



# TRATAMENTO DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Patrocínio:



[www.corona.ind.br](http://www.corona.ind.br)

Elaborado por:

Eng.º Joubert Trovati

## PREFÁCIO

Este guia foi elaborado com o objetivo de informar o leitor sobre as características e algumas técnicas de tratamento de águas de resfriamento. Infelizmente, no Brasil, ainda não dispomos de literatura suficiente sobre o assunto e tampouco este tema é abordado nas universidades e cursos técnicos, sendo que muitas das informações são transmitidas pelas empresas especializadas na área.

Assim, fez-se uma coletânea na bibliografia disponível, associada à experiência prática e intensos estudos e pesquisas realizados sobre o tema, apresentados aqui nesta modesta apostila. Esperamos que o conteúdo seja útil e sirva de guia para solução de vários problemas, além de aumentar o conhecimento científico do estimado leitor.

Ficáramos imensamente agradecidos com a colaboração do leitor e, dentro da lei que protege o direito autoral e a propriedade intelectual, evitasse a cópia ou distribuição desse material sem consentimento expresso do autor. Também agradeceríamos se o leitor contribuísse com sugestões, fotos, estudos de casos, novidades e também com qualquer correção ou mal entendimento que tenha ocorrido durante a redação deste trabalho. Com isso, esperamos aprimorá-lo e torná-lo cada vez mais completo.

Muito obrigado e um forte abraço!

O autor

Araraquara-SP, setembro de 2004.

E-mail para contato:

[joubert\\_trovati@terra.com.br](mailto:joubert_trovati@terra.com.br)

## SUMÁRIO

<b>1 - CONCEITOS GERAIS .....</b>	<b>6</b>
1.1 - Sistema Aberto de Resfriamento .....	6
1.2 - Sistemas Semi-Abertos (ou Abertos de Recirculação) .....	7
1.3 - Sistemas Fechados ("Closed-Systems") .....	7
<b>2 - EQUIPAMENTOS E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO.....</b>	<b>9</b>
2.1 - Processos que Exigem Operações de Resfriamento .....	9
2.2 - Torres de Resfriamento: Tipos, Tiragem e Arranjos de Escoamento .....	10
2.3 - Mecanismo de Transferência de Calor em um Sistema de Resfriamento de Água .....	14
<b>3 - BALANÇOS DE MASSA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO – CICLOS DE CONCENTRAÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>4 - ÍNDICES DE ESTABILIDADE DA ÁGUA – TENDÊNCIA CORROSIVA E INCRUSTANTE .....</b>	<b>21</b>
4.1 - Índice de Saturação de Langelier.....	21
4.2 - Índice de Estabilidade de Ryznar .....	23
<b>5 - FINALIDADE DO TRATAMENTO DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO – FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>25</b>
5.1 - Incrustações – Origens e Conseqüências .....	26
5.2 - Corrosão - Fundamentos, Causas e Conseqüências .....	30
5.2.1 - Tipos de Corrosão .....	32
5.2.1.1 "Pittings" (ou pites): .....	32
5.2.1.2 Corrosão Galvânica .....	35
5.2.1.3 Corrosão Sob Fissura ou Cavidades ("Crevice Corrosion") ....	37
5.2.1.4 Corrosão por Tensão Fraturante ("Stress Corrosion Cracking") .....	38
5.2.1.5 Esfoliação ou Separação da Liga ("Dealloying") .....	39
5.2.1.6 Corrosão Intergranular .....	40
5.2.1.7 Abrasão ("Erosion - Corrosion").....	40
5.3 - Desenvolvimento Microbiológico – Considerações Gerais .....	42
5.3.1 - Fatores que Influenciam no Crescimento Microbiológico .....	49
5.3.1.1 Presença de Nutrientes.....	49
5.3.1.2 pH.....	49
5.3.1.3 Temperatura.....	50
5.3.1.4 Luz solar .....	51
5.3.1.5 Oxigênio Dissolvido.....	51
5.3.1.6 Material em Suspensão – Turbidez .....	51
5.3.1.7 Velocidade do Escoamento da Água.....	52

<b>6 - TRATAMENTO QUÍMICO DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO .....</b>	<b>52</b>
6.1 - Prevenção das Incrustações.....	52
6.1.1 - Floculante .....	52
6.1.2 - Mecanismo Dispersante.....	53
6.1.3 - Outros Métodos de Prevenção das Incrustações.....	57
6.2 - Combate à Corrosão .....	58
6.2.1 - Tratamentos de Superfície.....	59
6.2.2 - Inibidores de Corrosão.....	59
6.2.2.1 Inibidores Anódicos.....	60
6.2.2.2 Inibidores Catódicos.....	62
6.2.2.3 Inibidores Anódicos e Catódicos Simultâneos.....	64
6.2.2.4 Fatores que Influenciam a Eficiência dos Inibidores de Corrosão .....	66
6.2.3 - Outros Métodos de Controle da Corrosão .....	67
6.3 - Controle do Desenvolvimento Microbiológico ("slime") .....	67
6.3.1 - Biocidas Oxidantes .....	68
6.3.1.1 Cloro e Seus Compostos .....	68
6.3.1.2 Compostos de Bromo .....	72
6.3.1.3 Peróxidos .....	72
6.3.1.4 Ozônio .....	73
6.3.2 - Biocidas Não-Oxidantes.....	73
6.3.2.1 Quaternários de Amônio e Aminas Complexas.....	73
6.3.2.2 Carbamatos .....	74
6.3.2.3 Organotiocianatos.....	75
6.3.2.4 Compostos Organo-Estanosos .....	75
6.3.2.5 Clorofenatos e Bromofenatos.....	75
6.3.2.6 Glutaraldeído .....	76
6.3.2.7 Bromo-Nitro Derivados .....	76
6.3.2.8 Isotiazolonas.....	76
6.3.2.9 Poliquaternários .....	77
6.3.2.10 Terbutilazina .....	77
6.3.2.11 Biguanidas.....	78
6.3.2.12 THPS - Sulfato de Tetrakis-Hidroximetil-Fosfônio .....	78
6.3.3 - Biodispersantes.....	79
6.3.4 - Outros Métodos de Controle do Desenvolvimento Microbiológico .....	80
<b>7 - MONITORAMENTO E CONTROLE DO TRATAMENTO .....</b>	<b>80</b>
7.1 - Controle Físico-Químico.....	81
7.2 - Taxas de Corrosão e Deposição / Incrustação.....	82
7.2.1 - Método dos Cupons de Prova .....	82
7.2.2 - Sonda Corrosométrica.....	86

**"Tratamento de Água - Sistemas de Resfriamento"**

7.2.3 - Instalação de Trocador de Calor Piloto.....	86
7.3 - Métodos de determinação e monitoramento do desenvolvimento microbiológico.....	87
7.3.1 - Contagem Microbiológica na Água.....	87
7.3.2 - Índice de Aderência de Biofilme.....	87
7.3.3 - Medida do Material Suspenso .....	88
7.3.4 - Análises de DQO, DBO e Carbono Orgânico Total .....	89
7.4 - Avaliação Global e Visual do Tratamento.....	89

## 1 - CONCEITOS GERAIS

A água é largamente utilizada em vários processos como agente de resfriamento. Além de sua abundância em nosso planeta, a água apresenta um calor específico<sup>1</sup> relativamente elevado, tornando-a própria para as operações de resfriamento.

Basicamente, os sistemas de resfriamento a água são classificados em três tipos:

### 1.1 - SISTEMA ABERTO DE RESFRIAMENTO

Também chamado de sistema de uma só passagem ("once-through"), é empregado quando existe uma disponibilidade de água suficientemente alta com qualidade e temperatura satisfatórias para as necessidades do processo. A água é captada de sua fonte, circula pelo processo de resfriamento e é descartada ao final, com uma temperatura mais alta.

Neste tipo de sistema, não há como proceder a um tratamento químico conveniente da água, uma vez que volumes muito altos estão envolvidos. Além disso, este processo tem o inconveniente de gerar a chamada "poluição térmica", que pode comprometer a qualidade do curso de água onde é despejada.

Emprega-se este sistema em locais próximos a fontes abundantes e/ ou pouco onerosas de água, bem como em instalações móveis, tais como plataformas de petróleo, navios, submarinos, etc.

---

<sup>1</sup> Calor Específico (c) é uma propriedade termodinâmica que indica a quantidade de calor necessária para se elevar, em um incremento, a temperatura de uma massa unitária de um corpo. Normalmente é dada em Kcal/g.°C .

## 1.2 - SISTEMAS SEMI-ABERTOS (OU ABERTOS DE RECIRCULAÇÃO)

Um sistema semi-aberto ("Open Recirculating System") é utilizado quando existe uma demanda elevada e disponibilidade limitada de água, principalmente em locais onde a qualidade da mesma está comprometida.

Após passar pelos equipamentos de troca térmica que devem ser resfriados, a água então aquecida circula através de uma instalação de resfriamento (torre, lagoa, "spray", etc.) para reduzir sua temperatura e tornar-se própria para o reuso.

Este sistema apresenta um custo inicial elevado, porém resolve o problema de eventual escassez de água, possibilita menor volume de captação e evita o transtorno da poluição térmica. Também pode ser submetido a um tratamento químico adequado, capaz de manter o sistema em condições operacionais satisfatórias e, com isto, pode-se reduzir os custos operacionais do processo.

Alguns exemplos deste sistema são as diversas disposições de torres de resfriamento, condensadores evaporativos e "spray-ponds" (reservatórios onde a água a ser resfriada é pulverizada e resfriada naturalmente pelo próprio ar que a circunda).

## 1.3 - SISTEMAS FECHADOS ("CLOSED-SYSTEMS")

Este arranjo geralmente é aplicado em processos nos quais a água deve ser mantida em temperaturas menores ou maiores do que as conseguidas pelos sistemas semi-abertos; também é empregado em instalações pequenas e móveis. Neste sistema, a água (ou outro meio) é resfriado em um trocador de calor e não entra em contato com o fluido de resfriamento.

Alguns exemplos que utilizam este sistema são: circuitos fechados para resfriamento de compressores, turbinas a gás, instalações de água gelada, radiadores de motores a combustão interna (automóveis, caminhões, tratores, máquinas estacionárias) e algumas instalações de ar condicionado e refrigeração.

Na Figura 01 são mostrados estes três tipos de sistemas de resfriamento:

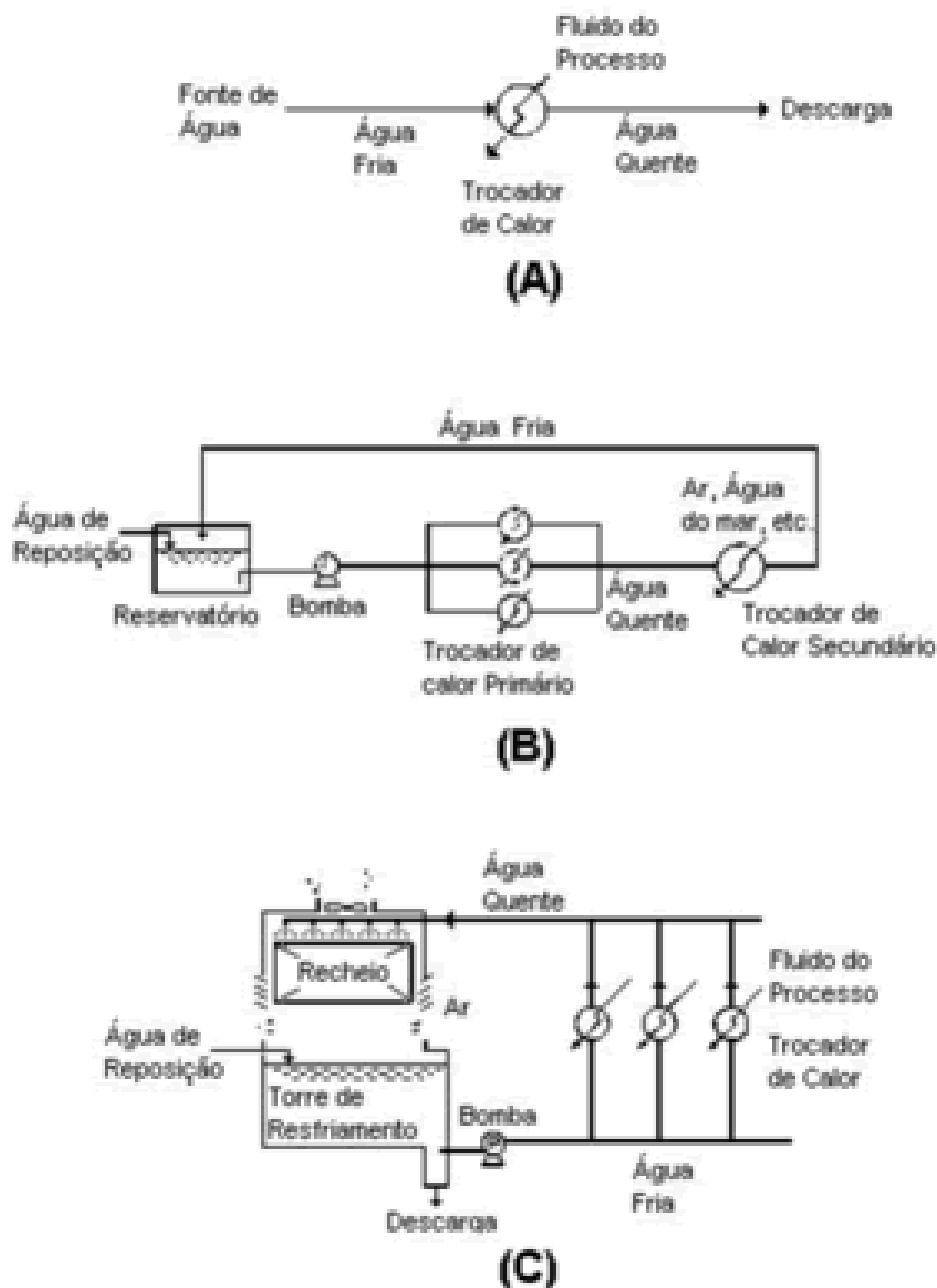


FIGURA 01: ILUSTRAÇÃO MOSTRANDO OS SISTEMAS DE RESFRIAMENTO: A) ABERTO; B) FECHADO; C) SEMI-ABERTO OU ABERTO DE RECIRCULAÇÃO

Nota: Muitas vezes, os termos "Resfriamento" e "Refrigeração" são empregados como sinônimos. Para evitar confusão, empregaremos a palavra "Resfriamento" para indicar uma redução de temperatura, em qualquer intervalo que seja, e a palavra "Refrigeração" para indicar, especificamente, a redução de temperatura a valores abaixo de 0° C (273 K).



## 2 - EQUIPAMENTOS E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Nesta seção trataremos, sobretudo, dos equipamentos e funcionamento dos sistemas abertos de recirculação, que são os mais utilizados e os que exigem maiores cuidados no tratamento de água. Faremos, no entanto, uma breve menção sobre tratamento dos sistemas de uma só passagem e sistemas fechados ao longo do capítulo.

### 2.1 - PROCESSOS QUE EXIGEM OPERAÇÕES DE RESFRIAMENTO

Uma infinidade de processos industriais necessita de remoção de calor utilizando a água como meio de resfriamento, dentre os quais podemos citar:

- Operações siderúrgicas, metalúrgicas, fundições, usinagens, resfriamento de fornos, moldes, formas, etc.
- Resfriamento de reatores químicos, bioquímicos e nucleares.
- Condensação de vapores em operações de destilação e evaporadores, colunas barométricas, descargas de turbinas de instalações termelétricas e nucleares, etc.
- Resfriamento de compressores e gases frigoríficos em circuitos de refrigeração (condensadores evaporativos), incluindo operações de ar condicionado e de frio alimentar.
- Arrefecimento de mancais, peças, partes móveis, lubrificantes, rotores e inúmeras máquinas e equipamentos.
- Resfriamento dos mais variados fluidos (líquidos e gases) em trocadores de calor, entre muitas outras aplicações.

## 2.2 - TORRES DE RESFRIAMENTO: TIPOS, TIRAGEM E ARRANJOS DE ESCOAMENTO

Existem vários modelos e disposições diferentes de torres e sistemas de resfriamento de água, cada qual com suas aplicações mais usuais e respectivas vantagens e desvantagens.

Abaixo está esquematizado um modelo clássico de torre de resfriamento, mostrando seus principais componentes. Na página a seguir (Quadro 01) encontra-se um esquema resumido destes sistemas, com suas características operacionais. Nas figuras subseqüentes, são mostradas algumas fotografias de equipamentos e instalações para resfriamento de água.

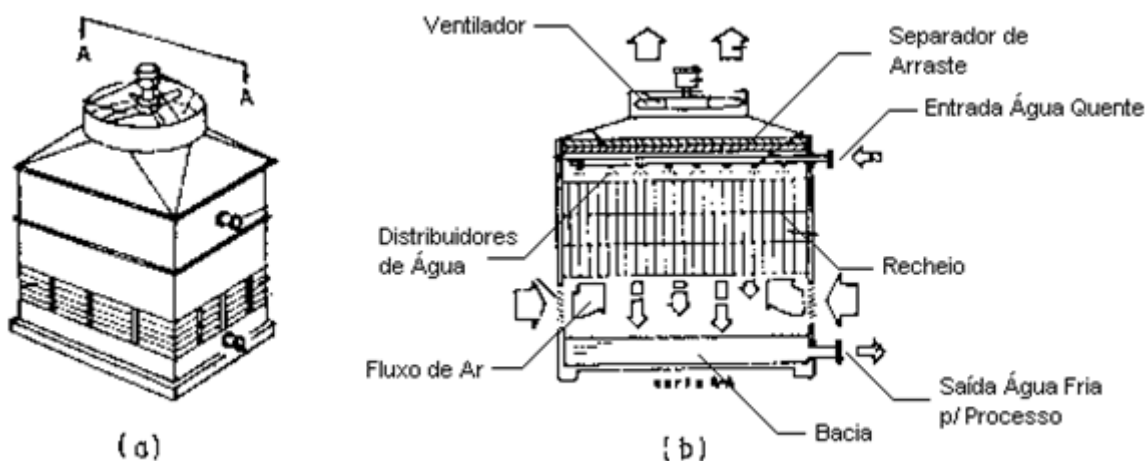


FIGURA 02: MODELO CLÁSSICO DE TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA, DE TIRAGEM INDUZIDA E FLUXO CONTRACORRENTE. (A) PERSPECTIVA. (B) CORTE A-A MOSTRANDO OS INTERNOS DO EQUIPAMENTO

QUADRO 01: DISPOSIÇÕES, ESQUEMAS EMPREGADOS E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE RESFRIAMENTO.

"Tratamento de Água - Sistemas de Resfriamento"

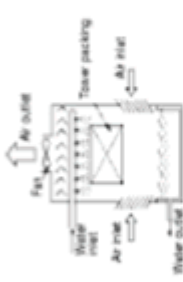
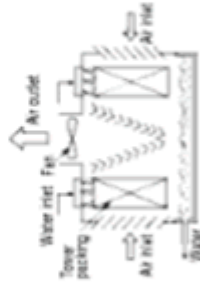
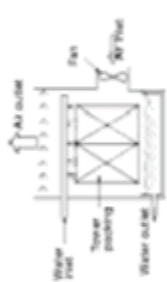
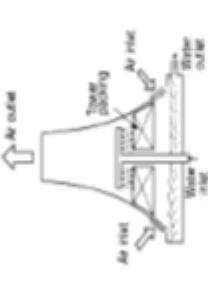
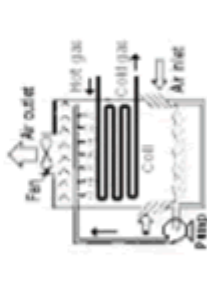
TIPO	ESBOÇO	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<b>Tiragem Induzida Fluxo Contracorrente</b>		Ventilador no topo e entrada do ar pela base. A água quente é distribuída no topo e sai mais fria na base. O ar escoá em contracorrente em relação à água	Pouco retorno de ar úmido Maior eficiência termodinâmica, pois a água mais fria que sai na base entra em contato com o ar mais frio.	Partes móveis (pás do ventilador, motor e redutor) sujeitas à corrosão (ar úmido) e em local de difícil manutenção.
<b>Tiragem Induzida Fluxo Cruzado</b>		Ventilador no topo e entrada de ar portoda a lateral. Água quente é distribuída no topo (2 lados) e sai mais fria na base. Fluxo de ar é cruzado em relação ao fluxo de água.	Pouca recirculação de ar úmido Maior área da seção reta para escoamento do ar Maior espaço e estrutura para manutenção.	Partes móveis sujeitas à corrosão (ar úmido) e em local de difícil manutenção. Decks superiores de distribuição e bacia podem ficar expostos à luz solar. Maior área de contaminação
<b>Tiragem Forçada Fluxo Contracorrente</b>		Ventilador e entrada de ar pela base. Água quente entra pelo topo e sai fria na base. Escoamento do ar em contracorrente à água.	Conjunto ventilador/ motor/ redutor em local de fácil manutenção e menos sujeitos à corrosão.	Grande recirculação do ar úmido devido à baixa velocidade do ar na saída. Por isso, pode ter eficiência prejudicada.
<b>Tiragem Natural Fluxo Contracorrente</b>		Não tem ventilador. Deslocamento do ar promovido pela diferença de densidade na base e no topo. A água quente é distribuída a uma altura de 1/8 do total. Usada no resfriamento de grandes quantidades de água. Grandes dimensões: altura maior que 100 m e diâmetro de 80 m.	Não tem partes móveis. Baixo consumo de energia por volume de água resfriada Requer pouca inspeção ou manutenção.	Custo inicial elevado Vazão do ar e o grau de resfriamento da água são muito influenciados pelas condições atmosféricas.
<b>Condensador Evaporativo Tiragem Induzida ou Forçada</b>		A água circula no equipamento, resfriando um feixe tubular de gases usados na refrigeração (amônia, CFC's, etc.). Mesmo princípio de operação das torres de resfriamento. Volumes de água são normalmente pequenos	Análogas às torres de mesma configuração. Equipamentos de tiragem forçada permitem fácil limpeza e observação do feixe tubular, mesmo com equipamento funcionando.	Análogas às torres de mesma configuração. Equipamentos de tiragem forçada dificultam a limpeza e inspeção do feixe tubular do trocador de calor.



FIGURA 03: TORRES DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA DIVERSAS.



FIGURA 04: SISTEMA DE RESFRIAMENTO DO TIPO "SPRAY-POND".

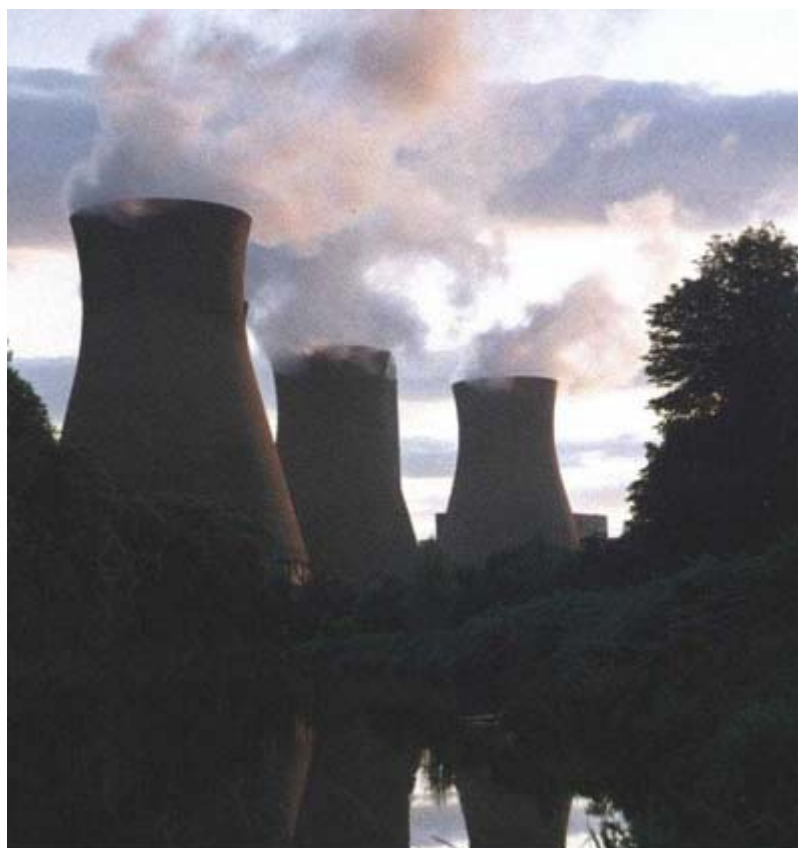


FIGURA 05: TORRES DE RESFRIAMENTO DE TIRAGEM NATURAL, INSTALADAS EM UMA CENTRAL NUCLEAR.

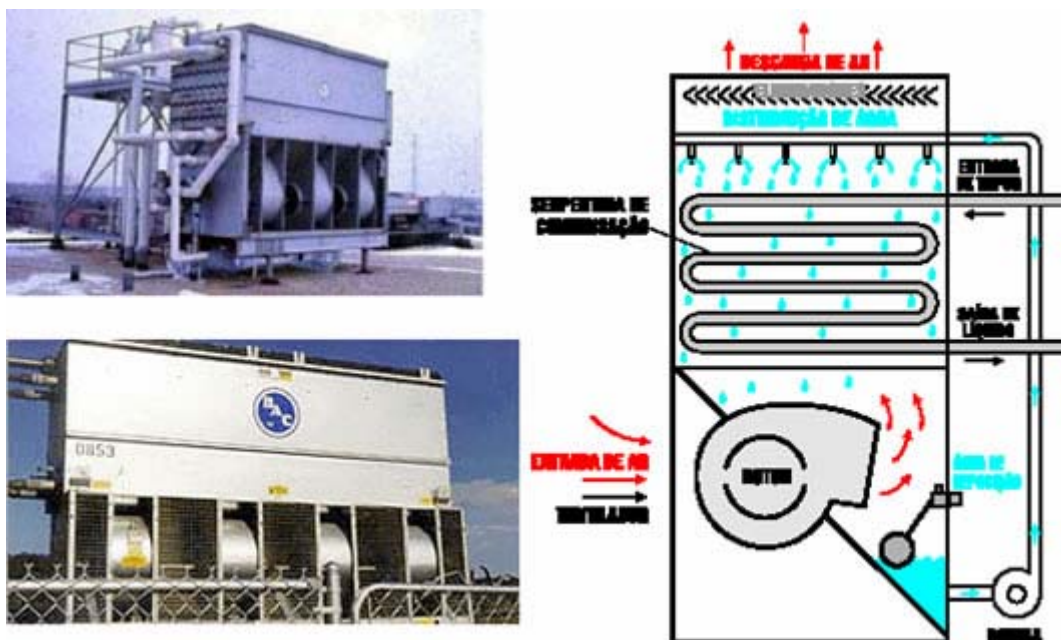


FIGURA 06: CONDENSADOR EVAPORATIVO

## 2.3 - MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA

O resfriamento da água em uma torre ou equipamento similar ocorre fundamentalmente através de dois processos:

- Transferência de calor sensível (por convecção), devido ao contato com o ar a uma temperatura mais baixa. Normalmente, este fenômeno é responsável por cerca de apenas 20% do calor transferido.
- Transferência de calor latente por evaporação de certa quantidade de água, devido à menor concentração desta no ar circundante (umidade); responsável por aproximadamente 80% da transferência global de calor da operação.

Assim, ocorre um fenômeno de transferência simultânea de calor e de massa neste processo, ou seja, há uma diferença de concentração entre a água (fase líquida) e a água

presente no ar (fase vapor – umidade do ar); isto proporciona uma força motriz que faz com que a água (líquido) tenha uma tendência a equilibrar a concentração com a fase gasosa (umidade do ar). Para a água passar para a fase vapor, ela necessita de energia, que é obtida na forma de calor da água que permanece na fase líquida, resultando no resfriamento desta última. Assim, quanto mais seco estiver o ar, maior será a força motriz e a tendência da água evaporar, resultando em maior quantidade de calor removido e conseqüentemente, menor temperatura da água resfriada. Na figura 07 está ilustrado este processo.

Pelo fato dos dois mecanismos de transferência serem fortemente dependentes da área de troca, os sistemas de resfriamento são projetados de modo a propiciar uma grande área superficial de contato da água com o ar, conseguida através de bicos para pulverização / distribuição e recheios (colméias) para otimizar o contato.

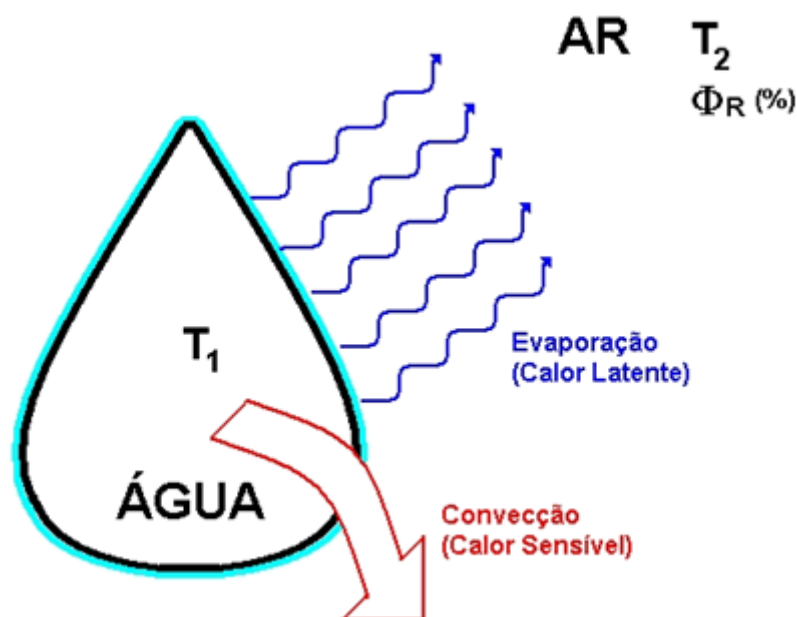


FIGURA 07: ESQUEMA MOSTRANDO A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA E REMOÇÃO DE CALOR EM UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO. NO EXEMPLO,  $T_1 > T_2$  E UMIDADE RELATIVA DO AR ( $\Phi_R$ ) < 100%.

A temperatura mínima obtida num sistema de resfriamento a água pode até ser menor que a temperatura ambiente, dependendo da umidade relativa do ar e da eficiência do equipamento. No entanto, existe um valor mínimo na qual a temperatura deste

processo pode chegar, que é a chamada Temperatura de Bulbo Úmido. Esta, por sua vez, é determinada colocando-se um pedaço de algodão umedecido (ou gaze, ou flanela) em volta do bulbo de um termômetro (ou outro instrumento de medida), fazendo-se passar pelo mesmo o ar a uma certa velocidade; a água evapora e retira calor da água que ficou no algodão, provocando o abaixamento da temperatura.

A diferença entre a temperatura da água resfriada e a temperatura de bulbo úmido é chamada de "Approach" e pode, inclusive, ser usada para avaliar a eficiência de um sistema de resfriamento: quanto mais próxima do bulbo úmido estiver a temperatura da água resfriada, maior será a eficiência da instalação. De modo geral, valores de "Approach" maiores que 10 °C indicam operação deficiente no sistema de resfriamento (subdimensionamento, obstruções ou canais preferenciais nos recheios, bicos entupidos / danificados, baixa velocidade do ar, etc.), embora alguns autores e técnicos adotem limites máximos de "Approach" de 6 °C.

### **3 - BALANÇOS DE MASSA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO – CICLOS DE CONCENTRAÇÃO**

Com a evaporação da água no sistema de resfriamento, há a necessidade de reposição da mesma; além disso, a evaporação causa aumento na concentração de sais dissolvidos e, por isso, deve-se proceder com um regime adequado de descargas a fim de evitar uma concentração excessiva dos mesmos. Ao entrarem em contato com o fluxo de ar, pequenas gotículas de água são arrastadas pelo mesmo e também causam perda de água do sistema. Finalmente, existem outras perdas indeterminadas de líquido, tais como vazamentos, outros usos, etc.



Esquemáticamente, um sistema de resfriamento pode ser representado pela seguinte ilustração:

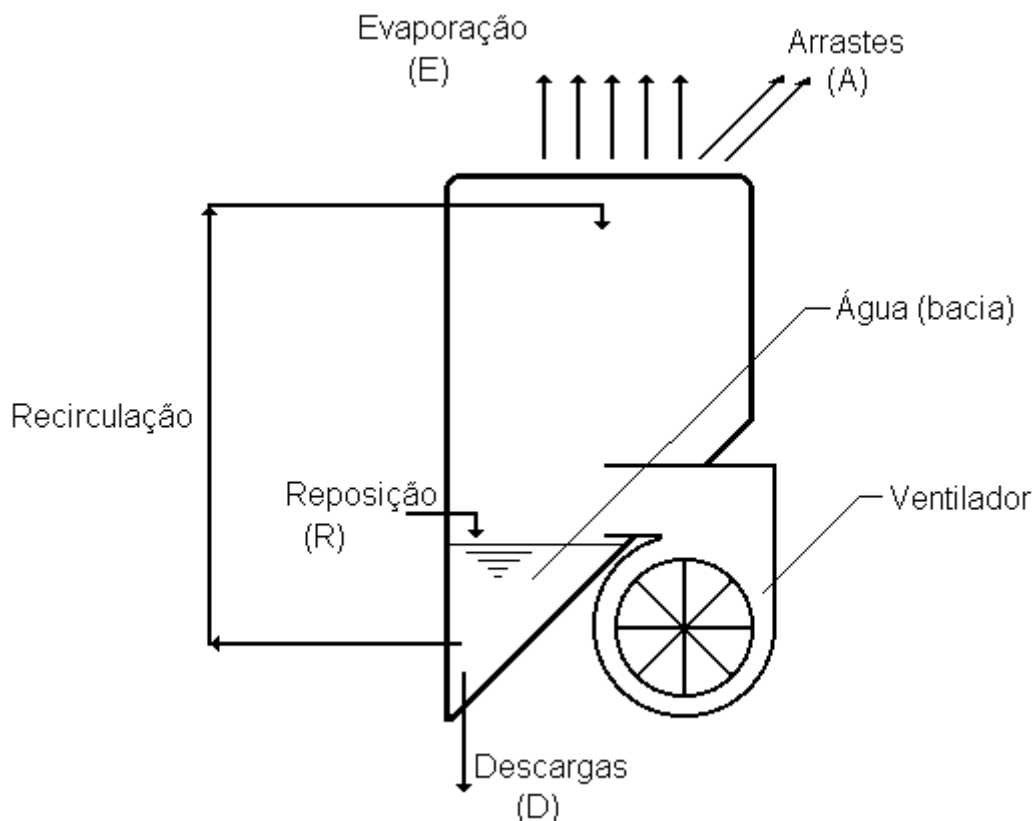


FIGURA 08: FLUXOS DE MATERIAL (ÁGUA) EM UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO.

Para este sistema genérico, considerando regime estacionário e sem acúmulo de material, o desenvolvimento do balanço de massa para a água resulta em:

$$\begin{aligned} \text{SAI} &= \text{ENTRA} \\ R + F &= E + A + D + I \end{aligned} \quad (1)$$

Considerando que as perdas indeterminadas e outras fontes de alimentação sejam nulas ( $F = 0$  e  $I = 0$ ):

$$R = E + A + D \quad (2)$$

Como dito anteriormente, a água é concentrada na torre. Assim, a quantidade de vezes que a mesma é concentrada é chamada de CICLO DE CONCENTRAÇÃO (CC). Considerando que durante a evaporação somente água pura esteja saindo do sistema, o Ciclo de Concentração é definido como:

$$CC = \frac{E + A + D}{A + D} = \frac{R}{A + D} \quad CC = \frac{E}{A + D} + 1 \quad (3)$$

De acordo com a equação (3), verificamos que com o aumento da evaporação da água (E), maior é o Ciclo de Concentração do sistema. Por outro lado, com o aumento das descargas (D), percebemos uma diminuição nos ciclos. Assim, as descargas são utilizadas para manter a água de resfriamento em níveis aceitáveis de concentração de sais.

Rearranjando as equações, podemos finalmente calcular a quantidade de água a ser repostada (R):

$$R = E \cdot \frac{CC}{CC - 1} \quad (4)$$

A evaporação de água correspondente a 10°C de resfriamento obtido é equivalente à cerca de 1,7 % da vazão de recirculação; em outras palavras, cada 5,8°C de resfriamento conseguido na água representa a evaporação de, aproximadamente, 1% da vazão de recirculação (estimativa genérica). Valores mais precisos desta estimativa são obtidos com balanços de energia em conjunto com os de massa.

Para o cálculo do arraste, deve-se levar em consideração o tipo de tiragem existente no sistema (posição do ventilador, quando existente); o arraste é assumido com uma

porcentagem da vazão de recirculação e, normalmente, empregam-se os seguintes valores empíricos:

TABELA 01: ESTIMATIVAS DE ARRASTES EM ÁGUA DE RESFRIAMENTO, EXPRESSOS COMO PORCENTAGEM DA VAZÃO DE RECIRCULAÇÃO, PARA CADA TIPO DE EQUIPAMENTO.

<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>Arraste (%) Valor médio</b>	<b>Arraste (%) Faixa Usual</b>
Tiragem Induzida	0,2	0,1 – 0,3
Tiragem Forçada	0,2	0,1 – 0,3
Tiragem Natural	0,5	0,3 – 1,0
"Spray-pond"	2,5	1,0 – 5,0
Condensador Evaporativo	0,2	0,1 – 0,2

Lembramos que, para estes cálculos, não foram consideradas as perdas indeterminadas (vazamentos, drenos abertos, etc.) e nem outras fontes de reposição de água, tais como águas condensadas de colunas barométricas, condensadores de contato, etc. Caso existam, todas estas variáveis devem ser computadas.

No cálculo de dosagem de produtos químicos para condicionamento da água, convém lembrar que somente as perdas por arraste e descarga propiciam a perda de produtos. Assim, uma fórmula genérica para estimar a dosagem de determinado produto na água de resfriamento é:

$$w = \frac{C \cdot (A + D)}{1000} = \frac{C \cdot R}{CC \cdot 1000} \quad (5)$$

Onde:

- w = Quantidade de Produtos (Kg/ h)
- C = Concentração desejada de produto (ppm)
- A = Perdas por Arrastes (m<sup>3</sup>/h)
- D = Descargas (m<sup>3</sup>/h)
- R = Reposição (m<sup>3</sup>/h)
- CC = Ciclos de Concentração

Na maioria das vezes, é difícil de obter os ciclos de concentração de um sistema através da medição e cálculo das vazões de reposição, descarga, arrastes e evaporação. Assim, para um sistema de resfriamento, os ciclos são estimados através das respectivas relações de concentração de sílica, cálcio e/ou magnésio entre a água do sistema e a água de reposição. Matematicamente:

$$CC = \frac{Si_{SIS}}{Si_{REP}} \quad CC = \frac{Ca_{SIS}}{Ca_{REP}} \quad CC = \frac{Mg_{SIS}}{Mg_{REP}} \quad (6)$$

Estes cálculos devem ser usados somente quando se há certeza que nenhuma das espécies (sílica, cálcio e magnésio) esteja se precipitando ou, caso incrustados, não podem estar se dissolvendo.

Alguns autores e manuais recomendam a utilização de cloretos (Cl<sup>-</sup>) para cálculo dos ciclos de concentração. No entanto, este parâmetro muitas vezes não é confiável para sistemas de resfriamento, pois o mesmo pode facilmente sofrer contaminações de cloretos do meio externo (inclusive pelo ar), principalmente em cidades litorâneas; além disso, muitos produtos adicionados ao meio (biocidas, derivados clorados, inibidores de dispersão e incrustação, etc) contêm este íon em solução. Os níveis de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) também podem ser usados para se estimar os ciclos, mas também sofrem interferências tais como no caso dos cloretos.

Em virtude da água se concentrar em um sistema de resfriamento, é necessário que a água de reposição (também chamada de "make-up") apresente uma boa qualidade, ou seja, possua baixas concentrações de sais e material orgânico, bem como baixos níveis de materiais suspensos e microrganismos.

## 4 - ÍNDICES DE ESTABILIDADE DA ÁGUA – TENDÊNCIA CORROSIVA E INCRUSTANTE

A água, como sabemos, tem uma tendência a dissolver outras substâncias. Quanto mais pura é a água, maior é a tendência solubilizante da mesma; por outro lado, quando a água apresenta concentrações elevadas de sais, maior é a tendência destes se precipitarem. Por outro lado, a solubilidade das substâncias normalmente presentes na água (sais, em sua maioria) é também dependente da temperatura, do pH, das espécies químicas envolvidas, entre outros fatores.

### 4.1 - ÍNDICE DE SATURAÇÃO DE LANGELIER

Uma tentativa de se quantificar a tendência solubilizante (ou corrosiva) e incrustante da água foi feita inicialmente por Langelier (1936) que, utilizando-se de um sistema água / carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), propôs a seguinte equação (válida para pH entre 6,5 e 9,5):

$$pH_s = (pK_2 - pK_s) + pCa + pAlc \quad (7)$$

Nesta equação,  $pH_s$  indica o pH de saturação, ou seja, o pH no qual uma água com uma dada concentração de cálcio e alcalinidade está em equilíbrio com o carbonato de cálcio.  $K_2$  e  $K_s$  representam, respectivamente, a segunda constante de dissociação e o produto de solubilidade do  $\text{CaCO}_3$  (estes valores são função da temperatura e podem ser obtidos de constantes termodinâmicas conhecidas). Finalmente,  $pCa$  e  $pAlc$  são os logaritmos negativos da concentração de cálcio (em mol/l) e da alcalinidade total (titulados como eq-g/l).

O Índice de Saturação de Langelier pode então ser definido como:

$$\text{Índice de Saturação} = pH - pH_s \quad (8)$$

(Langelier)

Onde valores positivos deste índice indicam tendência de deposição e valores negativos indicam tendência de dissolução de  $\text{CaCO}_3$ .

O Índice de Saturação é apenas qualitativo e, como o próprio Langelier enfatizou, é apenas um meio de indicação da tendência e da força motriz do processo (corrosivo ou incrustante) e não é, de modo algum, um método de mensurar esta tendência.

Os valores de  $pH_s$  podem ser obtidos graficamente através de cartas, tais como a exemplificada no diagrama a seguir:

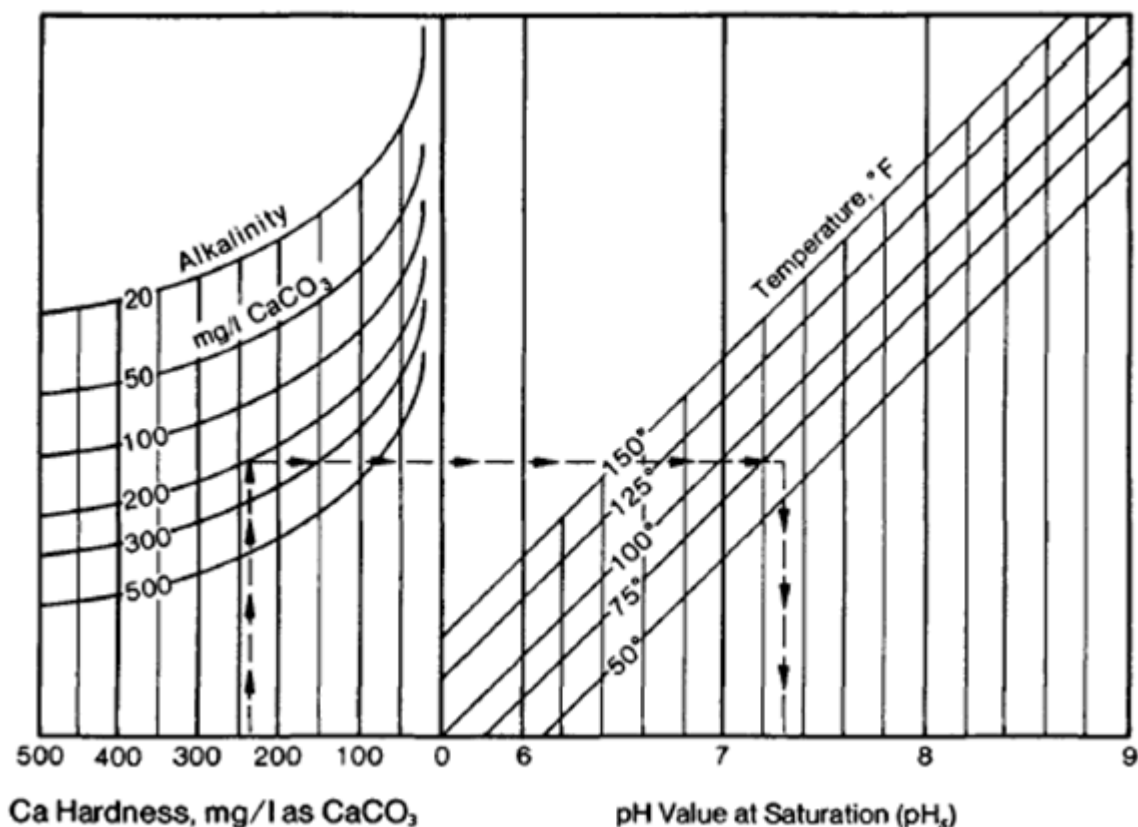


FIGURA 09: <sup>2</sup> DIAGRAMA MOSTRANDO OS PASSOS PARA OBTENÇÃO DO VALOR DE  $pH_s$ . NO EXEMPLO: DUREZA CÁLCIO = 240 mg/L; ALCALINIDADE TOTAL = 200 PPM; TEMPERATURA = 70°F; pH DE SATURAÇÃO ( $pH_s$ ) = 7,3.

<sup>2</sup> Extraída de:  
 KEMMER, F.N. (ed).: THE NALCO WATER HANDBOOK. 2 ed. Nalco Chemical Company.  
 New York, Mc. Graw Hill. 1988.

## 4.2 - ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE RYZNAR

Na tentativa de se expandir a utilidade do Índice de Saturação de Langelier, bem como obter um método quantitativo confiável para medir a característica incrustante/corrosiva da água, J. W. Ryznar propôs a utilização do Índice de Estabilidade:

$$\begin{array}{l} \text{Índice de Estabilidade} = 2 \cdot pHS - pH \\ \text{(Ryznar)} \end{array} \quad (9)$$

Utilizando-se este índice, uma água sem tratamento torna-se incrustante em valores abaixo de 6,0 e começa a apresentar características corrosivas com valores de Índice de Ryznar acima de 7,0. Na figura 10, são exemplificadas diversas águas com respectivos Índices de Estabilidade. Vários outros índices foram propostos por diversos autores com este intuito (Larson e Buswell, Stiff e Davis, entre outros) e podem ser encontrados na literatura especializada.

"Tratamento de Água - Sistemas de Resfriamento"

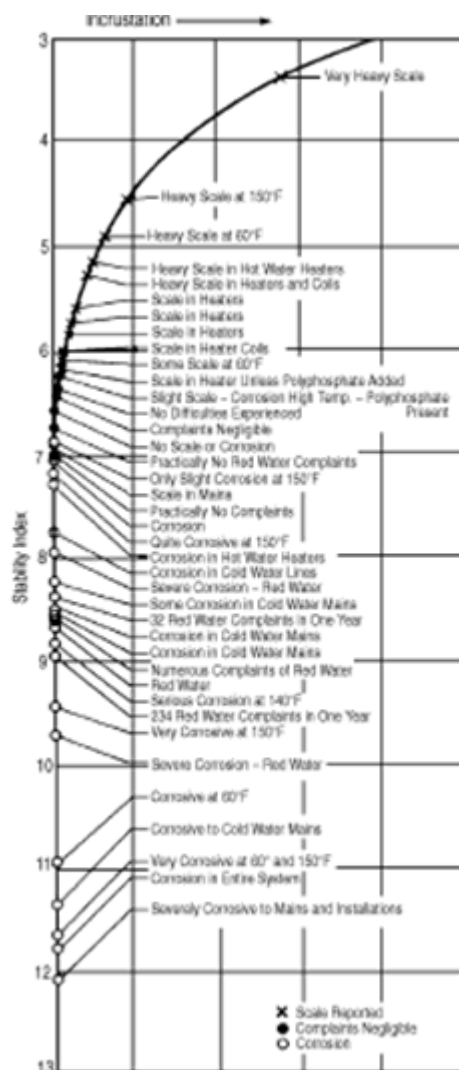


FIGURA 10: CORRELAÇÕES DE RESULTADOS PRÁTICOS DE DIVERSAS ÁGUAS COM OS VALORES CALCULADOS DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE RYZNAR.



## 5 - FINALIDADE DO TRATAMENTO DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O tratamento da água de resfriamento pode ser feito com o emprego de diversas técnicas e métodos, sejam eles químicos, físicos ou uma combinação de ambos. A escolha do melhor método deve se basear na sua eficiência e, evidentemente, no seu custo fixo e operacional. Deve-se, também, levar em consideração os efeitos ambientais e respectiva legislação de controle.

Fundamentalmente, os objetivos do tratamento da água de resfriamento são:

- **Evitar a formação de incrustações**
- **Minimizar os processos corrosivos**
- **Controlar o desenvolvimento microbiológico**

Muitas vezes, a solução completa ou eliminação destes problemas torna-se tecnicamente difícil ou inviável do ponto de vista financeiro. Assim, o tratamento pode ter por objetivo minimizar as conseqüências do problema, possibilitando a convivência com o mesmo e otimizando a relação custo/ benefício do processo.

Nas páginas seguintes, forneceremos maiores detalhes sobre cada um dos problemas relacionados.

## 5.1 - INCRUSTAÇÕES – ORIGENS E CONSEQÜÊNCIAS

A água encontrada na natureza nunca é pura, apresentando uma vasta gama de substâncias dissolvidas. Muitas destas substâncias são sais, óxidos e hidróxidos e apresentam solubilidades diferentes, sendo influenciadas basicamente pela temperatura, concentração e pH. Com a evaporação da água em um sistema de resfriamento, há um aumento na concentração das substâncias dissolvidas que, muitas vezes, podem se precipitar de forma aderente nas superfícies dos equipamentos (principalmente nas regiões de troca térmica), constituindo as incrustações. Outras substâncias também podem se incrustar indesejavelmente nesses sistemas, tais como: material orgânico (óleos, graxas, resíduos), lodo e acúmulo de material microbiológico, produtos de corrosão, sólidos em suspensão (argila, etc.), bem como produtos insolúveis originados de reações químicas na água (incluindo excesso de produtos para condicionamento químico).

As conseqüências da presença de incrustações em circuitos de resfriamento são:

- Diminuição das taxas de troca de calor nos trocadores, devido à baixa condutividade térmica das incrustações.
- Obstrução e até destruição do enchimento (colméias) de torres de resfriamento.
- Obstrução (parcial ou total) de tubulações e acessórios, restringindo a área de fluxo e, conseqüentemente, limitando a vazão.
- Entupimento de bicos e dispositivos distribuidores de água nas torres de resfriamento, promovendo a ocorrência de canais preferenciais de escoamento e diminuindo a eficiência do equipamento.
- Aumento dos processos corrosivos que ocorrem sob os depósitos (áreas sujeitas a diferenciais de aeração).

As substâncias formadoras de incrustações (sais em sua maioria), ao terem seus limites de solubilidade ultrapassados, iniciam uma precipitação sob a forma de pequenos cristais. Estes, por sua vez, apresentam uma estrutura molecular bem ordenada e podem se aderir fortemente às superfícies metálicas dos equipamentos. Uma vez formado o cristal, ocorre um rápido desenvolvimento do mesmo, através da agregação de novas moléculas, resultando em incrustações com tamanhos cada vez maiores. Para a remoção

de incrustações já consolidadas depende-se um grande esforço, muitas vezes através de limpezas químicas (normalmente com soluções de ácidos apropriados, devidamente inibidos) ou limpezas mecânicas de grande intensidade, tais como hidrojateamento a altas pressões, martelletes, chicotes rotatórios, impactos diretos com ferramentas (marreta e talhadeira, ponteiros), etc.

Os principais responsáveis pela formação de incrustações inorgânicas em sistemas de resfriamento são:

- Sais de cálcio e magnésio (dureza), principalmente o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e o sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ). Dependendo do controle do tratamento, fosfato de cálcio ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) pode também se formar. A ocorrência de hidróxido de magnésio também é comum.
- Sílica solúvel ( $\text{SiO}_2$ ) e silicatos ( $\text{SiO}_3^{2-}$ ) de vários cátions. A sílica solúvel é oriunda da dissolução de parte da própria areia e rochas com as quais a água mantém contato.
- Óxidos de ferro de outros metais, tais como o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , originado principalmente de processos corrosivos.

Tanto o carbonato como o sulfato de cálcio apresentam solubilidades que decrescem com o aumento da temperatura (o sulfato de cálcio, particularmente, tem sua solubilidade aumentada com a temperatura até cerca de  $40^\circ\text{C}$ ; a partir daí, sua solubilidade diminui consideravelmente). Assim, os mesmos tendem a se incrustar nas superfícies aquecidas de trocadores de calor ou em pontos onde a água encontra-se com temperatura mais elevada. Além disso, cristais formados no seio da solução podem se depositar sobre os equipamentos, principalmente em locais de baixa circulação de água. Estes cristais iniciam, então, o desenvolvimento de uma incrustação aderida no local.

Costuma-se fazer uma distinção entre os termos "depósito" e "incrustação" normalmente empregados:

- Depósitos: São acúmulos de materiais sobre determinada superfície que podem ser removidos manualmente com facilidade. Normalmente aparecem em locais com baixa velocidade de circulação de água ou nas extremidades

"Tratamento de Água - Sistemas de Resfriamento"

inferiores dos equipamentos. Embora menos aderidos que as incrustações, os depósitos também prejudicam a troca térmica e o escoamento da água. Geralmente, materiais orgânicos resultantes do desenvolvimento microbológico e material em suspensão formam depósitos nas superfícies.

- **Incrustações:** Caracterizam-se por um acúmulo de material fortemente aderido sobre uma superfície, necessitando de esforços consideráveis para sua remoção (limpezas mecânicas ou químicas). Normalmente, as incrustações são formadas por precipitação de sais e/ou óxidos na forma cristalina, o que geram incrustações altamente coesas e aderidas.

Nas figuras a seguir são mostrados alguns casos de incrustações em equipamentos e sistemas de resfriamento a água.



FIGURA 11: INCRUSTAÇÕES DE CARBONATO DE CÁLCIO FORMADAS NO LADO ÁGUA: (ESQ.): EM UM CONDENSADOR. (DIR.): EM UM TROCADOR DE CALOR COM TUBOS DE COBRE.



FIGURA 12: (ESQ.): TUBOS INCRUSTADOS DE UM CONDENSADOR EVAPORATIVO. (DIR.): TUBOS DO MESMO EQUIPAMENTO APÓS, LIMPEZA QUÍMICA.



FIGURA 13: RESFRIADOR DE ÓLEO DE UM COMPRESSOR QUE SOFREU PROCESSO INTENSO DE DEPOSIÇÃO/ INCRUSTAÇÃO PELA ÁGUA DE RESFRIAMENTO.

## 5.2 - CORROSÃO - FUNDAMENTOS, CAUSAS E CONSEQÜÊNCIAS

Corrosão pode ser definida como a destruição da estrutura de um metal através de reações químicas e/ ou eletroquímicas com o ambiente em que o mesmo se encontra. Podemos dizer que a corrosão é uma forma natural dos metais voltarem ao estado original em que eram encontrados na natureza, tais como nos minérios (óxidos); isto ocorre porque, nesta forma, os metais apresentam-se da maneira mais estável possível do ponto de vista energético. Seria como o exemplo de uma bola no alto de uma montanha: a bola tenderia a descer pela mesma, até atingir um estado de energia (potencial gravitacional, no caso) mais baixo possível.

As sérias conseqüências dos processos de corrosão têm se tornado um problema de âmbito mundial, principalmente em relação aos aspectos econômicos. Nos EUA, por exemplo, a corrosão gera prejuízos da ordem de US\$ 300 bilhões<sup>3</sup> por ano (dados de 1995). Infelizmente, no Brasil, não dispomos de dados precisos sobre os prejuízos causados pela corrosão, mas acreditamos serem consideravelmente elevados<sup>4</sup>. Como exemplo, podemos citar o caso da Petrobrás, a qual perde um navio petroleiro a cada cinco anos, devido aos processos corrosivos<sup>5</sup>.

Basicamente, a corrosão envolve reações de óxido-redução, ou seja, troca de elétrons. É um processo eletroquímico no qual o ânodo (espécie onde ocorre oxidação – perda de elétrons) que é consumido está separado por uma certa distância do cátodo, onde ocorre redução (ganho de elétrons). O fenômeno ocorre devido à existência de uma diferença de potencial elétrico entre estes dois locais.

Vamos tomar como exemplo uma superfície de aço qualquer, imersa na água, em um sistema de resfriamento. Esta água apresenta algumas características que favorecem a corrosão: tem boa condutividade elétrica (devido à presença de sólidos dissolvidos), pH próximo ao neutro e presença de alto teor de oxigênio dissolvido.

Assim, o mecanismo proposto para o processo é:

---

<sup>3</sup> Fonte: ROBERGE, P. R.: HANDBOOK OF CORROSION ENGINEERING. New York, Mc. Graw Hill, 1999.

<sup>4</sup> Informações detalhadas sobre corrosão podem ser encontradas em:  
ABRACO - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO: [www.abraco.org.br](http://www.abraco.org.br)  
NACE – NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS: [www.nace.org](http://www.nace.org)

<sup>5</sup> Informação verbal

1. Na região anódica, átomos de ferro ( $\text{Fe}^0$ ) passam para a água, aumentando seu estado de oxidação para  $\text{Fe}^{2+}$ .
2. Como resultado da formação do  $\text{Fe}^{2+}$ , dois elétrons migram através do metal para a área catódica.
3. O oxigênio, presente na água, move-se para a área catódica e ingressa no circuito, usando os elétrons que migraram para o cátodo e formando íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) na superfície do metal.
4. Os íons  $\text{OH}^-$  deslocam-se através do líquido para a região anódica, onde reagem com os íons  $\text{Fe}^{2+}$  formando hidróxido ferroso,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , que se precipita. Esta etapa completa o ciclo básico do processo.
5. O hidróxido ferroso formado é instável e, na presença de oxigênio e/ ou íons hidroxila, forma-se hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .
6. O hidróxido férrico, por sua vez, tende a se decompor em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , que é o óxido férrico, popularmente conhecido como ferrugem.

Quimicamente, as reações envolvidas são:

- 1, 2)  $\text{Fe}^0 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  (ânodo)
- 3)  $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$  (cátodo)
- 4)  $\text{Fe}^{2+} + 2(\text{OH})^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$
- 5)  $2\text{Fe}(\text{OH})_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3$
- 6)  $2\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightleftharpoons \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Em valores baixos de pH (até em torno de 4,0) ou em locais em que há ausência de oxigênio (tais como sob os depósitos), a reação catódica predominante que ocorre é com o íon hidroxônio:

- 3')  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\uparrow$  (cátodo, pH baixo, sem  $\text{O}_2$ )





entre as diminutas regiões anódicas (onde o pitting ocorre) e catódicas. Normalmente, os "pittings" aparecem em áreas com diferenças de potencial bem nítidas (tais como ocorre sob depósitos ou incrustações), em pontos de descontinuidade de filmes de proteção, em zonas de elevadas concentrações localizadas de certos íons (tais como os cloretos), entre outros.

Um caso particular da ocorrência de "pittings" em aços inoxidáveis é observado em certas regiões onde há depósitos e/ ou submetidas a tensões e esforços, expostas à ambientes com certa concentração de íons cloretos. A resistência à corrosão apresentada pelo aço inox deve-se a uma fina película protetora de óxidos (principalmente  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), existente sobre a superfície metálica. Qualquer deformação ou esforço realizado sobre o metal (operações de corte, soldagem, dobramento, etc), bem como formação de algum depósito (incluindo os de origem microbiológica), pode ocasionar o rompimento desta película, expondo o metal base e gerando neste local uma área anódica (positivamente carregada). Os íons cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), que apresentam elevada mobilidade, são atraídos devido à diferença de cargas e acumulam-se nestes locais, formando cloreto ferroso ( $\text{FeCl}_2$ ). Este se decompõe em hidróxido ferroso ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) e em ácido clorídrico, diminuindo o pH do meio e aumentando o processo corrosivo. Após a penetração no metal, as áreas circunvizinhas ao "pitting" são passivadas pela camada de óxido, o que concentra ainda mais a área anódica e favorece o aprofundamento do "pitting". Na figura 15 está representado este processo.

Alguns autores afirmam que a própria concentração elevada de íons cloretos sobre o aço inox, em determinadas condições, podem induzir a falhas na película protetora e posterior formação dos pites, sem que haja necessidade de grandes esforços no metal. Assim, como regra geral, costuma-se limitar a concentração de cloretos em águas de resfriamento em valores abaixo de 200 ppm; lembramos que, em determinados locais, pode haver concentrações localizadas deste íon muito superiores às encontradas no seio da água.

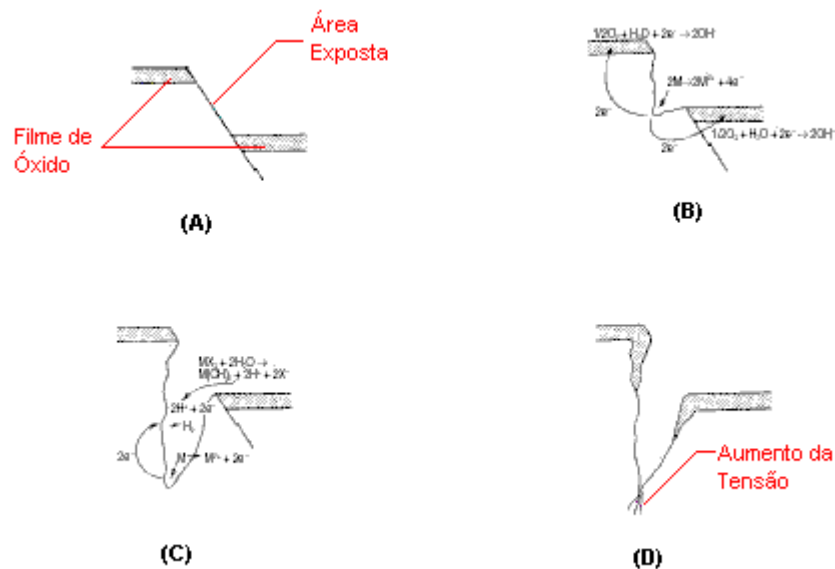


FIGURA 15: ESQUEMA DA FORMAÇÃO DE PITTING EM AÇO INOXIDÁVEL<sup>7</sup>.

Nas figuras a seguir, são apresentadas algumas fotografias mostrando ocorrência de pittings.



FIGURA 16: FOTOGRAFIA DO CORTE TRANSVERSAL DE UM TUBO DE AÇO CARBONO, MOSTRANDO A PENETRAÇÃO ATINGIDA PELOS PITTINGS<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Fonte: SUZUKI, T. (ed.): KURITA HANDBOOK OF WATER TREATMENT. 2ª Ed. Tokyo. Kurita Water Industries Ltd. 1999.

<sup>8</sup> Fonte: HERRO, H.M.; PORT, R.D.: THE NALCO GUIDE TO COOLING WATER SYSTEM FAILURE ANALYSIS. Nalco Chemical Company. New York. Mc. Graw Hill. 1993.



FIGURA 17: VASILHAME DE AÇO INOX, QUE CONTEVE UM BIOCIDA CLORADO DURANTE CERCA DE 3 DIAS. OBSERVE AS PERFURAÇÕES EXISTENTES NA REGIÃO DO NÍVEL DA SOLUÇÃO (SETA). ESTUDOS MOSTRAM QUE A TAXA DE PENETRAÇÃO DOS PITTINGS NESTE CASO FOI DE, APROXIMADAMENTE, 11 CM POR ANO<sup>9</sup>.

### 5.2.1.2 Corrosão Galvânica


Este tipo de corrosão ocorre, basicamente, quando dois ou mais metais com diferença significativa de potenciais de oxidação estão ligados ou imersos em um eletrólito (tal como a água com sais dissolvidos). Um metal chamado de "menos nobre", tem uma tendência a perder elétrons para um metal "mais nobre", cuja tendência de perda é menor. Assim, o metal menos nobre torna-se um ânodo e é corroído. Este fenômeno também depende da área entre as regiões anódicas e catódicas, isto é, quanto menor for a área do ânodo em relação ao cátodo, mais rápida é a corrosão daquele. Um exemplo disso ocorre entre o cobre (mais nobre) e o aço carbono, menos nobre e que tem a sua taxa de corrosão acelerada.

No Quadro 02, a seguir, encontra-se representada uma série galvânica de diferentes metais e ligas onde se pode visualizar a maior tendência à corrosão (áreas anódicas) ou menor tendência (área catódica).

---

<sup>9</sup> Idem Ibidem.

QUADRO 02: SÉRIE GALVÂNICA DE DIVERSOS METAIS E LIGAS<sup>10</sup>.

<p>REGIÃO ANÓDICA (Menos Nobre) Extremidade Corroída</p>  <p>MAIOR TENDÊNCIA À CORROSÃO</p> <p>REGIÃO CATÓDICA (Mais Nobre) Extremidade Protegida</p>	<p>Magnésio                  Ligas de Magnésio                  Zinco                  Alumínio 2S                  Cádmio                  Alumínio 17 ST                  Aço Carbono e Ferro                  Ferro Fundido                  Ferro - Cromo (ativo)                  18/8 Cr-Ni-Fe (Inox 304-Ativo)                  18/8/3 Cr-Ni-Mo-Fe (Inox 316-Ativo)                  Hastelloy C                  Chumbo - Estanho (soldas)                  Chumbo                  Estanho                  Níquel (Ativo)                  Inconel (Ativo)                  Hastelloy A                  Hastelloy B                  Latão                  Cobre                  Bronze                  Cobre - Níquel (ligas)                  Titânio                  Monel                  Prata (soldas)                  Níquel (Passivo)                  Inconel (Passivo)                  Ferro-Cromo (Passivo)                  18/8 Cr-Ni-Fe (Inox 304-Passivo)                  18/8/3 Cr-Ni-Mo-Fe (Inox 316-Passivo)                  Prata                  Grafite</p>
---	---

<sup>10</sup> Traduzido de "Nickel Company Inc.", apud: MAGUIRE, J. J. (ed.): BETZ HANDBOOK OF INDUSTRIAL WATER CONDITIONING. 18ª Ed. Trevoise-PA. Betz Laboratories Inc. 1980.

Para minimizar a ocorrência de corrosão galvânica, recomenda-se evitar a construção de equipamentos utilizando metais ou ligas com potenciais de oxidação muito diferentes e evitar o contato elétrico direto entre os metais, colocando materiais isolantes entre os mesmos (plástico, borracha, etc).

### **5.2.1.3 Corrosão Sob Fissura ou Cavidades ("Crevice Corrosion")**

É um tipo de corrosão localizada e intensa, ocorrendo em áreas isoladas do ambiente, tais como fendas, rachaduras, embaixo de depósitos, rebites, etc. Neste tipo de corrosão, a água no interior da fissura ou depósito torna-se extremamente concentrada em íons, além de ter seu pH reduzido significativamente, tal como ocorre dentro dos "pittings". Pelo fato dos mecanismos de corrosão serem idênticos, as condições que promovem a corrosão sob fissura também provocam pittings, e vice-versa (vide Figura 15). Este tipo de corrosão é muito encontrado em soldas, principalmente quando mal feitas; neste caso, o processo é acelerado pela ocorrência de corrosão galvânica – entre a solda e o metal base – e pela existência de tensões e esforços na região (vide item seguinte).

O melhor meio de se controlar este tipo de corrosão é, justamente, evitar a ocorrência de fendas, depósitos, rachaduras e zonas estagnadas, onde há pouco contato com a água do sistema.

Na figura seguinte é mostrado um pedaço de metal onde, propositalmente, formaram-se cavidades que promoveram este tipo de corrosão.

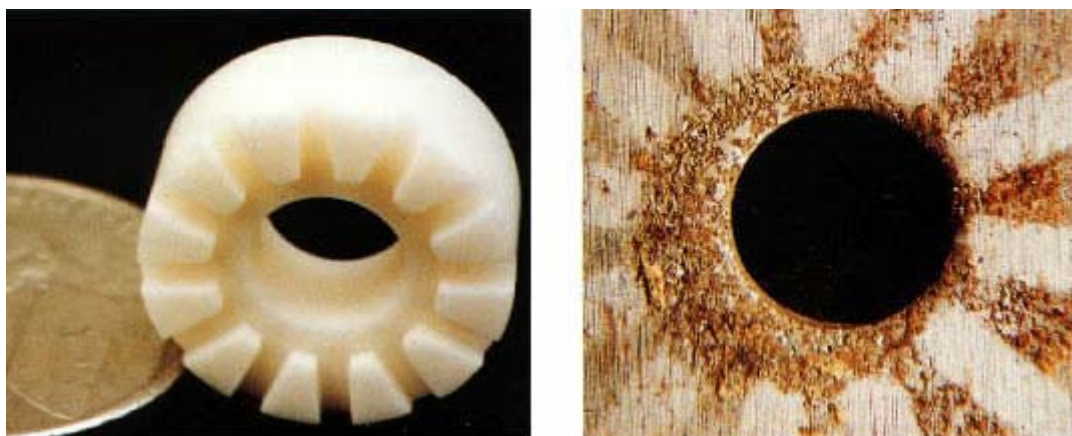


FIGURA 18: PEÇA PLÁSTICA COLOCADA EM CONTATO COM AÇO INOX, MOSTRANDO A CORROSÃO ACENTUADA EMBAIXO DAS ÁREAS DE CONTATO<sup>11</sup>.

#### **5.2.1.4 Corrosão por Tensão Fraturante ("Stress Corrosion Cracking")**

É um tipo de corrosão causada pela existência de tensões no metal e um ambiente propenso à corrosão. Frequentemente, há fraturas e quebras do metal nessa região. As ligas metálicas mais suscetíveis a este fenômeno são os aços inoxidáveis (série 300) e latão; nos primeiros, a presença de íons cloretos é a principal contribuinte pela ocorrência do processo. Já no caso dos latões (ligas de cobre e zinco), a corrosão sob tensão ocorre principalmente quando há concentração razoável de íons amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), que tendem a reagir com cobre, formando íons complexos; na figura 19 está ilustrado um caso deste tipo.

Muitas vezes, a corrosão por tensão e possíveis fraturas surgem como conseqüências de processos de "pittings" e/ou de corrosão sob depósito/ fissuras, ou podem, por sua vez, levar ao início de formação destes processos.

Para se prevenir este tipo de processo corrosivo, recomenda-se evitar esforços demasiados nas peças metálicas (principalmente inox e outras ligas) e, após a execução de qualquer operação onde isso ocorra, proceder com tratamento adequado para aliviar as

---

<sup>11</sup> Extraído de:

HERRO, H.M.; PORT, R.D.: THE NALCO GUIDE TO COOLING WATER SYSTEM FAILURE ANALYSIS. Nalco Chemical Co. New York. Mc. Graw Hill. 1993.

tensões e promover o surgimento da película protetora sobre o metal. Também se recomenda evitar a incompatibilidade química de alguns metais com certos íons (tais como cobre e substâncias amoniacais).



FIGURA 19: TUBO DE LATÃO QUE SOFREU PROCESSO DE CORROSÃO POR TENSÃO FRATURANTE, APÓS ENTRAR EM CONTATO COM AMÔNIA<sup>12</sup>.

#### **5.2.1.5 Esfoliação ou Separação da Liga ("Dealloying")**

Este processo ocorre quando um ou mais componentes de uma liga metálica são seletivamente removidos do metal. Um exemplo disso é encontrado em latões, onde o zinco é removido da liga com o cobre, permanecendo este último no metal sob uma forma esponjosa e pouco resistente (o processo é chamado de "dezincificação"). O níquel também pode ser removido seletivamente de ligas com o cobre, embora raramente venha causar maiores problemas.

Os fatores que mais influenciam na esfoliação são: metalurgia das ligas envolvidas, condições ambientais a que os metais estão sujeitos (processos de corrosão já existentes, depósitos, fissuras, etc) e características físico-químicas da água do processo (pH, condutividade, concentração de cloretos e outros sais, gases dissolvidos, entre outras).

---

<sup>12</sup> Id. Ibid.

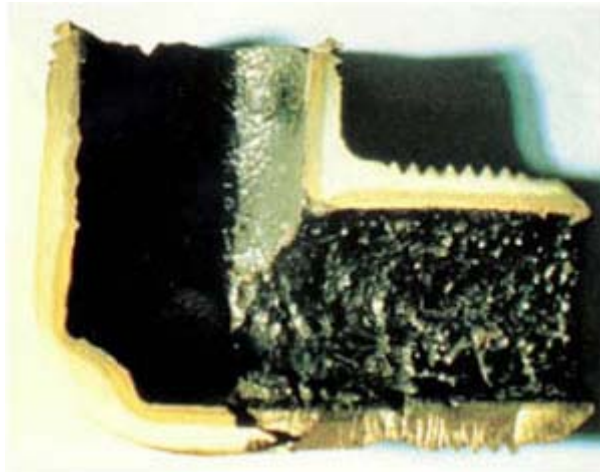


FIGURA 20: DEZINCIFICAÇÃO OCORRIDA NO TRECHO HORIZONTAL INTERNO DE UM COTOVELO DE LATÃO FUNDIDO<sup>13</sup>.

#### **5.2.1.6 Corrosão Intergranular**

É um tipo de ataque que aparece nas imediações dos grãos do metal, em nível molecular. Geralmente aparece em locais que foram submetidos a elevadas temperaturas ou grandes esforços, havendo falhas na estrutura cristalina do metal (remoção de um dos componentes, oclusão, etc.). Normalmente este tipo de corrosão não é significativo em sistemas de resfriamento.

#### **5.2.1.7 Abrasão ("Erosion – Corrosion")**

Apesar de não se tratar de um processo estritamente eletroquímico, a abrasão é, freqüentemente, a causa principal de falhas em sistemas e instalações de água de resfriamento; além disso, aumenta a incidência e intensidade dos processos corrosivos citados.

---

<sup>13</sup> Id. Ibid.



Este fenômeno ocorre quando a superfície do metal é submetida a uma força aplicada pelos sólidos suspensos, bolhas de gases ou pelo próprio fluxo de líquido, que muitas vezes é suficientemente intenso para arrancar a camada de óxido protetor existente sobre a superfície dos metais envolvidos. Um caso comum é observado em metais mais moles (latão, cobre, alumínio e respectivas ligas), com o aparecimento de sinais semelhantes a ferraduras de cavalo, conforme apontado na figura 21.

A cavitação, por exemplo, pode ser classificada neste tipo de ocorrência, agindo principalmente em rotores de bombas ou acessórios de tubulação onde há uma diminuição súbita da pressão, causando uma vaporização local do líquido; as diminutas bolhas produzidas, ao se chocarem com o metal, são responsáveis por sua deterioração.

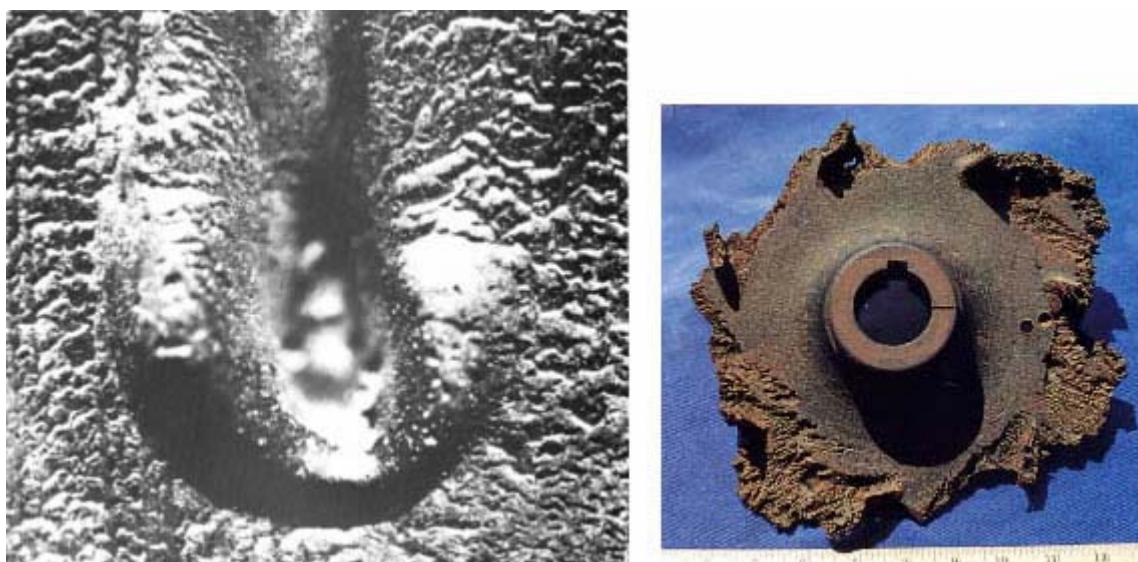


FIGURA 21: ESQ.: FOTOGRAFIA AMPLIADA (12X) DA SUPERFÍCIE DE UM PEDAÇO DE LATÃO SUBMETIDO À ABRASÃO (OBSERVE OS SINAIS EM FORMA DE FERRADURA). DIR.: ROTOR SEMI-ABERTO (AÇO CARBONO) DE BOMBA CENTRÍFUGA QUE SOFREU INTENSO PROCESSO DE CAVITAÇÃO<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> Id. Ibid.

### 5.3 - DESENVOLVIMENTO MICROBIOLÓGICO – CONSIDERAÇÕES GERAIS

A água é o habitat natural de milhares de seres vivos, desde microrganismos unicelulares até animais superiores. Com o aprimoramento das atividades humanas e o uso generalizado da água nestas atividades, deparamo-nos com um problema muito difícil de ser resolvido, principalmente porque vai de encontro à própria natureza: o desenvolvimento de organismos na água que usamos e todas as conseqüências que este fato pode gerar.

Em circuitos de resfriamento, isto não é diferente. O crescimento exagerado – principalmente de algas, bactérias e fungos – é sem dúvida um dos grandes problemas encontrados nestes sistemas. Os prejuízos de ordem técnica e econômica são significativos e, algumas vezes, catastróficos.

Os principais inconvenientes causados pelo excesso de crescimento microbiológico em águas de resfriamento são:

- Formação de depósitos sobre superfícies de troca térmica (trocadores de calor, serpentinas, etc.) diminuindo as taxas de transferência de calor.
- Obstrução e entupimento de tubos, bicos aspersores, válvulas, equipamentos, acessórios, entre outros, podendo diminuir a eficiência do processo, restringir a vazão, entre outros.
- Formação de lodo no fundo das bacias, "decks" e canais de distribuição, criando muitas vezes condições propícias para o surgimento de novas espécies de microrganismos.
- Obstrução e crescimento exagerado em recheios e colméias de torres, diminuindo a eficiência no resfriamento de água e, em casos extremos, podendo até causar ruptura e desmoronamento do recheio.
- Excesso de material orgânico na água promove formação de espuma, causando maiores inconvenientes.
- As substâncias mucilaginosas (glicocalíce) excretadas por alguns seres podem combinar-se com material inorgânico (sais, produtos de corrosão) e formar incrustações aderentes nos equipamentos e tubulações.

- Os depósitos de microrganismos sobre as superfícies metálicas aumentam a incidência de processos corrosivos, favorecendo as reações que os constituem.
- Algumas classes de microrganismos são causadores diretos de corrosão, tais como as bactérias redutoras de sulfato (SRB's) e formadoras de ácidos.
- Decomposição de estruturas de madeira (torres antigas), provocada principalmente por algumas espécies de fungos; a ocorrência de cogumelos saprófitos conhecidos popularmente como "orelha de pau" não é rara nestas instalações.
- O crescimento descontrolado de seres vivos em águas de resfriamento também provoca aumento da demanda química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), podendo causar complicações para o tratamento de efluentes (se existente) quando forem feitas descargas de água no sistema.
- Muitas vezes, o acúmulo de material orgânico na água de resfriamento pode gerar mau cheiro no local, tornando-se bastante desagradável principalmente em locais próximos à aglomeração de pessoas (tais como supermercados, shopping centers, etc.).
- Algumas classes especialmente patogênicas de microrganismos desenvolvem-se com muita facilidade em águas de resfriamento. Um exemplo são as bactérias do gênero *Legionella*, causadoras de uma grave enfermidade chamada popularmente de "Doença do Legionário".

Cada classe de microrganismo apresenta peculiaridades em sua morfologia e fisiologia, gerando inclusive diferentes problemas. No quadro a seguir são relacionados os principais tipos de microrganismos e alguns detalhes sobre os mesmos.

QUADRO 03: CLASSIFICAÇÃO, CARACTERÍSTICAS E PRINCIPAIS PROBLEMAS GERADOS POR MICRORGANISMOS EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO.

ORGANISMO	CLASSIFICAÇÃO	FONTES DE ENERGIA E NUTRIENTES	PRINCIPAIS PROBLEMAS OCACIONADOS
BACTÉRIAS aeróbias ou anaeróbias	Formadoras de depósitos (slime)	Diversos compostos inorgânicos e/ ou orgânicos. Fazem quimiossíntese (Heterótrofos)	Formam depósitos densos e aderentes. Podem restringir o fluxo de água e promover o crescimento de outras espécies de seres. Prejudicam a troca térmica em equipamentos.
	Formadoras de esporos		Ficam inertes quando o ambiente torna-se hostil, retornando ao estado ativo quando fica favorável de novo. Difícil eliminação completa. Na forma esporulada, costumam não causar problemas.
	Depositantes de Ferro		Causa oxidação do ferro e subsequente deposição dos óxidos insolúveis.
	Nitrificantes		Geram ácido nítrico quando ocorre contaminação da água com amônia. Podem causar corrosão severa.
	Redutoras de Sulfato		Reduz os sulfatos dissolvidos na água a sulfetos. Geram corrosão localizada e severa.
	Anaeróbicas corrosivas		Secretam substâncias corrosivas. São encontradas em baixo de biofilmes, tubérculos de processos corrosivos ou incrustações.
FUNGOS	Leveduras	Material Orgânico (Heterótrofos)	Causam degradação da madeira. Podem combinar-se com outras formas de vida (bactérias, algas), acentuando o processo de slime.
	Filamentosos		Fazem decomposição da matéria orgânica morta, causando mal odor. Podem obstruir tubulações e acessórios.
ALGAS	Unicelulares	Luz Solar Fazem fotossíntese (Autótrofos)	Crescem em áreas expostas à luz solar. Podem causar obstrução de tubos, bicos de aspersão e equipamentos. Podem se depositar sobre recheios das torres, causando desabamento. Quando morrem, podem servir de alimento a fungos e bactérias (mal odor).
	Superiores		
PROTOZOÁRIOS	Ciliados Flagelados Amebóides	Material Orgânico (Heterótrofos)	Crescem em todos os ambientes nos quais as bactérias se desenvolvem. Sua presença indica desinfecção ineficiente. Normalmente não causam maiores problemas.
FORMAS DE VIDA SUPERIORES	Nematóides Crustáceos Moluscos Peixes	Materiais orgânicos / inorgânicos diversos (Heterótrofos)	Podem se depositar ou agregar em filtros, telas e equipamentos. A presença destes seres indica um pobre controle microbiológico do tratamento.

Os microrganismos que se desenvolvem na água de sistemas de resfriamento são divididos em dois tipos:

Planctônicos: Ficam dispersos no líquido e movimentam-se junto com ele, sem tendência a se depositarem ou aderirem a superfícies.

Sésseis: São os que causam maiores problemas nos sistemas de resfriamento, pois se desenvolvem aderidos sobre as superfícies dos equipamentos e tubulações, formando uma camada chamada biofilme ("slime" do inglês).

Nas figuras a seguir, ilustramos algumas ocorrências de desenvolvimento microbiológico e suas conseqüências em sistemas de resfriamento:



FIGURA 22: CRESCIMENTO EXAGERADO DE ALGAS NO FUNDO DA BACIA DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO, EXPOSTA À LUZ SOLAR.



FIGURA 23: CRESCIMENTO EXAGERADO DE ORGANISMOS EM UM RECHEIO DE TORRE DE RESFRIAMENTO.



FIGURA 24: TROCADOR DE CALOR TIPO CASCO E TUBOS (CONDENSADOR, LADO ÁGUA) MOSTRANDO MATERIAL ORGÂNICO PROVENIENTE DE DESENVOLVIMENTO MICROBIOLÓGICO, DEPOSITADO NO INTERIOR DOS TUBOS.



FIGURA 25: EM CIMA: ENCHIMENTO DE TORRE DE RESFRIAMENTO (CANALETA EM "U INVERTIDO" PERFURADA), MOSTRANDO O DESENVOLVIMENTO DE BIOFILME. COMPARAR COM A CANALETA LIMPA (ABAIXO).



FIGURA 26: SEPARADOR DE ARRASTE (VENEZIANAS) DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO DE FLUXO CRUZADO, MOSTRANDO OCORRÊNCIA DE ARRASTE PROVENIENTE DO EXCESSO DE MATERIAL ORGÂNICO NA ÁGUA.



FIGURA 27: TUBOS DE AÇO INOX QUE SOFREU PROCESSO DE CORROSÃO POR BACTÉRIAS REDUTORAS DE SULFATO (GÊNERO *DESSULFOVIBRIO*). OS DEPÓSITOS DE COR NEGRA SÃO COMPOSTOS POR SULFETO DE FERRO, PRODUTO DA CORROSÃO.



### **5.3.1 - Fatores que Influenciam no Crescimento Microbiológico**

Muitos fatores físicos e químicos contribuem para a formação de condições propícias para desenvolvimento microbiológico. A capacidade dos seres vivos de se adaptarem a condições ambientais adversas faz com que certos organismos sobrevivam até em condições extremamente inóspitas, tais como altas temperaturas (superiores a 100°C), pressões elevadas (da ordem de centenas de atmosferas), pH excessivamente ácidos ou alcalinos, concentrações elevadas de sais, etc. No entanto, as condições encontradas na maioria dos sistemas de resfriamento são amenas, o que propicia o desenvolvimento microbiológico de várias classes de organismos. Colocadas todas estas peculiaridades, os fatores mais influentes neste processo são:

#### **5.3.1.1 Presença de Nutrientes**

É bastante evidente que um ser vivo se desenvolva com maior facilidade quando encontra fontes abundantes de materiais necessários para sua subsistência e reprodução. Assim, a presença de inúmeros nutrientes, orgânicos e inorgânicos, pode favorecer o crescimento microbiológico, tais como: açúcares, aminoácidos e proteínas, amônia, gorduras e/ou ácidos graxos, fosfatos, nitratos, sulfatos, potássio, sódio, vários outros íons e uma infinidade de outras substâncias.

Isto posto, o sucesso do controle do desenvolvimento microbiológico na água de resfriamento também depende da eliminação e ou anulação das fontes e possíveis contaminações desses nutrientes.

#### **5.3.1.2 pH**

A maioria das espécies de bactérias existentes tende a crescer em valores de pH neutros e ligeiramente alcalinos, enquanto que os fungos normalmente crescem em pH ligeiramente ácido. Como o pH da água dos sistemas de resfriamento são mantidos normalmente entre 6,5 e 8,5, há um favorecimento no crescimento dessas duas classes de seres, além de algas.

### 5.3.1.3 Temperatura

A temperatura é, sem dúvida, um fator de grande influência para o desenvolvimento de qualquer ser vivo. Normalmente, a maioria dos organismos sobrevive adequadamente em temperaturas entre 10 e 45°C; porém, algumas espécies selecionadas (principalmente bactérias) sobrevivem em temperaturas abaixo de 0°C ou acima de 100°C.

A manutenção de valores baixos de temperatura não é capaz de exterminar a maioria dos microrganismos, fazendo apenas com que os mesmos não se desenvolvam e mantenham-se em estado latente, aguardando uma alteração favorável nas condições ambientais. Por outro lado, nos processos de resfriamento, são encontrados vários gradientes de temperaturas ao longo do circuito, o que favorece o crescimento de certas espécies de modo localizado. As bactérias, de modo geral, preferem temperaturas rdes de 35-40°C (vide figura seguinte).

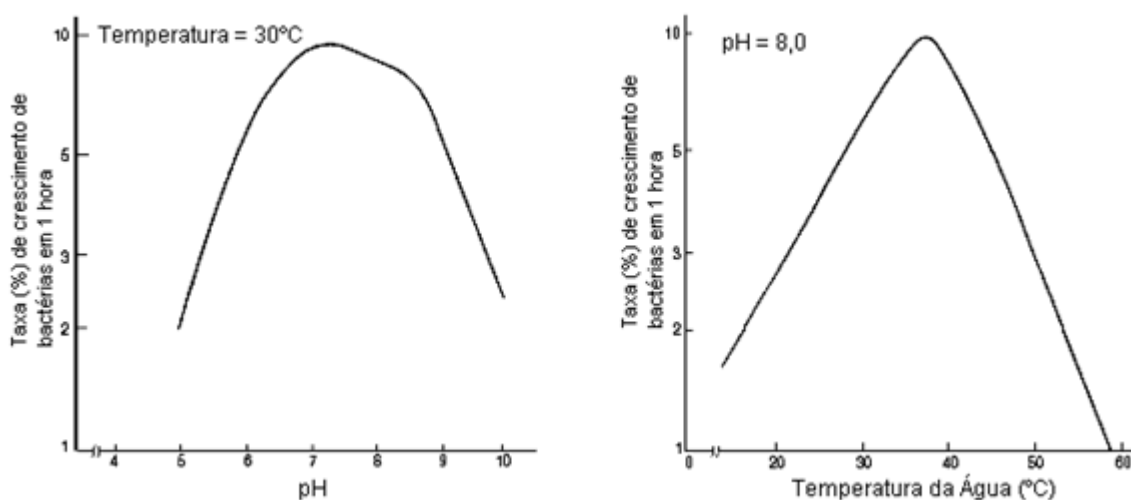


FIGURA 28: INFLUÊNCIA DO pH E DA TEMPERATURA NO CRESCIMENTO DE BACTÉRIAS TOTAIS EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO (SUZUKI, T., 1999<sup>15</sup>).

<sup>15</sup> SUZUKI, T. (ed.): KURITA HANDBOOK OF WATER TREATMENT. 2ª Ed. Tokyo. Kurita Water Industries Ltd. 1999.

#### **5.3.1.4 Luz solar**

A incidência de luz solar (direta ou indiretamente) contribui bastante para o desenvolvimento de organismos clorofilados (que fazem fotossíntese, ou seja, obtém energia através de reações químicas envolvendo a luz solar); as representantes dessa classe de organismos são as algas, unicelulares ou pluricelulares.

Certas áreas dos sistemas de resfriamento são submetidas à luz solar, tais como "decks" superiores de distribuição, bacias, etc. O impedimento da penetração de luz solar nessas áreas ajuda, e muito, no controle da infestação de algas no sistema.

#### **5.3.1.5 Oxigênio Dissolvido**

Geralmente, as águas de resfriamento possuem concentrações razoáveis de O<sub>2</sub> dissolvido, o que aumenta o desenvolvimento de microrganismos aeróbios (que utilizam o oxigênio em seu metabolismo vital de obtenção de energia). Muitos microrganismos anaeróbios são intolerantes ao oxigênio e acabam morrendo na presença do mesmo. No entanto, é comum a existência de áreas estagnadas, tais com sob depósitos, colônias de microrganismos aeróbios ou locais de pouca circulação de água onde se criam zonas com ausência de oxigênio; assim, estas áreas podem alojar microrganismos anaeróbios, tais como as bactérias redutoras de sulfato (SRB's), causadoras de corrosão.

#### **5.3.1.6 Material em Suspensão – Turbidez**

O material em suspensão contribui para o crescimento microbiológico de duas maneiras: ainda quando suspenso, pode servir de suporte para microrganismos unicelulares que tendem a se fixar sobre superfícies. Quando o material suspenso se deposita em locais de baixa circulação de água (tal como no fundo das bacias ou extremidades inferiores de equipamentos), pode criar condições favoráveis ao surgimento de outras espécies de organismos contaminantes, tais como bactérias anaeróbias.

### **5.3.1.7 Velocidade do Escoamento da Água**

Mecanicamente, a água é capaz de movimentar e até mesmo remover material microbiológico depositado nos circuitos de resfriamento. No entanto, locais com baixa velocidade da água permitem o depósito de material e/ou a adesão de biofilme. Velocidades de fluxo da ordem de 0,5 m/s ou superiores são capazes de prevenir o desenvolvimento de biofilmes significativos, enquanto que valores de 0,1 m/s são suficientes para impedir a decantação de lodo. Como regra geral, deve-se evitar ao máximo, durante o projeto do sistema, locais com baixa circulação de água; ou então, nesses locais, permitir uma fácil limpeza ou retirada do material sedimentado, através de drenos, fundos inclinados de bacias, etc.

## **6 - TRATAMENTO QUÍMICO DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO**

Um dos métodos mais empregados para o tratamento da água de resfriamento é através de insumos químicos, que visam combater o desenvolvimento de incrustações, crescimento microbiológico e a ocorrência de processos corrosivos.

Existem outros métodos, não químicos, que também se propõem a atingir estes objetivos, e serão comentados oportunamente.

### **6.1 - PREVENÇÃO DAS INCRUSTAÇÕES**

Basicamente, o controle de incrustações em sistemas de resfriamento é feito através de dois mecanismos:

#### **6.1.1 - Flocculante**

Este método é bastante utilizado para combater incrustações de origem orgânica, tais como contaminações da água por materiais de processo (óleos, hidrocarbonetos, etc.),

microrganismos e produtos originados de seu metabolismo (proteínas, lipídeos, polissacarídeos), lodos de maneira geral, material particulado, etc.

Para este propósito, utilizam-se normalmente polímeros (também chamados polieletrólitos) que aglutinam as substâncias indesejadas, através de interações elétricas e adsorção física. Com isto, forma-se um floco leve e fofo que é retirado pelos sistemas de descarga e/ou através de um filtro colocado em paralelo ao circuito da água do sistema (chamado "side stream filter").

A escolha do polímero deve recair sobre as seguintes propriedades:

- Carga elétrica, relacionada com as impurezas a serem removidas (polímero catiônico ou aniônico e respectiva intensidade da carga).
- Peso molecular, responsável pelo tamanho do floco formado e pela capacidade de adsorção dos contaminantes.
- Funcionalidade do polímero, ou seja, o mesmo deve possuir solubilidade em água, manter estabilidade nas condições do sistema e possuir reatividade e interação seletiva com as espécies presentes.

Normalmente, o mecanismo floculante não exerce efeito significativo na prevenção de incrustações de origem inorgânica, embora consiga reduzir, em alguns casos, a concentração de alguns sais presentes na água. Este mecanismo é comumente utilizado em circuitos abertos de resfriamento (de uma só passagem) ou de resfriamento por aspersão ("spray-pond"), onde a contaminação por material orgânico muitas vezes é significativa.

### 6.1.2 - Mecanismo Dispersante

Este é o mecanismo mais utilizado para prevenção de incrustações de origem inorgânica, apresentando uma série de qualidades que o tornam eficaz mesmo para sistemas que trabalham com elevadas concentrações de sais.

Os princípios de ação utilizados por este tipo de tratamento são:

1. Efeito Limiar ("Threshold"): Também chamado de "seqüestração", é caracterizado pela redução na tendência de precipitação de compostos de cálcio, magnésio, ferro e manganês, causando um atraso na precipitação desses sais mesmo quando o dispersante é dosado em quantidades sub-estequiométricas. Isto é possível porque o produto reage somente com a espécie química que está na iminência de se precipitar, sendo assim consumido somente por uma pequena fração da espécie. As principais classes de produtos que exibem estas propriedades são os polifosfatos, fosfonatos (compostos organofosfóricos – vide detalhes adiante) e polímeros/copolímeros (acrílicos, maleicos, estireno-sulfonados, carboxílicos etc.).
2. Ação dispersiva: Apresentada comumente por compostos organofosfóricos e polieletrólitos, que por sua vez tendem a se adsorver sobre a superfície de partículas em suspensão, tais como núcleos de precipitação de sais. O produto adsorvido sobre a partícula confere-lhe cargas elétricas, fazendo com que as mesmas exerçam forças de repulsão entre elas e, assim, permaneçam dispersas. Em outras palavras, a ação dispersiva atua de modo oposto à coagulação.
3. Efeito Surfactante: Normalmente empregado para agir contra material orgânico, principalmente quando originado do desenvolvimento microbológico (estes particularmente são chamados "biodispersantes", que facilitam a ação dos biocidas). Normalmente são compostos que aumentam a hidratação das partículas, solubilizando-as e mantendo-as dispersas, sem tendência a se depositarem. Em algumas aplicações, os surfactantes são usados para emulsionar hidrocarbonetos para facilitar sua eliminação pelas descargas. O princípio de ação dos surfactantes é semelhante ao de um detergente ou sabão: um dos extremos da molécula interage com o material orgânico, e o outro extremo é solúvel em água. Normalmente, utilizam-se produtos a base de compostos etoxilados ou copolímeros de óxidos de etileno-propileno combinados (EO-PO).
4. Modificação de Cristais: Sem tratamento, as incrustações inorgânicas são formadas por retículos cristalinos que se desenvolvem de maneira bem regular, o que favorece seu crescimento após a formação e aderência sobre as superfícies metálicas. A

modificação de cristais age através da distorção dos mesmos, impedindo seu crescimento ordenado e alterando sua forma. Com isso, os cristais tendem a não se aderir sobre as superfícies e permanecem dispersos no líquido, favorecendo sua eliminação pelas descargas. Alguns produtos orgânicos naturais, tais como ligninas e taninos, foram e ainda são usados com esta finalidade; ultimamente, o uso de polímeros e copolímeros sintéticos específicos (poliacrilatos, maleicos, fosfocarboxílicos, entre outros) tem se mostrado mais vantajoso.

Muitas vezes, um único produto pode apresentar duas ou mais das características mencionadas, sendo que a escolha deve levar em consideração os principais contaminantes presentes na água, tendência de acúmulo de material orgânico e, evidentemente, o custo global do tratamento.

Nas figuras a seguir, estão ilustrados alguns cristais submetidos a tratamentos com diferentes classes de dispersantes.

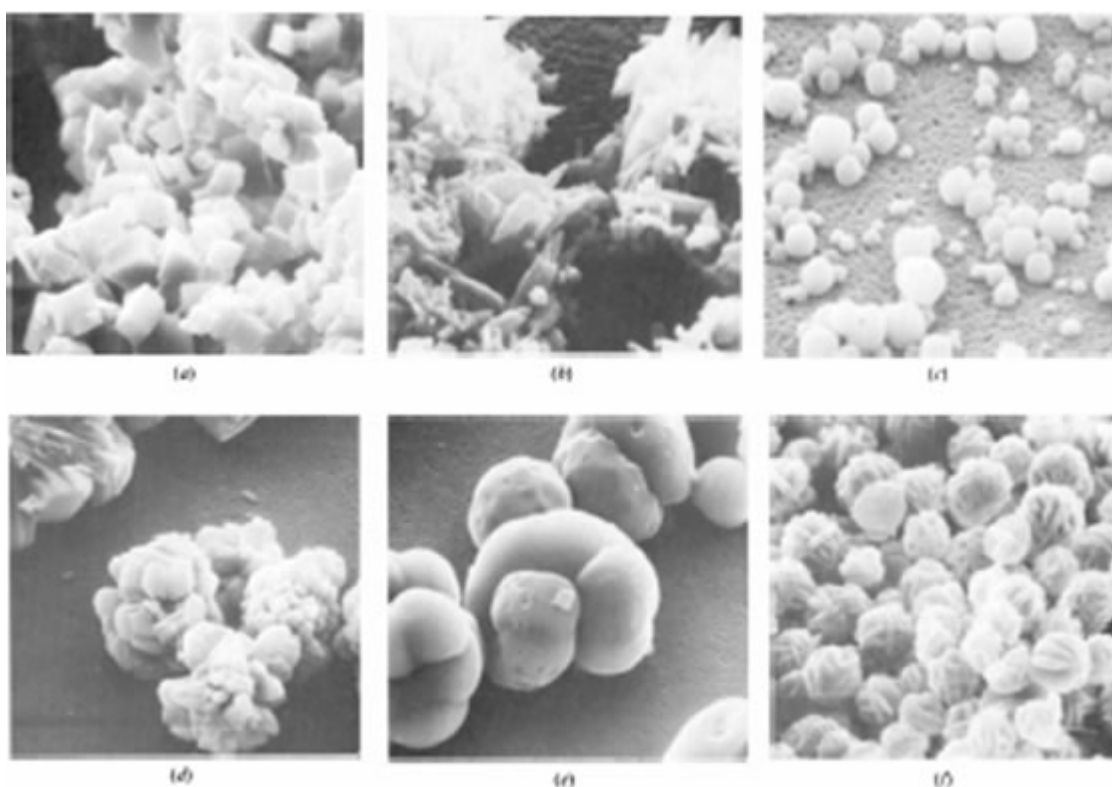


FIGURA 29: CRISTAIS DE CARBONATO DE CÁLCIO: (A) PRECIPITADO COMO CALCITA (FORMA CRISTALINA PREDOMINANTE EM BAIXAS TEMPERATURAS). (B) PRECIPITADO COMO ARAGONITA (PREDOMINANTE EM ALTAS TEMPERATURAS). (C) DISTORÇÃO CAUSADA POR TRATAMENTO COM POLIACRILATO. (D) MUDANÇAS NA ESTRUTURA DO PRECIPITADO. (E) ESTRUTURA

"Tratamento de Água - Sistemas de Resfriamento"

RESULTANTE DE TRATAMENTO COM COPOLÍMERO SULFONADO. (F) DISTORÇÕES PRODUZIDAS POR UMA MISTURA DE FOSFONATO E POLIACRILATO.

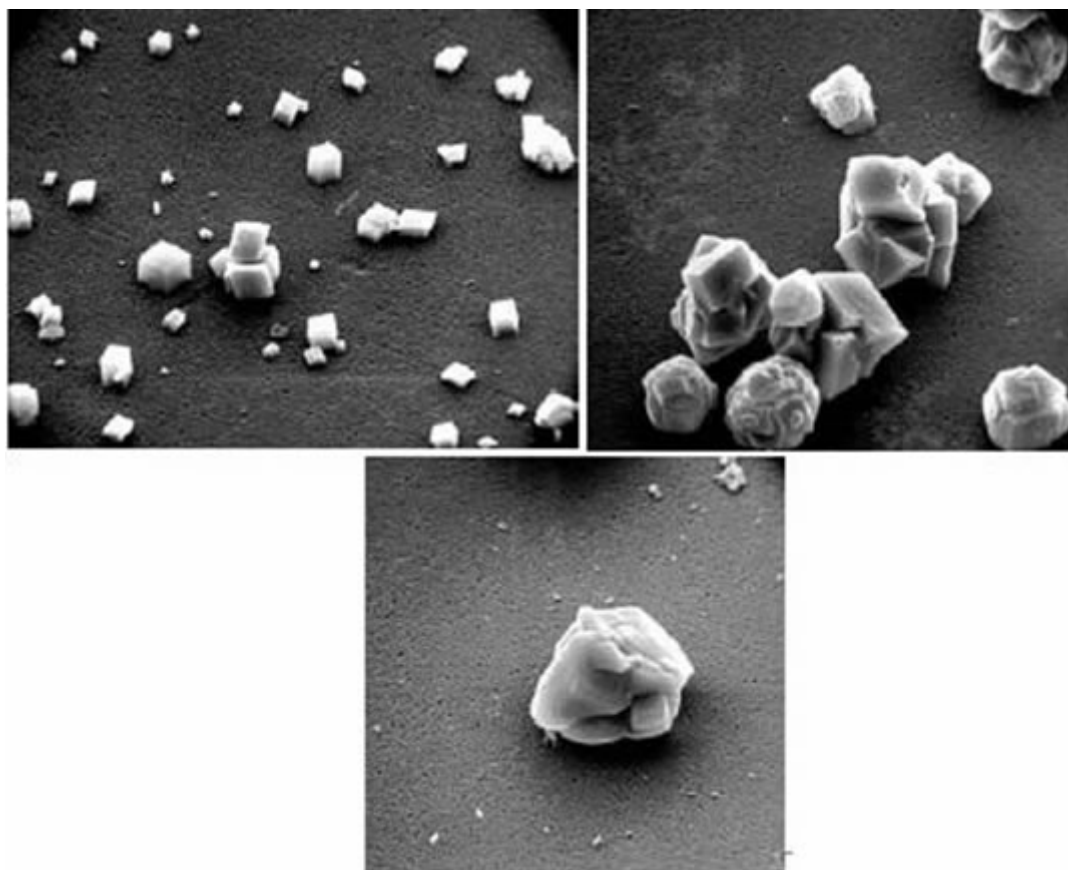


FIGURA 30: CRISTAIS DE SULFATO DE CÁLCIO. ACIMA, À ESQ.: SEM TRATAMENTO. ACIMA, À DIR.: APÓS TRATAMENTO COM FOSFONATO (PBTC). ABAIXO: APÓS TRATAMENTO COM POLIACRILATO (ROHM AND HAAS, 1997)<sup>16</sup>

<sup>16</sup> ROHM AND HAAS: ACUMER® 1000, 1020, 1100, 1110 SCALE INHIBITORS. Technical Bulletin. Rohm and Haas Company. Philadelphia. 1997.



### 6.1.3 - Outros Métodos de Prevenção das Incrustações

Além do tratamento químico, ou em conjunto com o mesmo, as incrustações podem ser evitadas utilizando-se métodos alternativos, tais como:

1. Condicionamento Magnético de Cristais: Consiste na aplicação de um campo magnético com frequência e intensidade específicas que distorce, fisicamente, a estrutura cristalina do cristal, de modo semelhante ao que é feito com produtos químicos. Os cristais distorcidos podem então ser removidos pelas descargas.
2. Pré-Tratamento: Consiste em remover, antecipadamente, o material dissolvido e em suspensão na água de alimentação do sistema. Normalmente empregam-se aparelhos de troca iônica (abrandadores e/ou desmineralizadores) para remoção dos sais dissolvidos. Para eliminar o material suspenso, utiliza-se uma clarificação da água seguida por filtração, podendo inclusive ser feita uma cloração para ajudar no controle de desenvolvimento microbiológico.
3. Reaproveitamento de Águas Condensadas: Em certos casos onde há escassez de água ou baixa qualidade da mesma, é viável a utilização de condensados para alimentação do sistema de resfriamento. O condensado é uma água com baixíssima concentração de sais dissolvidos, o que minimiza a formação de incrustações. Evidentemente, o condensado deve ser resfriado à temperatura mais baixa possível antes de ser alimentado ao sistema, usando para isso trocadores de calor e torres de resfriamento específicas.

## 6.2 - COMBATE À CORROSÃO

Devido aos inúmeros mecanismos e formas existentes, o controle da corrosão é sempre uma tarefa complicada e, muitas vezes, não conseguimos eliminar completamente a ocorrência de processos corrosivos de modo economicamente viável. Frequentemente, o controle da corrosão deve ser feito de modo a permitir a convivência com o problema, colocando-a em níveis aceitáveis.

A prevenção da corrosão deve começar já no projeto das instalações, através da escolha adequada dos metais e demais materiais constituintes do sistema<sup>17</sup>. Atualmente, dispomos de uma infinidade de materiais plásticos com várias aplicações e propriedades específicas, que podem (e devem) ser utilizados sempre que possível. A utilização de fibra de vidro também é recomendada e vários fabricantes de torres de resfriamento utilizam este material em seus equipamentos.

Em determinadas aplicações, o uso de metais faz-se necessário, principalmente quando forem exigidas propriedades de resistência mecânica e facilidade de condução e troca de calor. Nestes casos, a combinação correta de metais e ligas é de fundamental importância para se evitar o processo de corrosão galvânica, que costuma ser bastante agressivo; assim, a recomendação é evitar a associação de metais com potenciais de oxidação muito distintos e, caso isto seja impossível, deve-se evitar o contato elétrico direto entre eles, através de materiais isolantes. Finalmente, o alívio de tensões internas no metal (que corrige os defeitos de arranjo cristalino no grão) e o aterramento conveniente das partes metálicas (evitando acúmulo de cargas elétricas no conjunto), também auxiliam no controle de corrosão.

A escolha do local da instalação do sistema também contribui para o controle da corrosão (e também para a formação das incrustações e desenvolvimento microbiológico). Deve-se evitar instalações próximas à emissões de chaminés, atmosferas potencialmente ácidas, material particulado, etc. Lembramos que os sistemas de resfriamento com ventiladores fazem uma sucção significativa do ar nas redondezas, fazendo com que o mesmo e todos os seus contaminantes entrem em contato com a água.

---

<sup>17</sup> Um bom guia para escolha dos materiais é:  
TELLES, P. C. S.: MATERIAIS PARA INDÚSTRIA DE PROCESSOS. 6ª Ed. Rio de Janeiro. Editora Interciência. 2003.

Por fim, a qualidade da água de alimentação do circuito de resfriamento também deve ser considerada, levando-se em conta o balanço das características corrosivas/incrustantes da mesma.

Para controle da corrosão em sistemas de resfriamento, os métodos usualmente empregados são:

### **6.2.1 - Tratamentos de Superfície**

Os metais normalmente utilizados nos sistemas de resfriamento (principalmente aço carbono, ferro e ferro fundido) podem receber tratamentos anticorrosivos em sua superfície, que impedem que o metal entre em contato direto com o ambiente. Estes tratamentos podem ser feitos com base em processos de galvanoplastia (tais como cromação, galvanização, niquelação, etc.) ou através de pinturas ou coberturas específicas (zarçõ, primers, fosfatizantes, tintas epóxi, recobrimento com PVC, entre outras).

Ao ser aplicado este tipo de tratamento, deve-se assegurar a integridade do filme de proteção formado, uma vez que qualquer descontinuidade ou falha no mesmo pode ocasionar pontos de corrosão localizada.

### **6.2.2 - Inibidores de Corrosão**

São os métodos de controle de corrosão mais empregados em sistemas de resfriamento. Seus princípios de funcionamento baseiam-se no impedimento ou diminuição nas reações de óxido-redução que caracterizam os processos corrosivos. Assim, podemos classificar os inibidores de corrosão em duas classes: inibidores anódicos e inibidores catódicos, ou ainda aqueles que apresentam ambas as propriedades.

Como regra geral, normalmente são empregadas combinações de inibidores de corrosão, visando controlar a corrosão em todas as frentes. Estas associações produzem um efeito sinérgico, onde as propriedades da combinação de inibidores são superiores às suas utilizações isoladas. Como exemplo, podemos citar os inibidores a base de polifosfato e/ou fosfonato zinco, cromato-polifosfatos, orgânicos-zinco, etc.

Uma vasta discussão sobre inibidores de corrosão, não somente para sistemas de resfriamento, pode ser encontrada em NATHAN<sup>18</sup>, C.C (ed.) (1973).

### 6.2.2.1 Inibidores Anódicos

Como o próprio nome diz, estes inibidores atuam essencialmente nas áreas anódicas do metal, onde há fuga de elétrons e formação de átomos com estados de oxidação superiores (tais como o  $\text{Fe}^{2+}$ ). Os inibidores anódicos funcionam basicamente de duas formas: 1) reagem com os íons metálicos produzidos no ânodo e formam um filme de óxidos combinados, isolando o metal base e impedindo o prosseguimento das reações anódicas. 2) Formam um filme adsorvido sobre a superfície anódica, impedindo o fluxo de íons e elétrons nessa região, além de isolá-la do contato direto com o ambiente.

Tendo em vista a forma como atuam, estes inibidores necessitam entrar em contato com a superfície do metal para que sejam efetivos. Assim, em locais onde existem depósitos ou incrustações, estes inibidores não funcionam adequadamente e pode haver corrosão acelerada nos locais não protegidos. Também são necessárias concentrações mínimas destes inibidores na água do sistema, de modo a garantir a proteção de toda a superfície exposta do metal; caso sejam subdosados, também pode ocorrer corrosão localizada.

Os principais inibidores de corrosão anódicos são:

1. Cromatos: É sem dúvida o melhor e um dos mais eficientes inibidores de corrosão anódicos; formam uma fina película passivante de óxido de cromo e ferro ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), muito aderente e duradoura. Atualmente não são mais empregados, devido à sua elevada toxidez<sup>19</sup> e agressividade à flora e fauna aquáticas.

---

<sup>18</sup> NATHAN, C.C.(ed.): CORROSION INHIBITORS. Houston. NACE - National Association of Corrosion Engineers. 1973.

<sup>19</sup> O limite máximo tolerável de cromo em efluentes para despejo em cursos d'água é de 0,5 mg/l p/ cromo hexavalente e 2,0 mg/l de cromo trivalente. Além disso, a legislação brasileira permite uma concentração máxima de 0,05 e 0,5 mg/l de Cr (hexa e trivalente, respectivamente) nas águas doces, salobras e salinas do território nacional (CONAMA, Res. N.º 20 de 18/06/1986. [www.mma.gov.br/port/conama/res/resol86/res2086.html](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/resol86/res2086.html). (Acesso em 12/09/2004)

2. Ortofosfatos: Atuam através da formação de um filme cristalizado de ortofosfato de ferro ( $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ ). Porém, este filme é mais espesso, poroso e menos resistente que o formado pelo cromato. Em alguns casos, o uso de ortofosfatos pode aumentar a incidência de incrustações de cálcio (fosfato de cálcio) e, por isso, normalmente é usado em conjunto com inibidores de incrustação poliméricos.
3. Molibdatos, Tungstos: Agem de modo semelhante ao cromato. Seu uso em sistemas abertos de resfriamento não é muito difundido devido ao elevado custo. No entanto, é empregado com sucesso em sistemas fechados.
4. Nitritos: Apresentam excelente efeito de inibição de corrosão em aço carbono, porém não são utilizados em sistemas abertos devido à toxidez e por ser facilmente decomposto em nitrato, por ação de nitrobactérias. Apesar disso, é utilizado com sucesso em sistemas fechados, principalmente quando associados a inibidores catódicos tais como os boratos.
5. Lignosulfonados e Taninos: Tendem a formar um filme orgânico adsorvido sobre a superfície do metal, protegendo-o assim da corrosão. Em alguns casos, necessitam de dosagens relativamente elevadas e são suscetíveis à decomposição, principalmente quando se usam biocidas oxidantes (cloro, bromo, etc.). Por serem de origem orgânica e biodegradáveis, não são tóxicos ao ambiente e não comprometem o efluente gerado pelas descargas. Alguns taninos modificados exercem, ainda, uma função bacteriostática, que auxilia no controle microbiológico.
6. Polímeros: Certos polímeros de baixo peso molecular, tais como poliacrilatos e polimaleatos, exibem propriedades de inibição de corrosão quando usados em águas com concentrações razoáveis de carbonato de cálcio. O mecanismo proposto é da formação de uma camada de carbonato de cálcio dispersa que, precipitada sobre a superfície do metal, impede a corrosão. Devido à ação dispersante do polímero, a camada não se desenvolve e não constituirá uma incrustação.

7. Silicatos: Formam um filme adsorvido sobre a superfície do metal. Sua performance é muito afetada pelas condições operacionais (pH, temperatura, qualidade da água) e, por isso, também são pouco utilizados em sistemas abertos. Apresentam o risco de formação de incrustações de sílica extremamente duras. São normalmente empregados em sistemas fechados, incluindo circuitos de água quente e de salmoura refrigerada.

### **6.2.2.2 Inibidores Catódicos**

Estes inibidores agem preferencialmente, porém não obrigatoriamente, nas zonas catódicas dos processos corrosivos. O mecanismo de ação também se baseia na formação de barreiras e filmes protetivos, que restringem o fluxo de íons hidrogênio, hidroxilas e oxigênio para as superfícies catódicas, que completam as reações de corrosão.

Os principais inibidores catódicos usados em sistemas de resfriamento são:

1. Polifosfatos: Apresentam boa inibição de corrosão quando íons de metais bivalentes estiverem presentes na água, tais como cálcio. Além da inibição da corrosão, os polifosfatos também atuam como inibidores de incrustação. Seu uso combinado com zinco apresenta resultados superiores ao uso isolado do polifosfato, principalmente em águas com concentrações baixas de cálcio. Os polifosfatos usualmente empregados (pirofosfatos, tripolifosfatos e hexametáfosfatos) têm o inconveniente de reverterem-se quimicamente a ortofosfatos, podendo causar incrustações quando associados ao cálcio. Além disso, excesso de fosfatos em águas de resfriamento favorece o desenvolvimento microbiológico, principalmente de algas.

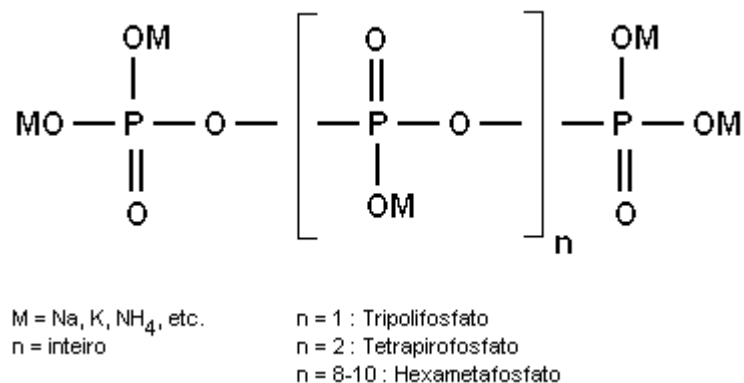


FIGURA 31: FORMAS MOLECULARES BÁSICAS DOS POLIFOSFATOS

2. Zinco: São usualmente empregados em combinações com outros inibidores de corrosão (polifosfatos, fosfonatos, etc.), pois seu uso isolado tem se mostrado pouco eficiente. Apresenta dois mecanismos propostos de ação: A) Formação, no cátodo, de um filme insolúvel de hidróxido de zinco – Zn(OH)<sub>2</sub> – devido à disponibilidade de íons hidroxila nessa região; B) Formação de filme de ortofosfato de zinco – Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> – ou um complexo de fosfonato/ zinco quando associado a um polifosfato ou fosfonato, respectivamente. O efeito sinérgico da associação de zinco com outros inibidores pode ser visto na figura abaixo. Um inconveniente do uso de zinco em sistemas de resfriamento é a sua precipitação quando o pH do meio ultrapassa 8,2, podendo inclusive formar incrustações.

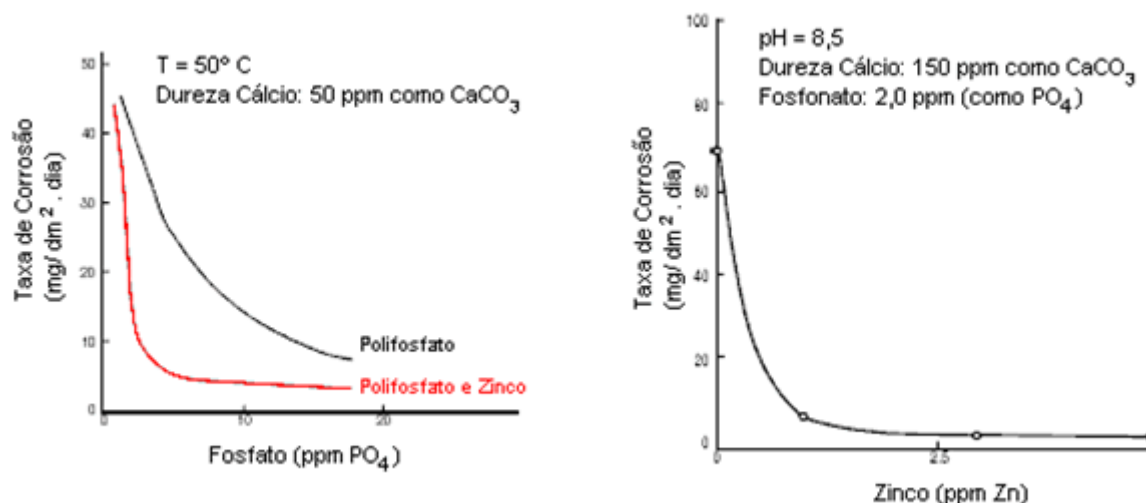


FIGURA 32: EFEITO PROMOVIDO NA INIBIÇÃO DA CORROSÃO EM AÇO CARBONO DE POLIFOSFATO (ESQ.) E FOSFONATO (DIR.) QUANDO ASSOCIADOS COM ZINCO (SUZUKI, T.; KURITA WATER INDUSTRIES LTD., 1999).

3. Carbonato de Cálcio: Quando devidamente controlado<sup>20</sup>, um fino depósito de carbonato de cálcio pode agir como inibidor de corrosão, principalmente em águas contendo quantidade razoável de dureza cálcio. No entanto, deve-se atentar para o não desenvolvimento de incrustações que podem causar maiores problemas, sendo de fundamental importância o uso de dispersantes eficientes.

### 6.2.2.3 Inibidores Anódicos e Catódicos Simultâneos

Alguns inibidores atuam sobre as zonas anódicas e catódicas dos processos corrosivos simultaneamente, seguindo basicamente o mesmo princípio de formação de filmes protetivos sobre a superfície metálica. Os principais inibidores deste tipo são:

1. Fosfonatos: São atualmente muito empregados como inibidores de corrosão (principalmente associados ao zinco) e também agem como eficientes

<sup>20</sup> Para este propósito, pode-se utilizar o Índice de Estabilidade de Ryznar como parâmetro de controle, procurando mantê-lo entre 5,0 e 7,0, e o Índice de Langelier entre 0,5 e 1,5 (SIMON, D.E.: MANUAL ON COOLING WATER CORROSION INHIBITORS. Pittsburgh, Exxon Research and Engineering Company. 1978).



antiincrustantes. Trata-se de compostos organofosfóricos, com elevada estabilidade química e com baixa taxa de reversão a ortofosfato, o que os tornam mais vantajosos em relação aos polifosfatos. São usados com sucesso em sistemas com águas de alta dureza e/ou com elevados ciclos de concentração. Os mecanismos admitidos para a inibição de corrosão desses compostos são: A) Quando reagem com cálcio ou zinco, formam partículas carregadas positivamente que são atraídas pelas áreas catódicas (negativamente carregadas), formando um filme nessa região; B) Devido à sua capacidade de seqüestração de íons metálicos, o fosfonato reage com íons ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) formados nas áreas anódicas, impedindo-os de reagir com as hidroxilas e formando um complexo fosfonato-ferro cristalizado sobre a superfície, impedindo fisicamente o prosseguimento das reações de corrosão. Os principais fosfonatos usados em sistemas de resfriamento são: HEDP (hidroxi-etilideno-difosfonato), o ATMP (amino-trimetileno-fosfonato) e o PBTC (fosfono-butano-tricarboxilato), podendo ser encontrados na forma ácida ou como sal; o HEDP é particularmente bastante usado em sistemas de resfriamento devido à sua grande estabilidade frente aos compostos clorados e demais biocidas oxidantes. Na figura seguinte, são mostradas algumas moléculas de fosfonatos.

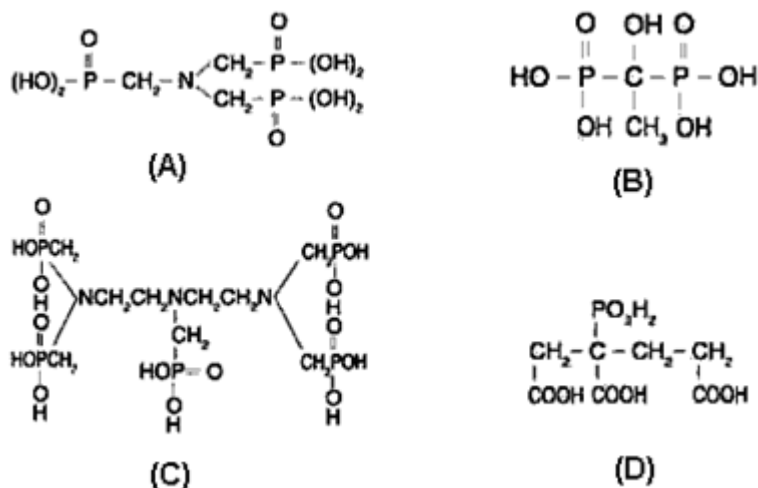


FIGURA 33: ALGUNS FOSFONATOS USADOS EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO.(A): ATMP. (B): HEDP. (C):DTPMPA. (D) PBTC.

2. Aminas e Amidas: São pouco usadas em sistemas abertos, devido ao alto custo e baixa eficiência quando comparadas aos demais inibidores. Formam filme orgânico adsorvido sobre a superfície do metal, minimizando as reações anódicas e catódicas. São comumente utilizadas como inibidores de corrosão em limpezas químicas ácidas.
3. Azóis: São inibidores bastante eficientes para controle de corrosão em equipamentos de cobre ou suas ligas (latão, bronze, etc.). Formam um filme precipitado do azol com o cobre na superfície do metal, impedindo a corrosão e processos de esfoliação da liga, principalmente quando há concentrações significativas de amônia no sistema. Os produtos normalmente utilizados são: mercaptobenzotiazol, o benzotriazol e o toliltriazol (vide figura abaixo). Alguns compostos organofosfóricos usados em sistemas de resfriamento podem atacar equipamentos construídos com ligas de cobre, obrigando assim a utilização deste tipo de inibidor.

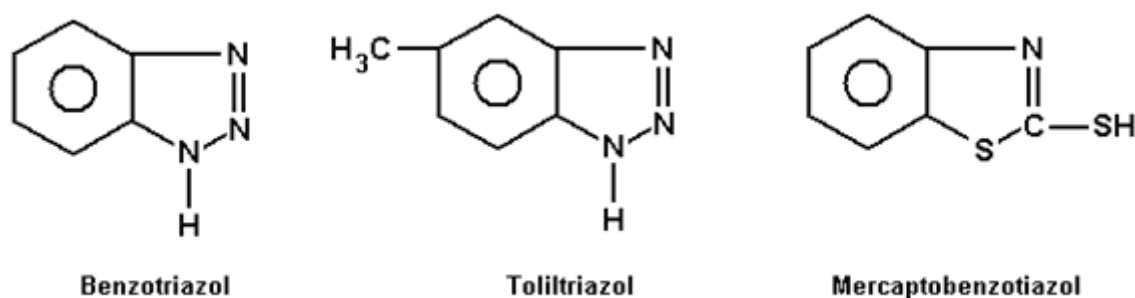


FIGURA 34: ESTRUTURAS QUÍMICAS DE ALGUNS AZÓIS

#### 6.2.2.4 Fatores que Influenciam a Eficiência dos Inibidores de Corrosão

O desempenho e eficiência dos inibidores de corrosão, bem como a ocorrência de processos corrosivos no geral, estão relacionados à qualidade físico-química da água de resfriamento. Basicamente, os fatores que mais influenciam são: pH, condutividade elétrica

da água, dureza cálcio, cloro residual ou outro biocida oxidante e temperatura e velocidade da água. Além disso, alguns compostos usados também no tratamento de água podem comprometer a eficiência dos inibidores de corrosão, tais como biocidas oxidantes fortes, substâncias fortemente catiônicas (quaternários de amônio, polímeros), entre outros.

### 6.2.3 - Outros Métodos de Controle da Corrosão

Dependendo da ocorrência e intensidade dos processos corrosivos, outras medidas devem ser tomadas no sentido de preveni-los. Assim, pode-se empregar um processo de proteção catódica (ânodo de sacrifício), processos de corrente impressa, etc. Estes métodos não serão aqui abordados e informações detalhadas sobre os mesmos podem ser encontradas em várias obras da literatura especializada, tais como GENTIL (2003), PANOSSIAN (1993) e SCULLY (1975)<sup>21</sup>.

## 6.3 - CONTROLE DO DESENVOLVIMENTO MICROBIOLÓGICO ("SLIME")

Um dos grandes problemas encontrados nos sistemas de resfriamento é o crescimento exagerado de microrganismos, principalmente algas, fungos e bactérias. Preventivamente, é desejável a utilização de água com boa qualidade para alimentação do sistema de resfriamento, preferencialmente clarificada, filtrada e clorada/ esterilizada, o que minimiza a entrada de microrganismos no sistema. No entanto, uma vez instalados, o meio usualmente empregado para combatê-los é através do extermínio direto desses seres, o que normalmente é feito através de produtos químicos denominados biocidas. Estes, por sua vez, podem agir especificamente sobre alguma classe de microrganismo, sendo denominados fungicidas, bactericidas e algicidas respectivamente, ou então possuem amplo espectro de ação, matando vários tipos de seres indistintamente.

---

<sup>21</sup> GENTIL, V.: CORROSÃO. 4ª Ed. Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro. 2003.  
PANOSSIAN, Z.: Corrosão e Proteção contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas. IPT. São Paulo. 1993. 2 Vol.  
SCULLY, J. C.: FUNDAMENTALS OF CORROSION. 2ª Ed. Pergamon Press. Oxford. 1975.

Uma prática comum em sistemas de resfriamento é o uso combinado e/ou alternado de dois ou mais princípios ativos, o que potencializa o efeito do biocida. Além disso, a alternância de princípios ativos minimiza as chances de desenvolvimento de resistência por parte dos microrganismos.

Por se tratarem de agentes potencialmente poluidores, deve haver rigoroso critério na escolha do biocida e sua dosagem, de modo a evitar o descarte de água que poderá contaminar ou prejudicar o meio ambiente.

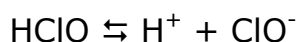
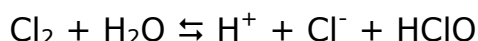
Os biocidas para águas de resfriamento podem ser classificados em dois grupos: oxidantes e não-oxidantes. Detalhes na seqüência.

### **6.3.1 - Biocidas Oxidantes**

Têm seu princípio de ação fundamentado na oxidação da matéria orgânica presente nos seres vivos, destruindo suas estruturas vitais e assim causando a morte dos mesmos. É como se os organismos fossem "queimados" pelo biocida. Os principais representantes desta classe de produtos são:

#### **6.3.1.1 Cloro e Seus Compostos**

O gás cloro ( $\text{Cl}_2$ ), hipoclorito de sódio ou cálcio ( $\text{NaClO}$  e  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ), o dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) e vários outros compostos derivados são freqüentemente empregados no tratamento de águas de resfriamento. Seus princípios de ação fundamentam-se na formação do ácido hipocloroso ( $\text{HClO}$ ), que é o principal responsável pela ação oxidante do composto. As reações envolvidas neste processo estão relacionadas abaixo (tomamos como exemplo de partida o gás cloro):



A dissociação dos compostos clorados para formação do ácido hipocloroso é bastante dependente do pH, o que restringe os processos de cloração em águas a valores de pH abaixo de 8,5. Este fenômeno pode ser visualizado nas curvas da seguinte figura:

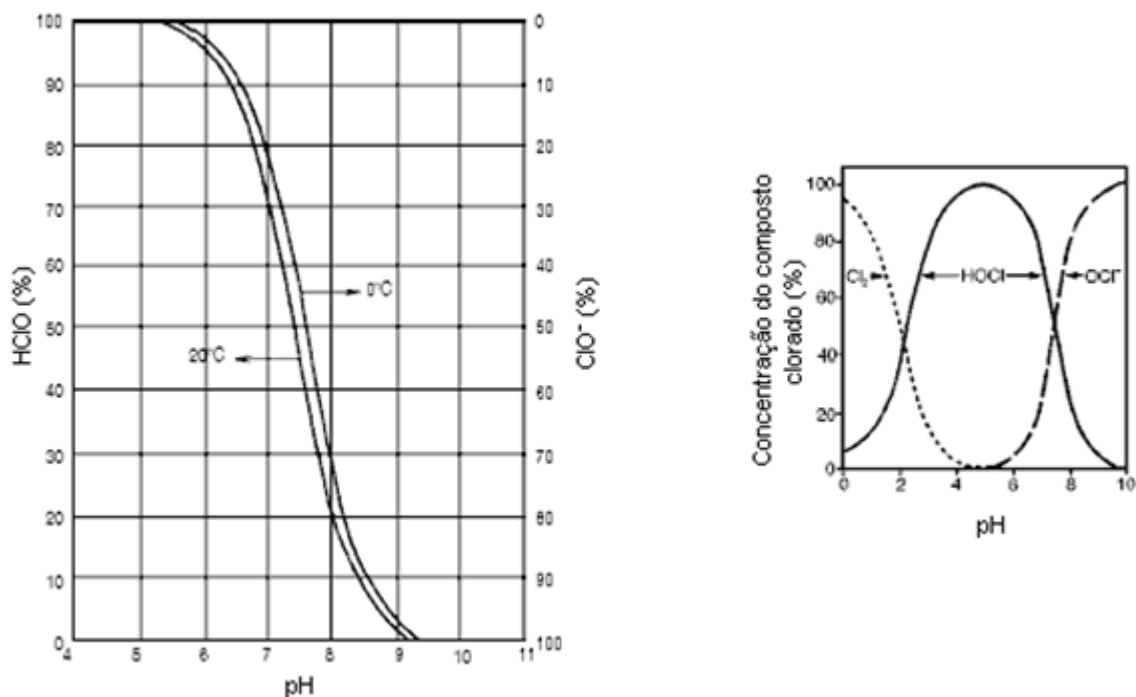


FIGURA 35: CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DO CLORO GASOSO, ÁCIDO HIPOCLOROSO E ÍON HIPOCLORITO EM FUNÇÃO DO pH.

A soma das quantidades de ácido hipocloroso e íons hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ) é denominada "Cloro Livre Disponível" ou "Cloro Residual Livre". Devido à sua reatividade, os compostos clorados oxidam vários componentes presentes na água além do material orgânico, tais como amônia, aminoácidos, proteínas, ferro, manganês, enxofre, cianetos, etc. A quantidade de cloro necessária para reagir com todas estas espécies (incluindo o material orgânico) é chamada "Demanda de Cloro". Particularmente com a amônia, o cloro forma compostos denominados cloraminas, que também possuem ação biocida; o cloro presente nesta forma é então chamado "Cloro Residual Combinado". Finalmente, a soma do cloro combinado com o cloro livre resulta no "Cloro Total".

Apesar de bastante eficiente e de custo relativamente baixo, os compostos clorados tem algumas desvantagens no uso em sistemas de resfriamento, tais como:

- Atuação em faixa limitada de pH
- Baixa estabilidade química principalmente quando submetidos à luz solar.
- Necessita um elevado tempo de contato para agir satisfatoriamente.
- Oxidação superficial, não atingindo as camadas inferiores dos biofilmes mais espessos.
- Não são seletivos na atuação, oxidando todo o material no qual entram em contato, inclusive o ferro e demais metais do sistema (aumenta incidência de corrosão).
- Em alguns casos, as cloraminas em excesso podem causar odores desagradáveis.
- Residuais de cloro livre elevados podem causar degradação nos produtos usados para inibição da corrosão e incrustações, comprometendo a eficiência do tratamento.
- Consumo excessivo do biocida quando a demanda de cloro for elevada (água com elevada concentração de material orgânico ou sujeita a freqüentes e/ou intensas contaminações externas). Esta desvantagem também é válida para qualquer outro biocida oxidante.

Nas últimas décadas, desenvolveu-se uma classe especial de compostos orgânicos clorados, denominados comercialmente como "cloro estabilizado" ou "cloro orgânico". Os principais representantes desta classe são o dicloro-isocianurato de sódio (ou dicloro-s-triazina-triona), o ácido tricloro-isocianúrico e o dicloro-dimetil-hidantoína (este também pode estar associado ao bromo, cuja performance é melhorada em pH mais altos).

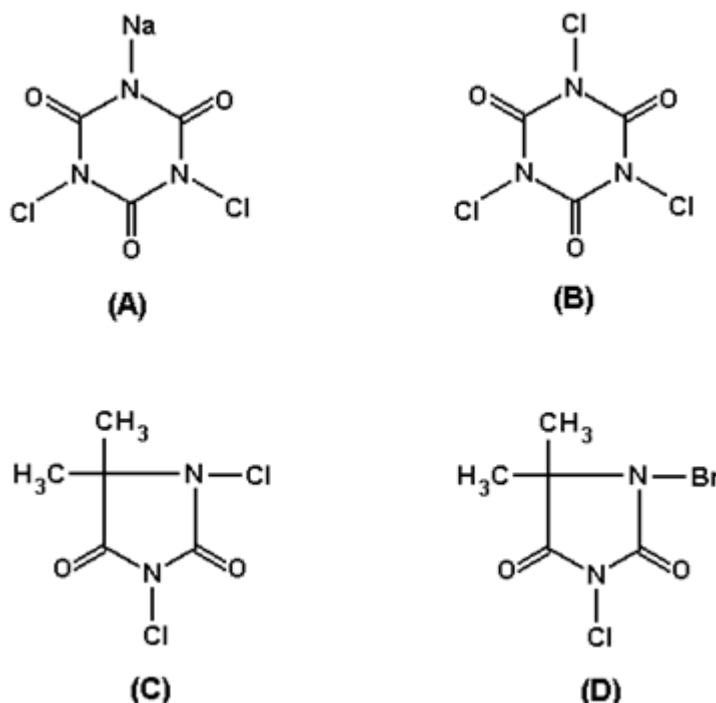


FIGURA 36: REPRESENTAÇÃO DAS MOLÉCULAS DE ALGUNS COMPOSTOS DE CLORO ORGÂNICOS: (A) DICLORO-ISOCIANURATO DE SÓDIO. (B) ÁCIDO TRICLOROISOCIANÚRICO. (C) DICLORO-DIMETIL-HIDANTOÍNA. (D) CLORO-BROMO-DIMETIL-HIDANTOÍNA.

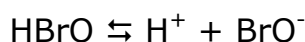
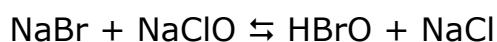
Este tipo de composto apresenta uma ação superior aos produtos clorados tradicionais, pois têm preferência na atuação contra o material orgânico, maior estabilidade fotoquímica, liberam o material oxidante (ácido hipocloroso) lenta e continuamente e produzem alguns subprodutos (tais como o cianurato de sódio ou a hidantoína) que possuem ação biocida residual, aumentando a eficiência global do composto.

Estes produtos têm sido aplicados com sucesso em sistemas de resfriamento de água e em tratamento de águas de piscinas, principalmente porque não tendem a formar os chamados trihalometanos (substâncias organocloradas consideradas precursoras de câncer em seres humanos). Maiores detalhes sobre o assunto, incluindo informações sobre os cloro-estabilizados, podem ser encontradas em MACEDO (2001), FERREIRA F.<sup>o</sup> (2001) e HIDROALL (2000)<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> MACEDO, J.A.B.: SUBPRODUTOS DO PROCESSO DE DESINFECÇÃO DE ÁGUA PELO USO DE DERIVADOS CLORADOS. J. de Fora, Jorge Macedo. 2001.

### 6.3.1.2 Compostos de Bromo

De modo análogo ao cloro, o bromo também exerce efeito biocida principalmente através do ácido hipobromoso (HBrO). Na prática, este ácido pode ser produzido a partir da reação do brometo de sódio (ou potássio, ou amônio) com hipoclorito de sódio. As reações envolvidas são:



O bromo apresenta algumas vantagens sobre o cloro:

- É mais eficiente em valores mais altos de pH.
- Apresenta maior estabilidade química, principalmente em relação à luz solar.
- É mais rápido que o cloro, requerendo menos tempo de contato com o material a ser tratado.
- Requer uma quantidade menor de oxidante para um mesmo efeito biocida, o que reduz a incidência de processos corrosivos e a degradação dos outros produtos destinados ao tratamento de água.

Alguns produtos desenvolvidos recentemente, intitulados "bromo estabilizados" dispensam a reação "in-situ" entre o hipoclorito e o brometo. Tais compostos são capazes de liberar convenientemente o ácido hipobromoso e já vem prontos para uso, na forma líquida, em tabletes ou em gel.

### 6.3.1.3 Peróxidos

Devido ao seu poder oxidante, alguns peróxidos, principalmente o peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) podem ser usados para controle do desenvolvimento microbológico em sistemas de resfriamento. Normalmente, estes compostos são dosados diretamente no

---

FERREIRA FILHO, S. S.: Remoção de compostos orgânicos precursores de subprodutos da desinfecção e seu impacto na formação de trihalometanos em águas de abastecimento. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.6, n.1 e 2, Jan/Junho 2001.  
HIDROALL: HCL 56, HCL 60, HCL 90 e AVICLOR: Boletins Técnicos. Campinas, Hidroall Ltda. 2000.



equipamento que está apresentando problemas (tais como biofilmes em trocadores de calor). Tem a desvantagem de ser bastante volátil, o que diminui sua eficiência, além de poder aumentar os processos corrosivos.

#### **6.3.1.4 Ozônio**

De modo semelhante aos peróxidos, o ozônio (um alótropo do oxigênio de fórmula  $O_3$ ) também pode ser usado como sanitizante em águas de resfriamento. No entanto, devido ao alto custo dos equipamentos destinados à geração desse gás e à sua volatilidade extremamente alta, é usado somente em alguns casos particulares. Por outro lado, o ozônio é empregado com certa frequência no tratamento de água potável e também em alguns efluentes.

### **6.3.2 - Biocidas Não-Oxidantes**

Esta classe de biocidas, representada por inúmeros compostos químicos distintos, apresentam mecanismos de ação peculiares e específicos para o controle dos microrganismos. A tendência atual é utilizar produtos de ação relativamente rápida, eficientes na eliminação dos microrganismos de interesse, de baixa toxidez ao ser humano e demais animais e plantas superiores, que apresente elevada degradabilidade e, finalmente, de baixo impacto ambiental.

Os biocidas não-oxidantes mais usados em sistemas de resfriamento são:

#### **6.3.2.1 Quaternários de Amônio e Aminas Complexas**

São compostos altamente catiônicos, que tendem a se adsorver nas superfícies (negativamente carregadas) das células dos microrganismos, afetando a permeabilidade celular e causando sua destruição. Apresenta velocidade de ação rápida (poucas horas), possui amplo espectro de ação contra fungos, bactérias anaeróbias e aeróbias e algumas classes de algas, sendo efetivo numa faixa de pH entre 5,0 e 9,0; devido às suas

características tensoativas, é capaz de agir também como biodispersante, embora não tão eficientemente. As principais desvantagens do uso dessa classe de compostos são: formação de espuma e incompatibilidade com produtos aniônicos para tratamento da água, como inibidores de corrosão/ incrustação.

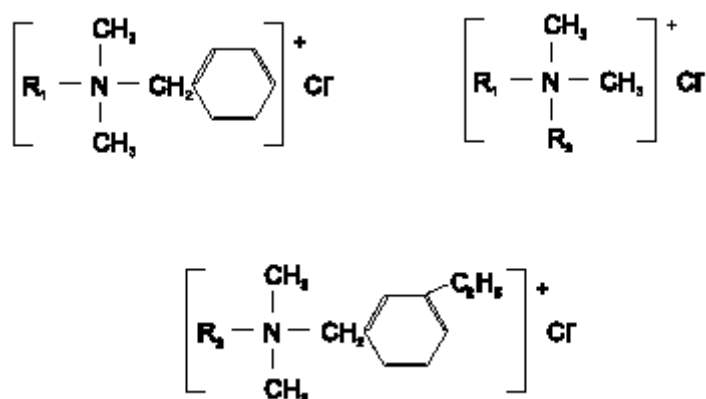


FIGURA 37: ALGUNS EXEMPLOS DE MOLÉCULAS DE QUATERNÁRIO DE AMÔNIO ("QUAT"), TAMBÉM CHAMADOS DE "CLORETO DE BENZALCÔNIO".

### 6.3.2.2 Carbamatos

São compostos organossulfurosos, possuindo grupos ativos de carbono, enxofre e nitrogênio em certas configurações, os que lhes confere o poder biocida. São bastante efetivos contra bactérias e fungos e, em menor proporção, contra algas. Por ser um agente quelante forte, os carbamatos seqüestram elementos essenciais da parede celular, causando sua morte. Apresentam velocidade de ação média (2 a 4 horas) e caráter aniônico, tornando-os compatíveis com inibidores de corrosão e dispersantes. As desvantagens dos carbamatos incluem o odor forte, a formação de precipitados com o ferro e baixa atividade em valores de pH iguais ou acima de 8,0.

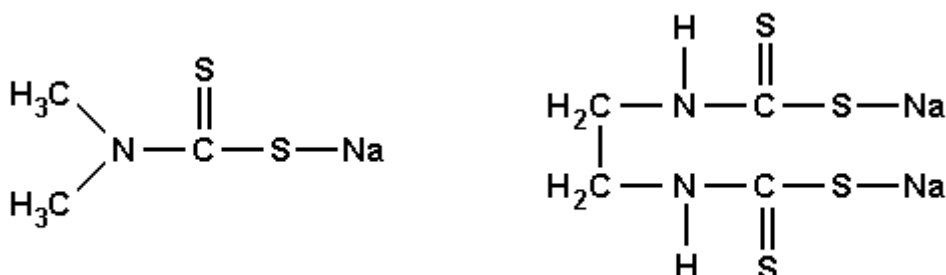


FIGURA 38: DOIS CARBAMATOS MAIS USADOS EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO: (ESQ.) DIMETIL DITIOCARBAMATO DE SÓDIO; (DIR) ETILENO-BIS-DITIOCARBAMATO DE SÓDIO ("NABAM")

### 6.3.2.3 Organotiocianatos

Apresentam o grupo funcional ( $S - C \equiv N$ ), muito reativo com as enzimas associadas às paredes celulares dos microrganismos, principalmente bactérias e fungos. Tem velocidade de ação média a lenta (4 a 12 horas), pH ótimo entre 5,5 a 8,0 e caráter catiônico. As maiores desvantagens são degradação em pH acima de 8,0 e sua elevada toxicidade, podendo comprometer as descargas do sistema. O principal representante dessa classe de compostos é o metileno-bis-tiocianato (MBT ou MTC).

### 6.3.2.4 Compostos Organo-Estanosos

São produtos normalmente empregados sinergisticamente em formulações conjuntas com aminas complexas ou quaternários de amônio, com efeito bactericida, fungicida e algicida. São catiônicos, com pH ótimo de atuação entre 5,0 e 9,5.

### 6.3.2.5 Clorofenatos e Bromofenatos

São compostos contendo um anel fenólico halogenado, extremamente tóxicos, persistentes e de baixa degradabilidade. Têm caráter aniônico a não iônico e amplo espectro de ação contra bactérias, fungos e algas. Por serem muito tóxicos e com efeitos

indesejáveis (inclusive causadores de câncer), seu uso tem sido abolido nos sistemas de resfriamento.

#### **6.3.2.6 Glutaraldeído**

Também chamado de aldeído glutárico (nome químico: pentano-1,5 dial), é um biocida bastante utilizado em sistemas de resfriamento para controle de fungos e bactérias, com tempo de ação entre 3 e 8 horas. Seu princípio de funcionamento baseia-se em ligações cruzadas com os grupos amino (de proteínas estruturais e enzimas) na superfície das células, ocorrendo com pH entre 6,0 e 9,0. Tem a desvantagem de reagir com amônia com níveis desta acima de 50 ppm e a desativação por sulfitos. O glutaraldeído é bastante empregado em uma formulação conjunta com o quaternário de amônio, resultando em um biocida popularmente conhecido como "Quat-Glut".

#### **6.3.2.7 Bromo-Nitro Derivados**

Basicamente representados pelo DBNPA (2,2-Dibromo-3-Nitrilo-propionamida) e pelo bromo-nitro-propanodiol, são biocidas mais modernos, com ação rápida (15 minutos a 2 horas) e excelente ação bactericida, conseguindo reduzir a aderência do biofilme em dosagens contínuas. O pH ideal de ação destes compostos é em torno de 6,0 a 8,5 e agem através da inativação de enzimas envolvidas em importantes rotas metabólicas da célula. Os biocidas a base de bromo-nitro-estireno foram os primeiros dessa classe de produtos, e atualmente são pouco usados em sistemas de resfriamento por serem muito tóxicos e pouco degradáveis.

#### **6.3.2.8 Isotiazolonas**

São também compostos relativamente modernos e ultimamente têm sido muito bem sucedidos no emprego em sistemas de resfriamento, com amplo espectro de ação contra bactérias, fungos e algas. As isotiazolonas (ou isotiazolinonas) reagem no citoplasma das células com os grupos "tiol" ( -SH ) presentes nas enzimas e proteínas estruturais; a ação biocida é lenta (4 - 12 horas) porém é um bacteriostático imediato. Os compostos dessa

classe mais empregados em água de resfriamento são apresentados na figura a seguir. As isotiazolonas atuam satisfatoriamente em pH entre 6,0 e 9,0 e a principal desvantagem é a sua desativação por formas reduzidas de enxofre.

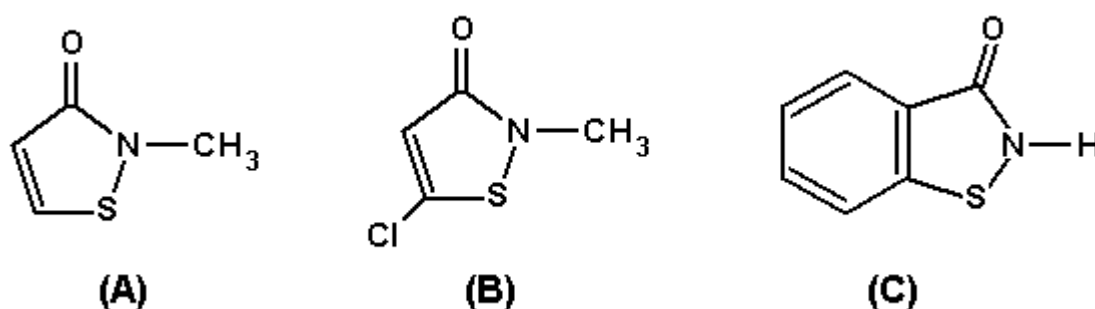


FIGURA 39: MOLÉCULAS DE ISOTIAZOLONAS USADAS EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO: (A) METIL-ISOTIAZOLINONA. (B) CLORO-METIL-ISOTIAZOLINONA. (C) BENZO-ISOTIAZOLINONA (BIT).

### 6.3.2.9 Poliquaternários

Trata-se de uma classe de compostos desenvolvidos nos últimos vinte anos, com princípio de ação semelhante aos quaternários de amônio, atuando contra bactérias, fungos e algas. É catiônico também, porém tem pouca tendência de formação de espuma. É bastante empregado como algicida de choque e "limpa-bordas" em piscinas.

Informações detalhadas sobre esta classe de compostos é encontrada em BUCKMAN<sup>23</sup> (Ano não disponível).

### 6.3.2.10 Terbutilazina

É um composto da família das triazinas, sendo um excelente inibidor da fotossíntese. Por isso, atua somente contra algas, recomendado nos sistemas onde este tipo de microrganismo é o principal constituinte do problema. É muito lento na ação, necessitando de 10 a 15 dias para se obter os resultados; outras desvantagens são sua faixa estreita de

<sup>23</sup> BUCKMAN : WSCP – TECHNICAL BULLETIN. Buckman Laboratories Inc. Memphis. N/D.

pH ideal de atuação (7,0 – 8,5) e o fato de poder destruir toda a vegetação que entrar em contato com a água do sistema.

### **6.3.2.11 Biguanidas**

São compostos com excelentes propriedades bactericidas, sendo usados inclusive em cosméticos, desinfetantes, etc. Possuem baixa toxicidade ao ser humano e animais superiores, o que permite seu uso em desinfecção de equipamentos para indústria alimentícia, em frigoríficos e instalações veterinárias. O principal composto que representa esta categoria de produtos é o polihexametileno biguanida (PHMB) ou biguanida polimérica. O mecanismo de ação deste produto é semelhante ao do quaternário de amônio: é catiônico, adsorve-se sobre a membrana plasmática (negativa) das células e promove inicialmente a perda de material de baixo peso molecular, tais como íons potássio ( $K^+$ ); posteriormente, faz a célula perder componentes vitais e organelas, além de inibir a ação das enzimas de união da membrana. Também apresenta incompatibilidade com outros produtos aniônicos do tratamento (inibidores de corrosão/ incrustação), porém não tem tendência à formação de espuma nas dosagens usuais. Maiores detalhes dessa classe de compostos pode ser encontrada em FRANZIN<sup>24</sup> (2001).

### **6.3.2.12 THPS – Sulfato de Tetrakis-Hidroximetil-Fosfônio**

É conhecido popularmente como "biocida verde", devido à sua baixa toxicidade aos animais, plantas superiores e seres humanos e à sua biodegradabilidade, superior aos biocidas convencionais. Sua fórmula molecular é:  $[(CH_2OH)_4P]_2SO_4$ . Normalmente é associado à aplicação de biodispersantes, que favorecem a atuação e são bastante empregados em tratamento de águas de injeção para extração de petróleo, devido à sua ação contra as bactérias redutoras de sulfato.

Tal como no caso das biguanidas, não dispomos, até o momento, de informações mais detalhadas sobre o uso desse biocida em sistemas de resfriamento.

---

<sup>24</sup> FRANZIN, M.: BIGUANIDA POLIMÉRICA: VERSATILIDADE E DIVERSIFICAÇÃO EM UM SÓ PRODUTO. Boletim Técnico. Avesia Biocides. 2001.

### 6.3.3 - Biodispersantes

Várias espécies de microrganismos são capazes de produzir uma substância mucilaginosa, composta na maior parte por polissacarídeos, proteínas e gorduras, chamada glicocálice. Esta substância aumenta a aderência dos microrganismos sobre as superfícies dos equipamentos, além de funcionar como abrigo, agrupando e alojando as células e colônias de outras espécies porventura existentes. O glicocálice também protege as células do contato direto com a água e biocidas a ela adicionados, diminuindo grandemente a eficiência destes últimos. Por outro lado, quando a tendência à formação do biofilme é muito acentuada, muitas vezes a ação dos biocidas é comprometida, pois não conseguem atingir as camadas celulares inferiores dos depósitos, ou são consumidos antes de atingirem-nas.

Para controlar este problema, uma classe especial de produtos denominados biodispersantes ou dispersantes orgânicos foi desenvolvida. O biodispersante tem a capacidade de dissolver o glicocálice formado e de promover a abertura de canais no interior do biofilme, favorecendo a penetração dos biocidas e auxiliando-o a matar as células das camadas inferiores ou protegidas pelo glicocálice. Um bom biodispersante também consegue, quando dosado adequadamente e com fluxo de água razoável, remover por completo a deposição do material orgânico presente em tubulações, equipamentos e/ou no recheio das torres. Por fim, o uso de um biodispersante pode reduzir as dosagens dos biocidas, propiciando economia e diminuindo a quantidade de material potencialmente poluidor nas descargas do sistema.

O princípio de atuação desses produtos é semelhante ao de um sabão ou detergente convencional: um dos extremos da molécula (parte lipofílica ou hidrofóbica) tem afinidade com o material orgânico e o outro (extremidade hidrofílica) é solúvel em água. Assim, a parte lipofílica interage com a parede celular dos organismos ou glicocálice e a parte hidrofílica proporciona a solubilidade deste complexo na água. Os principais compostos usados para este tipo de tarefa são os nonilfenóis-etoxilados, os polímeros de óxidos de etileno-propileno (EO-PO), aminas óxidas, alguns poliacrilatos, entre outros.

### 6.3.4 - Outros Métodos de Controle do Desenvolvimento Microbiológico

Alguns outros métodos são empregados, muitas vezes com sucesso e a um custo atrativo, para o controle dos microrganismos na água de resfriamento. Entre eles, podemos citar:

- Radiação ultravioleta
- Filtração lateral ou em paralelo ("side-stream filter")

Por ora, não forneceremos maiores detalhes sobre estes processos, citando-os aqui apenas a título de informação ao leitor.

## 7 - MONITORAMENTO E CONTROLE DO TRATAMENTO

As características físico-químicas e microbiológicas da água e do sistema como um todo constituem a essência do controle do tratamento químico em um circuito de resfriamento. Diversos métodos e táticas são empregados para avaliação das condições do sistema, seja referente à formação de incrustação, ocorrência de processos corrosivos e do desenvolvimento microbiológico.

A seguir apontaremos alguns métodos mais comuns empregados para o controle do tratamento nos sistemas de resfriamento.



## 7.1 - CONTROLE FÍSICO-QUÍMICO

Este controle é implementado através de análises físico-químicas da água do sistema, com periodicidade conveniente. São feitas análises de pH, alcalinidades, concentração de íons, condutividade, etc. Os principais itens de controle e sua faixa sugerida estão apresentados na tabela a seguir:

TABELA 02: CONTROLE FÍSICO-QUÍMICO DO TRATAMENTO DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO<sup>25</sup>

ITEM DE CONTROLE	FAIXA SUGERIDA	OBSERVAÇÕES
<b>pH</b>	6,5 – 8,5	Águas com pH abaixo de 6,5 aumentam a corrosão (ácido). Acima de 8,5, pode causar precipitação de sais e prejudicam a ação dos biocidas.
<b>Condutividade</b> ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Máx. 3000	Valores elevados de condutividade aceleram os processos corrosivos. Também indicam maior concentração de material dissolvido
<b>Alcalinidade Total</b> (ppm $\text{CaCO}_3$ )	Máx. 400	Alcalinidade elevada indica presença de carbonatos e bicarbonatos, que podem constituir incrustações.
<b>Sólidos Totais Dissolvidos</b> (ppm STD)	Máx. 2800	Valores elevados de sólidos dissolvidos indicam tendência incrustante da água.
<b>Dureza Total</b> (ppm $\text{CaCO}_3$ )	Máx. 400	Visa controlar a concentração de sais de cálcio e magnésio, potenciais formadores de incrustações.
<b>Cloretos</b> (ppm $\text{CaCO}_3$ )	Máx. 200	Indica o grau de concentração da água e também uma medida da característica corrosiva.
<b>Sílica</b> (ppm $\text{SiO}_3$ )	Máx. 150	O controle visa evitar incrustações de sílica e silicatos, muito duras e aderentes.
<b>Ferro</b> (ppm Fe)	Máx. 5,0	Estimativa da intensidade dos processos corrosivos. Concentrações elevadas de ferro podem se incrustar.

<sup>25</sup> Estes valores são sugeridos e baseados em informações de manuais, recomendações de fabricantes de equipamentos, dados empíricos e na média normalmente praticada pelas empresas especializadas em tratamento de água. No entanto, alguma companhia ou consultor em particular pode adotar valores diferentes dos aqui apresentados.

<b>Sólidos Suspensos</b> (ppm SS)	Máx. 20	Indica material em suspensão. Concentrações altas indicam pré-tratamento deficiente ou excesso de material orgânico (microbiológico).
<b>Sulfatos</b> (ppm SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Máx. 300	Associado a características corrosivas da água. Baixas concentrações ajudam a combater as bactérias redutoras de sulfato.
<b>Turbidez</b> (NTU)	Máx. 20	Permite avaliar o crescimento microbiológico, detectar contaminações externas e concentrações excessivas de sais.
<b>Produtos para Tratamento (Zinco, Fosfato, etc.)</b>		São mantidas concentrações ideais, conforme recomendações específicas.

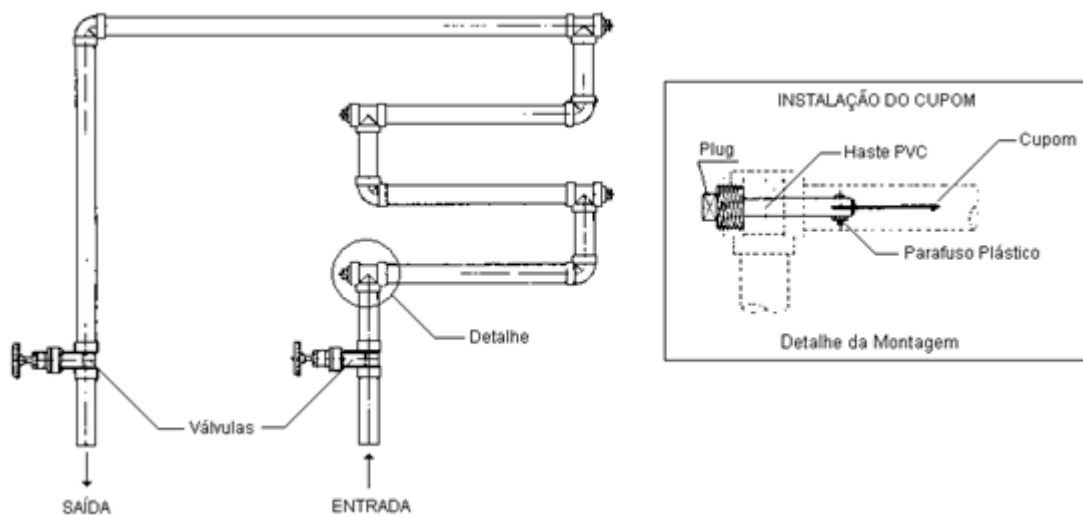
## 7.2 - TAXAS DE CORROSÃO E DEPOSIÇÃO / INCRUSTAÇÃO

Fornecem medidas diretas sobre a tendência corrosiva da água e sua intensidade, podendo-se avaliar o efeito da corrosão sobre diversos metais e ligas. Pode-se também qualificar e quantificar os principais formadores de incrustações no sistema, permitindo que sejam tomadas medidas corretivas específicas.

### 7.2.1 - Método dos Cupons de Prova

Normalmente, as taxas de corrosão são medidas através da colocação de cupons de prova, feitos com todos os metais e ligas constituintes do sistema. O cupom é tratado, colocado em um suporte adequado e submetido ao fluxo de água por um período de, pelo menos, 30 dias. Ao término do ensaio, os mesmos são avaliados em relação aos depósitos (cor, intensidade, tipo de corrosão – localizada ou distribuída, pittings, fissuras, esfoliações, etc.). Depois, os cupons são pesados, limpos, secos e novamente pesados, onde é avaliada a perda de material. De posse da massa de metal perdida, da área exposta do cupom e do período de permanência, pode-se calcular a taxa de corrosão, normalmente expressa em mpy (milésimos de polegada de penetração por ano) ou mdd (miligramas de massa perdida por dm<sup>2</sup> por dia).

Nas figuras a seguir é mostrado um sistema simples de colocação de cupons de corrosão e alguns deles após certo período de exposição.



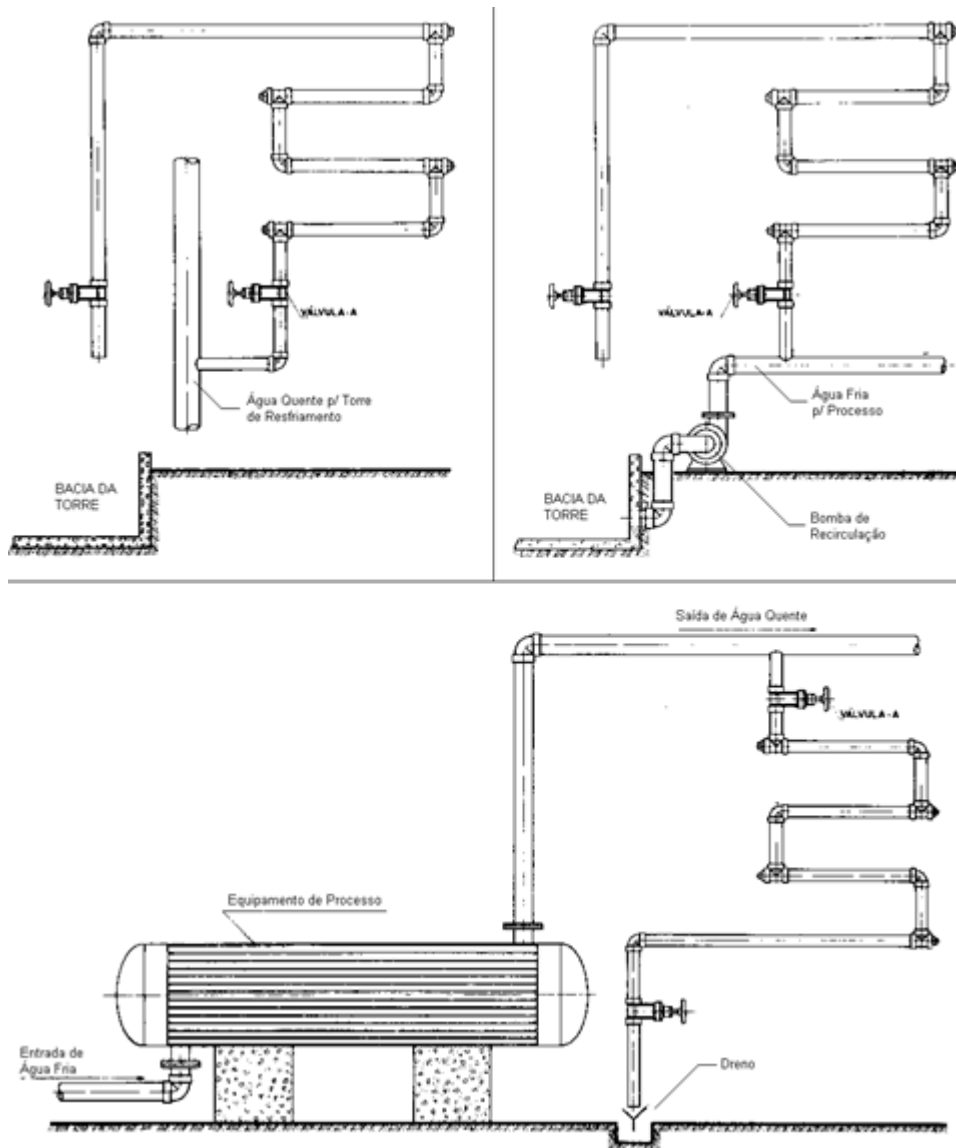


FIGURA 40: ESQUEMA DE MONTAGEM E EXEMPLOS DE INSTALAÇÃO DOS CUPONS DE CORROSÃO EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO

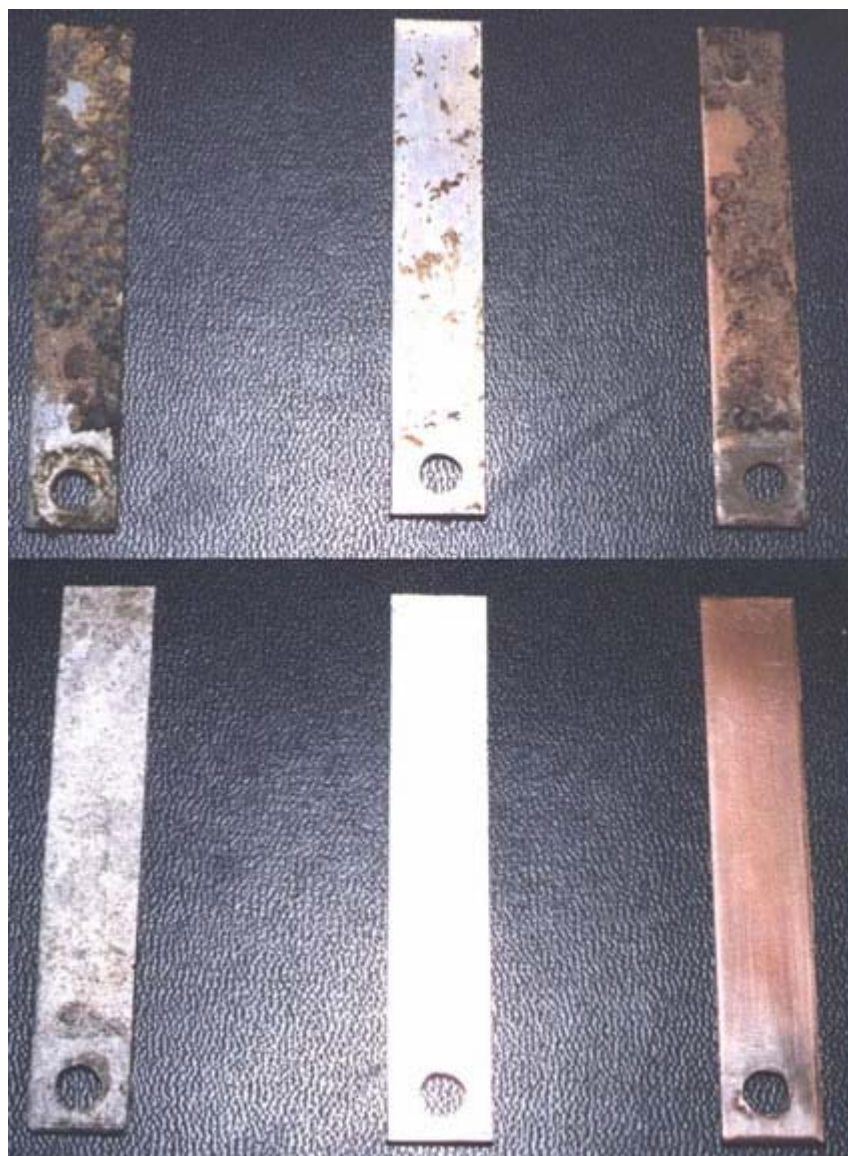


FIGURA 41: ACIMA: CUPONS DE CORROSÃO DE AÇO CARBONO, INOX E COBRE (DA ESQ. P/ DIREITA), APÓS ENSAIO EM ÁGUA DE RESFRIAMENTO. ABAIXO: MESMOS CUPONS, APÓS LIMPEZA DOS MESMOS. OBSERVAR SINAIS DE CORROSÃO NO CUPOM DE AÇO CARBONO.

### 7.2.2 - Sonda Corrosométrica

Trata-se de um equipamento que, colocado em contato com a água do sistema, fornece quase que imediatamente a taxa de corrosão para o metal ou liga em questão. O funcionamento de uma das classes destes equipamentos consiste na medição da resistência de um pequeno filamento do metal: conforme a corrosão aumenta, diminui a espessura do filamento e, conseqüentemente, aumenta sua resistência elétrica (Lei de Ohm); a medida da resistência elétrica é então convertida em taxa de corrosão.

### 7.2.3 - Instalação de Trocador de Calor Piloto

O tratamento químico da água de resfriamento pode ser avaliado através da instalação de um trocador de calor de pequenas dimensões, onde é possível medir com facilidade as vazões dos fluidos em questão e as temperaturas. Neste trocador é feito um ajuste de modo que suas condições de operação sejam similares ao equipamento que se queira observar. Com isto, pode-se estimar o coeficiente global de transferência de calor do equipamento (U), cujo aumento significativo indica a presença de incrustações inorgânicas, depósitos ou biofilme. Alguns modelos de trocador piloto são elétricos, o que torna fácil simular as condições de operação de um equipamento maior, além de maior facilidade de instalação.

O monitoramento das vazões e temperaturas pode também ser feito diretamente em um equipamento industrial, desde que dotado de sistemas confiáveis de medição.

Uma vez detectada alguma alteração nas condições operacionais do trocador piloto, o mesmo pode ser aberto e avaliado quanto à procedência do material porventura depositado/ incrustado (se é de origem salina, produtos de corrosão, lodo ou filme microbiológico, etc.). Depois de diagnosticadas as causas, tomam-se as providências cabíveis a cada caso. O trocador piloto é um eficiente método para avaliação de incrustações nos sistemas de resfriamento.

## 7.3 - MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO E MONITORAMENTO DO DESENVOLVIMENTO MICROBIOLÓGICO

Vários métodos são empregados pelos profissionais de tratamento de água para este tipo de controle. O próprio trocador de calor piloto e os cupons de corrosão podem indicar um crescimento de microrganismos acima do comum, embora os métodos seguintes sejam bem mais específicos.

### 7.3.1 - Contagem Microbiológica na Água

É um procedimento simples, que consiste em colocar a água do sistema em contato com um meio de cultura adequado. Depois de certo período de incubação, o procedimento revela a quantidade de unidades formadoras de colônias existentes por ml do meio (UFC/ml).

Normalmente adota-se como limite máximo o valor de  $1,0 \cdot 10^4$  UFC/ml. Dependendo do sistema, pode-se trabalhar com valores superiores a este sem causar maiores problemas, pois as bactérias medidas por este tipo de análise são, em sua maior parte, as planctônicas.

Como o principal problema em um sistema de resfriamento são os organismos sésseis (que crescem aderidos às superfícies), às vezes a contagem de bactérias na água não fornece resultados confiáveis sobre o grau de infestação do sistema, sendo necessário o emprego de outros métodos de avaliação.

### 7.3.2 - Índice de Aderência de Biofilme

É uma medida indireta da tendência dos microrganismos presentes no sistema crescerem de forma aderida sobre as superfícies. O procedimento consiste em colocar uma lâmina de vidro (usada em microscopia) imersa no local onde se deseja avaliar o biofilme (decks de distribuição, bacia da torre, trocador de calor, etc.). Após alguns dias, retira-se a lâmina e observam-se os depósitos porventura formados, permitindo-se inclusive

identificar diretamente algumas espécies ao microscópio. Coloca-se a lâmina em estufa e após a secagem, é feito um tingimento da mesma usando corante fucsina (que tingem de vermelho o material celular presente). Pode-se, então, quantificar a intensidade do biofilme através de uma leitura em um espectrofotômetro ou colorímetro.

O índice de aderência de slime também permite avaliar o desempenho de biodispersantes e biocidas sobre a população sésil dos microrganismos.

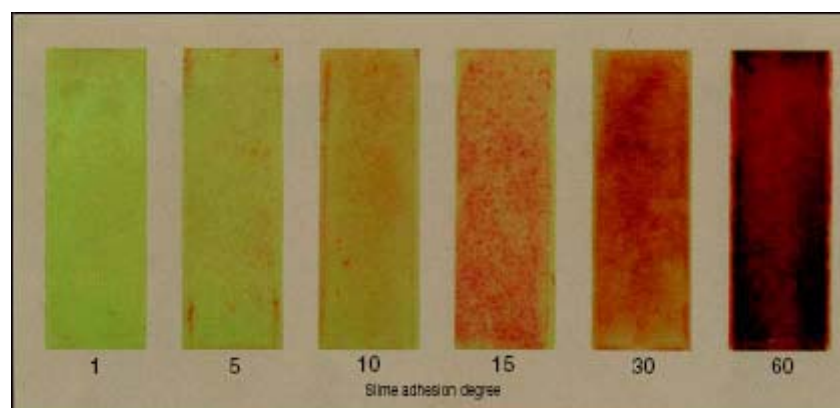


FIGURA 42: LÂMINAS DE VIDRO APÓS TINGIMENTO USADAS EM ENSAIO DE ADERÊNCIA DE SLIME, MOSTRANDO DIFERENTES NÍVEIS DE CONTAMINAÇÃO MICROBIOLÓGICA.

### 7.3.3 - Medida do Material Suspenso

Medidas de turbidez ou então uma filtração em membrana de porosidade adequada é capaz de indicar, indiretamente, a quantidade de microrganismos presentes na água do sistema. Esta medição é bastante influenciada por material não-orgânico normalmente encontrado na água, tais como areia finamente dividida, produtos de corrosão, sais precipitados, etc.



### **7.3.4 - Análises de DQO, DBO e Carbono Orgânico Total**

Estas análises permitem estimar o material orgânico presentes na água de resfriamento, comparando-os com os valores encontrados na água de alimentação do sistema. Normalmente, valores elevados desses parâmetros indicam crescimento microbiológico acentuado, o que permite a tomada das providências necessárias (biocidas, biodispersantes, purgas, limpezas no sistema, etc.).

## **7.4 - AVALIAÇÃO GLOBAL E VISUAL DO TRATAMENTO**

As ferramentas e métodos aqui apresentados ajudam, sem dúvida, na avaliação e detecção de falhas no tratamento da água de resfriamento. No entanto, a experiência prática, a avaliação das condições operacionais do processo e uma simples observação no sistema podem indicar a ocorrência de determinado(s) problema(s). A opinião e o relato de operadores e técnicos que estão em contato permanente com o processo deve ser sempre levada em consideração. Finalmente, o bom senso e critério na atuação devem ser exercidos, procurando soluções de baixo custo e baixo impacto ambiental.