjosa.

### **II.3.6 - Corrosão Induzida Por Microrganismos**

Este tipo de corrosão ocorre com a participação de microrganismos que atuam no processo de forma ativa sem alterar a natureza eletroquímica do fenômeno. Durante o processo corrosivo, a participação de microrganismos pode dar-se da seguinte forma:

- a) Gerando substâncias corrosivas provenientes de seu próprio metabolismo que transformam um meio inerte em agressivo. Tais substâncias podem ter natureza química diversas como álcalis, ácidos, sulfetos e etc.
- b) Nas zonas localizadas sob depósitos, os microrganismos geram pilhas de aeração diferencial por efeito de concentração desigual de oxigênio [5].

## II.4 - CORROSÃO EM SISTEMAS DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Os processos corrosivos causam grandes prejuízos aos sistemas de água de resfriamento. Tais processos afetam de forma severa as tubulações e os equipamentos trocadores de calor reduzindo desta forma sua eficiência, causando vazamentos e além de diminuir drasticamente a vida útil dos equipamentos, as principais características do processo corrosivo são os efeitos de dissolução do metal no anodo e a redução do oxigênio no catodo.

A mais importante reação que ocorre no anodo é apresentada da seguinte forma:  
$$M \Rightarrow M^{+2} + 2e$$

Os elétrons provenientes do anodo fluem através do circuito, e chegam ao catodo onde permitem que a reação catódica ocorra. Neste lado catódico existe o ganho de elétrons chamado de processo de redução.

A reação predominante no meio catódico para água de resfriamento será:  
$$O_2 + 2 H_2O + 4e^- \Rightarrow 4 OH^-$$

Podemos resumir na seguinte reação de oxi-redução:  
$$2M + O_2 + 2H_2O \Rightarrow 2 M^{+2} + 4OH^-$$

Como na maioria dos casos o metal em questão é o aço e seu principal constituinte é o elemento ferro, desta maneira, se a dissolução prosseguir, os íons ferrosos ( $Fe^{+2}$ ) se oxidarão e passaram a assumir a composição de íons férricos ( $Fe^{+3}$ ).

Tais íons férricos combinam-se com os íons hidroxilas formando então o produto de corrosão  $Fe_2O_3 \cdot x H_2O$ , é notório que é através de uma reação de precipitação que os produtos de corrosão insolúveis são formados.

A quantidade de metal dissolvido irá variar de acordo com a corrente, ou seja, de acordo com a massa equivalente do metal e a quantidade dissolvida terá uma variação diferenciada.

### Série Galvânica

O fenômeno de corrosão no metal pode apresentar-se pela formação de uma pilha sobre uma superfície metálica ou devido ao contato entre metais de diferentes potenciais na série galvânica. A tabela abaixo apresenta os valores de potenciais para alguns metais em meio aquoso (água do mar).

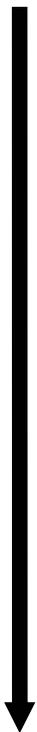
**Tabela 02** – Valores de Potenciais de Corrosão de alguns materiais em Volts.

<b>METAIS</b>	<b>POTENCIAL (VOLTS) X ECS</b>
Magnésio	-1,75
Zinco	-1,10
Alumínio	-1,01
Ferro Fundido	-0,68
Aço carbono	-0,68
Aço Inox 430 (ativo)	-0,68
Aço Inox 304 (ativo)	-0,60
Latão amarelo	-0,43
Cobre	-0,43
Latão almirantado	-0,36
Aço Inox 430 (passivo)	-0,29
Aço Inox 304 (passivo)	-0,15
Monel	-0,15
Aço Inox 316 (passivo)	-0,12

A série de nobreza dos metais, em relação a exposição, a um mesmo meio corrosivo, chama-se série galvânica e esta é determinada experimentalmente em laboratórios.

A tabela abaixo mostra uma série galvânica construída para a água do mar pela The International Nickel Company at Harbor Island para os metais mais usados industrialmente [4].

**Tabela 03** – Série Galvânica de Metais em ordem do metal menos nobre ao mais nobre

EXTREMIDADE ANÓDICA	METAL MENOS NOBRE
MAGNÉSIO E SUAS LIGAS ZINCO E SUAS LIGAS ALUMÍNIO COMERCIALMENTE PURO CÁDMIO DURALUMÍNIO (LIGA 2024) AÇO CARBONO FERRO FUNDIDO Ni - Resist (ferro fundido ao níquel) AÇO INOXIDÁVEL - ATIVO CHUMBO ESTANHO NIQUEL COMERCIALMENTE PURO LATÃO (liga 70% Cu + 30% Ni) COBRE COMERCIALMENTE PURO BRONZE (liga Cu + Sn ) MONEL (liga 70% Ni + 30% Cu) NÍQUEL - PASSIVO AÇO INOXIDÁVEL - PASSIVO PRATA TITÂNIO GRAFITA OURO PLATINA	
EXTREMIDADE CATÓDICA	METAL MAIS NOBRE

## II.5 - INCRUSTAÇÕES EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE ÁGUA INDUSTRIAL

O mecanismo de formação de incrustações nos sistemas de resfriamento depende da velocidade com que este fenômeno ocorra e é influenciado por fatores tais como:

Cristalização: A cristalização ocorre quando uma solução se torna supersaturada. Uma solução supersaturada é aquela que contém uma concentração de soluto maior do que sua concentração de equilíbrio. Entretanto a supersaturação sozinha não é suficiente para um sistema começar a cristalizar.

Supersaturação: Este tipo de estado ocorre quando um determinado sal apresenta sua solubilidade excedida na água. Isto pode ocorrer pois em sistemas de resfriamento, existe a evaporação da água, além da mudança de valores de pH e de temperatura.

Nucleação: Este processo ocorre logo após o estado de supersaturação da água em sistemas de resfriamento. A nucleação pode ser classificada em dois tipos, tais como:

Nucleação homogênea: Esta se apresenta de maneira espontânea quando há um alto grau de supersaturação na água.

Nucleação heterogênea: Este tipo de nucleação é o mais comum e ocorre devido às partículas estranhas ou condições diferenciadas que iniciaram o processo de precipitação. Estas partículas podem ser os sólidos suspensos ou os produtos da corrosão.

Desta maneira, quando há depósitos sobre a superfície da tubulação de troca térmica (trocadores de calor), a primeira camada é proveniente da nucleação heterogênea e em seguida, a camada observada é proveniente do mecanismo homogêneo.

## **II.6 - PRINCIPAIS TIPOS DE INCRUSTAÇÕES EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA INDUSTRIAL**

Basicamente as incrustações se apresentam sob forma de carbonatos, silicatos de cálcio, silicatos de magnésio e sulfato de cálcio. Em alguns casos é notório o aparecimento de fosfatos de cálcio e fosfatos de zinco.

Em se tratando do carbonato de cálcio, a sua precipitação depende principalmente da temperatura, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade e teor de cálcio.

Pode-se calcular o índice de saturação através do Índice de Saturação de Langelier.

**II.6.1 - Índice de Saturação de Langelier** – Este é um modelo de equilíbrio derivado de conceitos teóricos de saturação que indica o grau de saturação do carbonato de cálcio na água. O cálculo é feito tomando-se a diferença entre o pH da água (pH) e o pH calculado quando esta mesma água apresenta-se saturada com CaCO<sub>3</sub> (pHs).

$$LSI = pH - pHs$$

O pHs pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$pHs = (9,3 + A + B) - (C + D)$$

Onde temos:

$$A = (\text{Log}_{10} [\text{TDS}] - 1) / 10$$

$$B = -13,12 \times \text{Log}_{10} (C^{\circ} + 273) + 34,55$$

$$C = \text{Log}_{10} [\text{Ca}^{2+} \text{ de CaCO}_3] - 0,4$$

$$D = \text{Log}_{10} [\text{alcalinidade do CaCO}_3]$$

Obs: TDS = Total de sólidos dissolvidos (mg/l)

$\text{Ca}^{2+}$  de  $\text{CaCO}_3$  = Teor de Cálcio em forma de Carbonato.

Caso se tenha os valores de condutividade, pode-se transformar tais valores para TDS conforme tabela abaixo:

**Tabela 04** – Valores de transformação de condutividade em Totais de sólidos dissolvidos.

Condutividade ( micro-mho/cm)	Total de Sólidos Dissolvidos (mg/L CaCO <sub>3</sub> )
1	0,42
10,6	4,2
21,2	8,5
42,4	17,0
63,7	25,5
84,8	34,0
106,0	42,5
127,3	51,0
148,5	59,5
169,6	68,0
190,8	76,5
212,0	85,0
410,0	170,0
610,0	255,0
812,0	340,0
1008,0	425,0

Estes cálculos podem ser utilizados em águas com temperaturas menores que 50°C e índices de sólidos dissolvidos abaixo de 500ppm. Este índice pode ser interpretado como a variação de pH requerida para trazer a água ao seu equilíbrio.

Valores positivos do índice de Langelier: A água irá dissolver  $\text{CaCO}_3$  , apresentando características incrustantes.

Valores negativos do índice de Langelier: Indica que há precipitação de  $\text{CaCO}_3$  , onde a água é agressiva a esta substância.

Valor zero: Indica que a saturação da água está em equilíbrio, portanto, não haverá incrustações na superfície da tubulação e qualquer alteração de temperatura ou evaporação poderá alterar tal valor.

Este método possui suas limitações pois somente é observado a diferença de pH na água. Isto apenas não é suficiente para previsão da tendência de incrustações nas tubulações. Os fatores como ação mecânica e velocidade de circulação do fluido devem ser observados para uma melhor análise.

**II.6.2 - Índice de Ryznar**: Este índice atenta para uma correlação entre uma tabela empírica de espessura observada na tubulação e o estado químico da água. Isto para quantificar a relação entre o estado de saturação do carbonato de cálcio e a camada formada.

Desta forma temos:

$$RSI = 2 (pH_s) - pH$$

$pH_s$  = pH da água saturada com  $CaCO_3$

$pH$  = pH atual da água

Podemos resumir os valores deste índice conforme indicado na tabela abaixo :

**Tabela 05** - Índices de Ryznar

<b>ÍNDICE DE RYZNAR</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
Menor ou igual a 6,0	Diminuição da tendência da corrosão e aumento da tendência do depósito de $CaCO_3$
Igual a 7,0	Não há tendência à depósitos.
Maior ou igual a 8,0	Aumenta a tendência a processos corrosivos

Caso haja alguma situação onde a temperatura da água estiver compreendida entre os valores de 0°C e 60°C e se tenha a indicação de tendências diferentes tendo sempre valores positivos, pode-se tomar os valores indicados na tabela abaixo.

**Tabela 06** – Índices de Ryznar com parâmetros de Temperaturas entre 0°C e 60°C [17]

ÍNDICE DE RYZNAR	TENDÊNCIA
4 – 5	Forte Incrustação
5 – 6	Pequena Incrustação
6 – 7	Equilíbrio
7 – 7,5	Ligeira Corrosividade
7,5 – 8,8	Elevada Corrosividade

**II.6.3 - Índice de Puckorius:** Este índice foi desenvolvido para melhorar os índices pré-existent, é largamente utilizado em sistemas de resfriamento de água onde os valores de pH podem variar de 7,5 a 9,2.

O índice de PSI é calculado numa maneira semelhante ao índice de estabilidade de Ryznar.

Temos a seguinte equação:

$$PSI = 2 \text{ pHs} - (\text{pH}_{eq})$$

Onde:

pHs = pH da água saturada com CaCO<sub>3</sub>

pH eq = pH de equilíbrio calculado pelo que segue:

$$\text{pH eq} = 1,465 \text{ Log AT} + 4,54$$

AT = Alcalinidade Total.

A tabela a seguir serve para correlacionar os valores dos índices de Langelier, Ryznar e Puckorius, caso haja a necessidade de transformação.

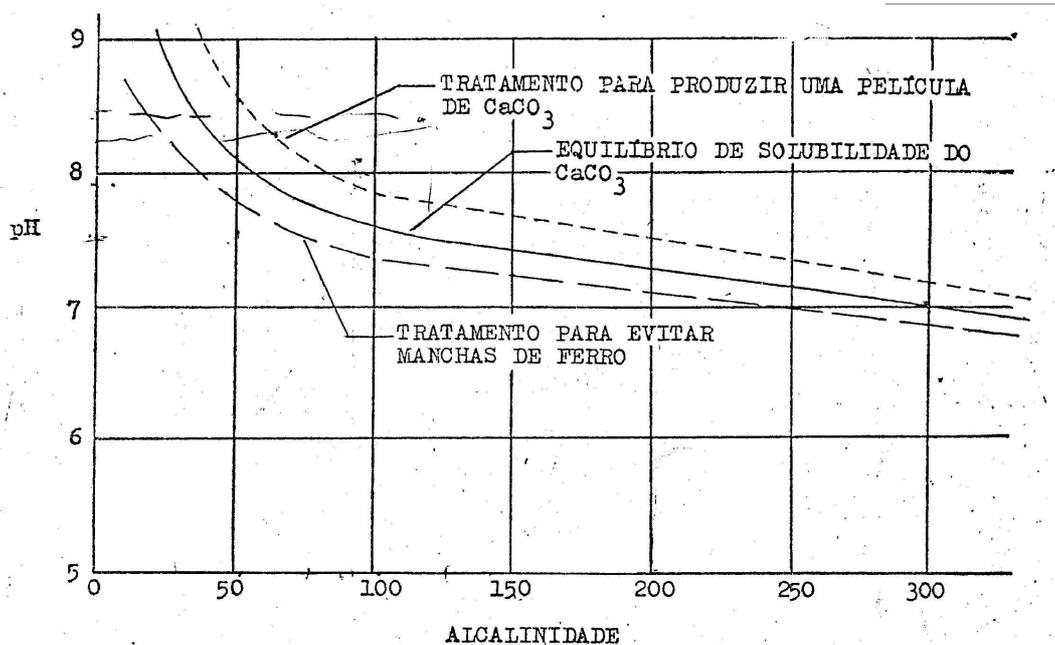
**Tabela 07** – Relação de valores entre os índices de Langelier, Ryznar e Puckorius [5].

LSI	RSI / PSI	CONDIÇÃO
3,0	3,0	Incrustação extremamente severa
2,0	4,0	Incrustação muito severa
1,0	5,0	Incrustação Severa
0,5	5,5	Incrustação Moderada
0,0	6,0	Água estável
-0,2	6,5	Sem incrustação, tendência muito leve para dissolver.
-0,5	7,0	Sem incrustações, tendência leve para dissolver.
-1,0	8,0	Sem incrustação, tendência moderada para dissolver.
-2,0	9,0	Sem incrustações, tendência forte para dissolver.
-3,0	10,0	Sem incrustações, tendência muito forte para dissolver.

O silicato de magnésio em pH abaixo de 10 se apresenta tanto sob a forma de íon monomérico ( SiO<sub>3</sub><sup>-2</sup> ) quanto sob a forma de polímeros. Este tipo de carbonato apresenta

solubilidade inversa com a temperatura. Podem promover uma incrustação vítrea quando combinado com o Magnésio na água.

**II.6.4 - Curva de Baylis :** O gráfico a seguir nos mostra a relação entre o pH e alcalinidade da água. Pode ser utilizado para estimar a corrosividade da água.



**Fig 01 - Curva de Baylis. [3]**

Caso o ponto no gráfico esteja abaixo da curva mais inferior a água é corrosiva. Uma operação prática é aumentar a alcalinidade da água e o pH, juntando-se cal extinta ou barrilha até que o ponto de intercessão esteja ligeiramente acima da curva central. Se o ponto de intercessão se localiza acima da curva superior existe um excesso de tratamento e desta maneira, poderão ser encontrados depósitos de carbonato de cálcio.

## II.7 - SISTEMAS DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA INDUSTRIAL

Nos processos industriais é comum o uso da água para absorver e rejeitar calor de um determinado sistema, em tratando-se de sistema de resfriamento para plantas industriais de ar condicionado as torres de resfriamento realizam este trabalho de rejeito de calor.

Desta maneira, o meio refrigerante utilizado é a água e temos alguns exemplos a seguir:

- Sistema aberto;
- Sistema semi-aberto;
- Sistema fechado.

A escolha de um deles para uma planta industrial depende de alguns fatores tais como:

- Quantidade de água em disponibilidade;
- Qualidade de água a ser usada no sistema;
- Temperatura da água;
- Tipo de operação;
- Capacidade do equipamento;
- Limitação na qualidade do efluente industrial.

### **II.7.1 - Sistema Aberto**

Este tipo de sistema é utilizado quando encontramos uma disponibilidade de água muito grande a baixo custo, com uma qualidade satisfatória e baixa temperatura, a água é bombeada da sua fonte principal, atravessa os trocadores de calor e, em seguida, é encaminhada a um ponto de descarte onde terá novas utilizações. Este sistema possui uma desvantagem pois o descarte de grandes volumes de água poderá causar poluição térmica, atingindo o equilíbrio biológico de rios, lagos e oceanos [6].

### **II.7.2 - Sistema Semi-Aberto**

Este tipo de sistema é largamente utilizado em sistemas de ar condicionado, onde há necessidade de vazões de água elevadas e somente uma pequena disponibilidade de água existente. A temperatura da água de circulação é reduzida fazendo com que a mesma entre em contato direto com o ar [7].

A água, ao passar pelos condensadores das centrífugas, é bombeada para as chamadas torres de resfriamento onde o calor é liberado para a atmosfera, este calor é dissipado através da evaporação de uma pequena porcentagem de água que após resfriada é recirculada para o sistema.

Em métodos práticos, esta rejeição de calor também acontece com a transferência de calor sensível onde o ar é aquecido pelo contato direto com a água dentro da torre de resfriamento.

O maior benefício deste tipo de sistema é a reutilização da água de processo por muitas vezes antes de uma eventual descarga para renovação do sistema. Para efeito de tratamentos químicos, estes podem ter sua aplicação à forma mais adequada possível [5], [6].

### **II.7.3 - Sistema Fechado de Recirculação**

Neste tipo de sistema a água é recirculada de forma contínua absorvendo e rejeitando calor em pontos distintos no sistema, a água aquecida é refrigerada em um trocador de calor secundário onde esta mesma água não entra em contato com o meio refrigerante.

Um exemplo prático para o sistema ocorre quando o calor absorvido pela água é transferido para um gás refrigerante do tipo freon e através dos processos de expansão e compressão deste gás o calor é transferido novamente para um sistema de dissipação (que pode ser movido a ar ou a água) eliminando o calor para a atmosfera. [5]

## **II.8 - TORRES DE RESFRIAMENTO**

Torres de resfriamento fazem um tipo especial de trocador de calor, onde ambos os fluidos - ar e água - estão fisicamente em contato. Nessas condições, a troca se dá principalmente por evaporação. Quanto menor for o “approach”, ou seja, quanto menor for a temperatura de bulbo úmido do ar em relação à temperatura da água na bacia da torre, melhor será a eficiência da mesma.

Algumas definições devem ser consideradas onde são muito utilizadas em sistemas de resfriamento de água industrial.

Vazão de Circulação – Representa o volume de água bombeado para o sistema por unidade de tempo. A água é bombeada da bacia da torre até os trocadores de calor e em seguida, retorna à bacia das torres. Geralmente a unidade de medida é m<sup>3</sup>/h (metros cúbicos por hora).

Evaporação – Parte da água que circula no sistema, durante a troca de calor com o ar, é evaporada. Em média o percentual de evaporação em torres de resfriamento gira em torno de 1,4% da água de circulação a cada 10°C de gradiente térmico. Esta água que evapora não possui sais, sólidos ou minerais dissolvidos provenientes do fluido do sistema. A unidade de medida é usualmente m<sup>3</sup>/h (metros cúbicos por hora).

Descargas – São conhecidas como purgas e podem ser aplicadas de forma intermitente ou contínua com a finalidade de reduzir a concentração de sais dissolvidos e sólidos em suspensão. A unidade de medida usual é m<sup>3</sup>/h (metros cúbicos por hora).

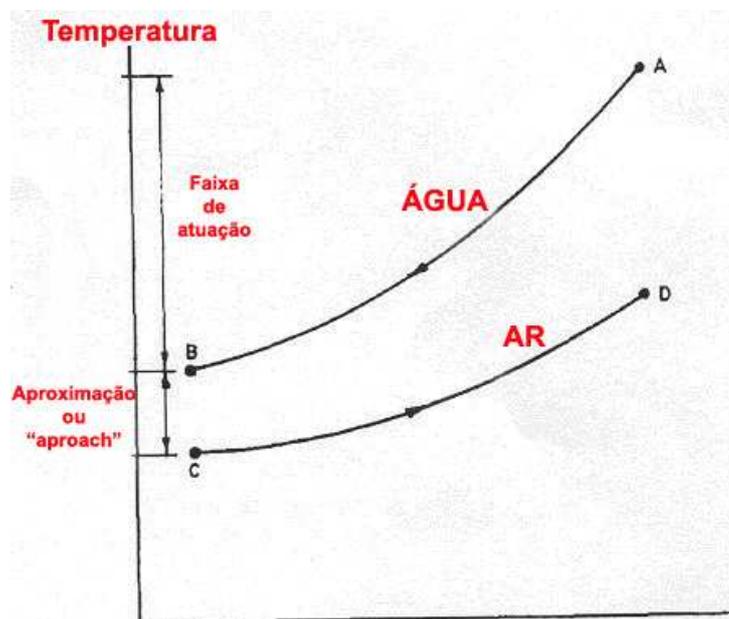
Arraste e Respingos – Representam gotas de água que se perdem para a atmosfera devido ao arraste do ar exaurido de dentro da torre ou do vento natural. Torres modernas possuem em média taxas de arraste que giram em torno de 0,01 a 0,05% em relação à vazão de circulação. Em tempos mais remotos este percentual poderia atingir 0,3%.

Reposição – Representa a água que é repostada ao sistema devido a perdas por purgas, evaporação, respingos ou arraste de água. Normalmente a água de *make up* é adicionada ao sistema por um controlador de nível.

Ciclo de Concentração – Este ciclo é representado pelo número de vezes que a água do sistema se concentra em relação à água de reposição, isto é decorrente da evaporação dentro das torres de resfriamento.

Nas torres de refrigeração, todo calor absorvido pela água é dissipado pelo calor latente e calor sensível. Os valores de calor latente podem variar de 75 a 90% do calor perdido e o calor sensível é representado pela diferença de temperatura. [17]

A figura a seguir indica a relação de temperatura da água do sistema e do ar, isto para analisar as condições de performance das torres de resfriamento.

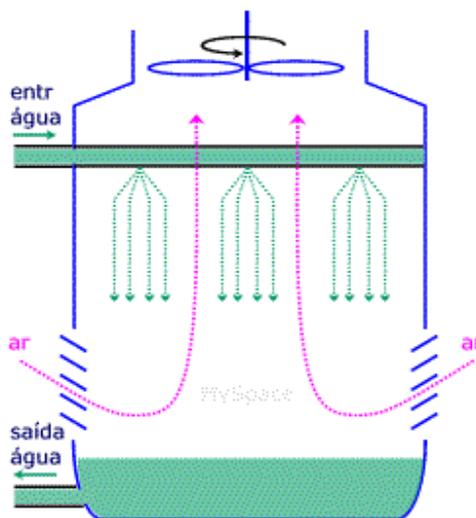


**Fig 02** – Gráfico de relação entre a Temperatura da água e do ar para melhor eficiência no resfriamento do sistema. [7]

Isto se deve ao fato de que existirá uma maior taxa de evaporação e conseqüentemente existirá a troca de calor entre o ar e a água, a temperatura mínima em que a água pode ser

resfriada por evaporação é a temperatura de bulbo úmido do ar, assim, esta temperatura é classicamente chamada de temperatura de ponto de orvalho.

Na grande maioria dos projetos, as torres de resfriamento convencionais possuem um range de “approach” entre 06 e 17°C onde o princípio de funcionamento é bastante simples. Um exemplo pode ser visto conforme Figura abaixo. Um ventilador no topo provoca um fluxo ascendente de ar que encontra o fluxo descendente da água. Na prática existem outros arranjos e também recursos para maximizar o contato do ar com a água, como chapas, colméias e outros.



**Fig 03** – Representação esquemática de uma torre de resfriamento do sistema de ar condicionado.

As torres de resfriamento podem ser caracterizadas de diversas maneiras, tais como o método de circulação do ar; a direção relativa entre o ar e o fluxo de água; o formato da torre e finalmente o método de transferência de calor.

Estes equipamentos são classificados de acordo com os seguintes itens:

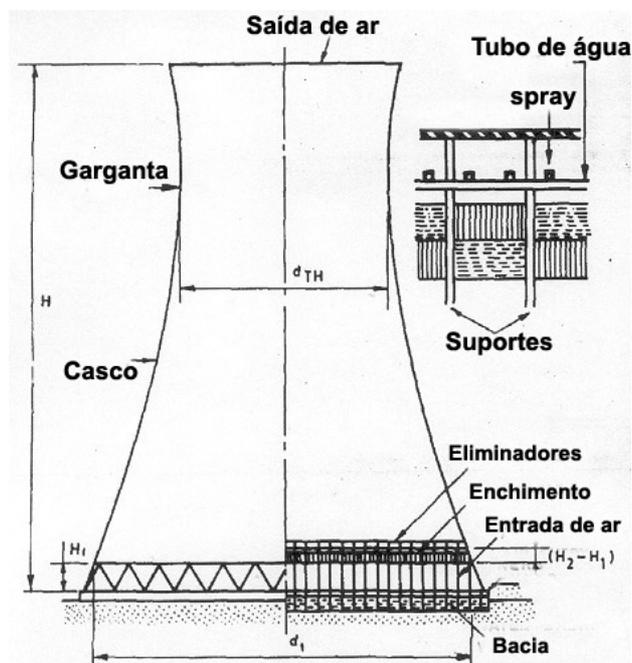
- Projeto - naturais ou mecânicas.
- Movimento relativo do ar e da água - corrente cruzada ou contra corrente.
- Método de transferência de calor – úmidas (usando resfriamento evaporativo), secas e úmidas e secas.

Nas torres de resfriamento mecânicas (Mechanical draught cooling towers –MDCT), os ventiladores são utilizados para garantir o fluxo de ar através da torre durante o processo de resfriamento. Estas podem ser divididas em:

- Torres de Resfriamento de tiragem Forçada (Forced draught cooling tower – FDCT)
- Torres de resfriamento de tiragem Induzida (Induced draught cooling tower – IDCT)

Esta classificação dependerá da localização do ventilador ou blower. [7]

Em torres de resfriamento naturais (Natural draught cooling tower – NDCT) a transferência de calor é dada pela diferença de densidade entre o ar quente dentro da torre e o ar externo fora dela. Esta diferença faz com que o ar quente suba através da chaminé enquanto o ar frio segue o sentido contrário até a base da torre. [7]



**Fig 04** – Representação de uma Torre de Resfriamento Natural.

Geralmente são construções grandes e suas chaminés são do tipo hiperbólicas. Para uma maior eficiência a altura mínima de 152m deverá ser atingida nas chaminés.

Não existem ventiladores equipando este tipo de torre e podem ser apresentadas através de projetos contra corrente ou corrente cruzada, a característica de corrente cruzada, geralmente o fluxo de ar atravessa de forma horizontal a água em queda dentro da torre e em sistemas de contra corrente o fluxo de ar move-se de baixo para cima da torre contra o sentido de queda de água.

## II.9 - CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES EM PROJETOS DE TORRES DE RESFRIAMENTO

Existem alguns fatores que devem ser considerados como itens importantes para um bom desempenho de uma torre de resfriamento, dentre eles podemos citar o que segue:

#### Área de superfície da água em contato com o ar.

Neste item o procedimento é a instalação de enchimentos no interior das torres para que a água aumente sua área de contato com o ar.

Este tipo de enchimento pode ser confeccionado em madeira ou em materiais plásticos poliméricos como o poliestireno entrelaçado, a madeira é menos resistente à ação do tempo e de fatores degradantes, desta maneira a opção por materiais plásticos seria a melhor opção pois são resistentes e distribuem de forma mais uniforme a água.

#### Velocidade relativa da água e do ar.

A velocidade da água é definida apenas pela aceleração da gravidade. Já a velocidade do ar pode ser controlada através da variação de rotação dos ventiladores. É notório que a rotação não pode chegar a níveis muito elevados pois podem causar grande arraste de água consequentemente aumentando o consumo de água de reposição.

#### Tempo de Contato entre a água e o ar.

Neste item, os fatores que determinam tais condições são a altura da torre e a velocidade do ar.

#### Diferença entre a temperatura de bulbo úmido do ar e a temperatura da água

As torres não podem resfriar a água abaixo da temperatura de bulbo úmido do ar externo, desta maneira quando a umidade relativa do ar chega a valores próximos de 100%, o sistema atuando a carga máxima, não é capaz de fornecer o resfriamento necessário a água para que a planta funcione dentro dos parâmetros de projeto.

Esta diferença de temperatura entre o ar e a água geralmente é estabelecida pelas características do sistema e das condições climáticas de cada região.

## **II.10 - TRATAMENTO QUÍMICO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO**

Quando se trata com sistemas de ar condicionado de grandes capacidades existe a necessidade de sistemas de distribuição de água, tanto de condensação quanto de água gelada. O sistema de água gelada pouco necessita de tratamento, devido os fatores de baixa temperatura, pouco contato com o ar exterior, pequena quantidade de água de reposição. Já o sistema de água de condensação há vários fatores que concorrem para sérios problemas, temperatura elevada, contato com ar exterior, elevadas quantidades de água de reposição entre outros.

Devido aos fatores supracitados muitos problemas ocorrem, proliferação de microorganismos, acúmulo de partículas, aumento da concentração de determinados produtos, corrosão e incrustações.

Geralmente estes fatores são tratados de forma química, largamente utilizados na indústria, e são chamados de inibidores de corrosão. Estes podem ser classificados da seguinte maneira:

Quanto ao comportamento: não oxidantes (depositantes), oxidantes e de adsorção.

Quanto à composição química: orgânicos e inorgânicos.

Adicionalmente a estas classificações, os inibidores podem ser definidos de acordo com as reações na qual controlam, desta maneira, podem se enquadrar como inibidores anódicos, catódicos e mistos. Este último se prevalece do efeito sinérgico.

### **II.10.1 - Inibidores Anódicos**

Este tipo de inibidor cria um filme de forma contínua, de alta resistividade com característica bastante insolúvel. Assim, o inibidor tende a evitar a reação anódica. A partir da aplicação dos inibidores anódicos, as quantidades devem ser controladas de forma adequada, isto por que, em um sistema industrial, estudos devem ser realizados previamente para controlar tais valores pois existem concentrações críticas acima da qual há inibição e abaixo da qual não há proteção ao longo das tubulações devido a não formação do filme protetor, este fato é favorecedor do efeito corrosivo nas áreas não cobertas pela camada protetora.

Um fator importante a ser observado é a densidade de corrente de corrosão, ou seja, caso a superfície do metal esteja sofrendo uma corrosão uniforme, a densidade de corrente será praticamente a mesma em relação àquelas poucas áreas onde há corrosão localizada (pites).

Caso se tenha uma quantidade grande de pits ao longo da superfície, a taxa de corrosão na qual o substrato está submetido ocorre de maneira muito mais rápida, isto porque a corrente está se concentrando em áreas bastante pequenas (pites).

Alguns exemplos de inibidores podem ser descritos a seguir: cromatos, nitritos, molibdatos, ácido fosfínico carboxílico, ácidos fosfonos carboxílicos, ortofosfatos (podem ser divididos em fosfato dibásico –  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , fosfato básico -  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ), sal de Boro, Benzoato de Sódio e Silicatos.

### **II.10.2 - Inibidores Catódicos**

Neste tipo de inibidor, a ação do oxigênio é restringida pelo filme formado sobre a superfície do metal. Desta maneira, há um retardo na capacidade do oxigênio de se reduzir no lado catódico.

A aplicação também prevê um certo controle, pois caso esta dosagem se afaste dos parâmetros estabelecidos, poderá ocasionar incrustações e “fouling” sobre a superfície do sistema. As vantagens deste tipo de tratamento é a redução do fluxo de elétrons através da polarização do catodo, redução da probabilidade de corrosão localizada e redução da taxa de corrosão.

Alguns exemplos de inibidores podem ser descritos a seguir: polifosfatos, fosfonatos, íons de zinco, azóis e os estéres de fosfatos.

### **II.10.3 - Inibidores Mistos**

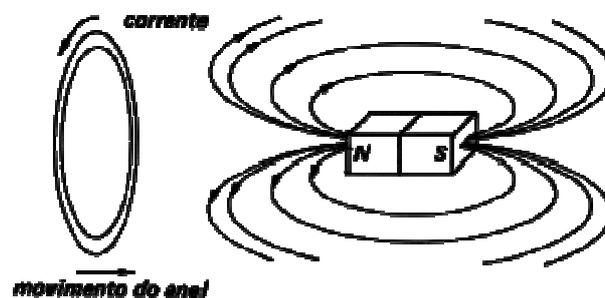
Este tipo de tratamento utiliza-se da composição de inibidores anódicos e catódicos, cada um atuando de forma a complementar as limitações do outro e desta forma obtendo resultados satisfatórios do ponto de vista prático e econômico. O resultado desta combinação resulta em menores índices de nucleação de pites no metal que compõem o sistema.

Alguns exemplos de inibidores podem ser descritos a seguir: a mistura de polifosfato-fosfonato-zinco, fosfonato-azóis-zinco, fosfeno carboxílico-azóis-zinco, fosfeno carboxílico-fosfonato-azóis-zinco.

## **II.11 – CONCEITOS BÁSICOS DE CAMPO ELÉTRICO E CAMPO MAGNÉTICO**

A fonte do campo magnético estacionário pode ser um ímã permanente, um campo elétrico variando linearmente com o tempo ou uma corrente contínua [9].

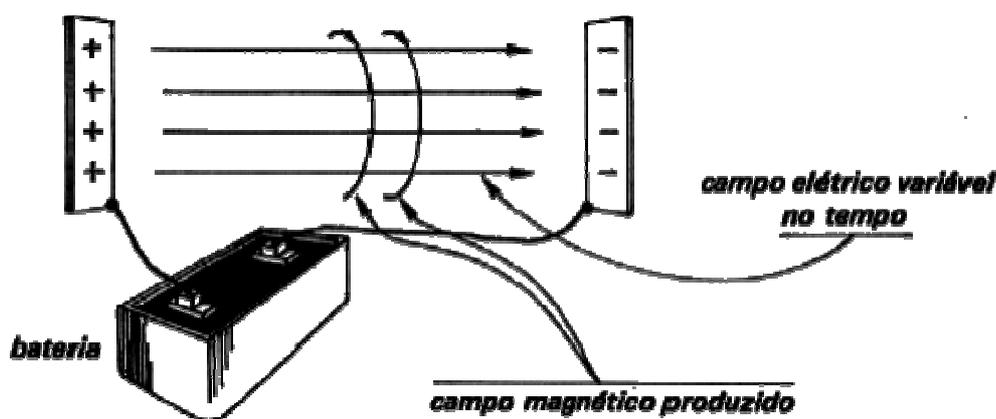
Considere o ímã perpendicular ao plano de um anel. Movendo-se ou o ímã ou o anel, aparecerá uma corrente no anel, causado por um campo elétrico criado devido à variação do fluxo magnético no anel, isto pode ser mostrado conforme figura abaixo.



**Fig 05** – Aproximando o anel do imã, aparecerá uma corrente elétrica no anel. [10]

Através das experiências realizadas por Maxwell, verificou-se que o contrário também era possível. Um campo elétrico variável podia gerar um campo magnético.

Imagine duas placas paralelas sendo carregadas progressivamente conforme a figura 06 abaixo:



**Fig 06** – Representação do surgimento do campo magnético em detrimento do campo elétrico. [10]

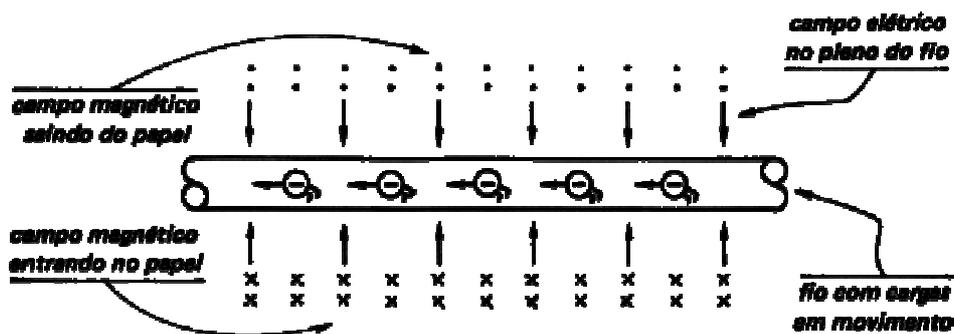
Ao crescerem as cargas das placas, o campo elétrico aumenta, produzindo um campo magnético (devido a variação do campo elétrico).

Embora Maxwell tenha estabelecido quatro equações para descrever os fenômenos eletromagnéticos analisados, podemos ter uma noção de sua teoria baseados em duas conclusões:

- Um campo elétrico variável no tempo produz um campo magnético.
- Um campo magnético variável no tempo produz um campo elétrico.

Esse campo elétrico variável ( $E$ ) irá gerar um campo magnético ( $B$ ), que será também variável. Por sua vez, esse campo magnético irá gerar um campo elétrico. E assim por diante. Cada campo varia e gera outro campo que, por ser variável, gera outro campo: e está criada a perturbação eletromagnética que se propaga através do espaço, constituída pelos dois campos em recíprocas induções.

É fato que o campo elétrico é perpendicular à direção de propagação e o campo magnético também, o que comprova que a onda eletromagnética é uma onda **transversal**. Além disso, o campo elétrico é perpendicular ao campo magnético, o que verifica-se facilmente: quando um fio é percorrido por cargas em movimento, o campo elétrico num ponto próximo ao fio pertence ao plano do fio, enquanto o campo magnético está saindo ou entrando neste plano [10], conforme figura esquemática a seguir.



**Fig 07** – Representação das linhas indicativas de sentido dos campos elétricos e magnéticos ao redor de um condutor. [10]

## II.12 - TIPOS DE TRATAMENTOS FÍSICOS DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

Existem vários tipos de tratamentos de água, os quais podemos apresentar como segue [11]:

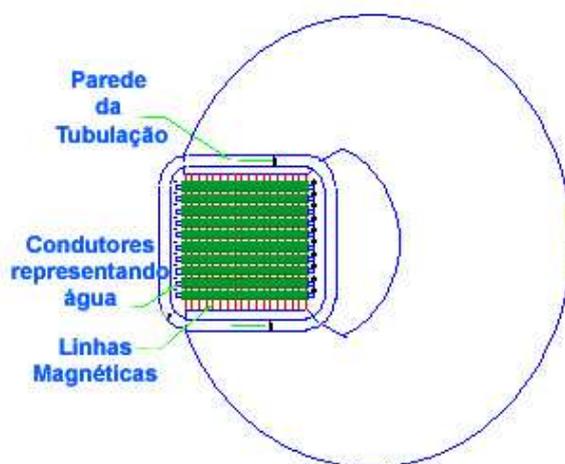
1. Imãs intrusivos
2. Imãs do tipo grampo (braçadeira)
3. Eletroimãs intrusivos
4. Eletroimãs não intrusivos
5. Eletrolítico
6. Sistema EletroMagnético

### II.12.1 - Imãs Intrusivos

Este tipo de tratamento físico, apareceu logo após a descoberta de que a água fluindo através do leito de rochas magnéticas não apresentava sinais que possam ocasionar incrustações [8].

Desta maneira, foi assumido que simplesmente o campo magnético era responsável pela prevenção contra as incrustações. Na Figura 08 é mostrado os princípios gerais que são empregados na operação de imãs intrusivos.

Os condutores representam a água em movimento cortando as linhas magnéticas, gerando uma tensão representadas por + e – nas pontas dos condutores. Esta tensão que pode ser gerada utilizando tal dispositivo depende de dois fatores: da força do imã e da velocidade do fluxo da água.



**Fig 08 - Imãs Intrusivos [11]**

A corrente no sistema é gerada como resultado da tensão e dependerá de dois fatores: da tensão e da condutividade da água. A corrente produzida por este método é **CC** (corrente contínua), ela agirá como uma corrente galvânica causando corrosão e deixando os íons metálicos na água.

Qualquer tipo de aglomerações que venham a ser formadas devido ao campo elétrico próximo aos ímãs, será carregado pelo fluxo da água. Algumas destas aglomerações crescerão atraindo mais íons e outras se dissolverão. Estas não são estáveis e se degradarão para íons individuais após um tempo relativamente curto. Caso uma quantidade suficiente de

aglomerações chegue até a fonte geradora do campo, estas crescerão para formar núcleos e a cristalização ocorrerá.

### **II.12.2 - Imãs do Tipo Grampo (Braçadeira)**

Este tipo de imãs são construídos principalmente de materiais cerâmicos revestidos com plástico.

Linhas magnéticas são criadas através de dois imãs individuais que abraçam a tubulação. Estas linhas são atenuadas pelo largo entre-ferro entre os imãs.

Estudos estão sendo realizados com tal dispositivo para verificação da emissão de um campo elétrico capaz de formar a nucleação de cristais no fluxo de água.

### **II.12.3 - Eletroimãs Intrusivos**

É possível gerar fortes campos magnéticos com eletroimãs através de um projeto bem elaborado. A velocidade do fluxo pode ser alterada restringindo o campo magnético. Os eletroimãs necessitam de uma fonte de energia elétrica para que possam atuar dentro de seus padrões de funcionamento.

Uma característica dos mesmos é que podem ser desligados, desta forma liberando quaisquer partículas magnéticas que se tenham acumulado no tubo.

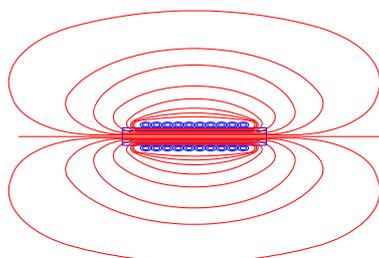
### **II.12.4 - Eletroimãs Não Intrusivos**

Neste tipo de tratamento campos magnéticos são gerados através do enrolamento de cabos ao redor das tubulações de água.

Nesta categoria podemos encontrar variações que podem ir de bobinas de 50Hz submetidas à tensão principal, a um fio enrolado no tubo. O sinal usado neste último é principalmente uma onda quadrada a uma frequência ultra-sônica. A Figura 09 ilustra uma seção de tubo e a bobina enrolada em torno dele. As linhas vermelhas representam as linhas magnéticas. Como pode ser visto a maioria das linhas magnéticas correm de modo paralelo ao líquido que se movimenta dentro da tubulação.

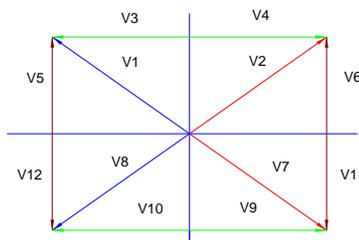
Algumas das linhas magnéticas além das extremidades da bobina, fluem entre os pólos, e irão cortar o líquido em ângulos rasos. Esta operação deve ser observada de forma criteriosa para que não haja a emissão de campos elétricos de menor intensidade em ambas as

extremidades da bobina. Conforme a figura abaixo mostrando a atuação das linhas magnéticas geradas no tubo.



**Fig.09** – Representação das linhas magnéticas produzidas na tubulação [11]

Os campos serão gerados perpendicularmente às linhas magnéticas. A Figura 10 representa as tensões que são geradas na água. Desde que cada linha magnética tenha a sua linha igual e oposta no mesmo eixo, as tensões que são geradas, V1 e V2, V7 e V8 são complementares. Desta forma as tensões V3 e V4, V5 e V12, V9 e V10, V6 e V11 que são iguais e opostas, nos permitem deduzir que a tensão total deverá ser zero.



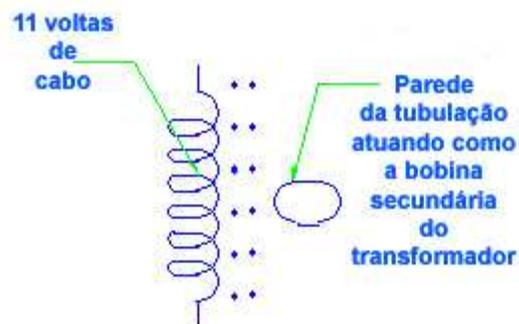
**Fig. 10** - Representação das tensões geradas na água. [11]

De modo prático, as tensões não se cancelam por completo pois existe uma distribuição irregular das linhas magnéticas.

Existem outras razões para variação no campo elétrico que podem ser formadas por este método. A principal deve-se ao fato da existência de turbulência no fluxo de água na tubulação. A água pode não fluir de forma linear no tubo. Isto depende de alguns fatores, e serão totalmente diferentes de uma instalação para outra. Tensões irregulares no eletroímã são causadas pelo fluxo turbulento através das linhas magnéticas.

É notório que o material do tubo exerce grande influência na eficiência do dispositivo. Os eletroímãs são enrolados ao redor da tubulação e esta mesma tubulação funciona como bobina secundária de um transformador pois está em paralelo com o enrolamento de eletroímãs.

Assim o enrolamento secundário atua como um curto-circuito e grande parte da energia é dissipada para aquecer as paredes da tubulação especialmente as confeccionadas em cobre, conforme esquematizado na figura 11.

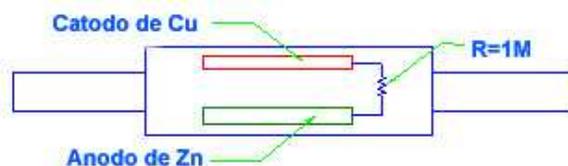


**Fig.11** - Representação da tubulação atuando como a bobina secundária de transformador. [11]

### II.12.5 - Eletrolítico

Este tipo de tratamento funciona basicamente como se fosse uma bateria, onde existe imersos dentro de um eletrólito (água) dois eletrodos de materiais distintos. Assim se os eletrodos forem interligados, fluirá corrente entre eles pois cada material possui um potencial de eletrodo diferente.

A ilustração de construção de um condicionador tipo eletrolítico é mostrada na Figura 12 conforme segue.



**Fig.12** – Desenho esquemático de um condicionador do tipo eletrolítico. [11]

Os eletrodos são ligados por um grande resistor  $1M\Omega$  (1.000.000 ohms). Este resistor é utilizado para aumentar a vida útil do ânodo de zinco.

O processo utilizado neste tipo de condicionador tenta equilibrar a eficiência com os custos para aumentar a vida útil do aparelho. Um campo elétrico é gerado para obter a inibição de incrustações e o mesmo é responsável pelo efeito condicionante.

Alguns parâmetros devem ser analisados e controlados para que haja uma boa performance deste sistema conforme abaixo:

1. Condutividade da água.
2. Verificação de sólidos totais dissolvidos na água de processo.
3. Compatibilizar os custos de manutenção.
4. Acompanhamento do efeito condicionante ao longo de todo sistema.

#### **II.12.6 – SISTEMA ELETROMAGNÉTICO**

Este tipo de tratamento é produzido por um equipamento que gera campos elétricos e campos magnéticos no fluxo de água.

Para produzir um fluxo razoável de elétrons em um condutor, é necessário fornecer uma fonte de alta frequência capaz de gerar uma onda estacionária de tensão em todo o comprimento do sistema de tubulação.

A figura abaixo nos mostra um sinal de onda de 200KHz, o comprimento de onda é de 1500m, um quarto deste comprimento é igual a 375m.

Em um sistema doméstico de água como uma central de aquecimento, uma central de distribuição de água potável ou sistema de resfriamento de água, o comprimento de toda a tubulação fica em torno de 60m.



**Fig. 13** - Representação do comprimento de onda gerado pelo equipamento eletromagnético na tubulação. [11]

Desta maneira, o campo de atuação do equipamento estaria contemplando todo o comprimento de tubos que constituem o sistema.

Caso seja aplicado uma tensão de 10V, então o valor da onda estacionária seria encontrado a partir da fórmula  $[\sin(K / Y) \times 90] \times V = T$ , onde temos:

K = comprimento da tubulação doméstica a ser estudada.

Y = Valor de um quarto do comprimento de onda gerado pelo equipamento.

V = Tensão aplicada no sistema.

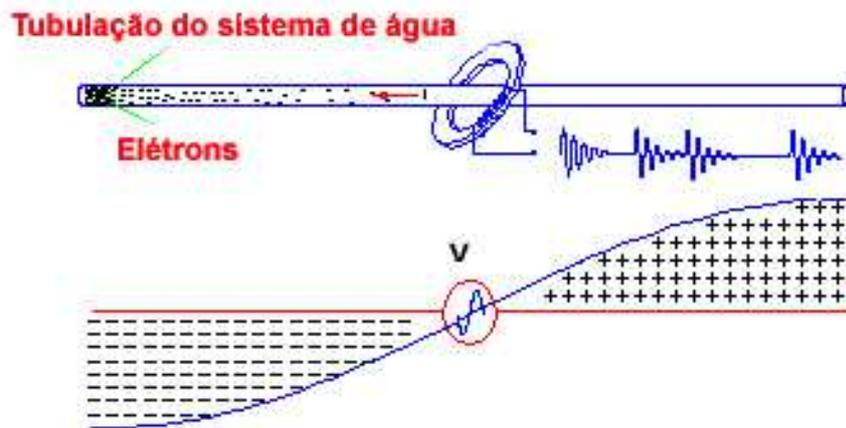
T = Tensão encontrada entre as extremidades da tubulação.

Considerando os dados acima citados teremos:  $[\sin((60/375) \times 90)] \times 10 = 2,49V$ .

Assim este valor de tensão seria o valor encontrado entre as extremidades da tubulação. Esta diferença de tensão encontrada nas extremidades do sistema é causada pelo fluxo de elétrons que caminham de uma extremidade a outra do circuito.

Para alcançar este fluxo de elétrons no sistema, a tensão tem que ser gerada na água e na direção da tubulação, isto é alcançado utilizando-se um transformador de alta frequência.

Na figura 14 é mostrado como o equipamento atua em termos de polarização dos íons no fluxo circulante do sistema.



**Fig 14** - Representação esquemática da polarização quando o equipamento permanece atuante. [11]

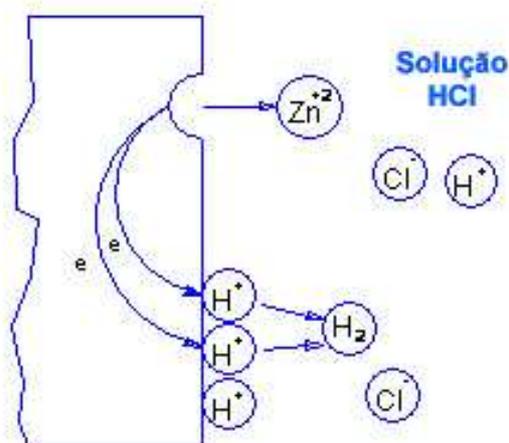
Este transformador é formado por um anel de ferrite instalado ao redor da tubulação. A bobina primária é instalada ao redor do anel de ferrite. Qualquer um dos condutores (a água ou a tubulação, caso esta seja confeccionada de material condutor) irá formar a bobina secundária paralela do transformador.

O sinal que alimenta a bobina primária é uma onda de alta frequência que oscila em períodos aleatórios. Esta onda é formada para permitir a nucleação de sais que podem estar presentes na água.

A corrente é a carga acelerada gerada através das ondas estacionárias. Esta aceleração é que forma o campo magnético. A componente elétrica é responsável pela formação da nucleação dos sólidos em suspensão e dos sais que caso não fossem tratados desta maneira, poderiam causar depósitos e incrustações.

O equipamento utilizado neste tipo de tratamento induz um campo eletromagnético coaxial através do líquido bi-polar. Este tipo de aparelho causa através do campo eletromagnético o movimento de cargas negativas em direção à superfície do tubo e dos íons positivos para o centro da tubulação, gerando um estado de proteção.

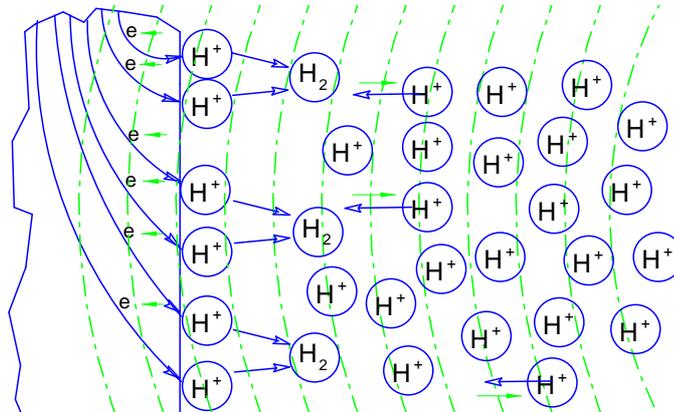
A figura 15 mostra um exemplo básico do processo de corrosão do Zinco em meio ácido, onde um átomo de zinco é transformado em um íon de zinco + 2 elétrons. Os elétrons permanecem no metal e serão instantaneamente consumidos na redução dos íons de hidrogênio. Mesmo que as reações ocorram em pontos diferentes ou atuem no mesmo ponto da superfície, não haverá comprometimento com o equilíbrio de cargas. Quando o campo eletromagnético é introduzido, os elétrons liberados pelo oxidante, são direcionados para longe da superfície do metal.



**Fig.15** – Esquema de Oxidação do Zn em presença de solução de HCl. [11]

A figura 16 ilustra um exemplo de funcionamento do equipamento no caso de um tubo exposto a um meio ácido diluído e ao campo eletromagnético coaxial produzido.

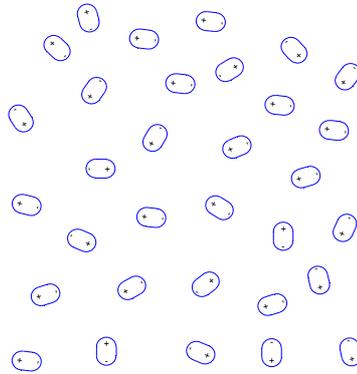
O princípio de funcionamento da fonte eletromagnética permite observar que através do campo magnético é gerado um fluxo de corrente na tubulação de forma que os elétrons sejam conduzidos à interface metal-meio e depois afastados devido aos sinais de onda oscilantes, enquanto na solução as cargas positivas são conduzidas para o centro do fluxo de água. Isto resulta na redução de processos anódicos como a dissolução do metal.



**Fig 16** – Exemplo de esquema de fluxo de elétrons produzidos pelo equipamento eletromagnético na tubulação em solução ácida [11]

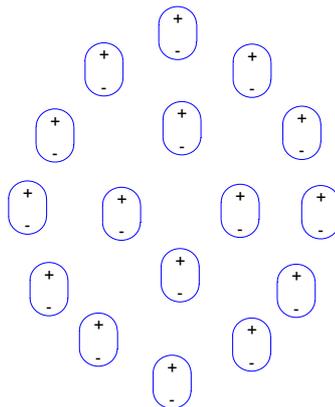
O equipamento pode criar uma concentração de cargas por todo o sistema, através de um campo elétrico.

Na figura 17 apresentam-se os íons bipolares que estão completamente dissociados e distribuídos aleatoriamente na solução, sem a atuação do campo elétrico. Os íons são associados devido à difusão e a atração eletrostática, tal atração é aumentada pela orientação dos dipolos e pelo efeito do campo aplicado. Os agrupamentos que representam dipolos maiores se ligam para formar áreas localizadas de alta concentração. As forças internas geradas por estes agrupamentos maiores, geram uma concentração de forças de atração.



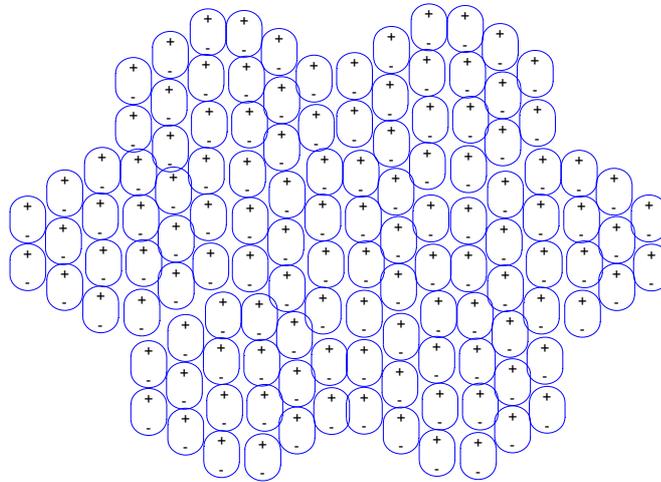
**Fig.17** – Representação dos íons na solução sem efeito do campo elétrico. [11]

Através da atuação do campo elétrico os íons são orientados conforme ilustrado na figura 18.



**Fig.18** – Representação da orientação dos íons com a atuação do campo elétrico. [11]

O campo elétrico gerado pelo equipamento através da solução fará aumentar a formação destes agrupamentos maiores, orientando-os nas soluções saturadas e não saturadas, assim o processo atrai mais espécies carregadas e um núcleo estável se forma como é mostrado na figura 19.



**Fig.19** – Representação da nucleação do cristal pelo efeito do campo elétrico. [11]

As forças de atração de tais núcleos se tornam muito maiores e como as partículas ficam difusas na superfície do núcleo, uma camada é formada e incorporada à rede de partículas. Os núcleos são formados e crescem novamente ajudados pelo efeito da orientação de cargas causada pelo campo aplicado.

O campo elétrico atua através do sistema e está presente na solução, especialmente próximo à área onde a solução experimentará mudanças de temperatura ou de pressão. Estas mudanças são responsáveis pela precipitação dos sais na solução. Desta maneira, através da purga no sistema, temos o recalque destes sais e sólidos em suspensão que causariam incrustações e posteriormente corrosão.

## II.12.7 – ALGUMAS CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS

Segundo Ross Gregory [13] o estudo de tratamentos físicos em águas industriais foi conduzido como segue, em dois diferentes ensaios :

1º ) As condições de tratamento físico foram analisadas em um sistema de água industrial montado de forma onde houvesse a dosagem de sulfato de ferro.

A água uma vez dosada com esta solução passaria por uma extensão longa de tubos e em alguns pontos, esta tubulação seria confeccionada em forma de espiral. Aparelhos para medir a turbidez foram instalados em dois locais do circuito.

Esta dosagem aplicada ao experimento fez com que o hidróxido de ferro aparecesse em suspensão. Verificou-se que este fenômeno foi diferenciado pelas condições físicas aplicadas, isto porque, ora utilizou-se um tratamento físico por vez e ora o tratamento fora utilizado de maneira combinada.

Três diferentes condições físicas de tratamento e suas combinações foram analisadas em diferentes pontos do circuito. Tais condições foram:

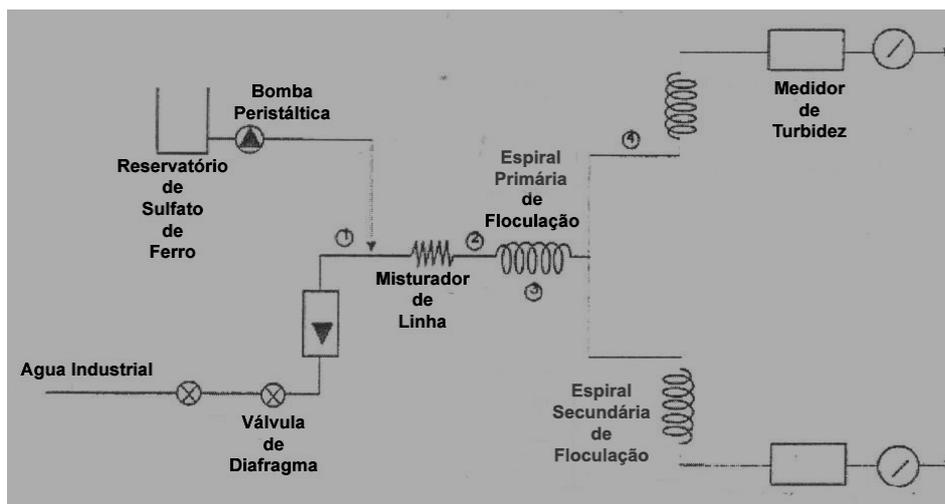
- Instalação de sistema eletromagnético no tubo antes da primeira espiral de tubos (posição 2).
- Instalação de uma bobina, que consiste no enrolamento de fios em um pequeno trecho da tubulação (posição 4).
- Instalação de dois blocos magnéticos ao longo da primeira espiral de tubos, um em cada lado da tubulação (posição 3).

O diagrama abaixo mostra que o experimento consiste numa linha de alimentação de água industrial com tubos flexíveis de 12mm de diâmetro interno. A solução de sulfato de ferro era dosada por uma bomba peristáltica logo na entrada do misturador e uma dosagem de 05 (cinco) mgFe/L era lançada no circuito desde que esta dose produzisse uma turbidez previamente medida no fluxo de água.

A solução passa por uma primeira espiral de 40 cm de diâmetro externo, 25 metros de comprimento e 25mm de diâmetro interno em tubo PVC. A solução então se divide em dois ramais onde estão localizadas as espirais secundárias de 37 cm de diâmetro externo, 25 metros de comprimento e 12mm de diâmetro interno em mangueira flexível. Cada ramal possui um

medidor de turbidez acoplado a um gráfico de registros. Dentro de cada espiral secundária foram instalados medidores de vazão para garantir a leitura do volume total de água tratada.

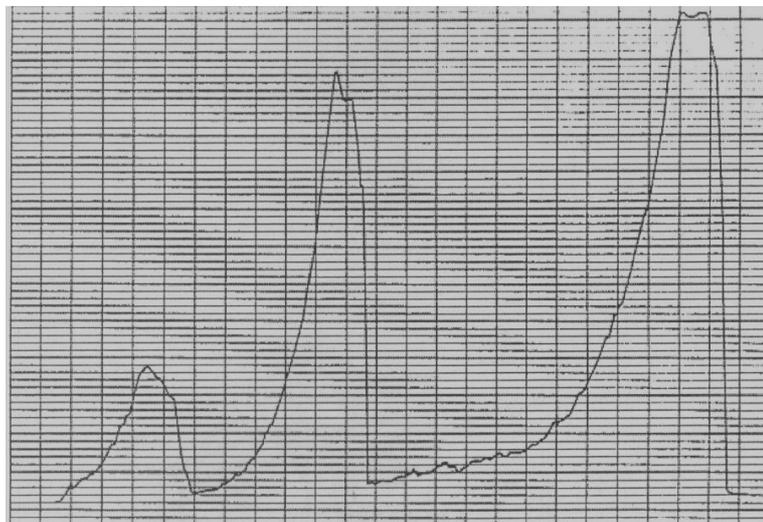
Durante o período dos testes, nenhuma diferença significativa foi encontrada na qualidade da água tratada deste circuito que pode ser ilustrado conforme figura 20.



**Fig 20** – Diagrama esquemático do circuito de água industrial utilizado no ensaio. [13]

Posteriormente foi realizado um procedimento para verificação de depósitos tanto na primeira espiral quanto na espiral secundária durante o período de 24 horas, esta verificação consiste em avaliar tais depósitos partindo-se de uma faixa padronizada de vazão que vai regularmente sendo aumentada no período de um dia.

No diagrama onde estão registrados os valores de turbidez, a área abaixo da curva representa a quantidade de depósitos avaliados. Esta curva é mostrada conforme a figura seguinte.



Estas medições permitem analisar os resultados dos testes feitos com a aplicação do tratamento físico e sem o tratamento no circuito. Desta maneira, os resultados foram plotados conforme o gráfico abaixo, indicando os diferentes tipos de tratamentos físicos aplicados.

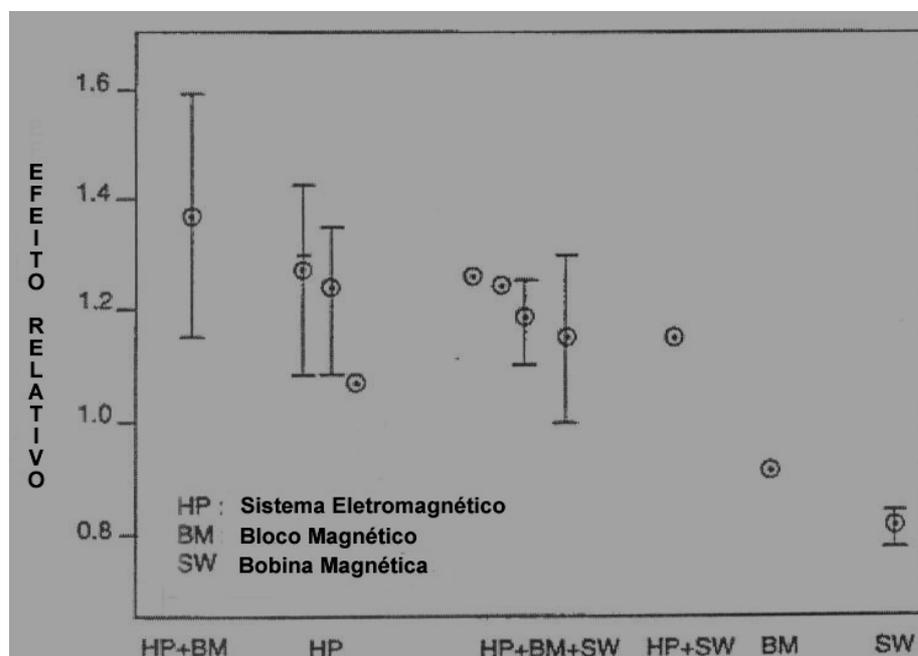


Fig 22 – Comparação dos testes realizados utilizando a combinação de tratamentos físicos. [13]

Isto evidencia que a aplicação do sistema eletromagnético juntamente com os blocos magnéticos apresentaram uma média de 37% de performance para evitar depósitos contra 18% das bobinas magnéticas utilizadas sozinhas.

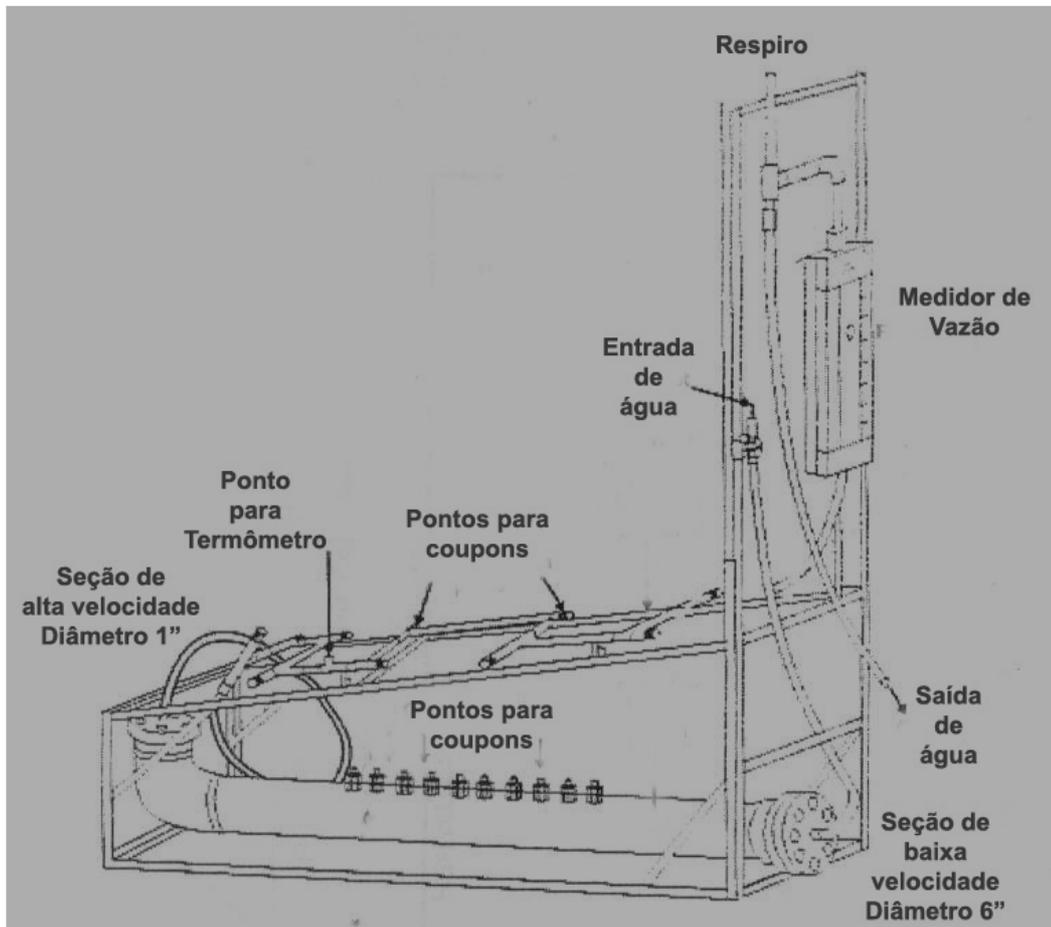
A forma como o experimento foi conduzido e como as condições de tratamento físico foram aplicadas, deixa claro que o campo magnético afeta a retenção de particulado de hidróxido de ferro em tubulações de pequenos diâmetros e de forma em espiral.

2º) Neste segundo experimento utilizou-se um tipo de água mais branda. A taxa de corrosão em tubulações de aço carbono varia de acordo com a velocidade do fluxo, da orientação da face do tubo em relação ao fluxo de água, da composição química da água do circuito e da temperatura.

Montou-se um sistema de verificação de perda de massa em coupons, dois circuitos foram confeccionados de forma a receberem adequadamente os coupons.

Um sistema destina-se a garantir um fluxo laminar composto por uma tubulação de 150mm de diâmetro externo em PVC e outro sistema composto por uma tubulação de 25mm de diâmetro externo formando ângulos retos ao longo de sua extensão para garantir um fluxo turbulento.

Cada sistema foi projetado para receber 10 pontos de inserção sendo que cada ponto receberia um par de corpos de prova, um fixado próximo à parede da tubulação e o outro a 4mm de distância do primeiro na direção do centro da tubulação. Isto faz com que cada ponto tenha duas faces de análise. Segue representado na figura abaixo o esquema de montagem do circuito de água.



**Fig 23** – Diagrama esquemático do sistema de coupons instalados na seção de alta velocidade (Dia. 1") e baixa velocidade (Dia. 6"). [13]

No primeiro sistema com tubulação de 150mm de diâmetro foi aplicada uma velocidade de 0,02m/s e no segundo sistema com tubulação de 25mm de diâmetro foi aplicada uma velocidade de 0,6m/s. Isto para reproduzir a gama de velocidades normalmente utilizadas em sistemas industriais.

Os pares de cupons foram retirados em intervalos regulares, assim a primeira amostragem foi retirada após 04 (quatro) semanas e as demais, quinzenalmente. Os resultados podem ser observados nos gráficos das figuras 24 e 25.

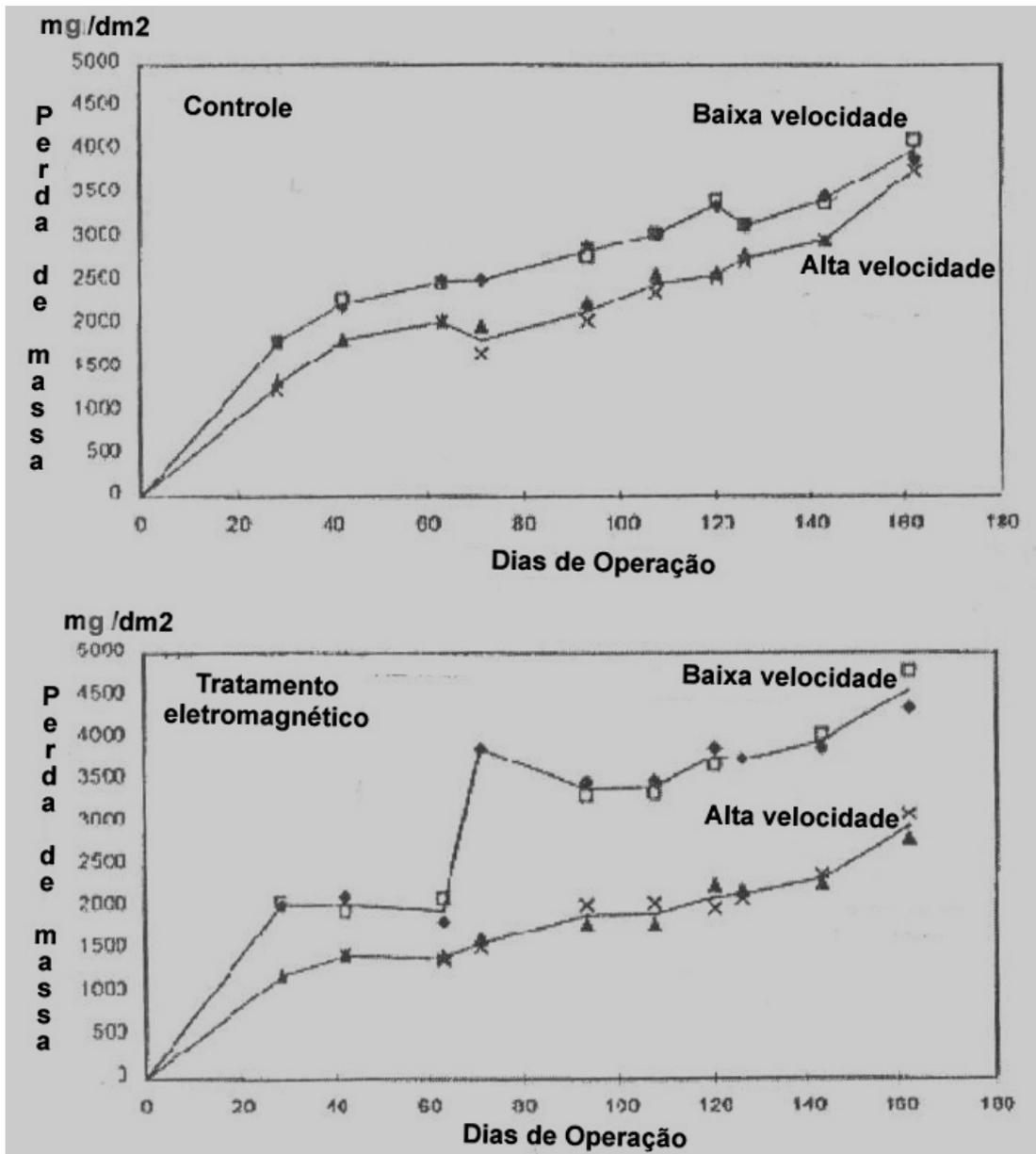
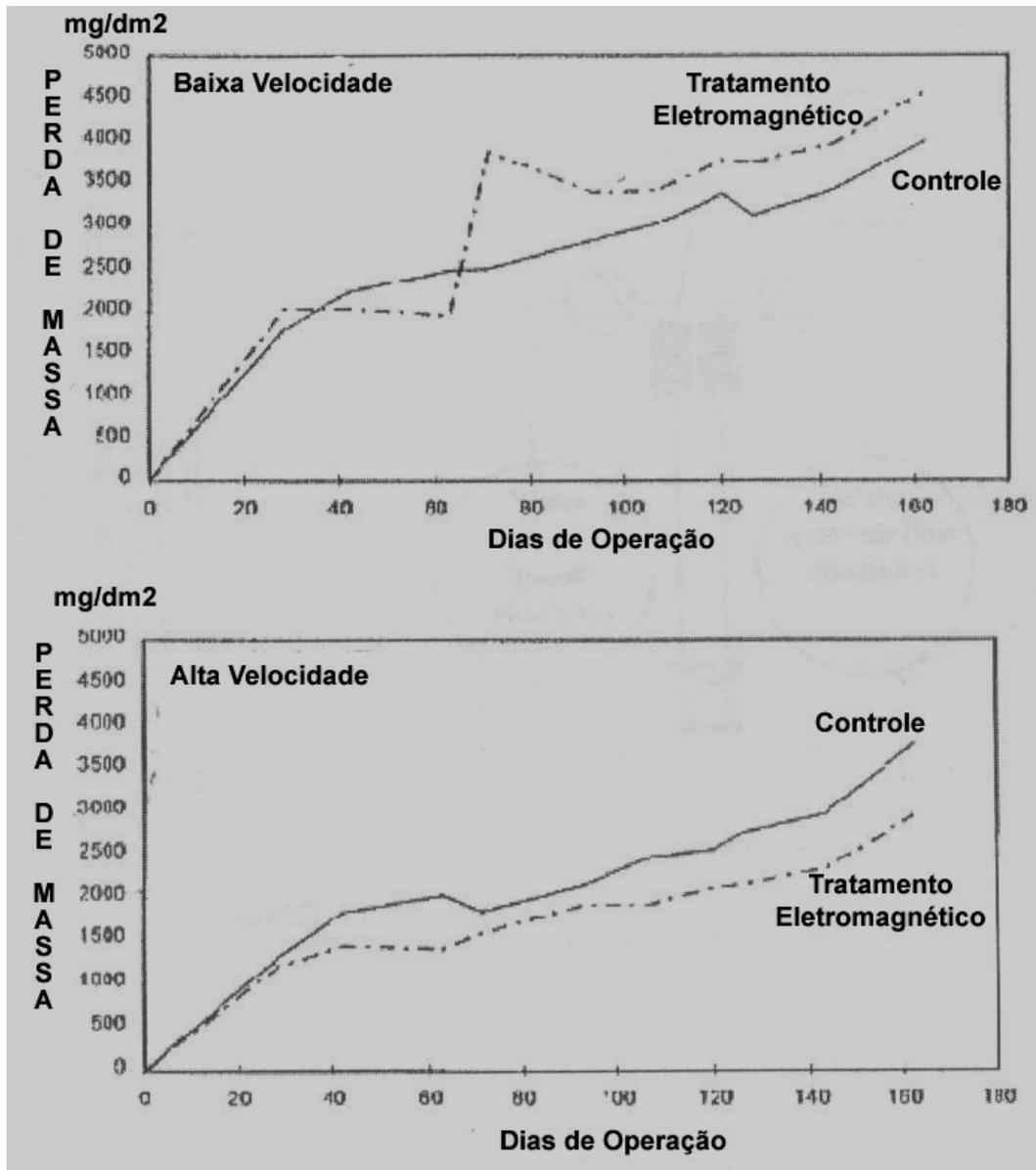


Fig 24 – Perda de massa nos corpos de provas nas seções de alta e baixa velocidade com e sem tratamento físico. [13]



**Fig 25** - Perda de massa nos corpos de provas nas seções de alta e baixa velocidade com e sem tratamento físico. [13]

Analisando de forma visual, ficou claro que os cupons que estavam instalados no circuito de alta velocidade apresentavam uma superfície sem muitos depósitos em relação aos instalados no circuito de baixa velocidade. Não foram detectadas diferenças entre os produtos de corrosão dos corpos-de-prova instalados nos dois circuitos mas observou-se que conforme o tempo de ensaio foi passando, nos corpos-de-prova influenciados pelo campo eletromagnético, o produto de corrosão apresentou características mais uniforme e suave. Os cupons

instalados no circuito de baixa velocidade apresentaram uma grande e densa camada proveniente do produto de corrosão de cor marrom escuro.

A tabela 8 representa a diferença entre as perdas de massa sofridas pelos corpos-de-prova nos dois tipos de circuito: alta e baixa velocidade. Incluindo a situação do uso do tratamento físico e controle convencional.

**Tabela 08** -Comparação entre as perdas de massa das seções.

<b>Seção</b>	<b>Tipo de tratamento</b>	<b>Média de perda de massa em mg/dm<sup>2</sup>/dia (mpy)</b>
<b>Baixa Velocidade</b>	Tratamento Físico 1	4098 (25,61)
	Controle 1	3527 (20,35)
<b>Alta Velocidade</b>	Controle 2	3167 (19,79)
	Tratamento Físico 2	2476 (15,47)

Posteriormente foi realizado o procedimento de secagem dos corpos-de-prova e o produto de corrosão em todos os coupons transformou-se em um pó marrom claro, retirado através de raspagem para revelar os efeitos da corrosão na superfície.

Os últimos coupons retirados do circuito de baixa velocidade não apresentaram muitas diferenças entre suas superfícies (interna e externa), tanto naqueles tratados de forma eletromagnética e aqueles não tratados desta forma.

Nos últimos coupons retirados do circuito de alta velocidade, os depósitos presentes foram menor na superfície do que os corpos de provas que não sofreram o efeito eletromagnético. Depois de limpos, dentre os corpos-de-prova do circuito de baixa velocidade, aquele que apresentou maior índice de corrosão (tratado pelo campo eletromagnético) não era prontamente distingüível daqueles sem tratamento físico. Entretanto, as marcas da corrosão na superfície dos corpos-de-prova tratados pelo campo eram mais evidentes.

Já no circuito de alta velocidade, novamente a diferença de corrosão entre os corpos de provas sob o efeito do campo e aqueles que não sofreram tal efeito também não foi detectada de forma imediata ainda que, geralmente, as marcas da corrosão na superfície do metal que não sofreu efeito do campo eletromagnético foram mais evidentes.

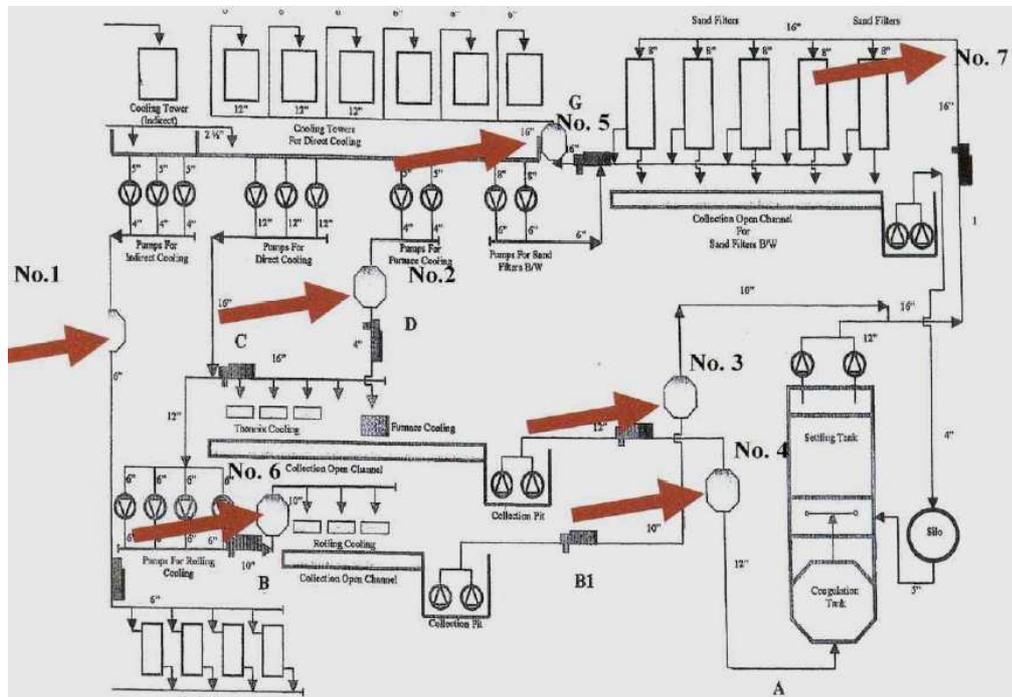
Analisando os gráficos, observa-se que a taxa de corrosão é aumentada após o septuagésimo dia devido ao aumento da temperatura que passou de 5°C para 18°C. A perda de massa no sistema de baixa velocidade ou fluxo laminar, nos dois tipos de condicionamento, foi maior em relação ao sistema de alta velocidade ou fluxo turbulento como mostrado pelas análises visuais.

Baseado no mecanismo acima utilizado e dos resultados dos testes, observa-se que para velocidades baixas, os particulados em suspensão na água sob o efeito do campo aderiram mais prontamente e de forma homogênea aos coupons. Estes apresentando ataques corrosivos resultado de um produto de corrosão com estrutura mais aberta permitindo um acesso maior do oxigênio. Por outro lado, para altas velocidades os particulados em suspensão também aderiram de forma homogênea, sob o efeito do campo eletromagnético, mas isto proporcionou um produto de corrosão com uma estrutura mais densa que permitiu um menor acesso do oxigênio ao metal, acarretando uma baixa taxa de corrosão.

Em suma, para a maneira em que os testes foram realizados e a aplicação do campo eletromagnético, foi afetado o desenvolvimento e a morfologia do produto de corrosão e conseqüentemente a taxa de corrosão nos coupons.

Segundo Farqad F.M. Saeed, Masaomi Tsuda [14], foram realizados testes de funcionamento de aplicação de campos eletromagnéticos na tubulação de água de refrigeração da Siderúrgica da Jordânia no período de um ano (04/01/2006 a 04/01/2007) utilizando-se 07 (sete) cupons de perda de massa de aço carbono (dimensões 2 x 4cm), de mesmo material utilizado nas tubulações do sistema, e 07 (sete) cupons de incrustação em aço inox 304 (dimensões 2 x 4cm). Estes últimos, foram fixados por suportes de plásticos para eliminar o efeito galvânico que poderia ocorrer entre o material do coupon e o material da tubulação.

Os pontos de instalação dos corpos-de-prova podem ser identificados pelo diagrama esquemático representado pela figura 27 a seguir.



**Fig 26** - Diagrama esquemático da Planta Industrial do Sistema de Refrigeração da Siderúrgica da Jordânia com os pontos de aplicação dos coupons de perda de massa e de incrustação. [14]

Análises químicas foram realizadas nas superfícies das tubulações antes da instalação dos coupons de corrosão e de incrustação e foi detectado altas quantidades (60 a 70%) de  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe(OH)}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  combinado com uma certa quantidade de graxa.

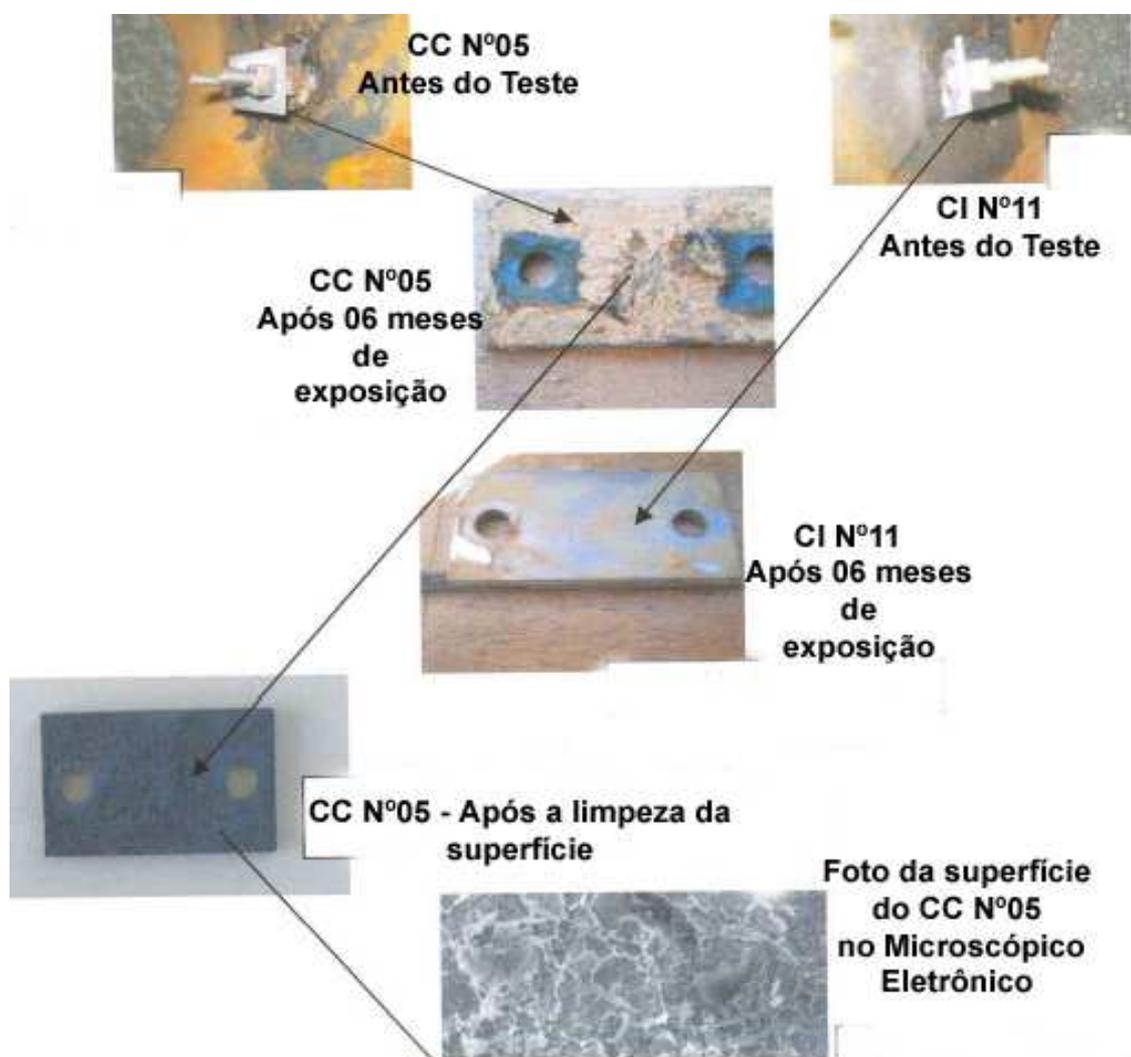
Em um período de 03 (três) meses após o início dos testes (07/04/2006) foi escolhido de forma aleatória um ponto para verificação visual, sem a retirada dos corpos de prova. O ponto nº 03 do sistema foi escolhido e após a desmontagem, verificou-se um produto de corrosão de cor marrom aderido ao coupon de perda de massa igual ao que se encontrava na superfície da tubulação. Isto pode ser mostrado conforme a figura 27 abaixo.



**Fig 27** - Verificação visual na posição nº 03 onde encontram-se o coupon de perda de massa à esquerda e o coupon de incrustação à direita na tubulação após três meses de utilização. [14]

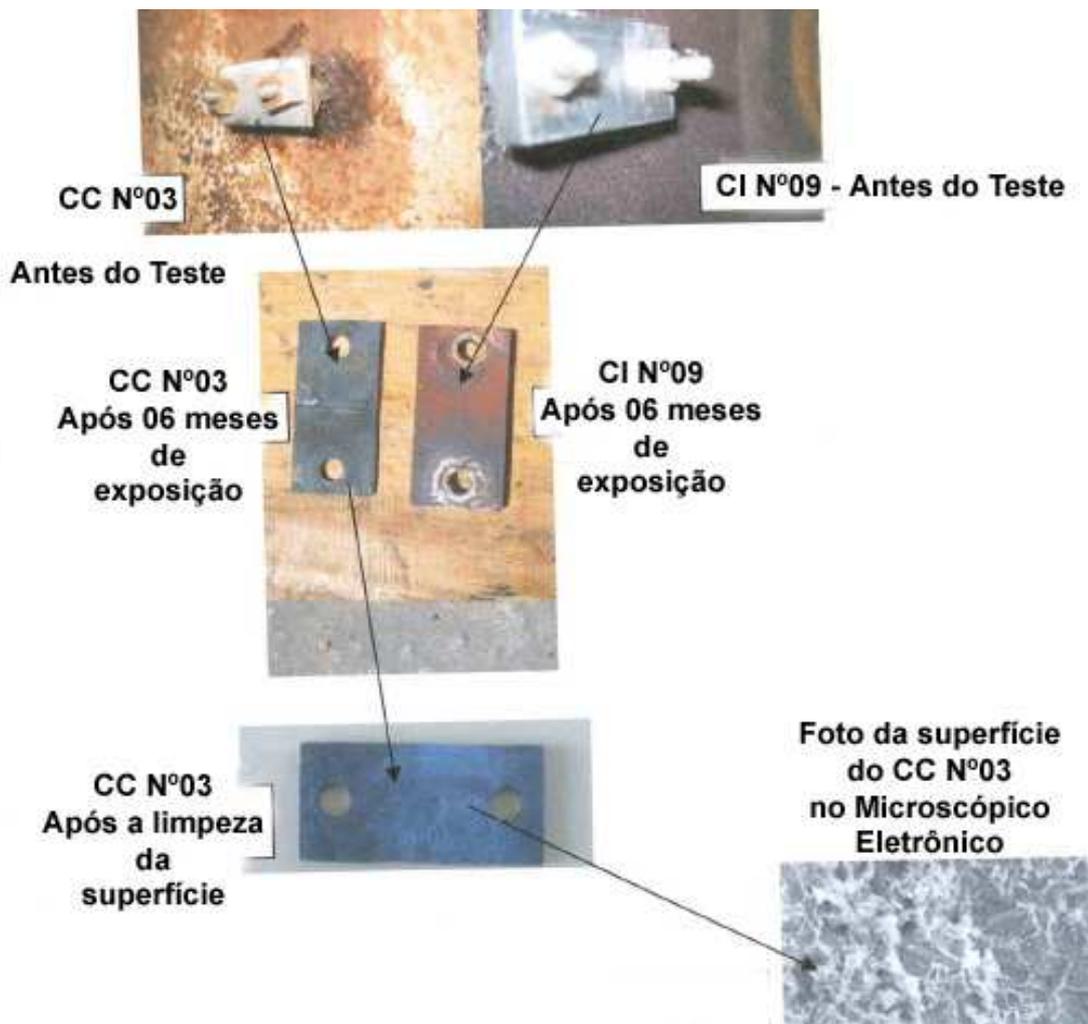
Os dois tipos de coupons foram retirados das posições 01 e 03 após um período de 06 (seis) meses (01/07/2006).

A superfície dos corpos de prova de perda de massa e de incrustação na **posição nº 01** apresentavam um produto de corrosão na cor marrom. Análises químicas feitas na superfície do coupon de incrustação nº 11 mostram o seguinte: uma quantidade de 49 a 55% de óxido de Ferro, uma quantidade de 01 a 07% de  $\text{CaCO}_3$ , material graxo e íons de magnésio, cloreto e sulfato. A taxa de corrosão do corpo-de-prova de perda de massa nº 05 foi de 0,09 mm/y ou 3,54 mpy, conforme figura abaixo



**Fig 28** - POSIÇÃO 01 - Apresentação dos coupons CC N° 05 e CI N° 11 após 06 meses de exposição. [14]

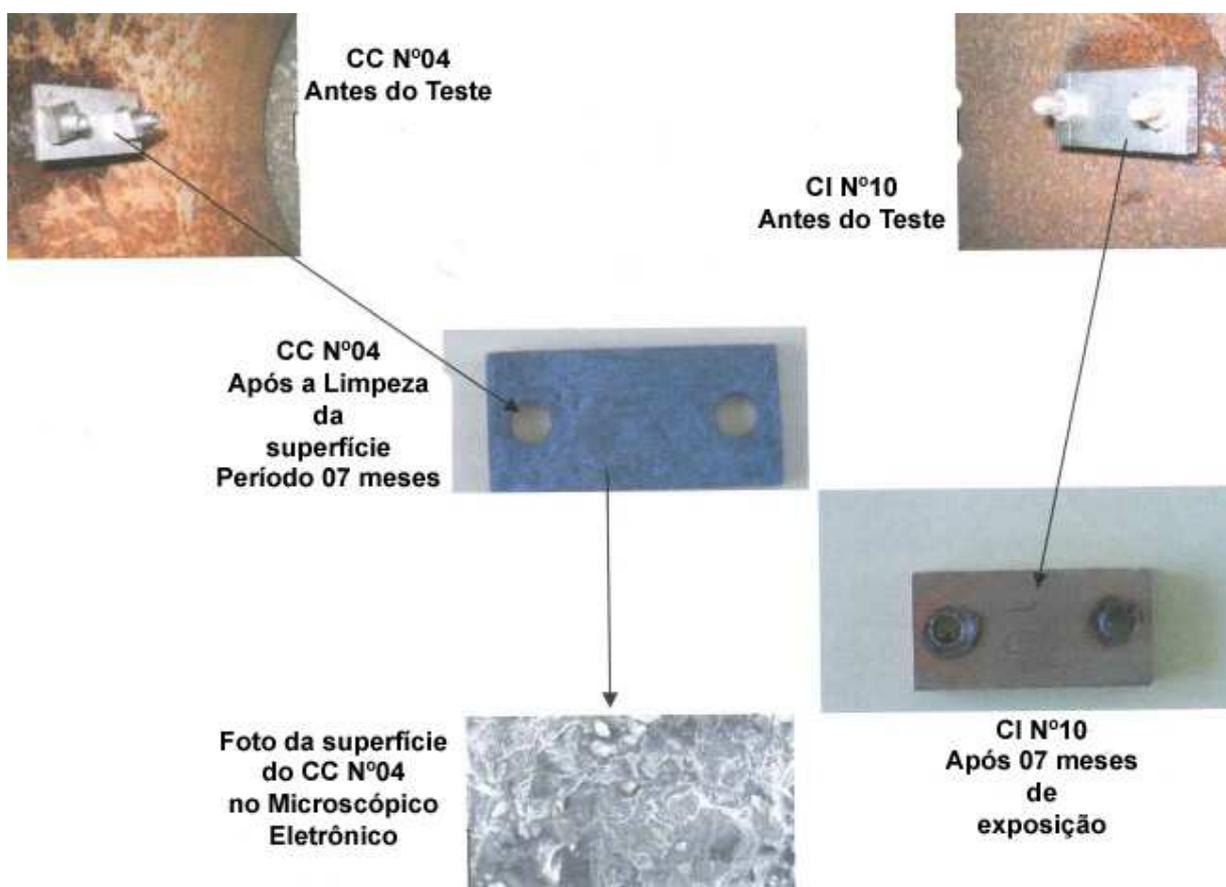
Os coupons retirados da **posição nº 03** apresentavam um produto de corrosão na cor marrom. Análises químicas feitas na superfície do coupon de incrustação nº 09 mostram que 45% de óxido de ferro, 45% de  $\text{CaCO}_3$ , presença de material graxo e íons de magnésio, cloreto e sulfato. A taxa de corrosão no corpo-de-prova nº 03 ficou em 0,4807 mm/y ou 18,925 mpy, como mostrado na figura seguinte.



**Fig 29** - POSIÇÃO 03 - Apresentação dos coupons CC N° 03 e CI N° 09 após 06 meses de exposição. [14]

Os corpos-de-prova da **posição nº 06** foram retirados para verificação após um período de 07 (sete) meses na data de 01/08/2006.

Os coupons desta posição apresentavam um produto de corrosão na cor marrom. Análises químicas feitas na superfície do coupon de incrustação nº 10 mostraram que 41 a 52% de óxido de ferro, 20% de  $\text{CaCO}_3$ , presença de material graxo e íons de magnésio, cloreto e sulfato. A taxa de corrosão no corpo de prova nº 04 ficou em 0,1337 mm/y ou 5,26 mpy, conforme figura 30.



**Fig 30 - POSIÇÃO 06 - Apresentação dos coupons CC N° 04 e CI N° 10 após 07 meses de exposição. [14]**

O fenômeno da corrosão ocorre devido a três fatores existentes na planta industrial: Óxido de Ferro, incrustações e Bactéria Reduzindo Sulfato. A precipitação de óxido de ferro forma células de concentração que causa o efeito corrosivo em conjunto com as bactérias reduzindo sulfato. Esta bactéria é do tipo anaeróbica e reduz o  $\text{SO}_3$  à sulfeto formando abaixo da camada de incrustação o gás  $\text{H}_2\text{S}$ .

Os resultados de taxa de corrosão encontrados nos corpos-de-prova de perda de massa nº 03 e nº 04, localizados na tubulação do sistema direto de resfriamento são maiores do que os coupons de perda de massa nº 05, localizado no sistema indireto de resfriamento devido à alta porcentagem de incrustações em conjunto com a precipitação de óxido de ferro e oxigênio.

Analisando o coupon nº 04 (5,26 mpy em 07 meses) em relação ao coupon nº 03 (18,925 mpy em 06 meses), observa-se que os valores de taxa de corrosão estão melhorando com o tempo devido a ação do sistema eletromagnético. Adicionalmente, os percentuais de óxido de ferro encontrado nas superfícies internas da tubulação diminuíram com o tempo.

Conforme análises químicas realizadas na data de 04/01/2006 os valores encontrados foram de 60 a 70% de óxido de ferro. Outra análise realizada na data de 01/08/2006 mostra um valor de 49% de óxido de ferro, isto significa que a ação do tratamento físico de água está diminuindo tais percentuais e contribuindo para redução de taxas de corrosão ao longo do tempo.

Em relação aos coupons de incrustação observa-se que o corpo-de-prova nº 09 obteve 45% de incrustações em 06 (seis) meses enquanto o corpo de prova nº 10 obteve 20% em 07 (sete) meses, indicando redução do percentual de incrustação.

Segundo H. Denenberg, R. Beeri, C. Lotan [15], estudos estão sendo desenvolvidos para a aplicação da tecnologia usada pelo equipamento gerador de campos eletromagnéticos, em doenças coronarianas. Os pesquisadores acreditam que este tipo de tratamento não intrusivo poderá ajudar a solucionar problemas como a obstrução de válvulas e artérias do coração humano. O dispositivo proposto seria composto por três principais parâmetros: uma unidade externa que seria fixada ao redor do paciente, um gerador de campo elétrico que induziria um campo eletromagnético no corpo e uma chave que possibilitaria uma interrupção intermitente aleatória dos sinais eletromagnéticos.

É esperado pela equipe de pesquisadores para um período de 18 (dezoito) meses o desenvolvimento de um modelo para desobstrução de artérias, projetar e construir um equipamento apropriado para estudos em animais e desenvolver estudos da eficácia terapêutica da tecnologia de geração de campos eletromagnéticos.

Segundo ESA Sistemas Ltda [16], estudos relacionados à performance da aplicação de campo eletromagnético em tubulações de água potável apontam melhora no condicionamento de água utilizada no circuito no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro. De maneira mais exata, os estudos foram realizados no sistema de distribuição de água potável do Hospital, especificamente na tubulação principal que alimenta o centro cirúrgico do posto de enfermagem, a sala de cirurgia do setor de odontologia e na central de compressores.

A aplicação de um equipamento eletromagnético, no sistema de alimentação de água do Hospital, tem por finalidade garantir a potabilidade da água. Em relação à central de compressores, o objetivo principal era analisar o desenvolvimento do sistema de tratamento, verificando o nível de limpeza do trocador de calor.

No Hospital, o sistema de alimentação de água potável foi analisado por testes *in loco* envolvendo os seguintes parâmetros físico-químicos da água: Dureza, Turbidez, Alcalinidade, Cloretos e pH.

Com relação ao trocador de calor da central de compressores, foi realizado um relato fotográfico quando do início do teste e ao final do mesmo. O período de testes ficou compreendido entre 09/02/1999 a 13/05/1999.

Seguem nas três tabelas abaixo as análises físico-químicas da água potável do Hospital durante este período:

**Tabela 09** – Análise da água no ponto nº01 do Centro Cirúrgico

<b>LOCAL:</b> Hospital do Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro.			<b>Equipamento:</b> Hydroflow modelo C60		
<b>PONTO DE COLETA:</b> Centro Cirúrgico, Posto de Enfermagem, tubulação que alimenta a torneira do banheiro entre os leitos nº05 e nº06.					
DATA	DUREZA (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TESTES			
		TURBIDEZ (NTU)	ALCALINIDADE (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	CLORETOS (mg/l Cl)	pH
09/02/99	1500	3,8	720	2100	8,0
25/02/99	1020	3,2	870	1500	8,2
18/03/99	900	3,4	510	500	8,3
14/04/99	270	3,2	210	500	8,1
13/05/99	210	3,4	90	400	8,1
<b>Valores Máximos</b>	800	< 5,0	600	750	7,0 a 8,5

**Tabela 10** – Análise da água no ponto nº02 do Centro Cirúrgico

<b>LOCAL:</b> Hospital do Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro.			<b>Equipamento:</b> Hydroflow modelo C60		
<b>PONTO DE COLETA:</b> Centro Cirúrgico, Posto de Enfermagem, tubulação que alimenta a torneira na bancada de entrada.					
DATA	DUREZA (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TESTES			
		TURBIDEZ (NTU)	ALCALINIDADE (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	CLORETOS (mg/l Cl)	pH
09/02/99	1680	3,5	750	1400	7,8
25/02/99	1530	3,1	840	1300	8,1
18/03/99	720	3,3	360	1200	8,2
14/04/99	210	3,2	150	300	8,0
13/05/99	180	3,4	120	300	8,2
<b>Valores Máximos</b>	800	< 5,0	600	750	7,0 a 8,5

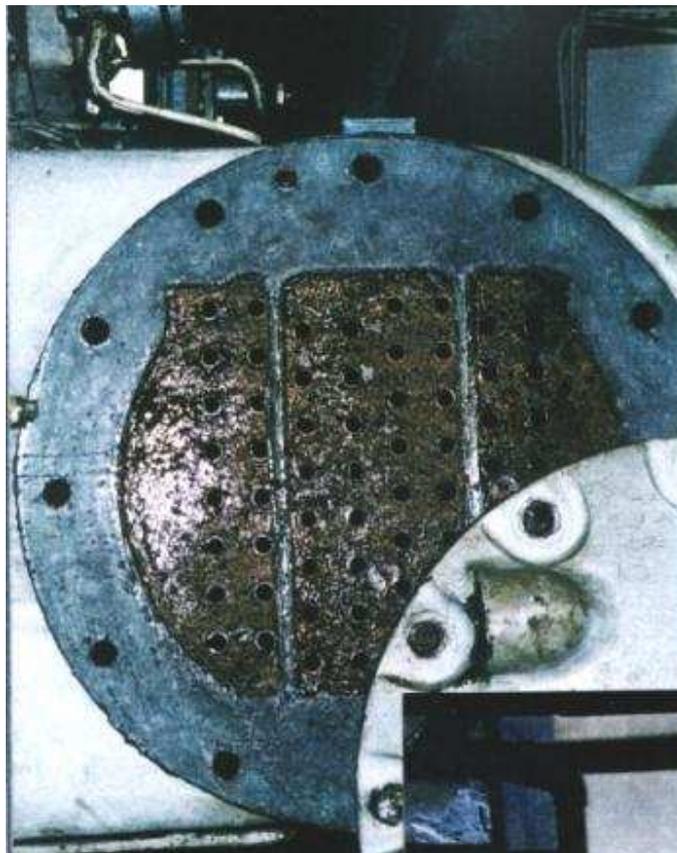
**Tabela 11** – Análise da água na sala de cirurgia.

<b>LOCAL:</b> Hospital do Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro.			<b>Equipamento:</b> Hydroflow modelo C60		
<b>PONTO DE COLETA:</b> Sala de Cirurgia, tubulação que alimenta a torneira do setor de Odontologia					
DATA	DUREZA (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	TESTES			
		TURBIDEZ (NTU)	ALCALINIDADE (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	CLORETOS (mg/l Cl)	pH
09/02/99	1920	3,4	480	1400	7,8
25/02/99	1440	3,1	600	1000	7,6
18/03/99	1020	3,2	330	800	7,9
14/04/99	300	3,2	150	400	8,0
13/05/99	240	3,4	120	200	8,2
<b>Valores Máximos</b>	800	< 5,0	600	750	7,0 a 8,5

Segue conforme as figuras 31 e 32 relato fotográfico do trocador de calor na central de compressores que havia sofrido a limpeza mecânica conforme plano de manutenção no início do teste. Houve a verificação do nível de incrustações dentro do feixe tubular após o final do ensaio em Maio de 1999.



**Fig 31** - Trocador de calor limpo e aberto em 09/02/1999. [16]



**Fig 32** - Trocador de calor aberto ao final do teste em 28/05/1999. [16]

Segundo J.M Loblely [18], na Conferência Internacional de Manutenção (Melbourne 1990), alguns cientistas chegaram a conclusão que, de alguma forma, os efeitos da aplicação de campos eletromagnéticos seria uma maneira vantajosa de melhorar as condições das águas industriais e da operação do circuito. Este processo seria explicado segundo conceitos do eletromagnetismo que, de maneira geral, seria um gerador acoplado à tubulação que forneceria uma fonte eletromagnética por onde o fluxo da água passaria e seria submetida aos efeitos deste campo.

Segundo J.D. Donaldson [19], foi concluído que primeiramente os depósitos e as incrustações dependem de dois fatores: solubilidade e nucleação. Para que se tenha um bom nível de depósitos e incrustações estes dois fatores devem ser controlados. Donaldson [19] concluiu que os efeitos do campo magnético no fluido poderiam afetar principalmente: tamanho da partícula, morfologia do cristal, cristalinidade, fase cristalina, a taxa de precipitação e a solubilidade. A chave para essas mudanças acontecerem, ocorreu na interface entre os depósitos e a solução. Algumas implicações neste processo podem ser listadas como a diferença de carga entre os depósitos que estão crescendo e os efeitos entre o anodo e catodo.

### III – MATERIAIS E MÉTODOS

#### III.1- Introdução

O objetivo deste trabalho é a verificação e avaliação de um tratamento físico de água de refrigeração a fim de mostrar o desempenho da proteção contra corrosão nas tubulações industriais. O sistema de refrigeração estudado está na planta industrial pertencente à Empresa Brasileira de Infra-estrutura Aeroportuária – Infraero, Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, Galeão, Prédio Anexo.

A metodologia de avaliação se dividiu em três etapas. A primeira consistiu em avaliar os sinais emitidos pela fonte eletromagnética ao longo da tubulação, a segunda etapa caracterizou-se pela verificação visual dos corpos-de-prova, análise de perda de massa e análise físico-química da água nos seus respectivos períodos e, finalmente, na terceira etapa foi realizada a medição de potenciais de eletrodo. O tempo de amostragem abrange os meses de Agosto a Dezembro de 2006 e o sistema de água de condensação utiliza o tratamento físico onde há uma fonte geradora de campos eletromagnéticos instalado na tubulação de descarga da bomba.

O enfoque maior deste trabalho está voltado para os sistemas de climatização que utilizam condensação a água. Desta forma, o sistema de torre de resfriamento do tipo semi-aberto encontrado na INFRAERO está contemplado dentro das atividades que envolvem esta metodologia de trabalho.

#### III.2 – Característica do Sistema de Refrigeração de Serviço

O sistema instalado nas dependências do prédio anexo do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro pode ser classificado como segue: sistema de climatização de expansão direta com condensação da água.

Os três condicionadores de ar são do tipo self-contained, com capacidade de 30 TR´s (toneladas de refrigeração) cada.

**Tabela 12** – Características dos Condicionadores Self-contained

Unidades	Capacidade (TR)	Tensão (V)	Condensador	Evaporador
Self nº01	30	380	Casco e Tubo	Serpentina Tijolada
Self nº02	30	380	Casco e Tubo	Serpentina Tijolada
Self nº03	30	380	Casco e Tubo	Serpentina Tijolada

O sistema de bombeamento de água de condensação é realizado desde as torres de resfriamento até os condensadores dos equipamentos de ar condicionado. As torres de resfriamento são do tipo corrente cruzada respeitando os seguintes parâmetros de operação:

**Tabela 13 – Características das Torres de Resfriamento**

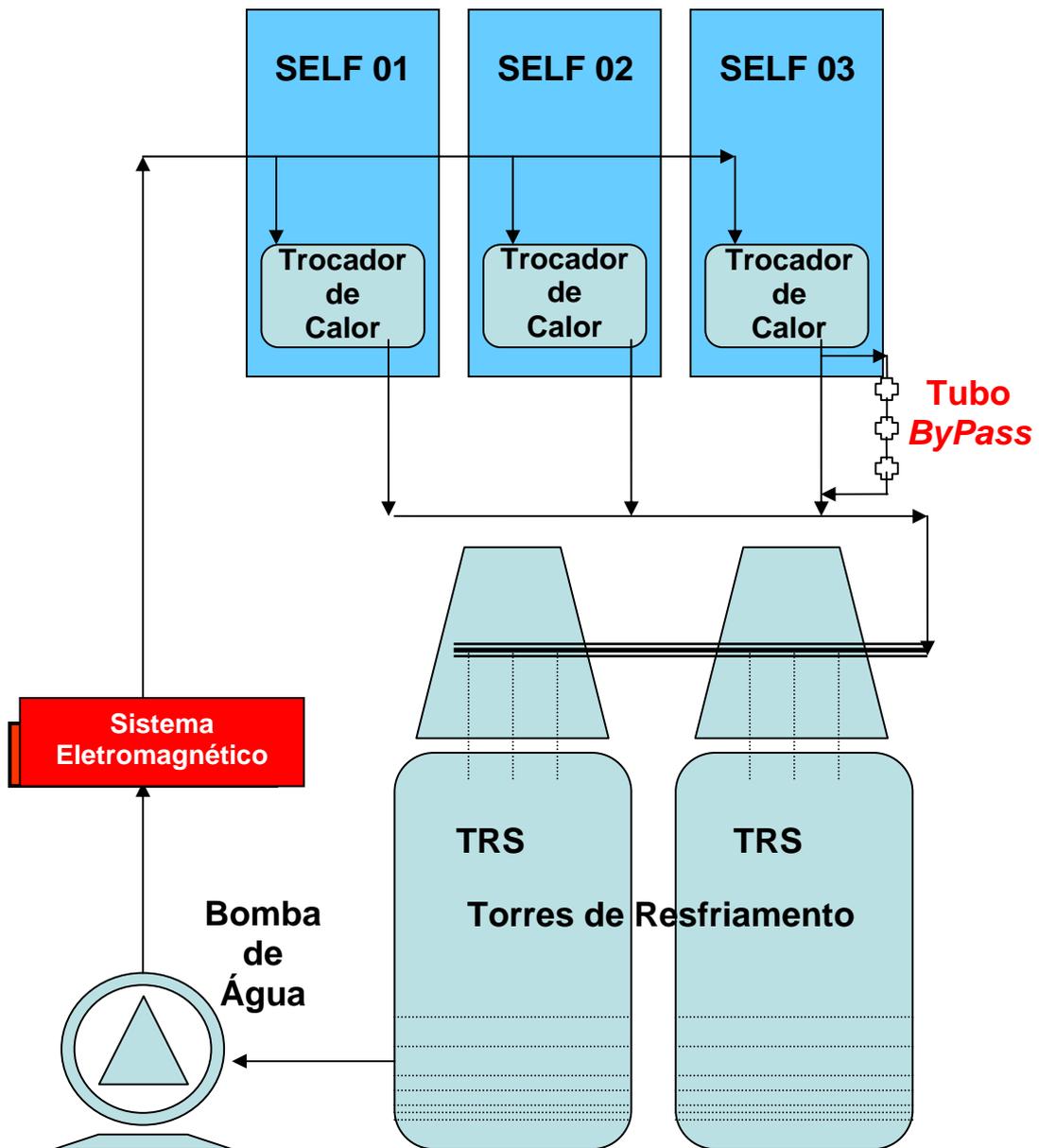
Unidades	Tipo	Temperatura de Saída (°C)	Temperatura de Entrada (°C)	Diferença de Temperatura Ts – Te(°C)
TRS nº01 Mod. 25SG	Corrente Cruzada	28 a 30	33 a 35	05
TRS nº02 Mod. 25SG	Corrente Cruzada	28 a 30	33 a 35	05

O sistema de água de condensação possui os seguintes parâmetros operacionais e dimensionais:

**Tabela 14 – Característica do sistema de condensação**

Grandezas	Valores	Unidades
Vazão de Recirculação	62	m <sup>3</sup> /h
Evaporação	0,60	m <sup>3</sup> /h
Descarga	0,38	m <sup>3</sup> /h
Arraste e Respingos	0,13	m <sup>3</sup> /h
Ciclo	04	-
Comprimento	280	Metros
Diâmetro dos Tubos	2 ½" a 6"	Polegadas

O sistema opera de segunda a sexta-feira de 07:30h até às 17:30h sendo que o sistema de bombeamento de água da bacia da torre se mantém ligado durante 24h. Abaixo segue a configuração de todo o sistema de climatização do prédio.



**Fig 33** – Esquema do sistema de climatização do AIRJ – Prédio Anexo em detalhe circuito *by pass*

Durante os testes, foi utilizado um equipamento de tratamento físico (geração de campos eletromagnéticos) cuja marca comercial é HydroFlow e as especificações seguem abaixo:

**Tabela 15-** Especificação técnica do aparelho comercial instalado na tubulação.

<b>HydroFlow modelo C-160</b>	<b>Valores</b>
Peso	6,5 Kg
Máximo Diâmetro Externo de Tubulação	8,0"
Tensão Primária	90 a 260 VAC
Tensão Secundária	30 VDC
Máxima Intensidade de Corrente	36 mA
Potência	8,28 W
Classe de Isolamento	IP 65 segundo norma BS5420

O aparelho foi instalado na saída da bomba, na tubulação de diâmetro 6", conforme Figura 34, e os testes com coupons de perda de massa foram realizados em um *by pass* construído próximo a saída do condensador nº03 conforme mostra em detalhe a Figura 35. Este trocador de calor foi escolhido por ser o mais distante da fonte geradora de campo eletromagnético.



**Fig 34** – Instalação do equipamento comercial Hydroflow na tubulação de água logo após a bomba.



**Fig 35** – Montagem do sistema *by pass* em tubos de aço carbono diâmetro 1” na saída do condensador nº03 em paralelo com a tubulação principal.

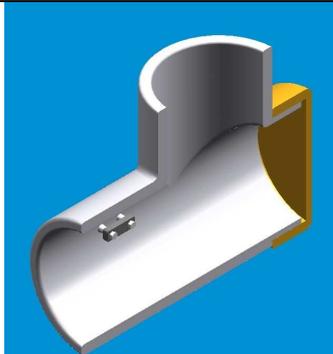
Para realização dos testes de verificação de perda de massa, os corpos-de-prova foram confeccionados em aço carbono, nas dimensões de 20 x 20 x 1,5mm, jateado em areia, e fixados por meio de parafusos com porcas aos tampões de 1” de diâmetro.

Desta maneira, a quantidade de coupons totalizam 08 (oito) peças sendo que 04 (quatro) foram montados em tampões de aço carbono e 04 (quatro) peças foram montadas em tampões de PVC, estes últimos com a finalidade de que haja o isolamento elétrico com a tubulação.

Dois eletrodos de referências de calomelano saturado foram utilizados para se obter leituras de potenciais de eletrodo dos corpos-de-prova instalados no *by pass*, conforme figura 35.

Toda a tubulação utilizada no *by pass* possui diâmetro de 1”, montada em paralelo com a tubulação principal e confeccionada em aço carbono sem galvanização.

As Figuras 36 e 37 mostram o esquema de instalação de corpos-de-prova, recomendados pelo fabricante, para análise de perda de massa. No presente trabalho não foi possível seguir a montagem recomendada, devido à limitações de diâmetro do tubo do sistema “*by pass*”.

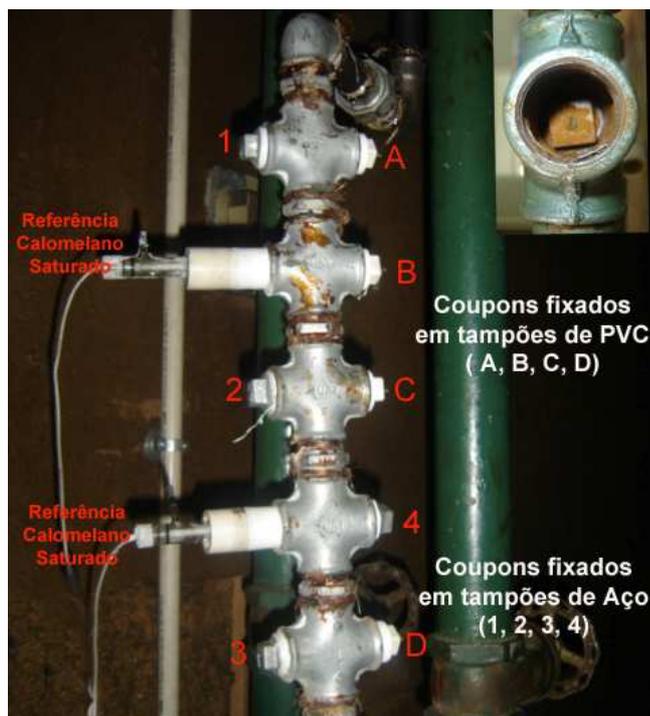


**Fig 36** – Esquema de montagem dos corpos-de-prova próximos à parede da tubulação, proposto pelo fabricante



**Fig 37** – Esquema de montagem dos corpos-de-prova apontando o detalhe da fixação no tubo, proposto pelo fabricante

Na Figura 38, é mostrado a disposição de instalação dos coupons, as referências de calomelano saturado e no detalhe o posicionamento relativo à superfície da parede do tubo, utilizado no presente trabalho.



**Fig 38** – Disposição dos coupons de perda de massa, os fixados nas posições nº 1, 2, 3 e 4 estão ligados eletricamente à tubulação enquanto os coupons A, B, C e D estão isolados eletricamente da tubulação.

## IV – RESULTADOS EXPERIMENTAIS e DISCUSSÃO

### Determinações na Unidade de climatização do prédio anexo do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro – Galeão , Antônio Carlos Jobim.

Neste capítulo serão abordados os dados correspondentes aos resultados obtidos no sistema de climatização do prédio anexo no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro. Seguindo os parâmetros da metodologia adotada, segue abaixo as etapas do trabalho:

- Verificação dos sinais emitidos pelo aparelho ao longo da tubulação;
- Verificação visual, perda de massa e análise físico-química da água;
- Medição dos potenciais de eletrodo.

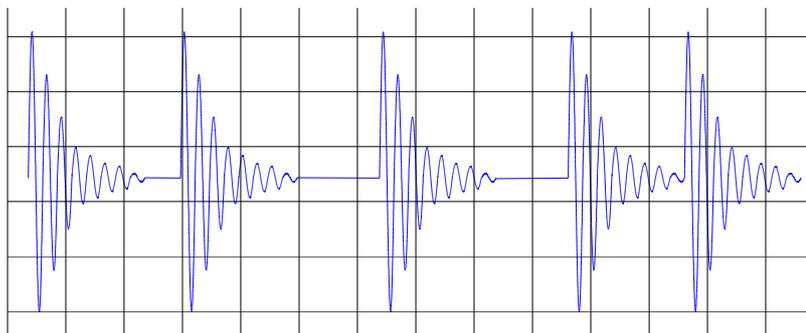
Desta forma, apresentamos alguns dados coletados experimentalmente na planta industrial do sistema de refrigeração.

#### IV.1 – Verificação dos Sinais Emitidos pelo Equipamento Eletromagnético em Campo.

Utilizando o equipamento de tratamento físico com aplicação de campos eletromagnéticos, foram obtidos alguns resultados que serão analisados logo a seguir.

O equipamento é capaz de produzir um sinal de onda padrão na faixa de 100 a 160KHz que pode ser verificado com auxílio de um osciloscópio.

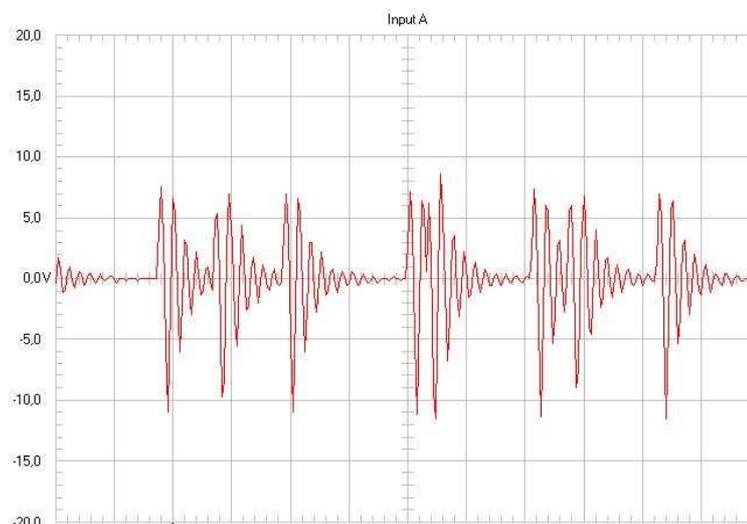
Desta forma o equipamento emite um sinal conforme demonstrado abaixo, segundo o fabricante.



**Fig 39** – Sinal de Onda de projeto do Equipamento Eletromagnético. [11]

Através de medidas de campo realizada junto ao equipamento (Figura 34), foi constatado que este tipo de sinal realmente estava presente no sistema industrial da Infraero, Torre do Prédio Anexo conforme mostrado abaixo na figura 40.

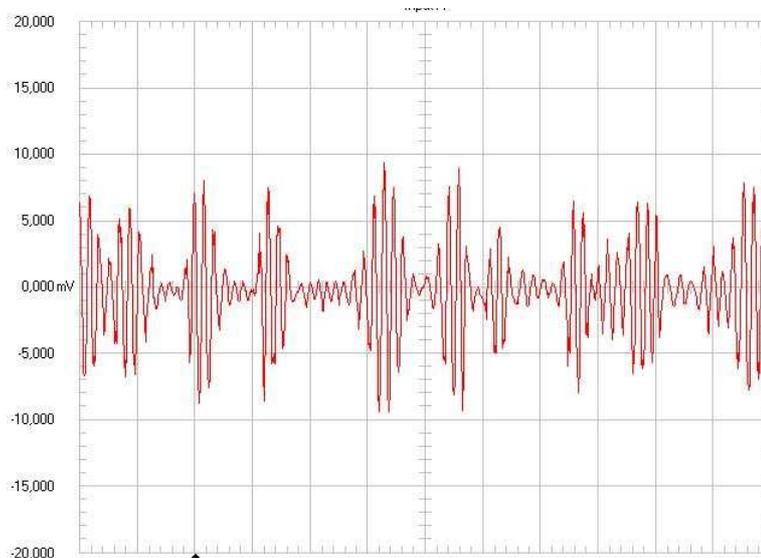
Os sinais foram medidos tomando-se como ferramenta um osciloscópio Fluke modelo ScopeMeter série 190. Posicionando as pontas do mesmo ao redor da braçadeira de ferrite da fonte geradora de campo eletromagnético faz-se a leitura conforme a figura abaixo.



**Fig 40** – Sinal de Onda medido diretamente no equipamento eletromagnético no sistema de resfriamento de água na Infraero.

Além da medição no equipamento, foram realizadas leituras em outros pontos da tubulação para verificação da nuância do sinal ao longo do sistema. Esta medição é feita de maneira análoga àquela feita diretamente no aparelho, sendo que utiliza-se uma braçadeira de ferrite fixada ao redor do tubo, no ponto escolhido do circuito de água.

Através dos testes realizados na saída do condensador nº03 situado a uma distância de aproximadamente 140m do ponto de instalação do aparelho eletromagnético, foi verificado que houve uma pequena queda na tensão de pico e uma ligeira variação na frequência em relação ao sinal medido diretamente no aparelho (Figura 41).



**Fig 41** – Sinal de Onda medido na saída do condensador nº03 próximo à tubulação *by pass*.

De modo geral, as configurações de onda medidas em campo permaneceram praticamente iguais ao sinal original (Figura 39), indicando que o efeito do campo magnético gerado foi mantido ao longo de toda a tubulação, garantindo assim a ação protetora no sistema industrial.

#### **IV.2 – Ensaio de Corrosão e Análises de Água**

Os ensaios de corrosão e análise de água foram conduzidos através de 04 experimentos durante o período de Agosto a Dezembro de 2006, conforme os seguintes procedimentos:

Inicialmente os corpos-de-prova foram jateados, pesados e montados em seus respectivos suportes na tubulação de *by pass*. No final do experimento os corpos-de-prova foram retirados, fotografados, limpos em água corrente, decapados em solução de Clark e novamente pesados. A amostragem de água para análise físico-química foi feita no final de cada ensaio.

## Experimento 01 – Agosto / Setembro 2006

A tabela abaixo mostra os resultados de perda de massa de cada corpo-de-prova e o valor médio com seu desvio padrão. Os comentários serão apresentados em uma tabela resumo após a apresentação dos 4 experimentos.

**Tabela 16 - 1º Ensaio de Campo (17/08/06 a 26/09/06)**

<b><i>Perda de massa de amostras em contato elétrico</i></b>			
<b>cp</b>	<b>mg/dm<sup>2</sup>/dia</b>	<b>mm/ano</b>	<b>mpy</b>
1	11,57	0,053	2,11
2	9,55	0,044	1,74
3	6,58	0,030	1,20
4	9,17	0,042	1,68
<b>Média</b>	<b>9,21 ± 2,04</b>	<b>0,042 ± 0,009</b>	<b>1,68 ± 0,37</b>
<b><i>Perda de massa de amostras isoladas</i></b>			
<b>cp</b>	<b>mg/dm<sup>2</sup>/dia</b>	<b>mm/ano</b>	<b>mpy</b>
5	32,76	0,152	5,99
6	28,93	0,134	5,29
7	30,81	0,143	5,63
8	31,20	0,144	5,70
<b>Média</b>	<b>30,92 ± 1,57</b>	<b>0,143 ± 0,007</b>	<b>5,65 ± 0,28</b>

Abaixo seguem os dados de registro fotográfico do aspecto dos corpos-de-prova instalados na tubulação de *by pass* mostrando o resultado do experimento 01.



**Fig 42** – Exemplo de corpo-de-prova conectado eletricamente à tubulação em bujão de aço carbono



**Fig 43** – Exemplo de corpo-de-prova não conectado eletricamente à tubulação em bujão de PVC

É evidente que, a observação dos corpos-de-prova indica uma diferença de ataque corrosivo entre os coupons isolados eletricamente e os não isolados eletricamente à tubulação, isto é, maior produto de corrosão nos corpos-de-prova isolados.

Durante o decorrer do ensaio, foi retirada uma amostra de água para análise de condições físico-química apresentando as características como seguem.

**Tabela 17** – Análise de água da torre de resfriamento – Experimento 01.

Data da coleta: 16/08/2006		Hora da coleta: 11h		Coletado por: Consórcio CDN	
Sistema: Água de Refrigeração & Água de Refrigeração Sistema Semi-Fechado					
ANÁLISES	UNID.	Torre Prédio Anexo		Padrão	
pH	---	6,5		6,5 a 8,0	
Alcalinidade Total	mg/L	70,0		-	
Cloretos	mg/L	72,0		até 100 mg/L	
Dureza Total	mg/L	74,0		até 200 mg/L	
Ferro Total	ppm	0,40		0,3 a 1 ppm	
Sólidos Totais	mg/L	240,0		1000 mg/L	
Sólidos Totais Fluidos	mg/L	180,0		-	
Sólidos Totais Voláteis	mg/L	60,0		-	

## Experimento 02 – Setembro / Outubro 2006

A tabela abaixo mostra os resultados de perda de massa referente ao experimento 02.

**Tabela 18 - 2º Ensaio de Campo (26/09/06 a 24/10/06)**  
***Perda de massa de amostras em contato elétrico***

<b>cp</b>	<b>mg/dm<sup>2</sup>/dia</b>	<b>mm/ano</b>	<b>mpy</b>
1	9,13	0,042	1,66
2	13,70	0,063	2,51
3	10,50	0,048	1,91
4	18,40	0,085	3,36
<b>Média</b>	<b>12,93 ± 4,11</b>	<b>0,060 ± 0,019</b>	<b>2,36 ± 0,75</b>

***Perda de massa de amostras isoladas***

<b>cp</b>	<b>mg/dm<sup>2</sup>/dia</b>	<b>mm/ano</b>	<b>mpy</b>
5	18,31	0,085	3,34
6	24,38	0,113	4,45
7	23,78	0,110	4,33
8	16,71	0,077	3,05
<b>Média</b>	<b>20,79 ± 3,85</b>	<b>0,096 ± 0,017</b>	<b>3,79 ± 0,70</b>

O conjunto de coupons fixados aos bujões de aço carbono apresentaram, de forma geral, um melhor nível de proteção comparado aos coupons fixados aos bujões de PVC, conforme tabela acima. Segue o registro fotográfico após experimento 02.



**Fig 44** – Corpo-de-prova em bujões em aço (conectados eletricamente ao tubo)



**Fig 45** – Corpo-de-prova em bujões PVC (não conectados eletricamente ao tubo)

Durante o decorrer do ensaio, foi retirada uma amostra de água para análise de condições físico-química apresentando as características como seguem.

**Tabela 19** – Análise de água da torre de resfriamento – Experimento 02

<b>Data da coleta: 18/09/2006</b>		<b>Hora da coleta: 15h</b>	<b>Coletado por: Consórcio CDN</b>
<b>Sistema: Água de Refrigeração &amp; Água de Refrigeração Sistema Semi-Fechado</b>			
<b>ANÁLISES</b>	<b>UNID.</b>	<b>Torre Prédio Anexo</b>	<b>Padrão</b>
pH	---	7,0	6,5 a 8,0
Alcalinidade Total	mg/L	45,0	-
Cloretos	mg/L	71,0	até 150 mg/L
Dureza Total	mg/L	92,0	até 200 mg/L
Ferro Total	ppm	0,20	0,3 a 1 ppm
Sólidos Totais	mg/L	332,0	1000 mg/L
Sólidos Totais Fluidos	mg/L	172,0	-
Sólidos Totais Voláteis	mg/L	160,0	-

### Experimento 03 – Outubro / Novembro 2006

A tabela seguinte reproduz os resultados de perda de massa referente ao experimento 03.

**Tabela 20 - 3º Ensaio de Campo (24/10/06 a 23/11/06)**

<b><i>Perda de massa de amostras em contato elétrico</i></b>			
<b>cp</b>	<b>mg/dm<sup>2</sup>/dia</b>	<b>mm/ano</b>	<b>mpy</b>
1	6,56	0,030	1,20
2	20,28	0,094	3,71
3	24,12	0,112	4,41
4	9,07	0,042	1,66
<b>Média</b>	<b>15,00 ± 8,51</b>	<b>0,070 ± 0,039</b>	<b>2,74± 1,55</b>
<b><i>Perda de massa de amostras isoladas</i></b>			
<b>cp</b>	<b>mg/dm<sup>2</sup>/dia</b>	<b>mm/ano</b>	<b>mpy</b>
5	42,24	0,197	7,73
6	54,26	0,253	9,93
7	37,93	0,177	6,94
8	50,55	0,236	9,25
<b>Média</b>	<b>46,24 ± 7,48</b>	<b>0,216 ± 0,034</b>	<b>8,46± 1,36</b>

De modo semelhante, foi realizado registro fotográfico onde verificou-se que o aspecto dos corpos-de-prova foi aproximadamente próximo ao experimento anterior conforme segue na figura 46.



**Fig 46** – Experimento 03 - Quatro corpos-de-prova posicionados acima da figura estão em bujões de aço e os quatro posicionados abaixo em bujões de PVC

A análise da água do sistema referente ao experimento 03 está apresentada conforme a tabela abaixo.

**Tabela 21** – Análise de água da torre de resfriamento – Experimento 03

<b>ANÁLISES</b>		<b>UNID.</b>	<b>Torre Prédio Anexo</b>	<b>Padrão</b>
pH		---	7,0	6,5 a 8,0
Alcalinidade Total		mg/L	45	-
Cloretos		mg/L	77	até 150 mg/L
Dureza Total		mg/L	91	até 200 mg/L
Ferro Total		ppm	0,20	0,3 a 1 ppm
Sólidos Totais		mg/L	292,0	1000 mg/L
Sólidos Totais Fluidos		mg/L	106,0	-
Sólidos Totais Voláteis		mg/L	186,0	-

#### Experimento 04 – Novembro / Dezembro 2006

A tabela abaixo indica os resultados de perda de massa referente ao experimento 04.

**Tabela 22 - 4º Ensaio de Campo (23/11/06 a 13/12/06)**  
***Perda de massa de amostras em contato elétrico***

<b>cp</b>	<b>mg/dm<sup>2</sup>/dia</b>	<b>mm/ano</b>	<b>mpy</b>
1	3,77	0,017	0,66
2	2,55	0,011	0,43
3	3,77	0,017	0,66
4	10,16	0,047	1,84
<b>Média</b>	<b>5,06 ± 3,44</b>	<b>0,023 ± 0,016</b>	<b>0,89± 0.63</b>

***Perda de massa de amostras isoladas***

<b>cp</b>	<b>mg/dm<sup>2</sup>/dia</b>	<b>mm/ano</b>	<b>mpy</b>
5	22,50	0,105	4,11
6	20,39	0,095	3,71
7	11,38	0,093	2,07
8	12,02	0,056	2,19
<b>Média</b>	<b>16,57 ± 5,69</b>	<b>0,077 ± 0,026</b>	<b>3,02±1,04</b>

Durante a observação visual verificou-se que os coupons não isolados eletricamente da tubulação apresentam uma quantidade menor de produto de corrosão em relação aqueles isolados eletricamente do circuito, conforme a figura abaixo.



**Fig 47** – Experimento 04 - Quatro corpos-de-prova posicionados acima da figura estão fixados em bujões de aço e os quatro posicionados abaixo em bujões de PVC

As análises da água do sistema referente ao experimento 04 foram realizadas numa fase intermediária e outra no final do ensaio conforme as tabelas 23 e 24 respectivamente.

**Tabela 23** – Análise de água da torre de resfriamento (a) – Experimento 04

<b>Data da coleta: 24/11/2006</b>		<b>Hora da coleta: 16h</b>		<b>Coletado por: Consórcio CDN</b>	
<b>Sistema: Água de Refrigeração &amp; Água de Refrigeração Sistema Semi-Fechado</b>					
<b>ANÁLISES</b>		<b>UNID.</b>	<b>Torre Prédio Anexo</b>	<b>Padrão</b>	
pH		---	7,1	6,5 a 8,0	
Alcalinidade Total		mg/L	60	-	
Cloretos		mg/L	76	até 150 mg/L	
Dureza Total		mg/L	92	até 200 mg/L	
Ferro Total		ppm	0,25	0,3 a 1 ppm	
Sólidos Totais		mg/L	294,0	1000 mg/L	
Sólidos Totais Fluidos		mg/L	124,0	-	
Sólidos Totais Voláteis		mg/L	170,0	-	

**Tabela 24** – Análise de água da torre de resfriamento (b) – Experimento 04

<b>Data da coleta: 20/12/2006</b>		<b>Hora da coleta: 10h</b>	<b>Coletado por: Consórcio CDN</b>
<b>Sistema: Água de Refrigeração &amp; Água de Refrigeração Sistema Semi-Fechado</b>			
<b>ANÁLISES</b>	<b>UNID.</b>	<b>Torre Prédio Anexo</b>	<b>Padrão</b>
pH	---	7,0	6,5 a 8,0
Alcalinidade Total	mg/L	50	-
Cloretos	mg/L	84	até 150 mg/L
Dureza Total	mg/L	92	até 200 mg/L
Ferro Total	ppm	0,20	0,3 a 1 ppm
ST	mg/L	322,0	1000 mg/L
STF	mg/L	172,0	-
STV	mg/L	150,0	-

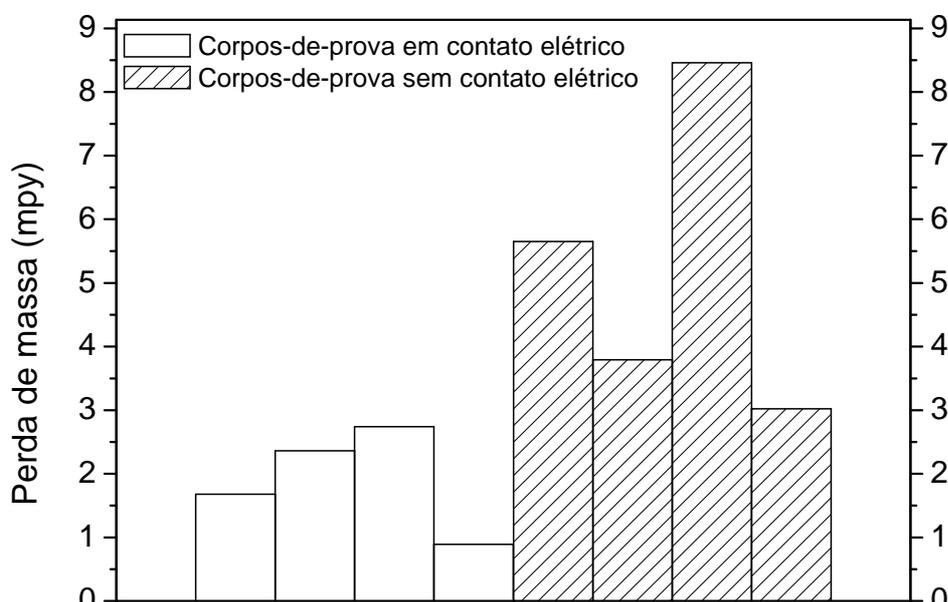
As tabelas 25 e 26 abaixo e a figura 48 resumem os resultados de perda de massa dos experimentos de 01 a 04.

**Tabela 25** – Resumo dos resultados de perda de massa dos corpos-de-prova com contato elétrico (bujões em aço)

<i>Perda de massa de amostras em contato elétrico com a estrutura</i>			
<b>Média dos Ensaios</b>	<b>mg/dm<sup>2</sup>/dia</b>	<b>mm/ano</b>	<b>mpy</b>
Ago / Set	<b>9,21 ± 2,04</b>	<b>0,042 ± 0,009</b>	<b>1,68 ± 0,37</b>
Set / Out	<b>12,93 ± 4,11</b>	<b>0,060 ± 0,019</b>	<b>2,36 ± 0,75</b>
Out / Nov	<b>15,00 ± 8,51</b>	<b>0,070 ± 0,039</b>	<b>2,74 ± 1,55</b>
Nov / Dez	<b>5,06 ± 3,44</b>	<b>0,023 ± 0,016</b>	<b>0,89 ± 0,63</b>

**Tabela 26** – Resumo dos resultados de perda de massa dos corpos-de-prova sem contato elétrico (bujões em PVC)

<i>Perda de massa de amostras isoladas</i>			
<b>Média dos Ensaios</b>	<b>mg/dm<sup>2</sup>/dia</b>	<b>mm/ano</b>	<b>mpy</b>
Ago / Set	<b>30,92 ± 1,57</b>	<b>0,143 ± 0,007</b>	<b>5,65 ± 0,28</b>
Set / Out	<b>20,79 ± 3,85</b>	<b>0,096 ± 0,017</b>	<b>3,79 ± 0,70</b>
Out / Nov	<b>46,24 ± 7,48</b>	<b>0,216 ± 0,034</b>	<b>8,46 ± 1,36</b>
Nov / Dez	<b>16,57 ± 5,69</b>	<b>0,077 ± 0,026</b>	<b>3,02 ± 1,04</b>



**Fig 48** - Gráfico de perda de massa referente às tabelas 25 e 26.

Os resultados mostrados acima indicam que os coupons eletricamente ligados à estrutura atingiram valores de perda de massa entre 0,89 e 2,74mpy, enquanto que os coupons isolados eletricamente da tubulação atingiram perda de massa entre 3,02 a 8,46mpy. Isto posto, a taxa de corrosão dos corpos-de-prova ligados à estrutura foi aproximadamente 3 vezes menor em relação aos corpos-de-prova que não receberam os efeitos emitidos pelo aparelho.

Os resultados acima permitem ainda classificar o controle da corrosão como sendo, *Excelente e Bom* [17] enquanto os corpos-de-prova isolados da tubulação apresentaram níveis de taxa de corrosão entre *Bom e Fraco* [17] conforme tabela abaixo.

**Tabela 27** – Taxa de corrosão do Aço baixo teor de Carbono [17]

TAXA (mpy)	PREVISÃO DE VIDA	CONTROLE DA CORROSÃO
0 – 2	Acima de 70 anos	Excelente
2 – 5	28 a 70 anos	Bom
5 – 8	17 a 28 anos	Fraco
8 – 10	14 a 17 anos	Pobre
Acima de 10	14 anos	Intolerável

Uma observação importante verificada após os testes consolidados foi que a montagem da tubulação de *by pass*, (conforme diagrama esquemático da Figura 33) não deveria ser projetada em paralelo à tubulação principal, conforme realizado, pois como há uma derivação na tubulação haveria também uma teórica derivação na atuação do campo eletromagnético.

Parte deste campo passando pelo tubo de *by pass* e outra parte, em proporção maior, atuando na tubulação principal. Isto provavelmente tem a possibilidade de alterar os resultados experimentais para níveis ainda melhores se os corpos-de-prova tivessem sido instalados diretamente na tubulação principal. Entretanto, esta montagem não foi possível ser confeccionada na época por motivos de disposição do projeto do sistema de refrigeração.

De fato, os resultados de proteção obtidos em campo apresentam valores dentro dos padrões de *Excelente a Bom* indicado na literatura [17], e se comparado com o teste de Ross Gregory [13] - tabela 08 - os valores de perda de massa do sistema da Infraero estão inferiores ao encontrado pelo pesquisador. Semelhantemente, em relação ao experimento de Farqad F.M. Saeed, Masaomi Tsuda [14], as taxas de corrosão dos corpos-de-prova em contato elétrico estão menores aos valores encontrados pelos autores (3,54mpy, 5,26mpy e 18,92mpy).

Os históricos de controle de corrosão da Torre do prédio anexo e das Torres Principal e Nova, com tratamento químico, nos permite uma análise que é oportuna ser mostrada no presente trabalho. No período de Março a Maio de 2005 os resultados de perda de massa de coupons nas referidas torres são reproduzidos nas tabelas abaixo.

**Tabela 28** – Perda de Massa da Torre CAG Principal, com tratamento químico no período de Março a Maio de 2005.

Torre CAG – Principal	Perda de massa (mpy)	Data da instalação	Data da Retirada
Coupon 1	1,75	14/03/2005	17/05/2005
Coupon 2	1,80	14/03/2005	17/05/2005
Coupon 3	1,71	14/03/2005	17/05/2005

**Tabela 29** - Perda de Massa da Torre CAG Nova, com tratamento químico no período de Março a Maio de 2005.

Torre CAG – Nova	Perda de massa (mpy)	Data da instalação	Data da Retirada
Coupon 1	1,40	14/03/2005	17/05/2005
Coupon 2	1,35	14/03/2005	17/05/2005
Coupon 3	1,47	14/03/2005	17/05/2005

**Tabela 30** - Perda de Massa da Torre Prédio Anexo, com tratamento químico no período de Março a Maio de 2005.

Torre Prédio Anexo	Perda de massa (mpy)	Data da instalação	Data da Retirada
Coupon 1	8,72	14/03/2005	17/05/2005
Coupon 2	8,60	14/03/2005	17/05/2005
Coupon 3	8,76	14/03/2005	17/05/2005

Os resultados acima indicam que a taxa de corrosão de coupons instalados na torre do prédio anexo antes de iniciar o tratamento físico (aproximadamente 8,65mpy) é cerca de 5,5 vezes superior aos resultados encontrados nas torres principal e nova, as três com tratamento químico. Isto significa que o tratamento na torre do prédio anexo não estava sendo adequado em relação as demais unidades. Por outro lado, a comparação entre os resultados de perda de massa obtidos através do tratamento com o aparelho eletromagnético (Agosto a Dezembro de 2006) na torre do prédio anexo (aproximadamente 1,91mpy) é da ordem de grandeza dos valores indicados acima para as torres com tratamento químico.

Estes resultados, com uso de inibidores, são também comparáveis àqueles indicados como taxas de corrosão típicas sob condições de sistema de recirculação, conforme indicado na literatura [20], que variam de 0,70 a 3,6mpy segundo a natureza do inibidor utilizado. Neste caso verifica-se que o sistema físico de tratamento utilizado no INFRAERO conduziu a resultados equivalentes, em termos de perda de massa, aos processos convencionais de tratamento químico.

Para efeito de comparação visual, foram coletadas no mesmo dia e horário amostras da água de make-up, da água tratada pelo efeito de campo eletromagnético e da água com tratamento químico convencional. Foi observado que a água sob o efeito do equipamento eletromagnético possui coloração transparente, límpida e sem resíduos ou sólidos em suspensão aparentes e mesmo após um descanso de 48 horas a água não apresentou partículas no fundo devido ao processo de decantação. Assim suas características visuais são muito semelhantes à água de make-up, conforme figura abaixo.



**Fig 49** – Comparação visual entre as amostras de água de Make-up (CEDAE), água com tratamento químico convencional e a água sob o efeito de campo eletromagnético do equipamento instalado no sistema.

Tendo em vista as condições físico-química da água, é apontado na tabela a seguir, as condições de início e de final de avaliação do tratamento na torre do Prédio Anexo, e as condições de tratamento químico em dois outros sistemas. Observa-se que de modo geral, os parâmetros analisados não apresentam alteração em relação ao tratamento químico utilizado nas torres da central principal e na central principal nova (CAG). A comparação entre os parâmetros de água das torres tratadas quimicamente e o método de tratamento físico aplicado na Torre do prédio anexo, indica uma redução dos níveis de Cloreto de aproximadamente 140mg/L para 84mg/L, Dureza total de 145mg/L para 92mg/L, Ferro Total de 0,40ppm para 0,20ppm.

Entretanto, as análises de água circulante no sistema do prédio anexo não permitem deduzir informações simples sobre a eficiência de funcionamento do aparelho gerador de campos eletromagnéticos na interface metal-meio, onde podem ocorrer processos de incrustações.

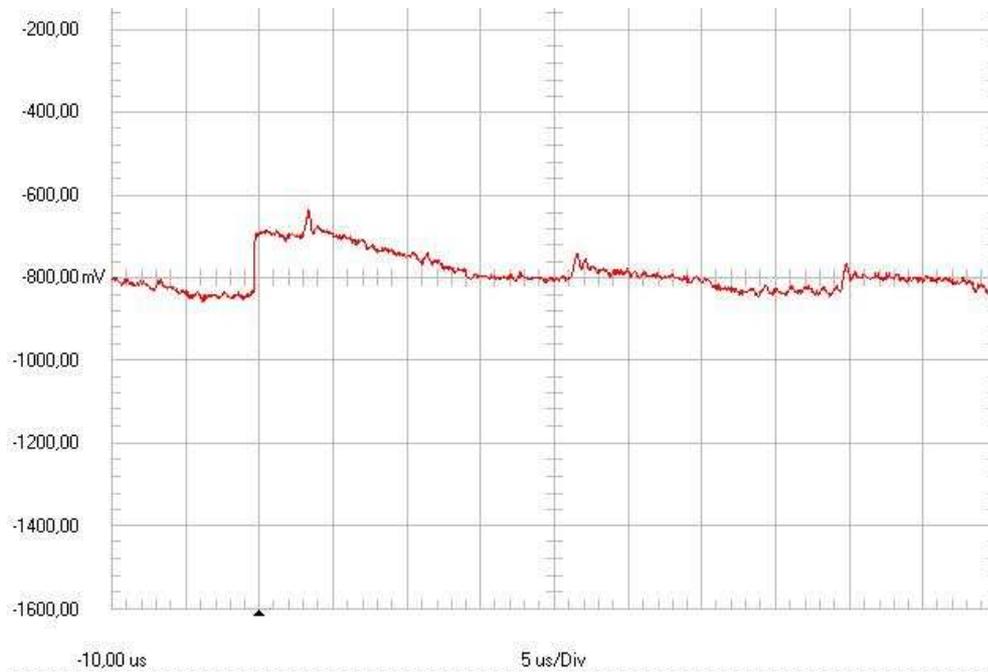
**Tabela 31** - Comparação entre os sistemas de refrigeração do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro.

Local: Infraero - Galeão		Hora da coleta: 10h		Coletado por: Kináqua Tecnologia Ltda	
Sistema: Água de Refrigeração & Água de Refrigeração Sistema Semi-Fechado					
ANÁLISES	UNID	Torre Principal CAG (Jun 06)	Torre Nova CAG (Jun 06)	Torre Prédio Anexo. (Início Trat. Jun 06)	Torre Prédio Anexo. (Determin. em Dez 06)
pH	---	7,1	6,3	7,1	7,0
Alcalinidade Total	mg/L	49,0	44,0	36,0	50
Cloretos	mg/L	135,0	153,4	118,4	84
Dureza Total	mg/L	117,2	166,2	133,5	92
Sólidos Totais	mg/L	250,4	319,5	208,7	322
Ferro Total	ppm	0,27	0,53	0,48	0,20
Condutividade	Micro mhos/cm	368,5	315,2	270,4	245,6
Contagem Bacteriológica	Col/100 ml	10.000	9.200	20.000	-
Fosfonato	mg/L	9,2	11,0	0,0	0,0

#### IV .3 – Potencial de Eletrodo

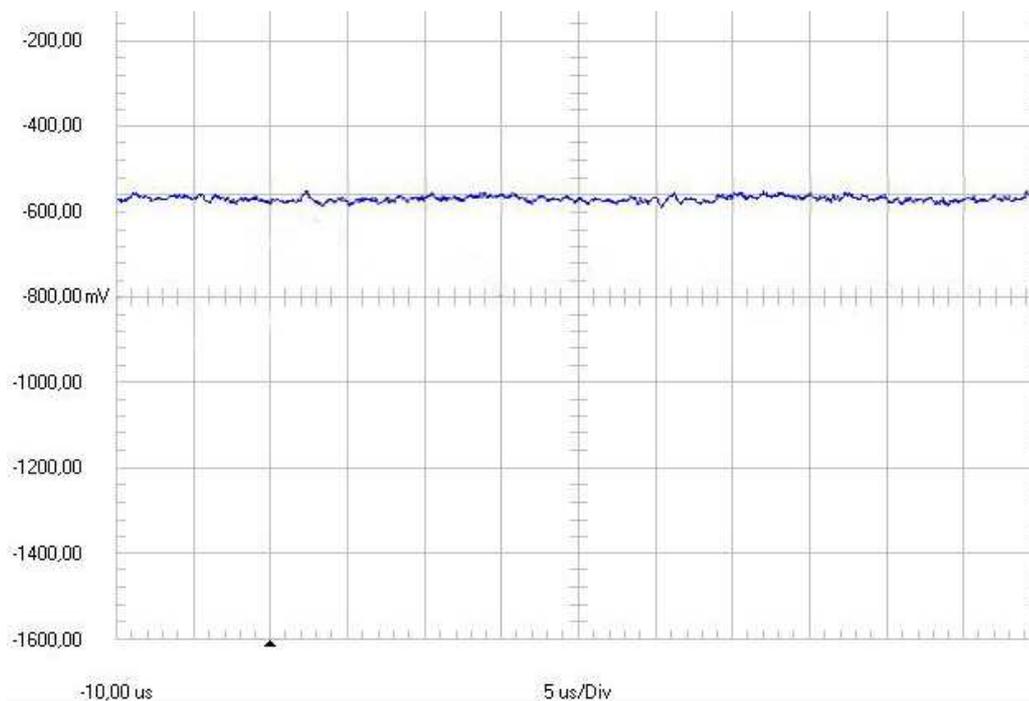
Foram realizados testes de medição de potencial nos corpos-de-prova instalados na tubulação de *by pass* sob as condições normais de projeto da torre e com a fonte eletromagnética atuando. Através do uso do multímetro convencional Fluke modelo 187/189, posicionando a escala de leitura em *mV (DC)* e posteriormente conectando uma das pontas na referência de calomelano saturado e a outra em um corpo-de-prova ligado eletricamente à estrutura, não foi possível obter leituras de potencial de eletrodo em relação à referência, isto posto, devido aos sinais oscilantes e aleatórios gerados pela fonte que não permitem que o multímetro convencional faça uma leitura significativa em corrente contínua na frequência de operação do aparelho.

Por outro lado, utilizando-se um osciloscópio Fluke modelo ScopeMeter série 190, tomando como referência o eletrodo de calomelano e um corpo-de-prova ligado eletricamente à tubulação, foi possível ler uma faixa de potencial compreendida entre aproximadamente -820mV e -700mV, conforme mostrado na figura 50 a seguir. Semelhantemente, a leitura dos potenciais dos corpos-de-prova isolados indicou valores entre -580mV e -620mV conforme mostrado na figura 51.



**Fig 50** – Medição de potencial no corpo-de-prova ligado eletricamente à tubulação no *by pass*.

Estes resultados mostram que os corpos-de-prova ligados eletricamente apresentam potenciais de eletrodo cerca de 200mV inferiores aos potenciais lidos nos corpos-de-prova isolados eletricamente. Embora o potencial de eletrodo da estrutura não seja constante, isto é, varia com o sinal de onda gerado pelo equipamento, os resultados indicam que o sistema de proteção eletromagnética atua no sentido de diminuir o potencial de eletrodo, a semelhança da técnica de proteção catódica.



**Fig 51** – Medição de potencial no corpo-de-prova isolado eletricamente à tubulação no *by pass*.

Tentando buscar maiores informações sobre o princípio de proteção do aparelho, foi realizado uma montagem experimental em laboratório onde corpos-de-prova de mesmas dimensões utilizadas em campo foram inseridos num circuito fechado composto por tubos de diâmetro 1" confeccionados em aço carbono não galvanizado e tubos de diâmetro 1" em PVC.

Procurando reproduzir as mesmas condições experimentais de campo, os corpos-de-prova ficaram faceando a parede interna da tubulação dentro do fluxo de água. O comprimento total da tubulação metálica foi de aproximadamente 2m. A fonte de campo eletromagnético foi projetada para atuar em tubulações de até 1 ½" de diâmetro, e aproximadamente 100m de extensão.

Os sinais de ondas emitidos pelo aparelho foram verificados em laboratório através de um osciloscópio Tecktronic modelo 2230, sendo estes de mesmas características daqueles indicados pelo fabricante. Entretanto, os resultados indicaram valores elevados de corrosão e invertidos entre corpos-de-prova ligados eletricamente (38mpy) e corpos-de-prova isolados (34mpy). O meio de ensaio foi uma solução contendo 50ppm de  $\text{NaHCO}_3$  (pH= 7,6) e o tempo de ensaio foi de 05 dias.

Desta maneira, é possível que o sistema experimental utilizado não atendesse às condições adequadas de funcionamento de proteção do equipamento gerador de campos eletromagnéticos, diferentemente do trabalho realizado em campo e do trabalho de Ross Gregory [13] e Farqad.F.M. Saeed, Masaomi Tsuda [14] que conseguiram obter resultados diferenciados, conforme visto nas considerações técnicas, capítulo II.

## V – CONCLUSÃO

Os ensaios realizados para avaliar a eficiência de um tratamento de água industrial alternativo conduziram as seguintes conclusões:

- Os sinais de onda apresentados pelo equipamento instalado próximo à torre foram confirmados ao longo da tubulação, indicando que o campo magnético atua em toda a extensão do circuito de água.
- Os ensaios de perda de massa indicaram que os corpos-de-prova eletricamente ligados à estrutura apresentaram taxas de corrosão da ordem de 1,91mpy, valor este cerca de 3 vezes inferior aos valores encontrados para os corpos-de-prova isolados.
- As análises de água da torre do prédio anexo sob o efeito de tratamento do equipamento eletromagnético mostraram uma redução dos níveis de Cloreto e Ferro em relação ao tratamento químico, apresentando ainda um aspecto de água límpida e transparente.
- Os corpos-de-prova ligados eletricamente à tubulação apresentaram potenciais na faixa de -820mV a -700mV x ECS, enquanto que os corpos-de-prova isolados apresentaram potenciais superiores, da ordem de -620mV a -580mV x ECS.
- O trabalho realizado na planta industrial mostrou que o efeito do campo eletromagnético atuante no sistema, de fato é capaz de induzir uma proteção contra corrosão na tubulação da planta de ar condicionado.

## VI - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] GENTIL, V., "Corrosão", 3ª Edição, LTC Editora S.A, Rio de Janeiro, 1996

[2] ROZENTAL, L.Y , "Avaliação de Tratamentos de água de sistemas de refrigeração semi abertos por meio de medidas eletroquímicas", Rio de Janeiro, Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 1999.

[3] RESENCRANCE, J.E. , "Manual de Laboratório de Química da água", Programa de Publicações Didáticas, USAID – Rio de Janeiro, 1966.

[4] CARVALHO, N.F., " Fundamentos da Corrosão" –Parte 02 – paper – 2000.

[5] P.C.S. GARCIA, P.C.S. , "Tratamento de Água de Resfriamento", Beltz Dearborn Gerência de Marketing, 1997.

[6] Manual Técnico, "Conceitos Básicos de Tratamento de Águas Industriais", Aquatec.

[7] MOHIUDDIN, A. K.M., KANT, K., "Knowledge base for systematic design of wet cooling towers. Part I : Selection and tower characteristics", paper 1995.

[8] SEELING, B., BERGSRUD, F., DERICKSON, R., "Softening", AE-1031 Bulletin, North Dakota State University, Extension Service, 1992.

[9] HAYT, W., BUCK, J., "Eletromagnetismo", LTC Livros Técnicos e Científicos, 6ª Edição, Rio de Janeiro, 2001.

[10] RICARDO, A ., "Ondas Eletromagnéticas", Curso de Física, disponível em [www.zaz.com.br](http://www.zaz.com.br), acesso em Novembro 2005.

[11] STEFANINI, D., "Condicionadores de Águas Físicos", ESA HydroFlow, Janeiro 1996.

[12] PANNONI, F.DOMINGOS, "Fundamentos da Corrosão", Proteção Estrutural AçoMinas AS, disponível conforme o endereço eletrônico apresentado a seguir

[www.gerdau.com.br/gerdauacominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnicos/Fundamentos\\_da\\_corrosao.pdf](http://www.gerdau.com.br/gerdauacominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnicos/Fundamentos_da_corrosao.pdf)

[13] GREGORY, R., "Impact of physical conditioning on small particles and consequences for flocculation and corrosion", Cranfield University, paper do 3º Simpósio de Abril de 1999.

[14] SAEED, F.F.M., TSUDA, M., "Anti-scale Magnetic Treatment and Physical Condition", Royal Scientific Society, Mechanical Design and Technology Center, Test Report nº 351/06/5 de 10 de Setembro de 2006.

[15] DENENBERG, H., BEERI, R., LOTAN, C., "Decalcification Device", Heart Institute, Hadassah University Hospital, 2006.

[16] Relatório Técnico, "Performance do Sistema Hydroflow no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro", ESA Sistemas Ltda, Fevereiro de 1999.

[17] DANTAS, E., "Geração de Vapor e Água de Refrigeração", Rio de Janeiro, 2ª Edição, Ecolab Química Ltda, 1988.

[18] LOBLEY, J.M., "The magnetic treatment of water for scaling, corrosion and biological control", Paper nº09, Melbourne, International Maintenance Management Conference, August 1990.

[19] DONALDSON, J.D., "The Magnetic treatment of Fluids", Eurocorr, United Kingdom, Bournemouth, 1994.

[20] Drew Produtos Químicos, "Princípios de Tratamento de Água Industrial", Drew Produtos Químicos Ltda, p.77, 1ª Edição, 1979.