

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Maximização da produtividade do tratamento de água de resfriamento em plantas petroquímicas - Metodologia e Resultados

Ricardo A. Fernandes¹, Luiz Carlos Sivelli²

RESUMO

O trabalho apresenta os resultados pioneiros alcançados no tratamento de água de resfriamento em plantas petroquímicas no tocante ao aumento do tempo de campanha dos permutadores de calor críticos e a maximização da vida útil dos feixes de troca térmica.

Mediante a aplicação de tecnologias de ponta, soluções de engenharia e de sistemas de gestão customizados, para o atendimento das criticidades operacionais existentes nas plantas, associados ao comprometimento mútuo entre o usuário e fornecedor, é possível alcançar substanciais e tangíveis ganhos de produtividade.

Neste trabalho são descritos todas as etapas deste processo, que são de suma importância para a conquista destes pioneiros resultados, bem como são apresentados os resultados práticos obtidos nos condicionamentos de corrosão e fouling em permutadores com campanhas contínuas de 7 anos.

Palavras-chave : corrosão, fouling, campanha de trocadores de calor, tecnologias para sistemas de resfriamento e sistemas de gestão.

ABSTRACT:

The paper presents the unique results achieved in the cooling water treatment in petrochemical plants, concerning the increase of the run length and the shelf life of critical heat exchangers.

By applying leading edge technologies, engineering solutions and customized management systems focused on the main critical aspects of the plant, associated with the mutual commitment between the user and the supplier, it is feasible to achieve tangible productivity improvements in the cooling water treatment.

The paper shows all steps of the process that are crucial to get these unique results, as well as presents the major technical results achieved in the corrosion and fouling processes of heat exchangers with 7 year run length.

Keywords: corrosion, fouling, heat exchanger run length, cooling water technologies and management system process.

(1) Gerente de Marketing – Kurita do Brasil

(2) Gerente Comercial – Kurita do Brasil

1. Introdução

O cenário econômico mundial com tendência recessiva, bem como a maior abertura do mercado brasileiro, vem exigindo em todos os segmentos da indústria nacional a busca de ganhos de produtividade significativos capazes de aumentar a competitividade de seus produtos. Na indústria petroquímica, a obtenção de campanhas prolongadas, assim como o aumento da vida útil dos feixes de troca térmica, são alternativas efetivas para se alcançar uma maior produtividade. Neste segmento, o tratamento de água de circuitos de resfriamento assume importância preponderante, face ao seu íntimo comprometimento com a continuidade do processo produtivo.

No decorrer das últimas décadas, a indústria petroquímica vem procurando aumentar a sua campanha produtiva, contudo para o cumprimento desta meta, torna-se imprescindível um contínuo aprimoramento dos processos de gestão no tratamento da água de resfriamento aplicado, tendo em vista a elevada complexidade existente nos circuitos.

Este trabalho objetiva ilustrar as principais etapas do Processo de Gestão implementado em sistemas de resfriamento de plantas do segmento petroquímico, incluindo tecnologias para a maximização da performance dos controles de corrosão e de fouling, bem como as importantes ferramentas utilizadas para a obtenção de campanhas pioneiras no mercado brasileiro.

Mediante os resultados mensurados e apresentados neste trabalho, busca-se apresentar os reais benefícios do Processo de Gestão aplicado em plena conformidade com a diretriz básica que seria a obtenção de campanhas de até 7 anos, sem a necessidade de qualquer intervenção mecânica, mesmo na presença de condições extremamente críticas no que tange as condições operacionais dos equipamentos de troca térmica, qualidade de água e contaminações diversas.

Por fim, são estabelecidas algumas metas futuras de trabalho, visando o aprimoramento contínuo da performance global nas campanhas subsequentes das unidades, mediante a implementação de novas ferramentas e inovações tecnológicas, de forma a contribuir de maneira ainda mais significativa para o aumento da produtividade e competitividade.

2. Principais Características de um Sistema de Resfriamento do Segmento Petroquímico.

Os sistemas de água de resfriamento de plantas petroquímicas, em especial de Centrais de Matérias Primas, são extremamente complexos e requerem a aplicação de um Programa de Gestão bastante proativo e produtivo, tanto no aspecto de tecnologias, quanto do conjunto de ferramentas para o perfeito acompanhamento do sistema, principalmente quando se trata do cumprimento de longas campanhas. Quanto maior for a previsibilidade das eventuais perturbações que podem ocorrer no sistema, maior será a performance global do tratamento químico aplicado. Como consequência da aplicação de um Programa de Gestão diferenciado, além do cumprimento de longas campanhas dos equipamentos de troca térmica críticos, a vida útil dos feixes também será maximizada, traduzindo em reais benefícios e ganhos de produtividade.

A figura 01 apresenta o cenário das principais variáveis que devem ser plenamente conhecidas em um sistema de resfriamento, para que a customização do Programa de Gestão propicie a materialização dos ganhos definidos como meta. Quanto maior for o conhecimento destas variáveis e a inter-relação existente entre as mesmas, maior será a possibilidade para o sucesso, visto que tanto a tecnologia a ser aplicada, quanto as ferramentas de acompanhamento poderão ser dimensionadas para o pleno atendimento das criticidades operacionais existentes

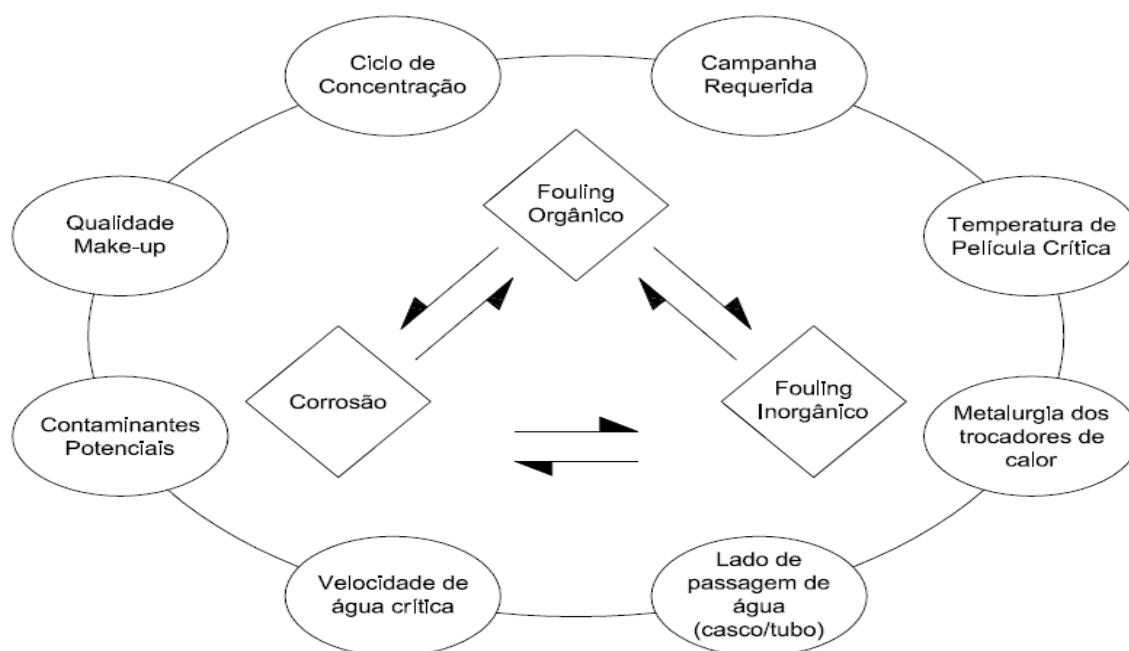


Figura 01

A Figura 02 apresenta uma visão das principais criticidades existentes nos sistemas de resfriamento, cujos resultados práticos da aplicação da Metodologia de Gestão são apresentados neste trabalho.

Variável	Case 1	Case 2
Campanha Requerida (anos)	6	7
Ciclo de Concentração	14	12
Qualidade Make-up	Tendência corrosiva/presença de alumínio	Tendência alcalina elevada concentração de sílica
Metalurgia dos Feixes de Troca Térmica	Aço carbono ligas de cobre	Aço carbono ligas de cobre
Velocidade de Água Crítica (m/seg)	> 0,8 m/seg	50% de redução em relação ao projeto
Temperatura Película Crítica (°C)	50	55
Lado de Passagem de Água	90% tubos 10% casco	90% tubos 10% casco
Possíveis Contaminantes	Hidrocarbonetos	Hidrocarbonetos

Figura 02

3. Dimensionamento do Programa de Gestão do Tratamento de Água de Resfriamento

Conhecidas as exigências estabelecidas para o sistema de resfriamento em termos de campanha e as variáveis mencionadas no ítem 2, bem como a relação entre as mesmas, torna-se prioritária a definição do Programa de Gestão adequado às condições do sistema.

A figura 3 evidencia a concepção básica do Programa de Gestão, sendo que no transcorrer deste trabalho, são evidenciados os principais aspectos e a importância de cada ferramenta.

O importante é assegurar que o Programa de Gestão seja proativo, seja representativo às condições críticas do sistema, possua máximo índice de previsibilidade e que o corpo técnico formado pelo fornecedor e usuário avalie os resultados de forma consistente e por conseguinte tome as ações cabíveis em tempo hábil.

Cumprir registrar que a frequência para a realização dos diversos monitoramentos é função intrínseca da criticidade operacional do sistema de resfriamento e também de um acordo prévio realizado entre o usuário e o fornecedor.

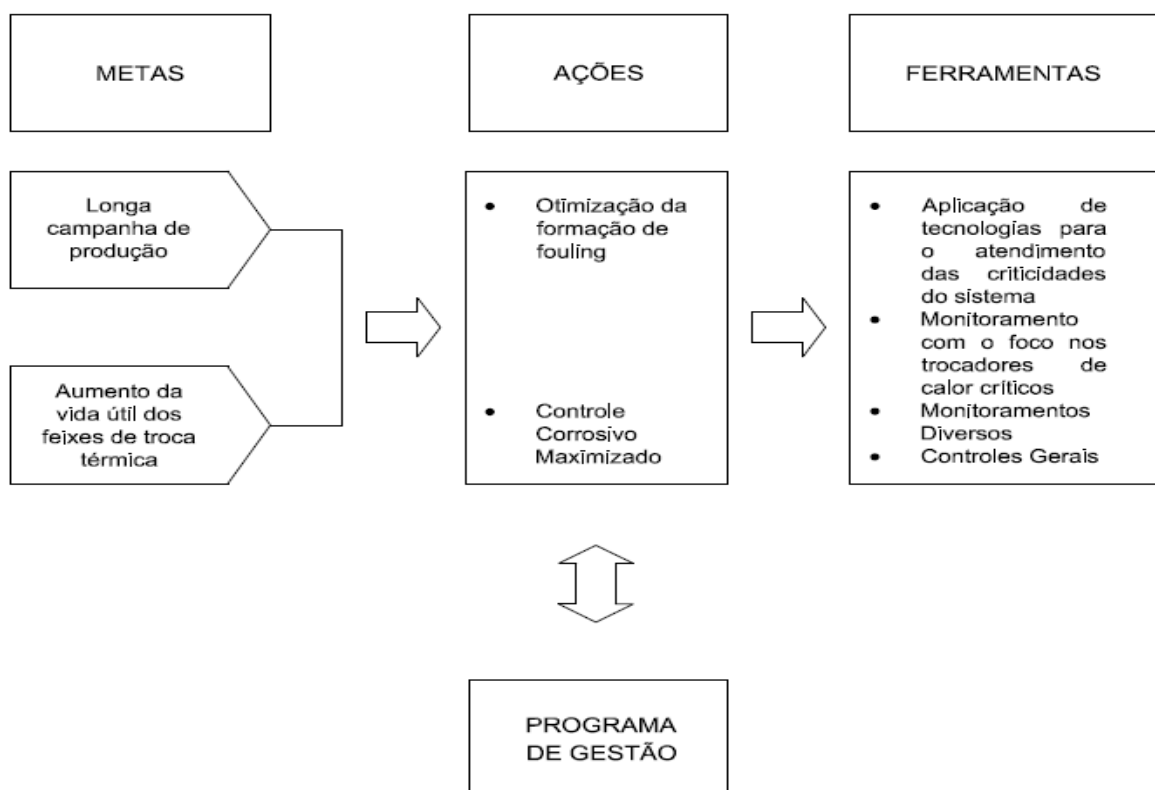


Figura 03

4. Caracterizando as Etapas do Programa de Gestão

A figura 4 apresenta o modelo básico aplicado, sob o prisma técnico, para o estabelecimento do melhor programa de tratamento de forma a atender as necessidades de maior tempo de campanha. Em linhas gerais deve-se avaliar de forma criteriosa a situação vigente, identificar perfeitamente os pontos de engargalamento e implantar as medidas necessárias para viabilizar o aumento da campanha.

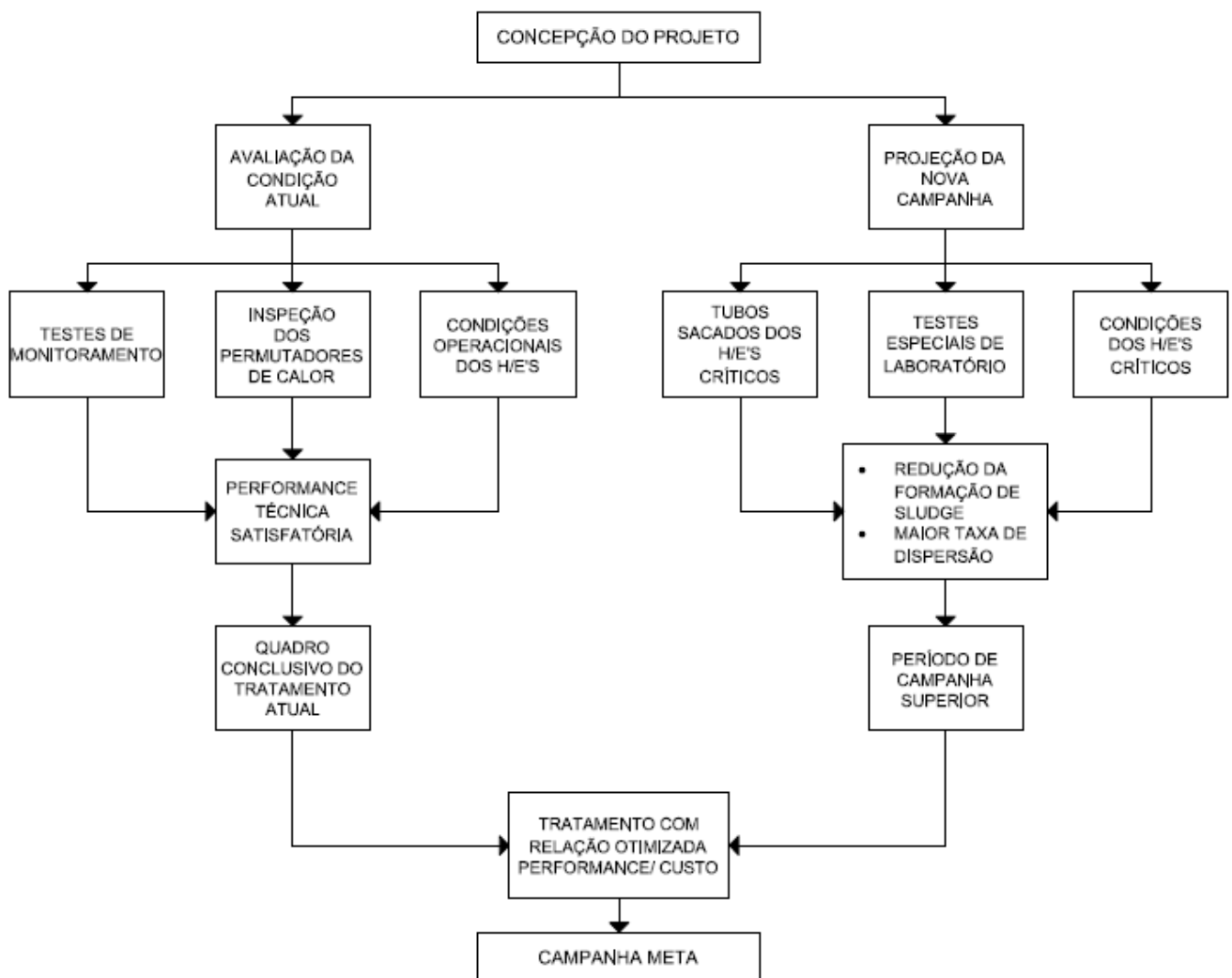


Figura 04

Apresentam-se a seguir as principais ações implementadas no que concerne à gestão sobre os condicionamentos de corrosão, fouling e ferramentas utilizadas no transcorrer das mencionadas campanhas.

4.1. Gestão sobre o Condicionamento Corrosivo.

Para assegurar a confiabilidade operacional em campanhas prolongadas, torna-se imprescindível a adoção de cuidados especiais, no tocante aos tipos de inibidores de corrosão utilizados, bem como a metodologia correta para a aplicação dos mesmos. Da mesma forma, a aplicação de um rigoroso controle de fouling, tanto inorgânico, quanto orgânico, deve ocorrer de forma sistêmica para a minimização do processo de corrosão do tipo pitting, bem como para evitar a perda de eficiência operacional dos trocadores de calor das unidades de produção. O parâmetro fouling será discutido no capítulo posterior deste trabalho.

Com relação aos tipos de inibidores de corrosão a base de fosfatos, recomenda-se aplicar polifosfatos ou fosfonatos, dependendo do potencial incrustante da água de resfriamento auferido pelo pH, Alcalinidade total, Dureza e Sílica da mesma, bem como das condições de temperatura de película e de velocidade de água existentes nos permutadores de calor.

Com relação ao fosfato inorgânico, recomenda-se a aplicação de múltiplos fosfatos ao invés da aplicação exclusiva de ácido fosfórico, face a incidência das seguintes vantagens:

- ✓ A dosagem exclusiva de H_3PO_4 (forma orto-fosfato após neutralização na água de resfriamento) apresenta uma menor eficiência no controle corrosivo.
- ✓ A mistura polifosfato + orto-fosfato (através da reversão natural no sistema) proporciona um rendimento significativamente superior.
- ✓ Em elevadas temperaturas e baixa velocidade, o orto-fosfato tem maior tendência a formar incrustações duras.
- ✓ A aplicação exclusiva de o- PO_4 requer uma dosagem maior de dispersante para assegurar as permanências ativas de PO_4 e Zn como inibidor de corrosão

A figura 05 evidencia os benefícios advindos da aplicação de múltiplos fosfatos.

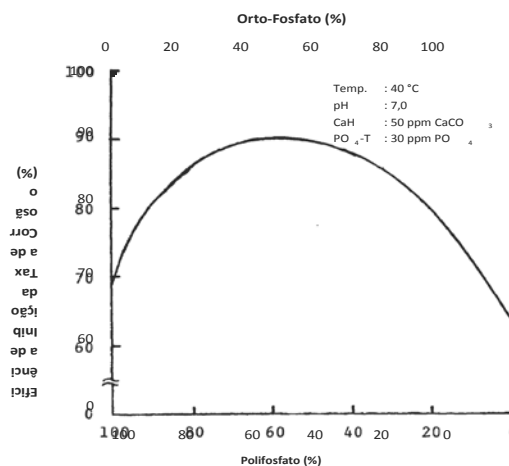


Figura 05 - Comparativo da Eficiência de Inibidores de Corrosão entre Polifosfato e Orto-Fosfato

Outro conceito extremamente importante para a minimização do processo corrosivo consiste na correta metodologia para a aplicação do inibidor de corrosão zinco.

Para a operação de sistemas de resfriamento com longas campanhas, aplica-se o conceito de FFZ (Film Formable Zinc), cujos benefícios e diferenciais são apresentados a seguir.

- Quais os objetivos do FFZ ?
 - ✓ Assegurar a excelência tecnológica dos polímeros para a prevenção de problemas de “fouling”.
 - ✓ Permitir o máximo desempenho anti-corrosivo por “pitting”, mesmo encontrando-se a AGR submetida a condições alcalinas, com elevado potencial de “slime” ou alto tempo de residência.

- O que foi considerado no estudo do FFZ ?
 - ✓ As diferentes velocidades de água nos permutadores de calor em um sistema de resfriamento e sua influência na corrosão por “pitting”.
 - ✓ A contribuição de filtros laterais, consequentemente evidenciando a influência dos sólidos suspensos em um tratamento de água.
 - ✓ O tempo de residência de sistemas de resfriamento.

- Quais contramedidas o FFZ possibilitou realizar?
 - ✓ Minimização da influência de elevados teores de sólidos suspensos na água de resfriamento.
 - ✓ Introdução de novos dispersantes e sua eficácia específica para cada planta.
 - ✓ Utilização do conceito para melhor dimensionar um tratamento químico em condições de “stress”.
 - ✓ Seleção de dispersante capaz de garantir que o zinco atue em sua plenitude como compactador da película protetora, conforme as características particulares de cada sistema.

A figura 06 evidencia a influência do FFZ no controle de corrosão e desta forma torna-se uma importante ferramenta para o aumento da vida útil dos feixes de troca térmica.

Cumprido ressaltar que na presença de metalurgia a base de ligas amarelas, a aplicação de inibidor com alta performance para o controle de corrosão em cobre é extremamente importante para o efetivo controle de corrosão galvânica.

A Figura 07 evidencia a influência do Cobre na catálise do processo corrosivo ferroso em sistemas de resfriamento.

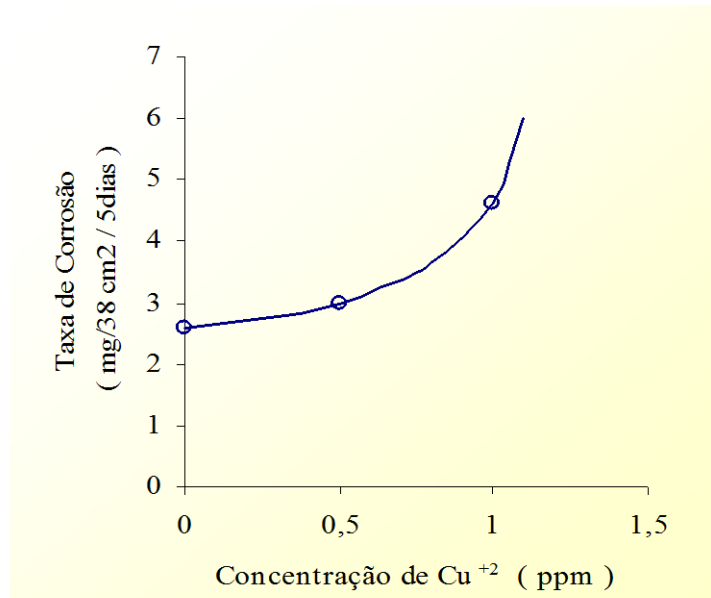


Figura 07

A Figura 08 apresenta o processo de corrosão ao cobre, relacionado com o tipo de fosfato utilizado, que deve ser considerado, quando do dimensionamento do programa de tratamento da água de resfriamento.

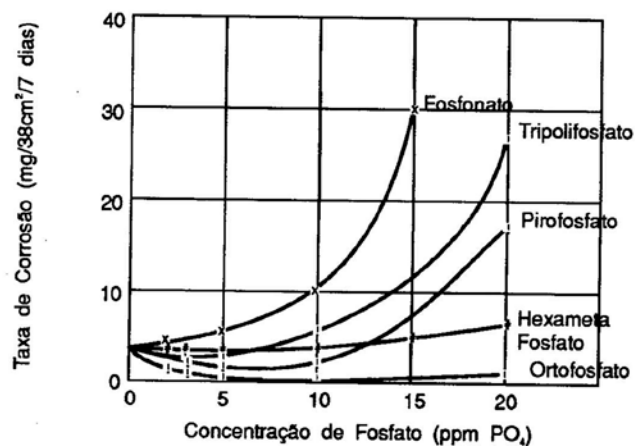


Figura 08

Recomenda-se portanto, a aplicação da associação entre moléculas de azóis para viabilizar um efeito anti-corrosivo complementar.

- O Tolitrizaol (TT), apesar de ser melhor inibidor de corrosão, na presença de cobre solúvel tem a sua eficiência afetada.

- A presença do Mercaptobenzotriazol (MBT), que forma complexo solúvel com íons cuprosos, minimiza esta condição de forma acentuada.

Recomenda-se portanto para o cumprimento de longas campanhas, a mistura de TT e MBT formando o complexo $\text{Cu}(\text{MBT})_2$ possibilitando a maximização da eficiência inibitória do TT na corrosão em cobre.

Cumpra registrar que a escolha da melhor faixa de controle para os inibidores de corrosão é função intrínseca da qualidade da água de resfriamento, das condições operacionais dos trocadores de calor existentes no sistema e do tempo de campanha da planta.

4.2 Gestão da Vida útil dos Feixes dos Permutadores de Calor

Diversos monitoramentos são comumente utilizados em sistemas de resfriamento para o monitoramento de corrosão. Dentre os mais utilizados, mencionam-se os cupons de teste utilizando-se as metalurgias existentes no sistema de resfriamento, corrater, etc.

De fato, são monitoramentos importantes, porém não são suficientes quando se trata do cumprimento de longas campanhas de um sistema de resfriamento, visto que os mesmos não refletem a intensidade do processo de corrosão localizada, dando maior ênfase para o do tipo generalizada e não quantificam a velocidade de formação do pitting. Adicionalmente, como não existe o processo de troca térmica nestes monitoramentos, os mesmos não refletem as condições do sistema, com a acuidade necessária em se tratando de longas campanhas. As mencionadas ferramentas apresentam uma tendência do processo corrosivo, contudo não permitem alcançar o nível de previsibilidade necessária para longas campanhas.

Com o objetivo de se prever com maior acurácia a vida útil de um feixe de trocador de calor, torna-se necessária a aplicação de uma ferramenta adicional que consiga prever e acompanhar a vida útil dos feixes.

Para a utilização desta ferramenta, há a necessidade de se efetuar a medição da profundidade dos pittings nos tubos dos trocadores de calor mais representativos do sistema em uma parada geral da planta, anterior ao início da nova campanha. Para a definição do modelo matemático do processo corrosivo, é recomendável além da medição dos pittings nos feixes dos trocadores críticos, a medição nos tubos do trocador piloto, para que a sua acurácia seja a maior possível. Registra-se que a utilização de trocador de calor piloto como ferramenta de monitoramento é de extrema valia para o acompanhamento do processo corrosivo. Maiores detalhes sobre a operação do piloto são apresentados no item 4.4 deste trabalho.

Sabe-se que o comportamento da velocidade da formação de “pitting” não é linear, mas obedece a relação:

$$X_p = at^b$$

Onde:

X_p = profundidade de pitting (mm)

t = tempo de vida útil (dias)

a e b = constantes empíricas

Em ensaios realizados com teste de trocador piloto em uma determinada planta petroquímica e que será detalhado posteriormente neste trabalho, foi quantificado o modelo matemático para mensurar o processo corrosivo deste sistema.

Todavia, com os tubos sacados na parada geral da planta anterior à nova campanha, no caso de 7 anos, associado aos valores já existentes (piloto + tubos sacados na parada anterior) foi possível plotar-se uma curva mais fidedigna da atual realidade do condicionamento corrosivo puntiforme no circuito em questão.

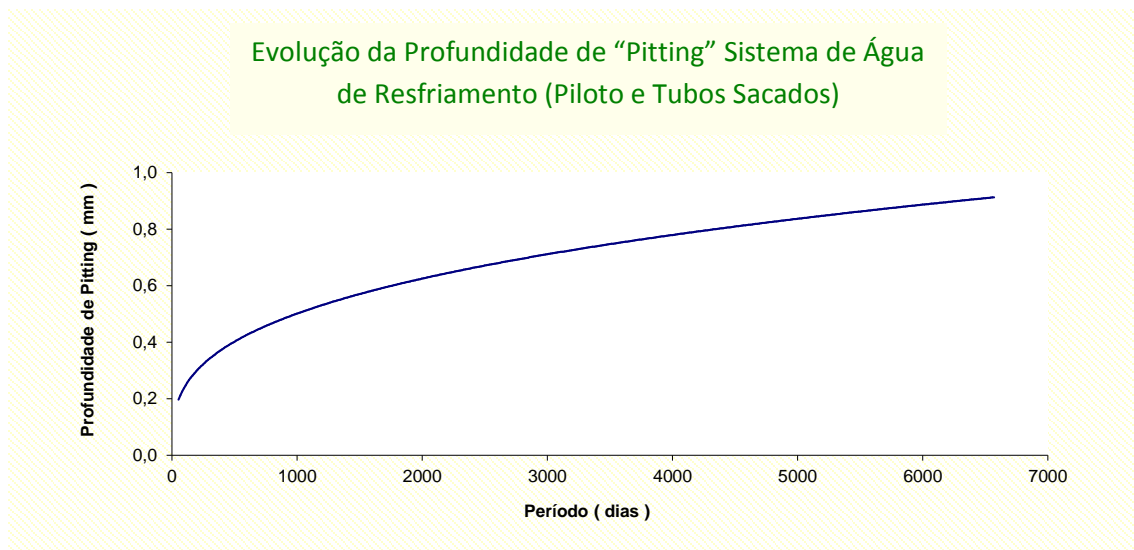


Gráfico 01

Do gráfico plotado, obtém-se o comportamento a seguir:

$$Y = 5,57 * 10^{-2} t^{0,3182}$$

A equação apresentou um fator de correlação de $R^2 = 0,9826$ ratificando a representatividade estatística da mesma.

Com o modelo matemático obtido, e sabendo-se que a espessura de parede mínima definida como limite de operação estabelecido pela planta em questão, de 1,1 mm, tem-se:

- Espessura inicial do tubo = 2,11 mm.
- Pitting máximo permissível = 1,11 mm.

Período de vida Útil = 32 anos

Desta forma, considerando-se o tempo de vida útil dos feixes vigente, pode-se prever o tempo residual dos mesmos. As constantes da equação podem até variar com o tempo, embora com reduzida intensidade, contudo é uma ferramenta valiosa para a previsão de vida útil. O Teste de Íris também é muito importante para a previsão de vida útil, porém este considera o processo corrosivo do tipo pitting como sendo linear, o que não ocorre na realidade e é representado de forma mais correta através do modelo matemático apresentado.

4.3 Gestão sobre o Condicionamento de Fouling.

A aplicação de um otimizado controle de fouling nos permutadores de calor é, sem dúvida, o mais preponderante fator para a operação de um sistema de resfriamento em longas campanhas. Além do prejuízo na eficiência de troca térmica, a presença de fouling pode ocasionar o processo de corrosão sob depósito, geralmente do tipo localizado, propiciando condições inadequadas para a operação longa estabelecida como meta.

A figura 09 apresenta a evolução da tecnologia de dispersantes, evidenciando a incidência de investimentos expressivos, para viabilizar o aumento do tempo de campanha dos trocadores de calor

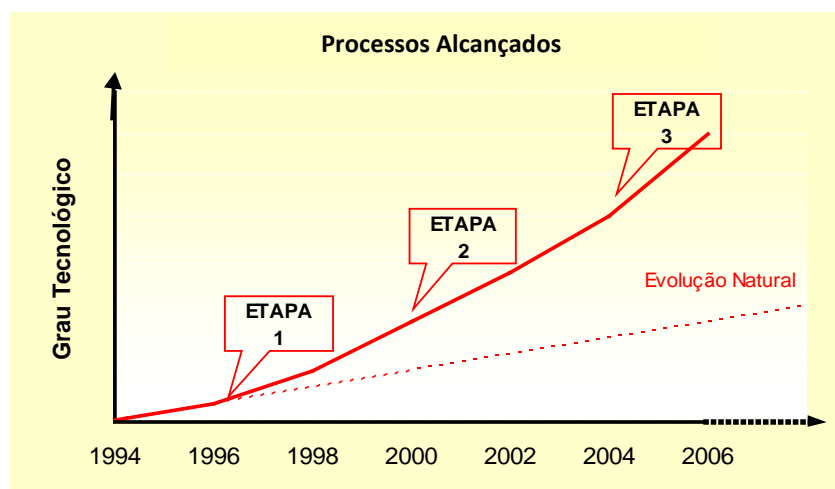


Figura 09

- i) **Evolução Natural:** acreditar nos contínuos desenvolvimentos de “Dispersantes Mais Flexíveis” para qualquer água.
- ii) **Tecnologia de última geração na “Etapa 1”:** síntese de múltiplas bases dispersantes, esgotando a sua tecnologia de aplicação.
- iii) **Tecnologia de última geração na “Etapa 2”:** associação das múltiplas bases químicas em um único produto, com “Know how” de aplicação consolidado.
- iv) **Tecnologia de última geração na “Etapa 3” (presente):** inserção de moléculas etoxiladas/propoxiladas capazes de conquistar novos ganhos sobre parâmetros ainda engargaladores.

Quais os fundamentos aplicados no seu desenvolvimento?

- ☛ Os dispersantes até então existentes possuíam caráter meramente aniônicos.
- ☛ Parâmetros como alumínio, cálcio e sílica teriam maior flexibilidade de dispersantes que não tivessem como efeito exclusivo a repulsão eletrostática das partículas.

A evolução da tecnologia de dispersantes demonstra que não existe um único dispersante capaz de atuar com a mesma performance desejada em todos os sistemas de resfriamento.

Cada parâmetro na água de resfriamento confere um potencial incrustante ao Sistema.

Portanto, mediante o pleno conhecimento da interferência de cada parâmetro na taxa de fouling e a relação existente entre os mesmos, foi possível o desenvolvimento de dispersantes específicos. Torna-se, portanto imprescindível analisar de forma criteriosa os parâmetros da água de resfriamento e as condições operacionais dos trocadores críticos, para que sejam escolhidos os dispersantes mais adequados, de forma a permitir a atuação para cada fator de engargalamento e, por conseguinte alcançar a meta de longas campanhas.

A figura 10 estabelece um diferencial entre Tecnologias de Ponta e a Tecnologia de Dispersantes de Última Geração, demonstrando a grande vantagem de se aplicar um mix de dispersantes específicos para atender as criticidades do sistema, ao invés de um único tipo de dispersante.

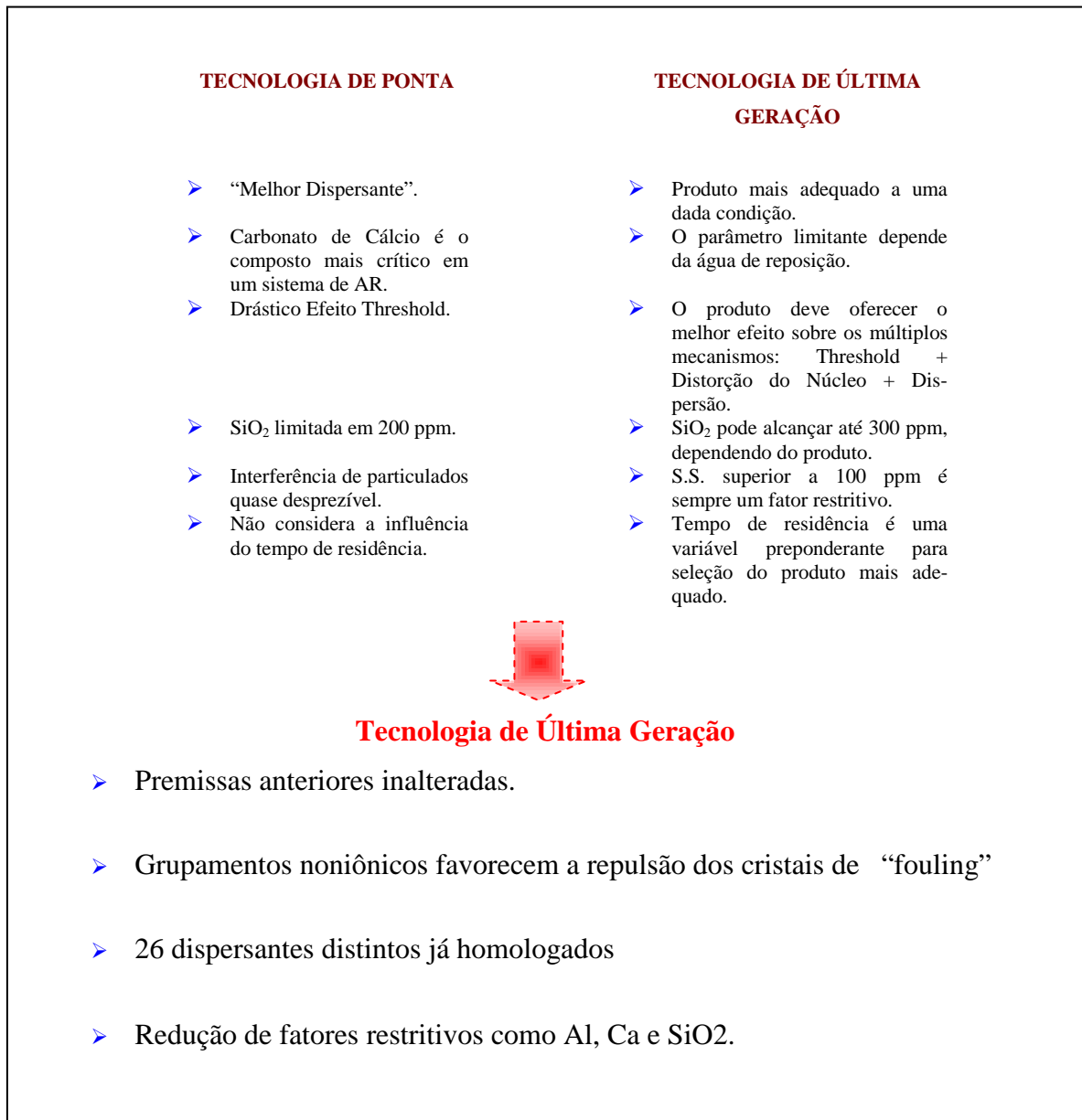


Figura 10

Mediante a aplicação de um blend de dispersantes, torna-se possível o aumento significativo da flexibilidade dos controles dos parâmetros da água de resfriamento, permitindo a torre de resfriamento operar com alto ciclo de concentração, condição esta cada vez mais exigida pelo mercado, bem como para utilizar fontes de make-up com qualidade mais crítica.

Prioritariamente, o blend de dispersantes é fundamental para viabilizar a operação longa e contínua dos trocadores críticos, visto que cada parâmetro crítico será devidamente controlado.

A tabela 01 evidencia o ganho de flexibilidade nos controles da água de resfriamento, conforme mencionado anteriormente.

Variáveis Críticas	Tecnologia de Ponta	Tecnologia de Última Geração
		Limite Natural
pH	6,8 a 8,5	pH: 6,8 a 10,0
Turbidez/ S.S	< 40	Turb./ S.S < 100
Dureza Cálcio	< 200	Ca-H: 1.000 a 2.000
Sílica (usual)	< 130	SiO ₂ < 250 Kps Mg-Si < 10 ⁻²⁹
Cloreto + Sulfato	< 600	Cl ⁻ + SO ₄ ²⁻ < 10.000
Ferro Total	< 3,0	Fe < 10,0
Óleos e Graxas	< 10	O/G < 30
DQO _{Mn}	< 15	DQO _{Mn} < 80
Tempo de Residência	< 200	t _R < 800 h
Carga de Zinco	< 5,0	Zn < 10,0
Carga de Alumínio	< 1,5	Al < 5,5
Carga de Cobre	< 1,0	Cu < 2,0
Carga de Amônia	< 10	NH ₃ < 80
Sílica (novo)	< 130	SiO ₂ < 300 Kps MgSi < 5 . 10 ⁻²⁹

Tabela 01

Cumpra registrar que neste trabalho foi dada uma maior ênfase ao fouling inorgânico, contudo é imprescindível também a aplicação de um rigoroso controle do fouling orgânico, no caso de operação em longas campanhas. Adicionalmente à aplicação de biocidas oxidantes, deve-se analisar sempre a necessidade da aplicação de biocidas não oxidantes e também de biodispersantes, para que a assepsia nos trocadores de calor seja a maior possível. Diversas tecnologias de ponta encontram-se disponíveis para esta finalidade. Ressalta-se que a condutividade térmica do fouling orgânico é quase a metade do inorgânico, portanto, o cuidado deve ser máximo.

Encontra-se também disponível uma Tecnologia de Última Geração patenteada, cujo produto ataca a camada polimérica da membrana celular dos microorganismos, destruindo-a e consequentemente matando-os. Este produto também atua como um poderoso agente removedor de biofilme, com atuação em todo o sistema de resfriamento. Além de ser muito mais estável do que outros produtos oxidantes existentes no mercado, tais como cloro e bromo, este produto proporciona uma interferência bastante inferior na taxa de corrosão em aço carbono, cobre e aço inox, quando comparado com os mencionados oxidantes convencionais.

Diversos monitoramentos para o controle de fouling orgânico são realizados, tais como contagem bacteriológica total, análise qualitativa de microorganismos, Índice de Aderência de Slime, dentre outros, contudo é muito importante a análise do efeito do mesmo na operação dos trocadores de calor.

4.4 Efetiva utilização de Trocador de Calor Piloto na Gestão de Fouling

Para o monitoramento de fouling em sistemas de resfriamento, é utilizado normalmente monitores de depósito dentre outros dispositivos, porém para longas campanhas, o mesmo torna-se aquém do necessário, visto que não é possível simular de forma acurada as condições operacionais de um trocador crítico neste dispositivo. Como referência e para fins de tendência, o mesmo é válido, mas não suficiente para ser utilizado como ferramenta de previsibilidade.

No transcorrer de longas campanhas recomenda-se como ferramenta de monitoramento proativo e preventivo, a operação de um trocador de calor piloto, base padrão NACE, composto de 10 (dez) tubos, possuindo seu escoamento em 2 (dois) passes, com água fluindo pelos tubos. Como fluido a ser resfriado, pode-se utilizar vapor de baixa pressão. A temperatura de película e velocidade de água são definidas com base nas condições operacionais existentes no permutador de calor crítico da unidade de produção.

Por possuir um maior fluxo térmico e maior incremento de temperatura, quando comparado com a maioria dos trocadores de calor da planta, a utilização de trocador piloto apresenta condições mais críticas, fator este importante para o acompanhamento do processo de geração de fouling.

A grande vantagem da utilização de um trocador piloto é que o mesmo permite as seguintes avaliações e medições de forma sistêmica:

- Realização de inspeções sistemáticas nos tubos.
- Evolução dos processos de formação de fouling e de corrosão.
- Medição da espessura de incrustação e quantificação da taxa de deposição (MCM).
- Análise química dos depósitos eventualmente formados.
- Quantificação do processo de corrosão localizado, através da medição da profundidade de pitting.

Todas as ações acima embasam de forma significativa a implantação contínua de medidas de otimização.

Ao longo da campanha recomenda-se adotar uma sistemática de substituição mensal de 2 (dois) tubos, um do passe de entrada e outro do passe de saída, visando a obtenção de um perfil mais fidedigno para avaliar-se a evolução do fouling em função do tempo.

Os resultados das espessuras de incrustação quantificados no permutador de calor piloto permitem a obtenção de um modelo matemático que expressa com maior acuidade a evolução do fouling do sistema de resfriamento, cuja metodologia é evidenciada na figura 11.

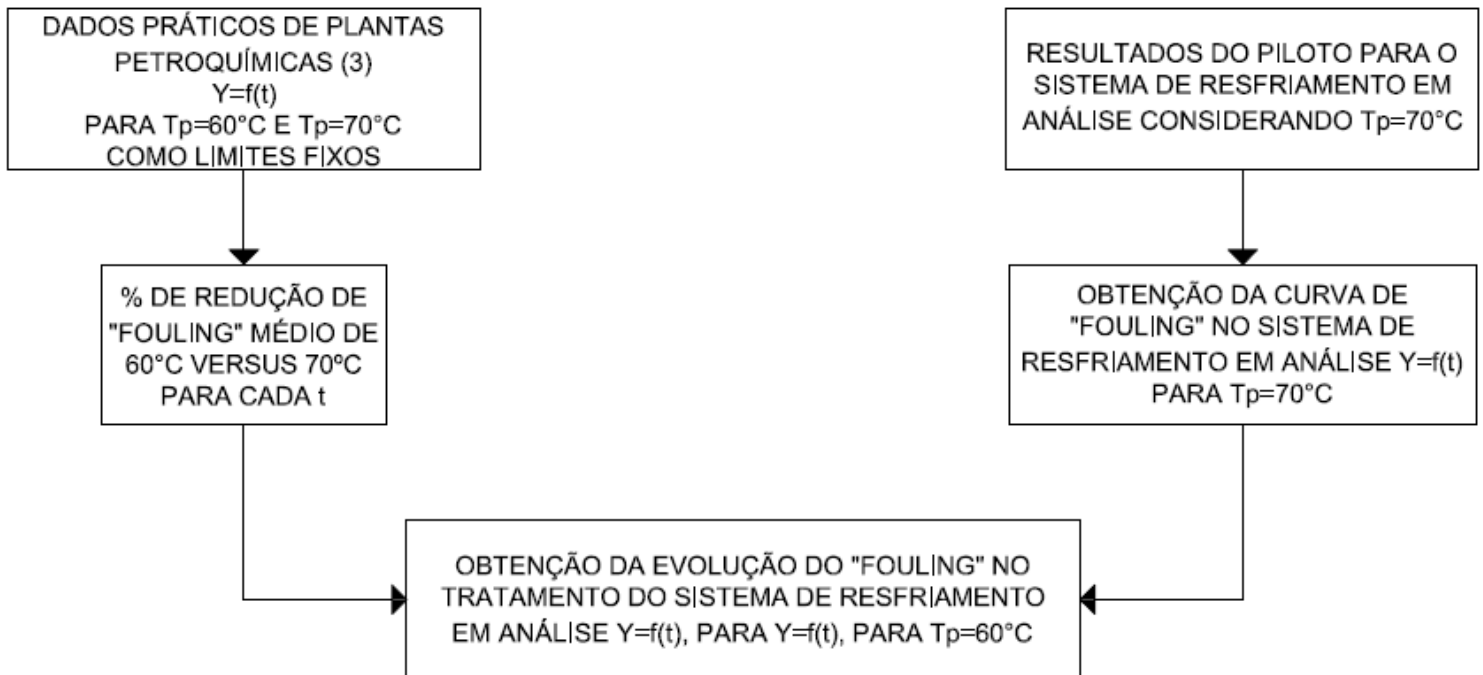


Figura 11

A equação que melhor expressa a velocidade de formação de “fouling” em função do tempo de permutadores de calor de sistemas de resfriamento apresenta um comportamento assintótico, através de uma curva de potência do tipo:

$$Y = a t^b$$

Onde:

- Y = espessura de incrustação (mm)
 t = tempo de operação (dias)
 a e b = constantes, dependendo da temperatura de película.

Com base nos resultados obtidos no teste em uma determinada planta petroquímica, definiu-se para o trocador piloto, o modelo matemático a seguir:

$$Y = 9,9840 \cdot 10^{-3} t^{0,3958}$$

A equação possui um fator de correlação de 0,961 o que confirma a representatividade do modelo matemático.

O gráfico 02 a seguir destaca a curva obtida com a equação anterior.

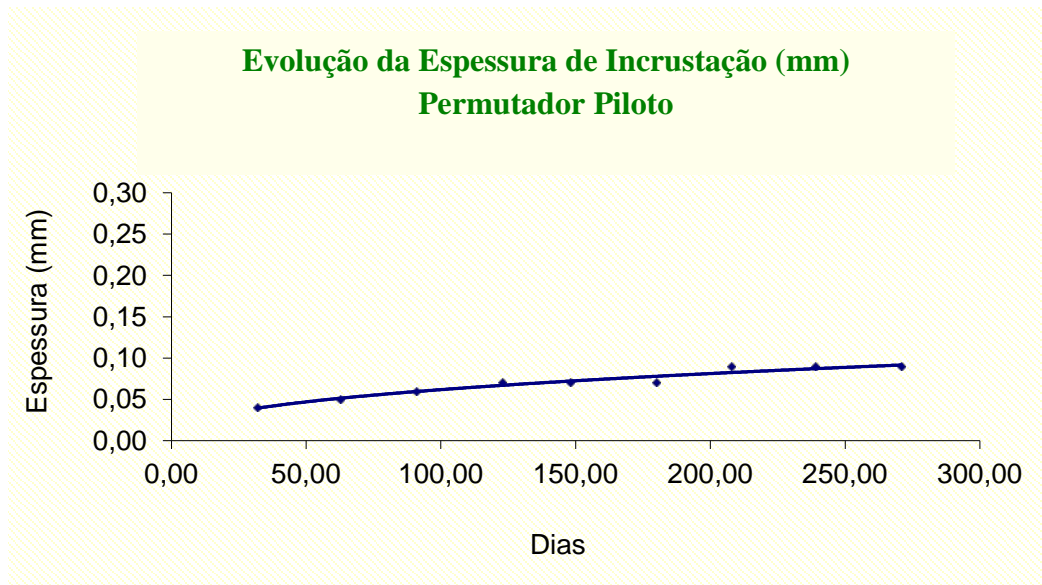


Gráfico 02

A condutividade térmica dos depósitos encontrados no teste piloto em questão foi de 0,5 a 0,6 kcal/h.m.°C, que juntamente com o “fouling factor” dos equipamentos da planta permitiu calcular a espessura máxima de “fouling” seco, isento de água, ou seja

$$E_{\text{máximo}} = K * FF * 103$$

Onde:

$E_{\text{máximo}}$ = espessura máxima permissível de fouling isento de água (mm)

K = condutividade térmica dos depósitos encontrados no teste (kcal/h.m.°C)

FF = resistência de depósito de projeto = $4,0 \times 10^{-4}$ h m²°C/kcal

$E_{\text{máx.}}$ = 0,20 a 0,24 mm ao final da campanha.

Diante do modelo matemático obtido no piloto tornou-se possível realizar uma projeção do tempo de campanha máximo para o sistema de resfriamento em questão, considerando-se a espessura máxima determinada. Assim:

$$E = 0,22 \text{ mm} \Rightarrow t = 2.460 \text{ dias} = 82 \text{ meses}$$

Adicionalmente à utilização do trocador de calor piloto, recomenda-se a avaliação do coeficiente global de troca térmica dos trocadores críticos, com uma frequência mínima mensal. Mediante a evolução do coeficiente global dos trocadores críticos, pode-se implementar medidas de otimização, quando necessárias, e também avaliar rapidamente os resultados advindos das ações tomadas.

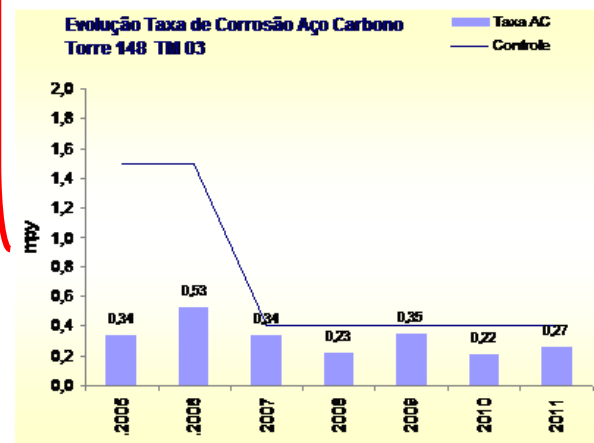
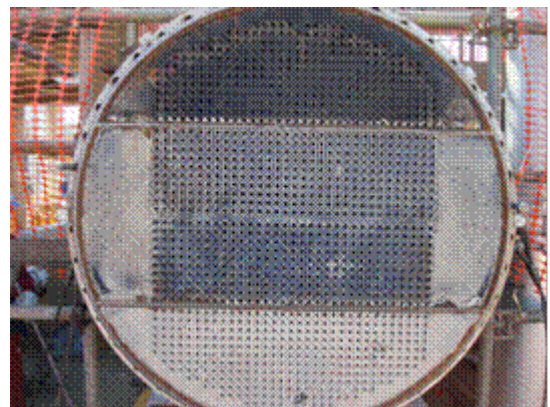
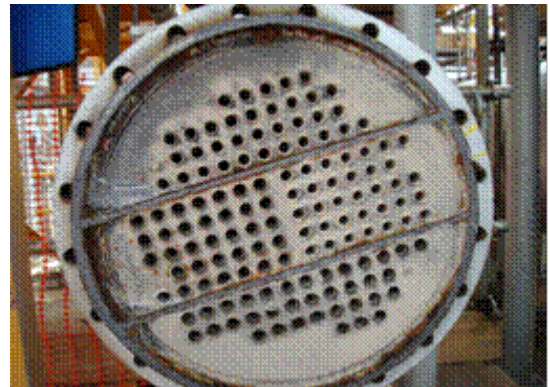
5. Resultados Mensurados em Sistemas de Resfriamento com longas campanhas.

Apresentam-se a seguir alguns resultados obtidos em sistemas petroquímicos de grande porte, mediante a plena utilização da Metodologia abordada neste trabalho.

Em se tratando de unidades extremamente críticas, as campanhas de 6 e de 7 anos são pioneiras, assim como os otimizados controles de corrosão e de fouling alcançados.

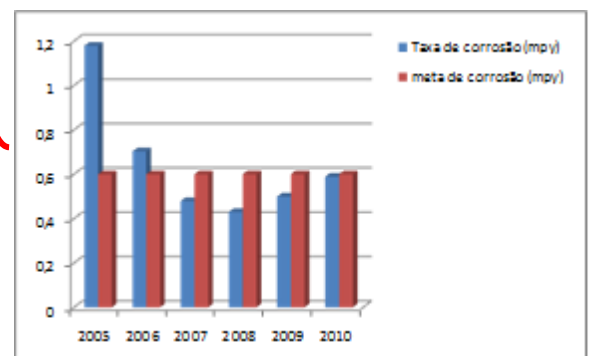
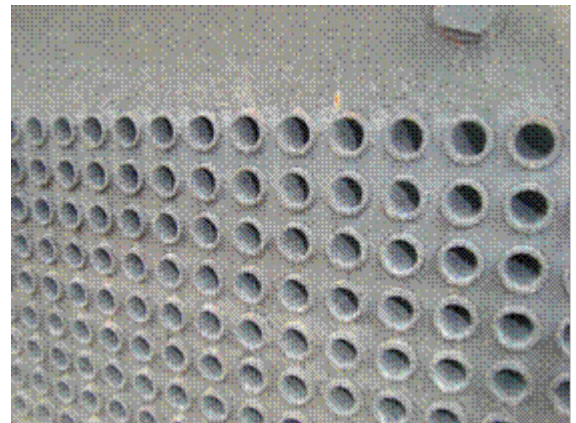
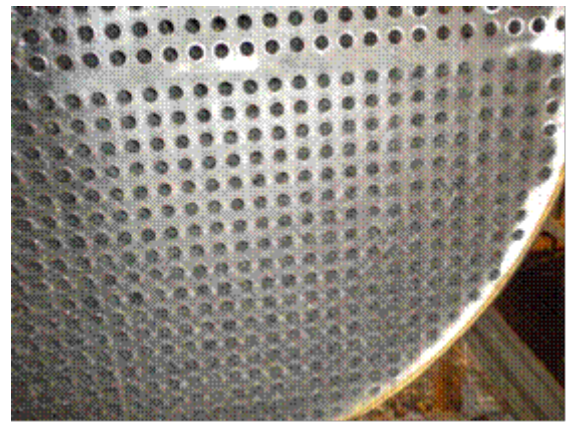
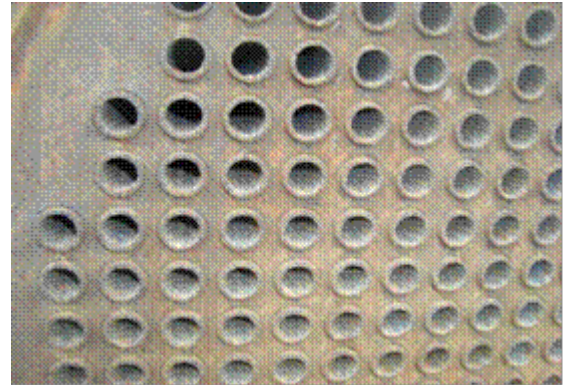
Caso I

- Água com tendência alcalina e elevado teor de SiO_2 (< 300 ppm);
- 12 ciclos de concentração;
- 7 anos de campanha;
- $t_{\text{película}} = 50^\circ\text{C}$



Caso II

- Água com tendência corrosiva;
- 14 ciclos de concentração;
- 6 anos de campanha;
- $t_{p\acute{e}l\acute{u}cula} = 40^{\circ}C$



6. Conclusões e Temas Futuros de Trabalho.

Conforme ressaltado ao longo do trabalho, o cumprimento de campanhas longas em sistemas de resfriamento requer um árduo trabalho de engenharia, com a participação intensiva do usuário e fornecedor, aplicação de tecnologias de última geração e implementação de monitoramentos que sejam representativos às condições dos sistemas e que possuam a máxima previsibilidade possível.

Há a necessidade de se conhecer detalhadamente as condições críticas do sistema e a relação existente entre as mesmas, para que o Projeto seja customizado e em conformidade com as exigências existentes.

A realidade da indústria nacional cada vez mais exigirá a operação com campanhas mais longas e com a qualidade da água de make-up cada vez mais crítica, face ao crescimento contínuo da utilização de água de reuso e com pior qualidade das que têm sido utilizadas até o momento.

Desta forma o investimento em engenharia de tratamento de água, tecnologias de dispersão de fouling, em monitoramentos específicos ou direcionados tornar-se-á cada vez maior.

Cumprido ressaltar que para o aprimoramento contínuo da Metodologia apresentada, encontra-se em fase de lançamento um sistema de automação para a Gestão de Tratamento de Água Resfriamento, com filosofia preventiva e totalmente inovadora, onde as únicas variáveis são corrosão e fouling. Diferente dos sistemas de automação atualmente disponíveis, que atuam exclusivamente nas consequências, isto é na correção de problemas já inseridos no sistema de resfriamento, este novo sistema atuará diretamente nas causas, minimizando-se assim a ocorrência de perturbações no sistema, assim como também terá adicionalmente uma ação direta nas consequências. Desta forma, a implantação de medidas preventivas e corretivas será realizada com uma performance bastante superior à detectada nos sistemas de automação disponíveis atualmente.

7. Referências Bibliográficas

- 1 – KURITA WATER INDUSTRIES LTDA., Informações Bibliográficas de Testes com Permutadores de Calor Piloto nas Indústrias Petroquímicas de OPC e Showa Denko, fev. 1990.
- 2 – ISHII, Yasuyuki Previsão da Máxima Profundidade de Corrosão por Pites em Trocadores de Calor de Aço Carbono Através do “Extreme Value Analysis Method” 18º Seminário Brasileiro de Inspeções de Equipamentos – IBP, Rio de Janeiro, 1 (1): 639-650, jun.1991.
- 3 – SUZUKI, Takashi Prevention of Pitting Corrosion of Heat Exchanger Tubes in Cooling Water 4th Asian-Pacif Corrosion Control Conference – Material Conference – Material Conservation & Corrosion Controle, Tokio, 1 (1): 182-189 mai. 1985.
- 4 – KURITA WATER INDUSTRIES LTD. – Kurita Handbook of Water Treatment.