

A INFLUENCIA DA QUALIDADE DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO NA PLANTA DE VAPOR

Mauricio Sanches Garcia
Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
Seção de Reparo de Caldeiras
Rio de Janeiro – RJ – Brazil
mauricio.Sanches@amrj.mar.mil.br

1. Introdução

Diversos processos industriais e sistemas de geração de potencia utilizam vapor como fluido de trabalho. A qualidade do vapor utilizado é fundamental para a conservação e a confiabilidade dos componentes do sistema. Este parâmetro é obtido através do controle químico da água de alimentação em uma planta de vapor. De modo geral, o controle envolve: a produção de água destilada de boa qualidade na planta de destilado; a detecção e a eliminação de contaminantes da água de reserva, condensado e água de alimentação e a manutenção da qualidade da água de alimentação dentro dos limites recomendados pela adição de elementos químicos e processos de extração de contaminantes da caldeira.

A utilização da água de alimentação em condições impróprias resulta em falhas na caldeira. Estas falhas, além de indisponibilizarem os equipamentos, acarretam em elevados custos operacionais e de manutenção. As avarias são caracterizadas por depósitos indesejáveis no lado da água, corrosão e arrastamento. Os depósitos restringem a transferência de calor através dos tubos da caldeira e eventualmente conduzem a falhas. A formação de lama, em excesso na caldeira, oriunda de extrações inadequadas e as escamações nos tubos devido ao tratamento químico incorreto irão resultar em depósitos do lado da água. A corrosão e a perda de espessura dos metais são causadas de diversas maneiras, entre as quais: tratamento químico insuficiente ou tratamento químico além do necessário da água de alimentação e a presença de oxigênio.

Esta contribuição apresenta as teorias de tratamento de água de caldeira sobre as quais os controles de qualidade são estruturados. O objetivo é fornecer orientações de engenharia para utilizadores de vapor, tanto na propulsão naval como em atividades industriais e seus processos produtivos, porem será dada ênfase em sistema de propulsão naval.

2. Ciclo de vapor

O controle efetivo da água de alimentação requer a compreensão do ciclo termodinâmico através do qual a água sofre as transformações de fase e a importância de manter a qualidade adequada da água para evitar avarias nos diversos componentes do sistema.

De forma resumida, a planta de propulsão a vapor pode ser compreendida como um ciclo fechado, na qual a água de alimentação da caldeira é aquecida para geração do vapor. Este vapor realiza então trabalho nas turbinas principais e é condensado, retornando para o sistema. Normalmente a água para este ciclo é obtida da água do mar, que para ser utilizada precisa ser tratada, no grupo destilatório para a produção do destilado. Esta é armazenada

em tanques de água de reserva até que seja utilizada como água de suprimento. Quando há a necessidade de completar as perdas do sistema, esta água é bombeada para o sistema de condensado onde é misturada com o condensado. O condensado é então bombeado para o tanque aquecedor desarejador que remove o oxigênio dissolvido e outros gases. Nesta condição a água é chamada de água de alimentação, podendo ser bombeada para a caldeira. No gerador de vapor, o calor é adicionado ao sistema, ocorrendo a transformação para a fase vapor que é utilizado como energia potencial para acionar as turbinas principais, aonde ocorre a transformação da energia potencial do vapor em energia cinética nas palhetas da turbina e finalmente em energia mecânica no eixo. A energia do vapor é ainda utilizada em máquinas auxiliares e em diferentes sistemas do navio. No condensador há a remoção de calor do vapor e a transformação para a fase líquida. O condensado está pronto para ser utilizado novamente no ciclo. Teoricamente este ciclo é fechado e opera continuamente. A mesma água permanece no sistema, exceto em casos de perdas, como em caso de vazamentos e extrações de fundo.

A figura 1, abaixo, representa esquematicamente o ciclo de vapor.

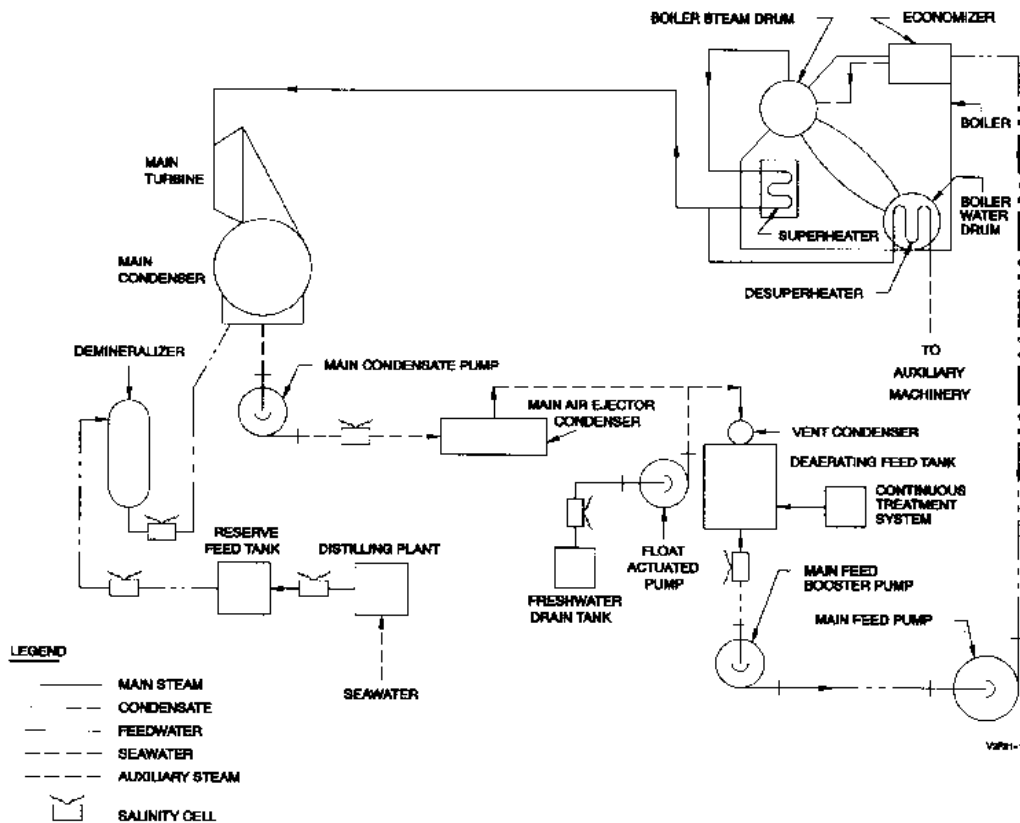


Figura 1 – Representação esquemática do ciclo de água no ciclo de vapor

A bordo dos navios, a água utilizada no sistema de geração de vapor recebe diferentes denominações. A água destilada armazenada em tanques é chamada de **água de alimentação de reserva**, a água que flui do sistema de condensado para os tanques de alimentação é chamada **água de suprimento**.

Caso haja desmineralizador no navio, a água que flui do desmineralizador para o sistema de condensado é chamada de **água de suprimento desmineralizada**.

Após o vapor realizar trabalho, ele retorna para o estado líquido pelo resfriamento no condensador. Este equipamento é um trocador de calor, no qual o vapor sob vácuo flui e é condensado nos tubos resfriados internamente pela água do mar. O líquido condensado do vapor é chamado de condensado. O condensado de varias partes do sistema é combinado com a água de suprimento para manter a quantidade correta de água no sistema. Esta é enviada para o tanque aquecedor desarejador (T.A.D), aonde o oxigênio e outros gases são removidos da água. A descarga do T.A.D é chamada de água de alimentação desarejada. O T.A.D é projetado para manter o oxigênio dissolvido na água de alimentação até 15 ppb. No sentido amplo, o termo água de alimentação refere-se aos vários sistemas de alimentação de água. No sentido estrito, o termo água de alimentação define a água contida entre o T.A.D e a caldeira, que não deve ser confundida pois possui uma qualidade especial, uma vez que é desarejada. Esta água quando entra no tubulão de vapor da caldeira é definida como água da caldeira. O termo **água da caldeira** descreve a água no tubulão de vapor, coletores e tubos geradores da caldeira.

O ciclo de vapor pode ser dividido em três partes principais: Sistema de alimentação propriamente dito; Sistema de condensado; e Sistema de drenagens.

Resumidamente, o **sistema de alimentação** é composto do tanque aquecedor desarejador (TAD), que realiza o desarejamento (eliminar parte dos gases como oxigênio, gás carbônico e a amônia) da água de alimentação antes de alimentar as caldeiras, de aquecedores de alimentação, economizador e bombas de alimentação da caldeira, abrangendo as bombas de recalque, bombas de alimentação principal e tanques para armazenamento de água de reserva. Existem ainda bombas de suplemento para transferir água dos tanques de reserva para o sistema de alimentação.

O **sistema de condensado** consiste em condensadores principais e auxiliar, sendo que os primeiros recebem vapor proveniente das máquinas propulsoras enquanto o último recebe o vapor proveniente dos turbo-geradores. O vapor de descarga das auxiliares, não utilizado nos aparelhos de troca de calor, poderá ir para o condensador principal ou para o condensador auxiliar. O meio de remoção do condensado dos condensadores é através de uma bomba de extração de condensado e um ejetor de ar que remove o ar. A bomba de extração do condensado descarrega no sistema de alimentação e o ejetor de ar descarrega o ar na atmosfera.

Além do sistema de água de alimentação, existe o grupo destilatório, cuja função é vaporizar a água do mar, e através de processos físicos, transformá-la em água de suplemento para alimentação da caldeira e uso geral no Navio. Um ou mais vaporizadores associados a um grupo de condensação, bombas e alguns acessórios são conhecidos como grupo destilatório. Estes equipamentos tornam o Navio independente de fontes externas de água doce, e possibilitam o fornecimento de água para alimentação das caldeiras com qualidades superiores às da água obtidas em terra.

3. Fluxo de água na caldeira

As caldeiras têm seu princípio de funcionamento baseado na diferença de densidade dos fluidos que nela estão presentes, isto é, a água e vapor. A água de alimentação das caldeiras aquecida no feixe tubular da caldeira e no tubulão, se transforma em vapor. Em decorrência deste aquecimento, resulta uma corrente ascendente do fluido mais quente (vapor) e uma

corrente descendente do fluido mais frio (água). Estas correntes tomam o nome de corrente de convecção. O fluido mais quente (vapor) sai do tubulão e passa pelo superaquecedor onde recebe uma quantidade adicional de calor, elevando sua temperatura até a desejada. Este vapor que passa pelo superaquecedor é chamado de **vapor principal** e se destina a trabalhar nas máquinas principais (turbinas), sendo descarregado no condensador principal onde, resfriado pela água do mar, transforma-se em condensado, diminuindo em muito seu volume o que provoca um vácuo no condensador que é mantido pelo ejetor de ar.

O condensado é aspirado do condensador pela bomba de extração de condensado, ou simplesmente bomba de condensado, e descarregado no tanque aquecedor desarejador (T.A.D), através do condensador dos ejetores, onde é aquecido pelo vapor utilizado neste aparelho. No T.A.D, o condensado é aquecido pelo vapor de descarga das auxiliares e drenagens de alta pressão (principais fontes de aquecimento da água de alimentação), sendo então desarejado. O condensado se constitui assim na água de alimentação das caldeiras, que é aspirada da câmara de armazenamento do T.A.D. pela bomba de recalque e descarregada na aspiração da bomba de alimentação principal (B.A.P), de onde será descarregada na caldeira com pressão superior a desta, através do economizador. No economizador, antes de entrar no tubulão da caldeira, a água de alimentação sofre mais um aquecimento dado pelos gases quentes da combustão do óleo queimado na fornalha, e assim reinicia o ciclo.

4. Requisitos da água de alimentação.

A qualidade da água de alimentação da caldeira é fator fundamental para confiabilidade e o bom funcionamento do sistema.

O tratamento de água de caldeiras é realizado com o intuito de impedir as seguintes anormalidades:

- a) corrosão do lado de vapor e água do gerador;
- b) formação de incrustações e depósitos nas paredes dos tubos e tubulões; e
- c) arrastamento de materiais contaminantes da água da caldeira para as demais partes do sistema de vapor, como redes, válvulas e turbinas (carryover).

De uma forma sucinta, este tipo de tratamento consiste do método conhecido como *coordenada pH-fosfato*.

O pH da água da caldeira é mantido em um nível próximo ao da neutralidade (de neutro a alcalino) por meio da adição de soda cáustica. A figura 2 mostra o ataque corrosivo em função do pH da água. O controle do nível de alcalinidade da água da caldeira serve para minimizar a corrosão metálica, seja ácida ou cáustica, e, também formar íon hidroxila (OH) necessário para reagir com o magnésio oriundo da água salgada, de forma a neutralizar a acidez da água. A reação química que ocorre pode ser expressa por:



Porém, no caso da água permanecer alcalina, com pH superior a 12, o hidróxido dissolvido na água, reage com o cálcio e o magnésio formando lama. Se a lama não for removida pode ocorrer de contaminar até as regiões superiores da caldeira. As figuras 3 e 4 apresentam tubos do tubulão superior com lama.

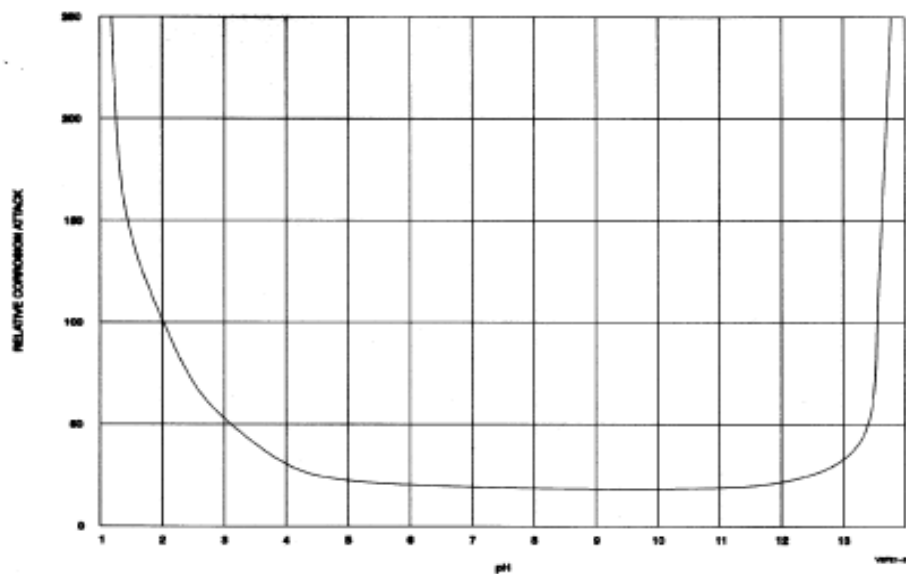


Figura 2 – Ataque corrosivo em função do ph.

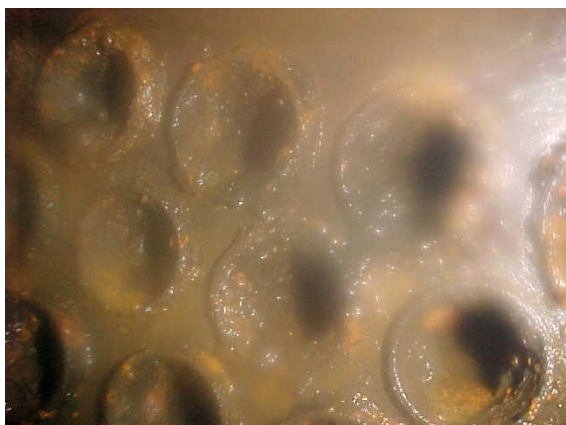


Figura 3 – Lama na tubulação do tubulão superior.

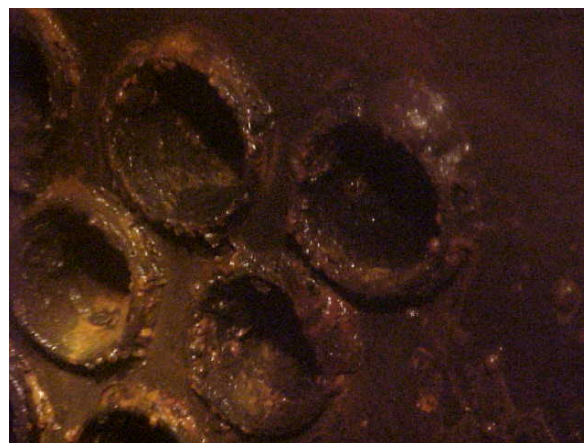


Figura 4 – Detalhe da lama

Os fosfatos são adicionados à caldeira para a decantação dos sais de cálcio e magnésio oriundos da água do mar na forma de lama, sendo retirada posteriormente por extrações de fundo. A lama é proveniente da reação química entre o fosfato e material em suspensão, que entra na caldeira através da água de alimentação, e as partículas sólidas produzidas pela reação química do tratamento da água com o cálcio, magnésio, e o ferro, entre outros, aglomerados na água da caldeira.

Neste tipo de método, a condutividade elétrica da água da caldeira, bem como o índice de íons cloretos, são utilizados para o monitoramento do nível de contaminantes em suspensão e dissolvidos na água, estabelecendo a necessidade da realização de extrações de superfícies.

A qualidade da água da caldeira, bem como da água de alimentação da planta de geração de vapor, é primordial para a sua conservação e de todo o sistema de condensado e vapor, estando os seus limites estabelecidos por diversas normas e fabricantes de produtos químicos, conforme a tabela 1 o quadro abaixo, para caldeiras de média pressão:

Parâmetros	NAVSEA	Ashland
pH	0,1 – 1,0 epm	----
Alcalinidade parcial (ppm)	-----	90 a 130
Fosfatos (ppm)	10 - 40	20 – 40
Condutividade (µmho/cm)	≤ 500	≤ 700
Cloretos (ppm)	≤ 35.5	≤ 40
Ferro (ppm)	-----	0.01

Tabela 1 – limites recomendados

O código ASME recomenda os seguintes limites para caldeiras industriais, de acordo com as pressões de trabalho. A tabela 2 apresenta estes limites.

Feedwater Property	0 - 2068 KPa (0 - 300 psig)	2075-3103 KPa (301-450 psig)	3110 - 4137 KPa (451 - 600 psig)	4144 - 5171 KPa (601 - 750 psig)	5178 - 6205 KPa (751 - 900 psig)	6212 - 6895 KPa (901 - 1000 psig)	6902-10,342 KPa (1001 - 1500 psig)	10,349-13,790 KPa (1501 - 2000 psig)
Dissolved oxygen (ppm O ₂) before adding chemical oxygen scavenger	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007
Total iron ppm Fe (as Fe)	≤ 0.1	≤ 0.05	≤ 0.03	≤ 0.025	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.01	≤ 0.01
Total copper ppm Cu (as Cu)	≤ 0.05	≤ 0.025	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.015	≤ 0.01	≤ 0.001	≤ 0.001
Total Hardness ppm (as CaCO ₃)	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.1	≤ 0.05	ND	ND
pH at 25 °C (77 °F)	8.3-10.0	8.3-10.0	8.3-10.0	8.3-10.0	8.3-10.0	8.3-9.6	8.3-9.6	8.3-9.6
Chemicals for pre-boiler system	NS	NS	NS	NS	NS	VAM	VAM	VAM
Non-volatile TOC ppm (as O ₂)	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Oily matter ppm	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.2	< 0.2	< 0.2

NOTES:

1. Makeup water percentage: Up to 100% of feedwater.
2. Assumes existence of deaerator.
3. Conditions: Includes superheater, turbine drives, or process restriction on steam purity.
4. Saturated steam purity target as shown.
5. NS = not specified.
6. ND = not detectable.
7. VAM = Use only volatile alkaline materials upstream of a temporary water source.

Tabela 2 – Limites recomendados pelo Código ASME

5. Problemas relacionados à qualidade da água da caldeira

Os problemas mais comuns relacionados à qualidade da água de alimentação no interior do sistema da caldeira são a corrosão, depósitos e o arrastamento.

5.1 Problemas de corrosão

Os problemas de corrosão são resultado da ação do oxigênio e do efeito do pH, alto ou baixo em componentes metálicos, incluindo os tubos da caldeira, os tubulões de vapor e coletores, que são de aço carbono. A corrosão também pode ocorrer da alcalinidade excessiva da água da caldeira. Este ataque caustico é mais comum de ocorrer com formação de depósitos, aonde elevada concentração local de hidróxidos não permite o correto resfriamento da região, criando zonas aquecidas no interior dos tubos. O ataque corrosivo pode ocorrer tanto em regiões que precedem a caldeira, bem como em seções após a caldeira, pois ambos são construídos de aço carbono. A corrosão pode resultar na perda de metal, estas situações quando atingem mais de 50% da espessura do tubo podem levar a uma falha catastrófica. A corrosão em linhas de vapor e condensados, localizados após a caldeira, pode ocasionar vazamentos que conduzem em perda de condensado, situação que exige aumento da demanda de energia, água e produtos químicos. Além de criar uma situação insegura a tripulação. A figura 5 apresenta tubulação com ataque corrosivo.

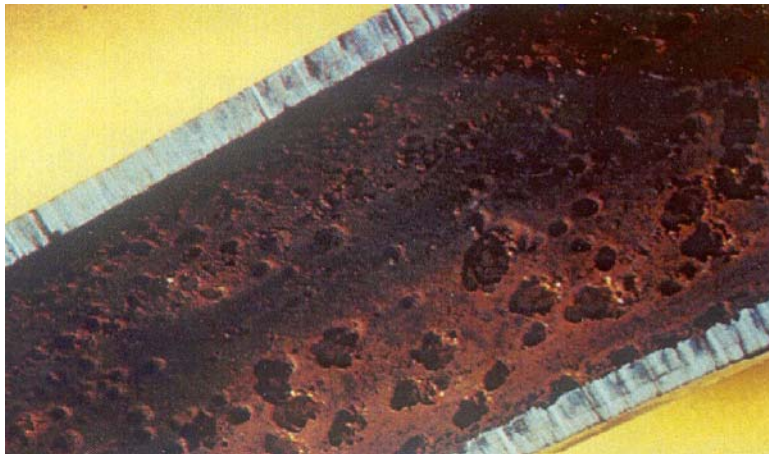
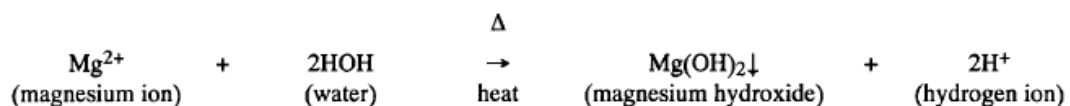
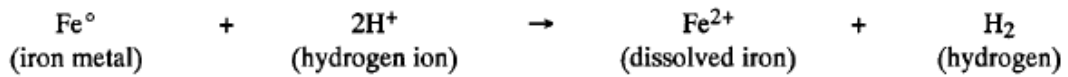


Figura 5 – Ataque corrosivo no interior do tubo - pittings

Para manter a água acida é necessário aumentar os íons hidrogênio ou diminuir os íons hidroxila. Quando o íon magnésio, na água em alta temperatura, entra em contato com a hidroxila a solução torna-se acida. Esta reação é dada por:



O hidróxido de magnésio precipita como depósito e o íon hidrogênio, agora em excesso torna a água ácida. Este fenômeno ocorre quase que exclusivamente quando há contaminação por água do mar, devido a grande quantidade de magnésio na água do mar. A acidez na água da caldeira provoca a dissolução da camada apassivadora de Fe_3O_4 , permitindo um ataque ainda maior no metal da caldeira.

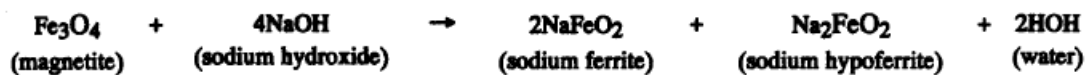


Para manter a água alcalina é necessário ou aumentar os íons hidroxila ou diminuir os íons hidrogênio na água da caldeira.

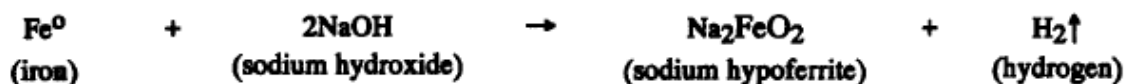
Quando mais íons hidroxila estão disponíveis na água da caldeira do que os necessários para reagir com o disodifosfato para formar o trisodifosfato, o excesso de hidroxila irá concentrar-se em regiões propícias a corrosão, como poros ou descontinuidades superficiais. A concentração de hidroxilas nestas regiões causa corrosão e perda de material do tubo da caldeira.

As reações químicas que ocorrem são:

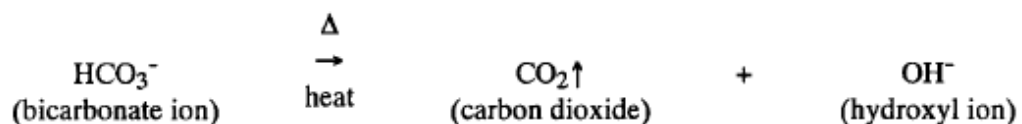
a) Dissolução da camada protetora de magnetita:



b) Reação com o metal base:



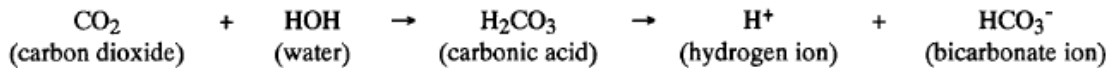
Uma condição de pH excessivamente alto na água da caldeira pode ocorrer, geralmente, por dois motivos: adição, em excesso, de soda caustica (NaOH), durante o tratamento químico, ou contaminação com água não tratada. A água não tratada possui grande quantidade de bicarbonato, em comparação com a água do mar. Na caldeira o bicarbonato se dissolve de acordo com a equação abaixo:



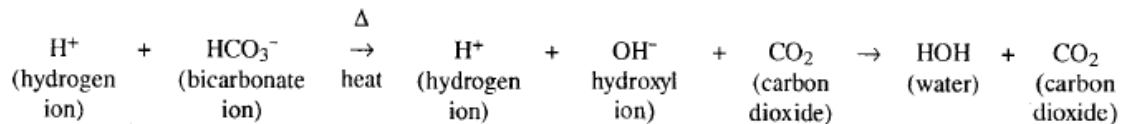
O íon hidroxila aumenta o pH enquanto que o dióxido de carbono, um gás, é carregado pelo vapor. A corrosão oriunda da soda caustica pode ser tão severa quanto à corrosão ácida. Chama-se de corrosão caustica, apesar da soda caustica não ser a única origem dos íons hidroxila.

O principal exemplo de corrosão caustica é o pitting em curvas inferiores dos tubos da cortina d'água.

A contaminação por bicarbonato também causa a formação de ácidos, não na caldeira, mas no vapor. De acordo com a equação acima, o bicarbonato, oriundo tanto da água do mar, como de água não tratada do cais, forma não apenas íons hidroxila, como também dióxido de carbono. O dióxido de carbono carregado com o vapor se dissolve e reage com o vapor formando hidrogênio e íons bicarbonato, conforme abaixo:



O íon hidrogênio deixa ácido o condensado. Tanto o íon hidrogênio e o íon bicarbonato entram na água da caldeira.



O dióxido de carbono recircula no sistema e torna o condensado ácido novamente. Este condensado ácido causa corrosão de todo sistema de condensado e alimentação e é particularmente perigoso na presença de oxigênio dissolvido. Os produtos da corrosão do sistema de condensado e alimentação são então carregados para a caldeira aonde contribuem para a formação de lama.

5.2 Problemas de depósitos.

Cálcio e magnésio são os principais constituintes da dureza e a principal fonte de origem de depósitos em caldeiras e em sistemas de alimentação e trocadores de calor. A formação de depósitos de hidróxido de magnésio já foi descrita anteriormente. Na água da caldeira, os depósitos de sulfato de cálcio (CaSO₄) também são formados devido à presença do sulfato de cálcio, tanto na água do mar, como na água doce do cais. Este composto se torna menos solúvel conforme a temperatura da água aumenta. Quando a solubilidade limite é alcançada, sulfato de cálcio sólido se precipita como depósitos na superfície dos tubos da caldeira. Depósitos encontrados no sistema de alimentação são usualmente compostos por carbonato de cálcio e sulfato de cálcio, resultantes de vazamentos de água potável no sistema de drenagem que contamina a caldeira.

O carbonato de cálcio é raramente encontrado em caldeiras de alta pressão, pois se decompõem em altas temperaturas.

Todos os depósitos agem como isolantes térmicos e reduzem a transferência de calor de uma superfície particular do tubo da caldeira. Este efeito faz a temperatura do metal aumentar até ocorrer um sobreaquecimento (800°F) e o amolecimento do metal, posteriormente, ocorre o crescimento da superfície, em forma de ovo (950F) e o rompimento do tubo. A figura 6 apresenta um tubo com depósitos acentuados em seu interior.

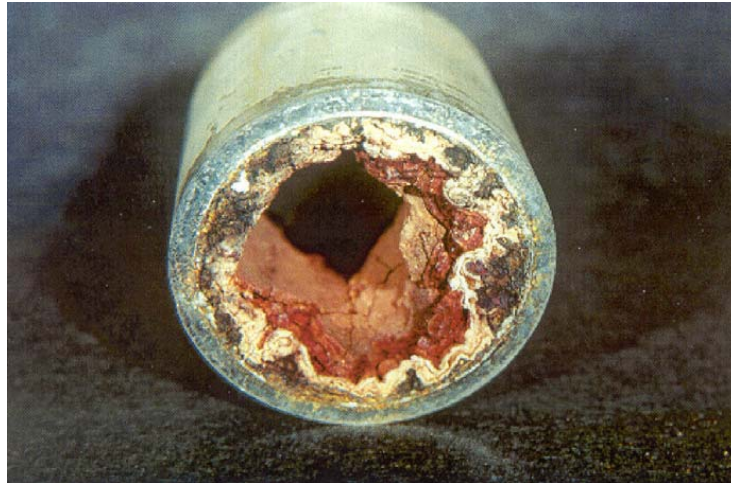


Figura 6 – Depósitos no interior do tubo

Devido às altas temperaturas da fornalha, as caldeiras navais não podem suportar mais que uns poucos milésimos da polegada de depósitos nas superfícies dos tubos sem sofrer ruptura. A figura 7 apresenta um tubo com aspectos típicos de sobreaquecimento. Estas avarias são extremamente prejudiciais ao equipamento, pois o rompimento do tubo no interior da fornalha, durante a operação, acarreta água nos pés dos tubos, região rica de fuligem que quando umedecida reage quimicamente com a água, formado ácido que ataca de fora para dentro a parede dos tubos. A figura 8 apresenta o tubo rompido e a figura 9 o pé dos tubos com ataque corrosivo.

A tabela 3, abaixo, mostra o efeito dos depósitos no aumento da temperatura da parede do tubo.

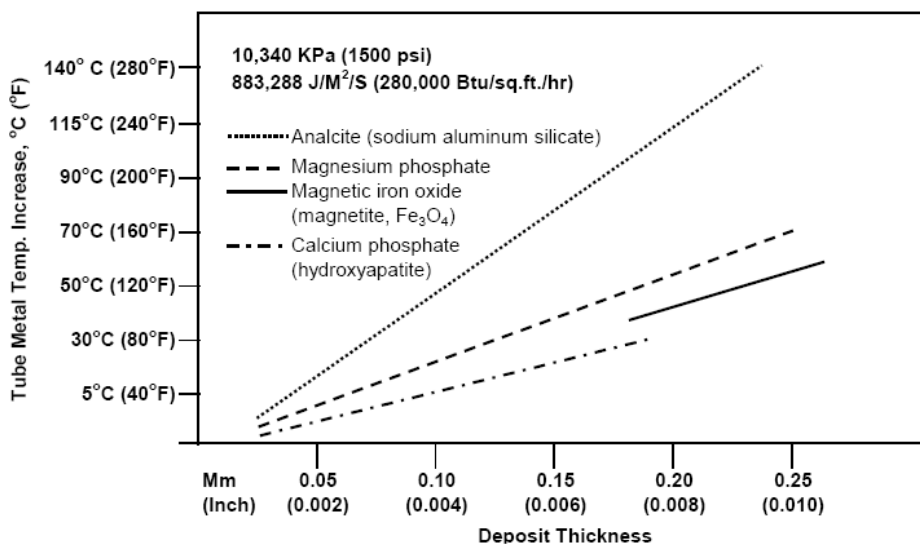


Tabela 3 – Relação dos depósitos com o aumento da temperatura da superfície do tubo



Figura 7 – Tubo com sinais de sobreaquecimento



Figura 8 – Tubo rompido no interior da fornalha.



Figura 9 – Ataque corrosivo nos pés dos tubos no interior da fornalha.

5.3 Oxigênio dissolvido (Corrosão por Pitting)

A água em contato com o ar irá conter uma quantidade de oxigênio dissolvido que é dependente da pressão e da temperatura. A tabela 4 abaixo apresenta a quantidade de oxigênio dissolvido em volume de água. Verifica-se que o oxigênio é mais facilmente dissolvido em água a baixas temperaturas. A pressão na qual a superfície líquida está submetida também influencia a solubilidade do oxigênio, que cresce com a pressão externa. Quando o oxigênio dissolvido entra na água da caldeira ele causa, inicialmente, uma corrosão localizada e o desenvolvimento de “pitting” no metal do feixe tubular. O oxigênio (O_2) dissolvido na água da caldeira irá reagir com o ferro (Fe) existente nas partes metálicas do lado da água da caldeira em pontos da superfície que funcionam como anodos. O ferro irá se dissolver e formar uma substância chamada de hidróxido de ferro (“ferrous hydroxide”) $[Fe(OH)_2]$. Uma quantidade de hidróxido de ferro é transformada em óxido de ferro hidratado ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$). A mistura do óxido de ferro com o óxido de ferro hidratado, na reação, é desidratada formando o óxido de ferro, de coloração escura, conhecida como magnetita (Fe_3O_4). O óxido de ferro preto sofre uma mudança na sua composição em uma nova reação com o oxigênio, na qual resulta em um óxido de ferro de coloração avermelhada (Fe_2O_3). A foto 10 apresenta aspectos físicos deste fenômeno.

Como o ataque do oxigênio continua por um período de tempo, o ferro existente no metal base é dissolvido e uma crosta de oxigênio ativo é formada em vários pontos da superfície metálica. O aparecimento de diversos tubérculos na superfície do metal é característico do ataque do oxigênio ativo, foto 11. O tubérculo possui uma casca dura de coloração marrom –avermelhada. Esta casca está criando a atmosfera necessária para o surgimento de “pitting” no metal da caldeira, fotos 12 e 13.

Pode ocorrer apenas um ponto de ataque isolado ou pontos de ataque espalhados por toda a superfície. Porém quando um tubérculo de oxigênio ativo se forma, a corrosão naquele ponto continua mesmo quando a causa de contaminação por oxigênio dissolvido é identificada e sanada.

O pH da água da caldeira também influencia na concentração de oxigênio dissolvido da caldeira. Quando o pH da caldeira diminui além dos limites recomendados, a severidade do ataque por oxigênio dissolvido aumenta. Muito cuidado deve ser tomado com as caldeiras, que por motivos diversos, mantêm seu lado de água aberto para a atmosfera pois nesta situação estão sujeitas a corrosão, caso as superfícies estejam úmidas, ou ainda se a própria umidade do ar atmosférico na região for alta.

Durante o período de hibernação das caldeiras, caso se opte pela conservação úmida, é necessário adicionar produtos sequestrantes de oxigênio na água pois, nesta situação o material continua sujeito à corrosão por oxigênio.

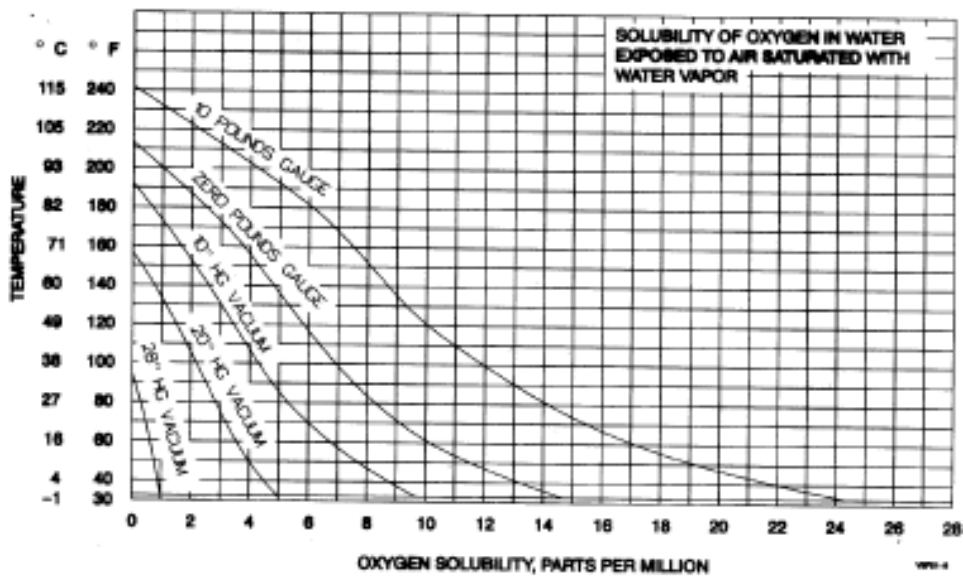


Tabela 4 – Solubilidade do oxigênio em função da pressão e da temperatura



Foto 10 – Aspecto do tubérculo



Foto 11 – Ataque de oxigênio dissolvido



Foto 12 – Ação da corrosão - Pitting



Foto 13 – Pitting e tubérculo

A presença de oxigênio nos sistemas de vapor, condensado e água de alimentação também causa corrosão generalizada em materiais como aço, ferro, cobre, níquel e, até em ligas metálicas. Como o ciclo de vapor é considerado como um sistema fechado, salvo as drenagens e o suplemento de água, os produtos da corrosão dos componentes do sistema que compõem o ciclo de vapor são conduzidos até a caldeira, onde contribuem para a formação de depósitos como lama. Esta situação pode ser mais prejudicial quando temos condensado ácido.

5.4 Presença do íon cloreto (corrosão por “Pitting”)

Devido a grande quantidade de cloretos presentes na água do mar, este elemento é usado preferencialmente como indicador de contaminação da água da caldeira pela água do mar. O cloreto é um íon agressivo que causa a dissolução da camada protetora de magnetita do metal da caldeira e inibe a sua formação. O cloreto também ataca a superfície metálica com a ocorrência de “pittings” devido à corrosão. O íon sulfeto tende a inibir o efeito destrutivo do cloreto, quando este apresenta pequenas quantidades na superfície dos tubos geradores de vapor.

O cloreto é danoso a instalação por causar corrosão em componentes de aço inoxidável do sistema de propulsão. O aço inoxidável sob tensões quando sujeito ao cloreto e ao oxigênio sofre uma ruptura de seus cristais. Quando há contaminação da água da caldeira pela água do mar a concentração de cloretos aumenta. Este íon pode ser conduzido pelo vapor saturado do tubulão superior para o superaquecedor da caldeira, onde se depositará nas superfícies dos tubos. Se o superaquecedor for composto de tubos de aço inoxidável, como ocorre freqüentemente, o processo corrosivo tem início ocasionando a falha dos tubos.

Os componentes dos sistemas da propulsão também podem ser afetados pelos íons cloreto. Caso o dessuperaquecedor apresente um vazamento, a água da caldeira contaminada de cloretos alcança vários sistemas do ciclo de vapor e de água. Uma vez estando o sistema contaminado é necessária uma limpeza para a remoção da contaminação.

5.5 Fenômenos relacionados ao arrastamento de contaminantes (“General Corrosion and Carryover”).

A condutividade está relacionada com a habilidade de conduzir uma corrente elétrica e pode ser expressa em micromhos por centímetro ($\mu\text{mho/cm}$). Na água da caldeira, a condutividade está associada a sólidos dissolvidos e, geralmente, um é medida do outro, pois para uma solução conduzir corrente elétrica é necessário que íons estejam presentes. Os contaminantes e o tratamento da água de alimentação são os responsáveis pela condutividade. Teoricamente todos os materiais dissolvidos na água do mar, na água de alimentação e na água da caldeira são íons e possuem a capacidade de conduzir corrente elétrica. A exceção é a sílica, que é um metal dissolvido e não conduz eletricidade.

As variações químicas e físicas que ocorrem na superfície do metal da caldeira geram áreas anódicas e catódicas, de modo que a superfície do metal apresenta uma leve diferença de potencial elétrico. Para os elétrons migrarem do catodo para o anodo deve existir uma condutividade no meio. A água pura possui alta resistência e baixa condutividade ($0,1 \mu\text{mho/cm}$), neste caso a taxa de corrosão do metal é baixa. Quando a condutividade cresce,

a resistência ao fluxo de elétrons diminui e a corrosão aumenta. Alguns íons, como a hidroxila e o fosfato, inibem a corrosão quando controlados dentro de certos limites. Outros como os íons cloreto e hidrogênio aumentam a corrosão. A condutividade da água deve-se em grande parte, principalmente, a íons cloreto, sulfeto e compostos de bicarbonato de sódio, cálcio e magnésio. A alta condutividade da água causa arrastamento.

A água em estado de ebulição produz bolhas de vapor envoltas por água. A bolha se rompe para liberar o vapor e água retorna novamente para o vaso. Se a água é pura, as bolhas de vapor se rompem facilmente e ocorre uma completa separação da água com o vapor. Quando concentrações de sólidos dissolvidos e em suspensão ou óleo cresce na água, as bolhas de vapor tornam-se estabilizadas e mais difícil de romper. Conforme a caldeira vaporiza, a concentração de sólidos dissolvidos e sólidos em suspensão aumenta e o controle é exercido por extrações de fundo. A área do tubulão de vapor acima superfície da água da caldeira, em um dado momento, fica repleta de bolhas estabilizadas então uma quantidade de água da caldeira é carregada junto com o vapor saturado pela tubulação. Ao chegar no superaquecedor as bolhas se rompem devido à alta temperatura e a água evapora. Partículas de materiais que estavam em suspensão e dissolvido na água da caldeira são carregados na velocidade do vapor a diferentes regiões do superaquecedor, depositando-se em sua superfície, principalmente no primeiro passe. O acúmulo destes depósitos geram uma série de defeitos, como restrição à troca de calor, fluência do material do tubo “blistering” e no caso do cloreto de sódio, corrosão no aço inoxidável. Este tipo de arrastamento da água de caldeira é chamado na literatura de “foaming”.

Outra forma de arrastamento é chamada de “priming”. Este fenômeno é causado por nível alto de água no tubulão de vapor conjugado com o balanço do navio, ou falha dos separadores de vapor e água ou de órgãos internos. “Priming” consiste no arrastamento de volumes de água carregadas através da tubulação. Estes volumes podem inclusive alcançar as rodas de palhetas da turbina de vapor e neste caso provocar serias avarias.

6. Conclusões

A qualidade da água de alimentação da caldeira é fator determinante da confiabilidade e da manutenibilidade da instalação a vapor. A manutenção dos parâmetros recomendados quer por normas técnicas, quer por fabricantes de tratamentos químicos é fundamental para a conservação perfeita do ciclo de vapor. Negligenciar as recomendações técnicas significa avarias sucessivas da instalação com alto custo de manutenção e indisponibilidade do bem.

7. Referências

- a) Steam Generating Plant Inspector Manual – S9221–D2–MMA–010;
- b) Boiler Water/Feedwater Test and Treatment Manual – S9086 –GX–STM – 020/CH–220;
- c) CHAUDIERES 27 EMM/MAT/EP;
- d) Boiler TECHNICIAN 3 & 2 – Navedtra 12140;
- e) Boiler Chapter 221– S9086–GY–STM –010;

- f) Industrial Water Treatment Operation and Maintenance UFC 3-240-13FN; e
- g) Shipboard Water Treatment Manual – Drew Ameroid Marine.