



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RÔMULO JOSÉ GUIMARÃES DE MELO

LIMPEZA EM EQUIPAMENTOS DE PROCESSO NO REFINO DE PETRÓLEO

Recife

2018

RÔMULO JOSÉ GUIMARÃES DE MELO

LIMPEZA EM EQUIPAMENTOS DE PROCESSO NO REFINO DE PETRÓLEO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Laertty Morais Cavalcante

Recife

2018



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro
de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2**

Aos doze dias do mês dezembro do ano de dois mil e dezoito, às 10:00, no Bloco de salas de aula do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **LIMPEZA EM EQUIPAMENTOS DE PROCESSO NO REFINO DE PETRÓLEO**, elaborado pela aluno **Rômulo José Guimarães de Melo**, matrícula 062.138.944-70, composta pelo Prof. **Laerty Moraes Cavalcante** (Orientador), Prof. **Tiago Leite Rolim** (examinador 1) e Prof. **Armando Lúcio Ramos de Medeiros** (examinador 2). Após a exposição oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente, e deliberaram pela _____(aprovação/reprovação) do candidato no Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica da UFPE, atribuindo-lhe à monografia a média _____. Para constar, redigi a presente Ata, aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Orientador: Prof. **Laerty Moraes Cavalcante** Nota: _____
DEMEC/UFPE

Assinatura: _____

Examinador 1: Prof. **Tiago Leite Rolim** – DEME/UFPE Nota: _____

Assinatura: _____

Examinador 2: Prof. **Armando Lúcio Ramos de Medeiros** Nota: _____
DEMEC/UFPE

Assinatura: _____

Recife, 12 de Dezembro de 2018

José Maria A. Barbosa
Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Dedico à minha família e aos meus amigos, pelo crédito e apoio recebido, desde o princípio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha vida, família e amigos.

À Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade de fazer o curso de Engenharia Mecânica.

Ao meu orientador, Prof. Me. Laertty Moraes Cavalcante, pelo empenho dedicado à orientação na elaboração deste trabalho.

Ao Programa da Petrobras de Formação de Recursos Humanos (PRH-PB203), para o Setor de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Especialmente, ao meu pai que se encontra no céu, e foi um dos principais pilares.

A todos, que direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

A deposição de materiais orgânicos, compostos metálicos, impurezas e partículas pesadas do petróleo nas superfícies de um trocador de calor podem resultar em incrustação. Em superfícies aquecidas, como trocadores de calor, essa formação de depósitos pode ser chamada de incrustação, que gradativamente impede a transferência de calor e aumenta a resistência ao escoamento. O problema relacionando incrustação em trocadores de calor e a perda de eficiência no processo vem sendo motivo de vários estudos. Segundo Bott (1995), um grande estudo, publicado em 1981, fornece valores de despesa adicional de energia devido à presença das incrustações. O processo de incrustação nos trocadores de calor do pré-aquecimento de petróleo é uma grande barreira a ser vencida nesta área. O objetivo deste estudo é apresentar os métodos mais eficientes de manutenção e limpeza em equipamentos que fazem parte do processo no refino do petróleo. Baseado no material recolhido sobre este tema, este estudo apresenta os principais métodos de limpeza *on-line* e *off-line* em trocadores de calor, com o objetivo de expor as melhores aplicações, vantagens e desvantagens de cada caso. Como fazem parte de um projeto amplo sobre limpeza em equipamentos, os resultados do estudo serão utilizados como parâmetros para estudos mais aprofundados sobre o tema.

Palavras-chave: Incrustação. Trocador de calor. Limpeza. Métodos.

ABSTRACT

The deposition of organic materials, metallic compounds, impurities and heavy oil particles on the surfaces of a heat exchanger may cause incrustation. On heated surfaces, as a heat exchanger, this deposits formation can be named as incrustation, which gradually blocks the heat transfer and increases the resistance to the flow. The issue relating incrustation on heat exchangers and the loss of process efficiency has been motive of numerous studies. According to Bott (1995), an expressive study, published on 1981, provides additional expense values of energy due to incrustation. The incrustation process on the oil preheating heat exchangers is a great barrier to be overcome on this field. The objective of this study is to present the most efficient methods for maintenance and cleaning equipment that are part on the oil refining process. Based on the material acquired about this topic, this study comes up with the main methods of online and offline cleaning in heat exchangers, in order to point the best applications, pros and cons of each case. As part of a wide project about cleaning of equipment, the study results will be used as parameters to a more detailed study about the theme.

Keywords: Incrustation. Heat exchanger. Cleaning. Methods.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 -	Esquema de um trocador de calor “casco e tubos” típico	17
Figura 2 -	Deposição de partículas	19
Figura 3 -	Incrustação devido à corrosão	20
Figura 4 -	Problemas com corrosão num trocador.	23
Figura 5 -	Trocador de calor após limpeza.	24
Figura 6 -	Circulação das bolas-esponja de borracha.	27
Figura 7 -	Soprador de fuligem retrátil e rotatório.	30
Figura 8 -	Inserção de matriz de arame no tubo.	31
Figura 9 -	Diagrama esquemático da ação de trocadores de calor de superfície raspada	34
Figura 10 -	Alguns dispositivos para limpar tubos obstruídos	36
Figura 11 -	A técnica de perfuração de um tubo de trocador de calor usando uma broca	37
Figura 12 -	Choque térmico com resfriamento rápido.	39

LISTA DE TABELA

Tabela 1 -	Mapa comparativo dos riscos dos métodos de limpeza	41
Tabela 2 -	Mapa comparativo do alcance	42
Tabela 3 -	Mapa comparativo do alcance e eficiência	43

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA	13
1.2	PROBLEMÁTICA E PERGUNTA DE PESQUISA	13
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	OBJETIVOS	14
1.4.1	Geral.....	14
1.4.2	Específicos	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	PRÉ-AQUECIMENTO	16
2.2	TROCADORES DE CALOR.....	16
2.3	INCRUSTAÇÃO	18
2.3.1	Mecanismos de formação de incrustação.....	18
2.3.1.1	Deposição de partículas.....	18
2.3.1.2	Cristalização	19
2.3.1.3	Solidificação da incrustação.....	19
2.3.1.4	Incrustação devido à corrosão	20
2.3.1.5	Formação de incrustação por reação química.....	20
2.3.1.6	Crescimento biológico nas superfícies do trocador de calor	21
2.4	MODELOS DE INCRUSTAÇÃO.....	21
2.5	FATORES QUE ACELERAM AS INCRUSTAÇÕES	22
2.5.1	Problemas causados pela incrustação.....	23
2.6	DETECÇÃO DA INCRUSTAÇÃO EM TROCADORES DE CALOR.....	24
3.	METODOLOGIA	26
3.1	MÉTODOS DE LIMPEZA	26
3.1.1	Métodos de limpeza <i>on-line</i>.....	26
3.1.1.1	Circulação de bolas-esponja de borracha	27
3.1.1.2	Sistemas de gaiola e escova.....	28
3.1.1.3	Injeção de gás ou ar.....	28
3.1.1.4	Tecnologia sônica	28
3.1.1.5	Lavagem com água.....	29
3.1.1.6	Sopradores de fuligem	29
3.1.1.7	Inserções de tubo.....	30

3.1.1.8	Design e recursos especiais.....	31
3.1.1.8.1	Tratamento de superfícies.....	31
3.1.1.8.2	Esmalte vítreo.....	32
3.1.1.8.3	Cobertura de plástico e polímero.....	32
3.1.1.8.4	Coberturas finas e pinturas.....	33
3.1.1.8.5	Trocadores de calor não metálicos.....	33
3.1.1.8.6	Trocadores de calor de superfícies raspadas.....	34
3.1.1.9	Limpeza química.....	34
3.1.2	Métodos de limpeza off-line.....	35
3.1.2.1	Limpeza manual.....	35
3.1.2.2	Limpeza mecânica.....	36
3.1.2.2.1	Água, vapor e lanças de ar.....	36
3.1.2.2.2	Perfuração de tubos e rodding.....	37
3.1.2.2.3	O uso de balas, raspadores ou lavadores.....	37
3.1.2.2.4	Limpeza com explosivo.....	38
3.1.2.3	Absorção de vapor.....	38
3.1.2.4	Choque térmico.....	39
3.1.2.5	Limpeza química.....	39
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....	41
5.	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

O acúmulo de depósitos não desejados em trocadores de calor foi observado há muito tempo, em pesquisas realizadas por volta de 1910, e a primeira aplicação prática dessas pesquisas ocorreu em 1920. No mundo foram analisadas, 231 patentes relacionadas a este tópico, sendo os Estados Unidos o país com maior número de patentes, 147, seguido da Alemanha, com 22, e do Japão, com 21, segundo a conferência mundial *Heat Exchanger Fouling and Cleaning Conference*. Este tema é tão importante que existe uma conferência mundial, *Heat Exchanger Fouling and Cleaning Conference*, que ocorre a cada dois anos.

A variedade de flúidos trabalhados em uma refinaria é extensa e de maneira simplificada pode-se dividi-los em: flúidos do processo, flúidos de limpeza e flúidos de descarte.

Sabe-se que para a obtenção dos derivados do petróleo, a partir do óleo bruto, no refino, há a geração de resíduos, porém, felizmente, esse material pode ser reaproveitado. Um exemplo é o resíduo de destilação a vácuo, onde ele tem diferentes destinos dentro da refinaria: pode ser usado como óleo combustível ou asfalto, e também como carga de unidade de coqueamento retardado. É bom salientar que o tratamento de resíduos sólidos inclui: incineração, neutralização, fixação química e disposição em aterros sanitários, que podem estar situados dentro ou fora das refinarias.

O efluente de refinaria de petróleo contém compostos orgânicos residuais que são substâncias não biodegradáveis ou de difícil degradação, como hidrocarbonetos monoaromáticos e poliaromáticos, provenientes do processo de refino de petróleo. Devido ao grande volume de água utilizada pela indústria de refino de petróleo, de maneira simplificada, quatro tipos de efluentes são produzidos em uma refinaria: águas contaminadas coletadas a céu aberto, águas de processo, águas de refrigeração, e efluentes sanitários.

Através de tratamentos adequados, que dependerão da qualidade do efluente, tratamento secundário e do uso final da água, os efluentes gerados poderão ser

reutilizados de forma a reduzir custos durante o processo e diminuir os de impactos ambientais.

Assim, foi possível usar esse material para estudo de novos métodos de limpeza em equipamentos. Percebe-se que há um grande número de materiais relacionados à limpeza em equipamentos de fluidos utilizados no processo de refino. A partir deles foi possível reunir os melhores métodos de limpeza, tipos de flúidos, suas aplicações e diminuir os custos do processo e minimizar os impactos ambientais de processo no refino de petróleo com resultados satisfatórios, que serão muito úteis e vantajosos, considerando os já existentes no mercado

1.1 TEMA

Esse trabalho foi desenvolvido com base na necessidade da Refinaria Abreu e Lima em Pernambuco, para apresentar métodos de limpeza e manutenção de equipamentos que minimizam o tempo de parada.

1.2 PROBLEMÁTICA E PERGUNTA DE PESQUISA

A deposição de material no fundo dos equipamentos ocorre devido às partículas sólidas do petróleo, que em consequência da gravidade, tendem a descer e se acumular na superfície interna. Em superfícies aquecidas, essa formação de depósitos é chamada de incrustação, que gradativamente impede a transferência de calor e aumenta a resistência ao escoamento. Quando um equipamento é parada para limpeza, varias linhas de produção, dependentes do sistema, também param, causando assim perdas de produção para a refinaria.

Com o crescimento do mercado de óleo e gás, é cada vez mais necessário novas tecnologias e mais gente qualificada para acompanhar esse desenvolvimento.

Diante dessa linha de pesquisa, pode-se resumir o problema deste trabalho na seguinte pergunta: quais os métodos mais eficientes para manutenção e limpeza em trocadores de calor no processo de refino de petróleo?

1.3 JUSTIFICATIVA

O tema abordado é de grande importância para refinarias e grandes indústrias que necessitem de manutenção e limpeza devido ao problema de incrustações. Busca-se aperfeiçoar cada vez mais este processo, a fim de minimizar o tempo de parada das máquinas a serem limpas e diminuir os riscos à segurança e ao meio ambiente. A deposição de material nos equipamentos ocorre devido às partículas sólidas do petróleo, que em consequência da gravidade, tendem a decantar e se adensar na superfície. Em superfícies aquecidas, como trocadores de calor, essa formação de depósitos é chamada de incrustação, que gradativamente impede a transferência de calor e aumenta a resistência ao escoamento.

Sendo assim, a necessidade de apresentar esses métodos é visível e os resultados podem beneficiar uma refinaria que esteja preocupada em minimizar o tempo de parada através dos métodos mais eficientes para manutenção e limpeza de trocadores de calor no processo que refinam petróleo.

1.4 OBJETIVOS

A minimização do tempo de parada para limpeza relacionadas a incrustações nos trocadores de calor, é o principal objetivo do presente trabalho. Usando métodos que serão abordadas nos próximos capítulos, procura-se a classificação dos métodos de limpeza em trocadores de calor.

1.4.1 Geral

Indicar os métodos mais eficientes para manutenção e limpeza de equipamentos de processos de refino de petróleo.

1.4.2 Específicos

- Apresentar os métodos para manutenção e limpeza *on-line* de equipamentos de processos de refino de petróleo.
- Apresentar os métodos para manutenção e limpeza *off-line* de equipamentos de processos de refino de petróleo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presença da incrustação representa uma resistência à transferência de calor e diminui, com o passar do tempo, a performance térmica destes equipamentos. O monitoramento e a medição do desempenho térmico de trocadores de calor e suas redes podem auxiliar na redução de tempo de parada e custo de uma refinaria.

2.1 PRÉ-AQUECIMENTO

Com o bombeamento do petróleo (cru) tem início o processo de destilação através de uma rede de trocadores de calor. Ocorre simultaneamente o resfriamento dos produtos que deixam as torres de destilação, durante o aquecimento do cru. A rede de pré-aquecimento é um conjunto de trocadores de calor. O pré-aquecimento se dá em duas etapas, sendo que após a primeira etapa o cru passa por um equipamento chamado dessalgadora, com o objetivo de remover sais, água e partículas sólidas suspensas no petróleo. Depois o petróleo segue para uma segunda etapa de pré-aquecimento. Após passar pela rede de pré-aquecimento, o cru é aquecido em fornos para obter a temperatura necessária à destilação atmosférica. Desta forma, quanto maior for a temperatura do cru na saída da rede de pré-aquecimento, menor vai ser o consumo de combustível nos fornos.

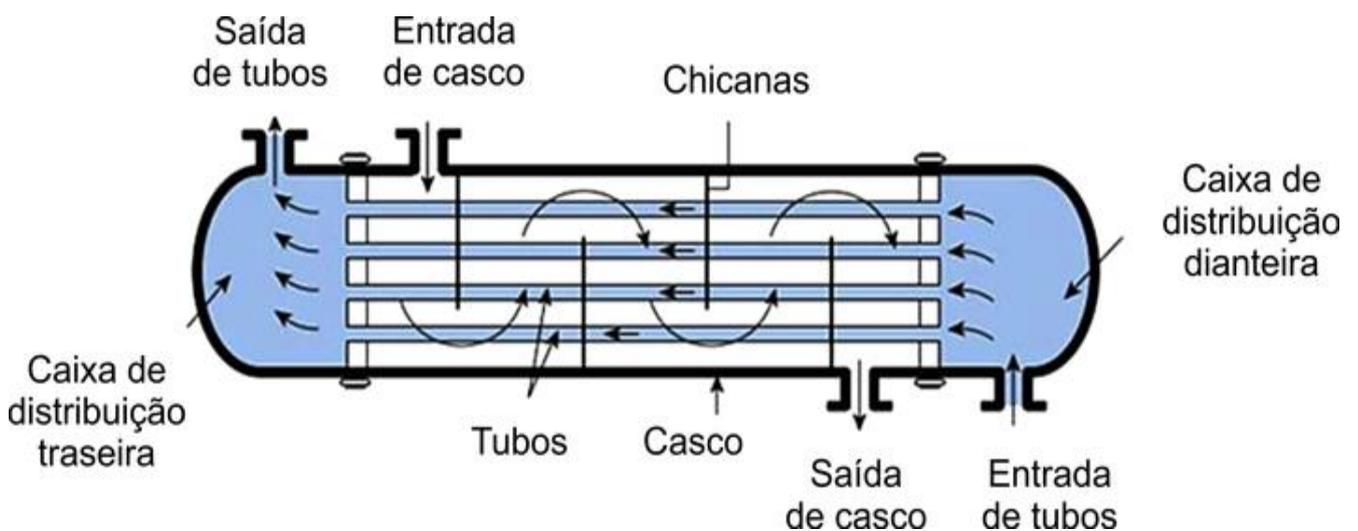
2.2 TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são usados para pré-aquecer o petróleo cru com o propósito de recuperar a energia de um processo e, desse modo, reduzir o consumo de uma refinaria. A classificação dos trocadores de calor é feita segundo as suas configurações de escoamento e do tipo de construção. Nos trocadores de correntes paralelas, os fluidos quente e frio escoam no mesmo sentido. Nos de contracorrente, os fluidos escoam em sentidos opostos. A natureza da condição de

mistura dos fluidos pode influenciar significativamente o desempenho do trocador de calor, pelo fato de que a temperatura pode variar em mais de uma direção, (INCROPERA e DEWITT, 1998)

Trocadores de calor casco-tubo diferem de acordo com o número de passes no casco e nos tubos. Sua forma mais simples envolve uma única passagem nos casco e nos tubos. Geralmente são instaladas chicanas no lado do casco para aumentar o coeficiente de transferência de calor do trocador no fluido, induzindo a turbulência e uma componente da velocidade na direção perpendicular ao feixe de tubos, como mostra a Figura 1.

Figura 1. Esquema de um trocador de calor “casco e tubos” típico



Fonte: GHIZZE (2008)

Trocador de calor é o dispositivo usado para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos que estão a diferentes temperaturas, ou para que haja a transferência de energia térmica de um sistema para a vizinhança. O uso de trocadores de calor já faz parte de todos os setores da indústria, sendo mais evidente nas indústrias químicas, petroquímicas, nos processos de geração de

energia, no processamento de alimentos e nos processos de refino de petróleo. Apesar da grande demanda de trocadores, as empresas estão sendo pressionadas para produzi-los com foco na eficiência da transferência de calor e na utilização do material, pois enfrentam a dificuldade de processamento dos fluidos que geram deposições de materiais não desejados sobre a superfície da maioria dos trocadores de calor, fato chamado de incrustação.

A formação da incrustação representa uma resistência à transferência de calor diminuindo ao passar do tempo a performance térmica desses equipamentos. A partir disso, a incrustação presente na superfície de transferência de calor tem grande importância no coeficiente global de transferência de calor. Estão descritos a seguir os métodos de limpeza dos equipamentos.

2.3 INCRUSTAÇÃO

Segundo KERN e SEATON (1959), a incrustação é qualquer tipo de depósito indesejável na superfície, como de um trocador de calor, aumentando de forma significativa as resistências à transferência de calor e ao escoamento do fluido transportado. A taxa de formação de incrustação pode ser definida como uma simples diferença entre a taxa de deposição e a taxa de remoção.

2.3.1 Mecanismos de formação de incrustação

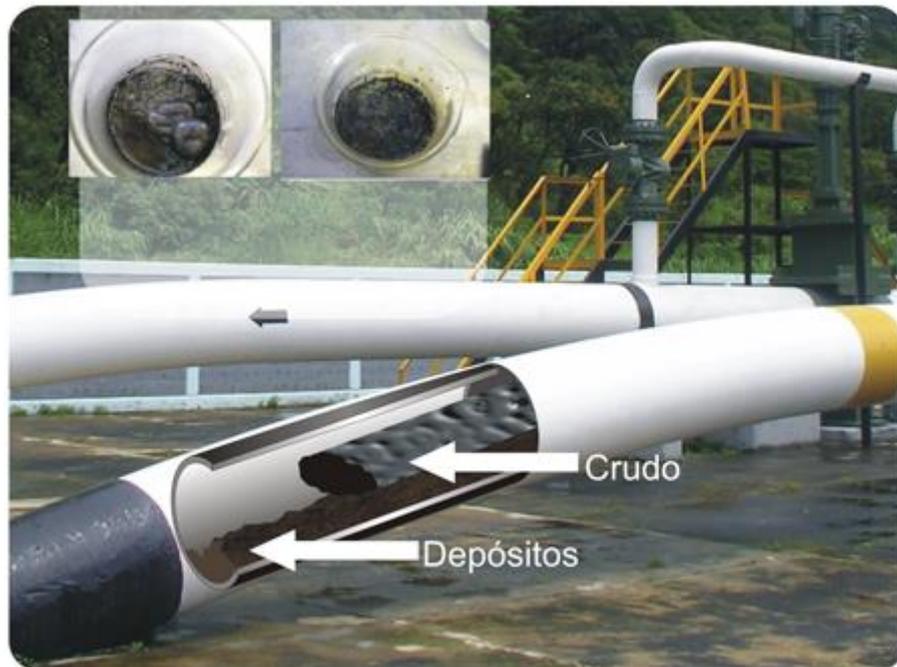
Segundo BOTT (1995), os principais mecanismos de formação da incrustação são os listados abaixo.

2.3.1.1 Deposição de partículas

Onde tem-se uma grande influência da geometria, pois a deposição se dá pela atuação da força da gravidade, como mostrado na figura 2. Em altos

escoamentos a deposição não é verificada de forma acentuada devido à elevada velocidade do fluido.

Figura 2. Deposição de partículas



Fonte: Geo Estratos (1991)

2.3.1.2 Cristalização

Este mecanismo é ligado diretamente à temperatura de trabalho. Através do aumento ou diminuição da temperatura pode-se atingir insolubilidade, e assim ocorrer uma cristalização de sais.

2.3.1.3 Solidificação da incrustação

Quando se tem a incrustação, geralmente no estado líquido se movimentando dentro do trocador, poderá ocorrer a solidificação desta incrustação na parede do trocador.

2.3.1.4 Incrustação devido à corrosão

Este processo pode ser iniciado pela presença de impurezas ou mesmo pela reação natural dos compostos de oxigênio e hidrogênio. A deterioração e perda de material em um ponto da tubulação seguida pela deposição deste material em outro ponto representa a formação da incrustação devido à corrosão, como mostrado na figura 3.

Figura 3. Incrustação devido à corrosão



Fonte: Bott(1995)

2.3.1.5 Formação de incrustação por reação química

Este mecanismo não é uma exclusividade das refinarias. Indústrias químicas e de processamento de alimentos também podem ter este tipo de problema. A deposição dos asfaltenos, oxidação dos óleos lubrificantes, formação de coque durante o craqueamento de hidrocarbonetos leves, formação de lama e deposição de produtos de carvão são as possíveis reações que conduzem à deposição.

2.3.1.6 Crescimento biológico nas superfícies do trocador de calor

Este mecanismo de formação é usualmente identificado quando se trabalha com sistemas aquosos e temperaturas próximas à temperatura ambiente. A presença de material biológico na superfície dos trocadores de calor pode promover outros mecanismos de formação da incrustação. É comum encontrar oxidação junto ao crescimento biológico nas superfícies de trocadores.

2.4 MODELOS DE INCRUSTAÇÃO

Segundo TABOREK ET AL. (1972), a relação entre a taxa de deposição e a taxa de remoção é que resulta em uma grande variedade de modelos de incrustação. Modelos esses que podem ser linear, *falling rate*, assintótico, dente de serra.

- **Linear:** Segundo ZUBAIR ET AL. (2000), enquanto a taxa de remoção depende da força de adesão do depósito e da tensão de cisalhamento, a taxa de deposição depende do mecanismo de incrustação. Se a taxa de deposição é constante e a taxa de remoção é desprezível, ou se a diferença entre a taxa de deposição e a taxa de remoção é constante, a curva representativa da evolução da incrustação com o tempo assumirá a forma de uma reta, sendo geralmente este tipo de incrustação depósitos duros e de difícil remoção.
- **Falling Rate:** Ocorrerá se a taxa de deposição for inversamente proporcional a espessura da camada de incrustação, sendo um tipo de incrustação intermediária aos tipos linear e assintótica.
- **Assintótica:** Ocorre se a taxa de deposição é constante e a taxa de remoção é proporcional à espessura da camada de incrustação. Sugerindo que a força

de cisalhamento na superfície da camada está aumentando ou que os outros mecanismos que deterioram a estabilidade da camada estão tomando lugar.

- **Dente de serra:** Uma mudança periódica nas condições operacionais resulta numa configuração de incrustação que descreve uma trajetória assintótica com variações periódicas, para mais e para menos, nos valores da resistência. Sendo essa mudança nas condições operacionais comuns nas refinarias de petróleo.

Segundo BRONS e RUDY (2000), a incrustação ocorre ao longo da rede e diferentes mecanismos têm sido identificados como a causa da incrustação em diferentes trocadores de calor. Algumas considerações podem ser feitas mesmo com a diversidade de mecanismos presentes. Nos trocadores de calor localizados na primeira fase de aquecimento, os mecanismos predominantes da incrustação estão associados com a presença de sais inorgânicos, resinas e particulados levados com a carga de petróleo. Na segunda fase de aquecimento, os mecanismos predominantes na incrustação estão associados com as reações químicas nos trocadores de calor. Segundo WILSON e WATKINSON (1997), este fato deve-se a presença e instabilidade dos asfaltenos presentes no petróleo. Os trocadores de calor localizados no final da segunda fase de aquecimento são os mais importantes na recuperação de calor global da rede e os mais suscetíveis à incrustação.

2.5 FATORES QUE ACELERAM AS INCRUSTAÇÕES

As incrustações são bastante encontradas particularmente em pontos onde existe mudança de pressão, como nas conexões onde o fluxo é turbulento pela existência de obstáculos e válvulas, pelas mudanças de direção e em saídas de líquidos. A queda brusca de pressão favorece a formação de cristais de carbonato de cálcio e sulfato de bário, cuja estrutura adere e se deposita em qualquer lugar.

Estes problemas podem ser encontrados em dutos, tanques, caldeiras e trocadores de calor.

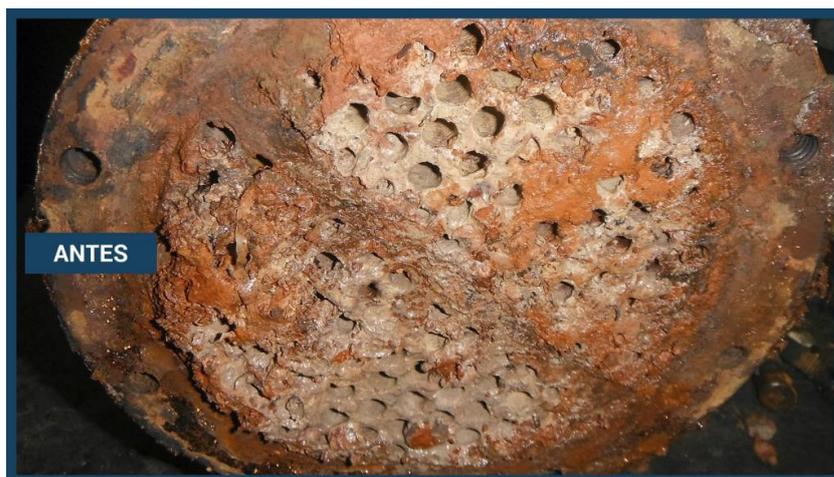
2.5.1 Problemas causados pela incrustação

Dentre os inúmeros problemas causados pelas incrustações, podemos destacar os seguintes:

- a. Bloqueio do sistema de tubulações;
- b. Perda de pressão do líquido devido à redução do diâmetro do tubo;
- c. Acúmulo de ferrugem nos tubos que pode provocar corrosão (figura 4);
- d. Desenvolvimento de bactérias em tubulações de água potável;
- e. Reparos contínuos nos sistemas e em equipamentos comerciais e industriais;
- f. Alto custo de produção devido à manutenção de equipamentos;
- g. Queda na produtividade da empresa.

Nas figuras 4 e 5, podemos visualizar um trocador de calor com problema de corrosão devido as incrustações e após a limpeza adequada.

Figura 4. Problemas com corrosão num trocador



Fonte: <http://heatexchanger-fouling.com/proceedings.htm>

Figura 5. Trocador de calor após a limpeza.



Fonte: <http://heatexchanger-fouling.com/proceedings.htm>

2.6 DETECÇÃO DA INCRUSTAÇÃO EM TROCADORES DE CALOR

A formação de incrustação é um processo químico e físico complicado, que é influenciado por muito fatores, de forma que a pesquisa inicial na detecção de incrustação, baseada no entedimento exato dos mecanismos de formação, não é ideal. Segundo JONSSON ET AL. (2007) existem métodos clássicos para detecção da incrustação. São eles: a análise do coeficiente de troca de calor (ou efetividade); a observação de quedas de pressão e vazão mássica; medições de temperaturas para calcular a proporção entre as ideias e as observadas no processador; medições ultrassônicas e medições elétricas.

De acordo com WALLHAUBER, HUSSEIN e BECKER (2012), dependendo do processo e dos objetivos requeridos, diferentes métodos de detecção podem ser mais vantajosos que outros. É implausível buscar um único método que seja capaz de satisfazer todos os requerimentos. Seria mais prático combinar diferentes métodos buscando aproveitar os pontos fortes de cada um. Os autores apontam que os objetivos do estudo da incrustação em trocadores de calor podem ser os seguintes: determinação do local exato da incrustação; determinação da quantidade

ou da espessura exata da incrustação; determinação simplesmente da presença ou ausência da incrustação; monitoramento e adaptação do processo de limpeza (por quanto tempo limpar?); monitoramento do desenvolvimento da incrustação (quando começa e quando termina?).

Uma combinação de diferentes métodos pode melhorar a estabilidade da detecção e a probabilidade dos objetivos a serem alcançados. O primeiro passo é determinar os objetivos e o limite de detecção dos métodos, e saber quais os tipos de incrustações presentes. É importante para a indústria ter um método não invasivo, rápido, confiável, robusto e não muito caro. Vários dos métodos conhecidos não são invasivos, mas não podem ser facilmente aplicados a trocadores de calor já existentes. Outros são muito sensíveis e invasivos, mas poderiam ser incluídos em novos trocadores de calor.

WALLHAUBER, HUSSEIN e BECKER (2012) ainda exemplificam que, se for necessário apenas determinar a presença da incrustação, a análise de pressões e temperaturas é suficiente.

3 METODOLOGIA

Os principais métodos mais eficientes para manutenção e limpeza *on-line* e *off-line* dos equipamentos de processos de refino de petróleo estão descritos abaixo com o objetivo de expor as melhores aplicações, vantagens e desvantagens de cada caso. Como faz parte de um projeto amplo sobre limpeza em equipamentos, os resultados dos estudos serão utilizados como parâmetro para estudos mais aprofundados sobre o tema.

3.1 MÉTODOS DE LIMPEZA

Segundo MULLER-STEINHAGEN ET AL. (2009), estima-se que trocadores de calor com problemas de incrustação conduz a custos adicionais na ordem de 0,25% do produto interno bruto (PIB) dos países industrializados, e que também é responsável por 2,5% das emissões de dióxido de carbono. Diversos tipos de limpeza foram desenvolvidos para lidar com o problema de deposição de material na superfície do trocador, de modo a manter sua eficiência ou até restaurá-la.

Os procedimentos de limpeza podem ser divididos em *on-line* e *off-line*. As técnicas *on-line* de limpeza são realizadas sem a necessidade de remover o trocador de calor da rede de operação, mantendo o funcionamento do equipamento no estado aceitável de limpeza, sem ser preciso a parada e perda de faturamento. Embora os procedimentos *on-line* sejam mais práticos, não são suficientes para que o trocador de calor mantenha um bom desempenho durante sua vida útil, assim é necessário o uso de técnicas *off-line* para restaurar a eficiência da transmissão de calor. Essa técnica é contrária à *on-line*. Para haver a limpeza por esse meio, é preciso parar o funcionamento do trocador.

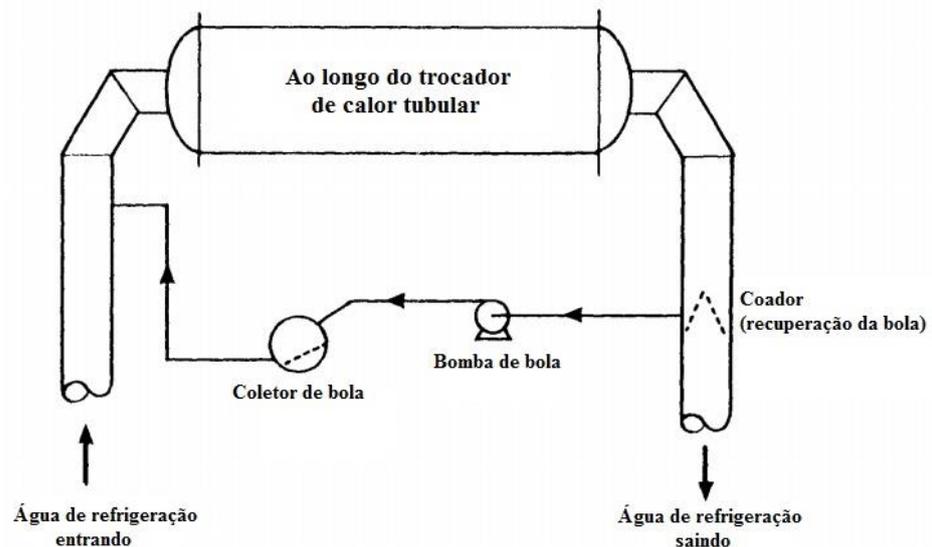
3.1.1 Métodos de limpeza *on-line*

A seguir são apresentados os principais processos *on-line*.

3.1.1.1 Circulação de bolas-esponja de borracha

Segundo BOTT (1995), a técnica foi inicialmente utilizada no final da década de 50 e consiste na circulação de bolas (esferas) de esponja de borracha, de tamanho considerável, ao longo do trocador de calor a partir do fluxo de água. As bolas precisam ser “apertadas” de modo que pressionem a superfície interna dos trocadores de calor, limpando então os locais por onde passam. Após a limpeza, um coador é utilizado para reter as bolas e terminar ou reiniciar o procedimento, como esta apresentado na Figura 6. Dependendo do tipo de incrustação (mais duras e resistentes), esponjas com materiais abrasivos na superfície podem ser utilizados para facilitar a remoção dos depósitos além de polirem a parte interna do tubo, dificultando então a aderência de novas impurezas. O sistema de circulação das bolas deve ser executado em intervalos intermitentes de tempo e só funciona em trocadores de calor do tipo tubo, sendo inútil para equipamentos de designs diferentes.

Figura 6. Circulação das bolas-esponja de borracha



Fonte: BOTT (1995)

3.1.1.2 Sistemas de gaiola e escova

Similares com o procedimento de limpeza de circulação das bolas-esponja de borracha, os sistemas de gaiola e escova previnem a incrustação por meio de uma limpeza da superfície interna do trocador de calor. O procedimento, de acordo com BOTT (1995), consiste na circulação de um esponja feita de fios metálicos, ou até filamentos de polímeros, com o fluxo de água varrendo as impurezas depositadas ao longo do tubo. Uma gaiola será colocada no fim de curso do trecho a ser feito a limpeza de modo que segure a escova. Sendo possível a reversão do fluxo de água no tubo, as gaiolas servem como pontos de parada e reinício do processo de limpeza. Assim como o sistema das bolas, a técnica é restrita a tubos retos e longos, sendo inútil para trocadores de diferentes formas.

3.1.1.3 Injeção de gás ou ar

Segundo MULLER-STEINHAGEM ET AL. (2000), a injeção de ar em tubos trocadores de calor pode ser útil para a redução da incrustação. Uma mistura bifásica de água e ar é injetada no tubo, ocorrendo então a limpeza em regiões de alta turbulência nas paredes internas. Como alguns depósitos são resistentes, forças maiores são necessárias para remover as impurezas aderidas na superfície interna. Por isso o procedimento é considerado na maioria das vezes ineficiente, tendo vantagem de uso apenas para a limpeza em locais de difícil acesso.

3.1.1.4 Tecnologia sônica

A vibração criada pela energia associada à propagação do som é capaz de deslocar depósitos localizados na superfície de um trocador de calor. Segundo

MULLER-STEINHAGEM ET AL. (2000), esse é o princípio básico do funcionamento da tecnologia sônica. Geralmente, o procedimento é utilizado em sistemas de gás e é considerado uma técnica complementar de limpeza. Este tipo de tecnologia não é tão utilizado pelo fato de que pode danificar a estrutura por causa da vibração das ondas sonoras. Mais estudos e pesquisas devem ser realizados para melhorar a eficiência e a segurança da tecnologia sônica.

3.1.1.5 Lavagem com água

Segundo MULLER-STEINHAGEM ET AL. (2000), esta técnica de lavagem *on-line* é utilizada há vários anos para recuperar a eficiência de trocadores de calor em sistemas de gás a combustão. Além de o jato causar uma força que arrasta as impurezas, o choque térmico faz com que os depósitos fiquem frágeis, quebrem e se soltem da parede interna do tubo. Mesmo a técnica sendo de alta facilidade de execução, ela tem sido utilizada quando várias outras técnicas de limpeza falham. Alguns parâmetros devem ser estabelecidos para este tipo de processo, como duração dos intervalos intermitentes de tempo e quantidade de água no jato. Apesar de não parecer uma técnica com riscos, a má execução da lavagem pode afetar a eficiência do trocador de calor, principalmente em tubos de caldeira, por reduzir a temperatura do vapor, diminuindo assim o rendimento térmico do sistema. Para ajudar na lavagem com água, produtos químicos podem ser utilizados para amolecer os depósitos, facilitando a sua remoção. Porém, é preciso identificar quais soluções químicas podem ser utilizadas, de modo que evite problemas de corrosão nos tubos.

3.1.1.6 Sopradores de fuligem

Segundo BOTT (1995), esta técnica é a mais utilizada em sistemas de combustão para manter a eficiência do trocador de calor e é executada em sistemas a gás de combustão. Um soprador de fuligem, ao injetar ar a alta pressão no

trocador de calor, faz com que os depósitos se soltem das superfícies internas do tubo. Será necessário usar certo número de sopradores graças ao formato do trocador de calor (conjunto de tubos). Este mecanismo de limpeza pode ser geralmente dividido em dois tipos de arranjo: rotatórios e longos retráteis, como apresenta a Figura 7. O arranjo rotatório consiste em um elemento multi bico rotacional, porém permanece fixo ao trocador de calor. Os dispositivos retráteis são usados geralmente onde as temperaturas são muito altas, de modo que limite sua exposição.

Figura 7. Soprador de Fuligem Retrátil e Rotatório



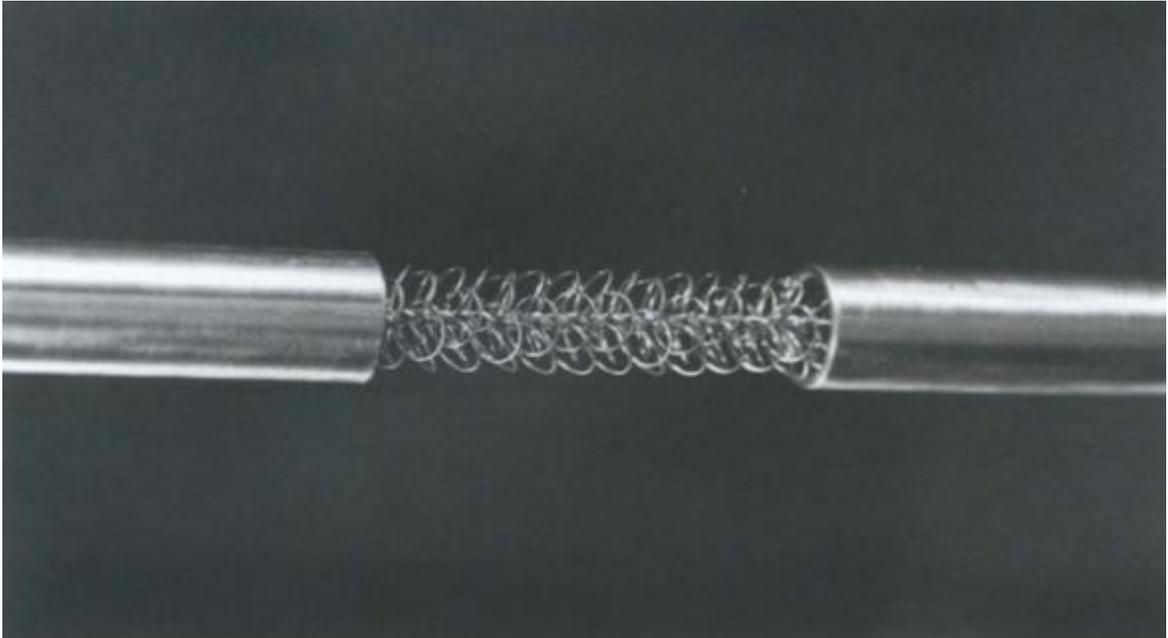
Fonte: Primasonics® International (2017)

3.1.1.7 Inserções de tubo

De acordo com RITCHIE ET AL. (2009), a utilização de inserções, tais como fitas torcidas, bobinas, e inserções de matriz de arame, podem aumentar os coeficientes de transferência de calor porque causam turbulência. A seleção de um determinado tipo de inserção e geometria da inserção depende do tipo de incrustação e a disponibilidade de adequadas peneiras ou filtros que podem coletar

as partículas ou matérias fibrosas antes de entrar no permutador de calor. A figura 8 apresenta uma inserção de matriz de arame no tubo.

Figura 8. Inserção de Matriz de Arame no Tubo



Fonte: Bott (1995)

3.1.1.8 Design e recursos especiais

A seguir são citadas técnicas especiais utilizadas, juntamente com os trocadores de calor, para ajudar na manutenção das condições de limpeza durante a operação desses equipamentos.

3.1.1.8.1 *Tratamento de superfícies*

Mudanças nas características das superfícies têm o potencial de reduzir a incidência de incrustações e também de prevenir corrosões. De acordo com BOTT

(1995), se adicionado um revestimento à superfície do trocador de calor, ela apresentará uma resistência à transferência de calor como se houvesse qualquer depósito sobre ela. Este revestimento, ao ser aplicado, tem que fornecer uma cobertura completa e ter uma espessura razoavelmente uniforme. As vantagens deste tratamento são que aço carbono e aços-liga mais baratos, podem ser usados em contato com águas agressivas. A incrustação é reduzida em tubos de liga, a possibilidade de corrosão galvânica é reduzida devido à barreira eléctrica fornecida pelo revestimento e a limpeza off-line é facilitada.

3.1.1.8.2 Esmalte vítreo

O esmalte vítreo começou a ser usado recentemente como revestimento para trocadores de calor, porém já era muito usado em reatores e em equipamentos de processamento químico. PAGE (1980) apud BOTT (1980) analisou as oportunidades de usar esse material em trocadores de calor, principalmente em condições ácidas à altas temperaturas.

Os dois maiores problemas em usar o esmalte vítreo como revestimento no equipamento em questão são a dificuldade de garantir uma cobertura uniforme contínua e o fato de que o processo de esmaltagem requer um ambiente de alta temperatura para o aquecimento e isso pode restringir o tamanho dos equipamentos a serem revestidos.

3.1.1.8.3 Cobertura de plástico e polímero

O revestimento interno das superfícies de trocadores casco tubo para reduzir incrustação, corrosão e prevenir abrasão é um método usado há muitos anos. Porém a utilização de polímeros é restrita a temperaturas relativamente baixas,

geralmente em trocadores de calor trabalhando com temperaturas próximas a 200°C. A principal aplicação da cobertura de polímero é reduzir a corrosão, mas a superfície brilhante e lisa vai reduzir a perda de fricção e de qualquer incrustação.

3.1.1.8.4 Coberturas finas e pinturas

CALLOW (1990) descreveu o uso de tintas anti-incrustantes nos cascos do navio para reduzir a incrustação macro e microbiana, mas esse método também pode ser aplicado em trocadores de calor em ambientes adequados. Os três principais tipos destas tintas são: tintas convencionais (matriz solúvel), lixiviação, auto polimento ou tintas ablativas.

O problema do uso desse método é a manutenção da superfície coberta. Com o passar do tempo, a cobertura precisará ser substituído. Em geral o uso de coberturas finas e pinturas podem ser difíceis e caro.

3.1.1.8.5 Trocadores de calor não metálicos

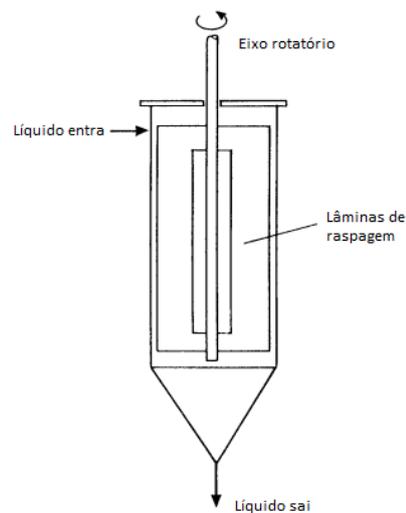
Trocadores de calor não são feitos apenas de metal, também podem ser de vidro ou polímeros. Os de vidro, como tem uma superfície lisa, tem menos retenção de depósitos do que as construções tradicionais de metal.

REDMAN (1989) apud BOTT (1995) revisou o uso de trocadores de calor não metálicos e constatou que o uso de polímeros garante uma excelente resistência à incrustação. Outras vantagens são que o custo é baixo comparado com a alta qualidade e são fáceis de limpar. Já as desvantagens são os baixos pontos de fusão dos termoplásticos e a baixa condutividade térmica.

3.1.1.8.6 Trocadores de calor de superfícies raspadas

Esse método foi desenvolvido para melhorar a transferência de calor para líquidos viscosos ou para evaporação. Esta tecnologia foi revisada por HEWITT (1994) e consiste em um tubo com diâmetro largo com um eixo montado axialmente no seu centro, ligado a lâminas, como apresenta a Figura 9. A ação das laminas é raspar e manter limpas as superfícies do trocador de calor. Essa técnica é particularmente usada em transferências de calor para líquidos termicamente sensíveis, pois o contato com o líquido com a superfície quente é rápido. As limitações são a baixa capacidade e os altos custos de manutenção.

Figura 9. Diagrama esquemático da ação de trocadores de calor de superfície raspada



Fonte: Bott (1995)

3.1.1.9 Limpeza química

Segundo BOTT (1995), na limpeza *on-line*, há uma injeção de soluções químicas no processo. A maior dificuldade é a contaminação do produto, que pode permanecer até depois da injeção parar.

3.1.2 Métodos de limpeza *off-line*

De acordo com BOTT (1995), mesmo tendo feita a limpeza *on-line* para eliminar ou minimizar problemas de incrustação, é necessário que em certo tempo haja uma limpeza *off-line* para restaurar a eficiência da transferência de calor. O ideal é que essa parada para limpeza seja feita na parada anual da indústria ou em outro momento planejado, pois uma parada de emergência de um trocador de calor para limpeza interrompe e é muito caro. Vários são os aspectos a serem analisados ao escolher uma opção de limpeza *off-line*, como prevenção de dano ao equipamento, proteção dos empregados contra acidentes e proteção ao meio ambiente.

3.1.2.1 Limpeza manual

Limpeza manual é a técnica mais simples e envolve limpar, raspar ou escovar superfícies de trocadores de calor. Ela pode ser feita em condições secas ou molhadas. Como é um trabalho manual intenso, o custo para esse tipo de limpeza é alto. Segundo BOTT (1995), esse método de limpeza geralmente é usado em trocadores de calor de placas, onde o acesso a placas individuais é possível. No caso de uso de solventes, os riscos de explosão e intoxicação devem ser observados. Em grandes equipamentos de combustão, a limpeza pode ser empregada para remover depósitos frágeis da superfície e será necessário que os empregados entrem no equipamento, precisando assim de precauções com roupas, sapatos e máscaras de proteção.

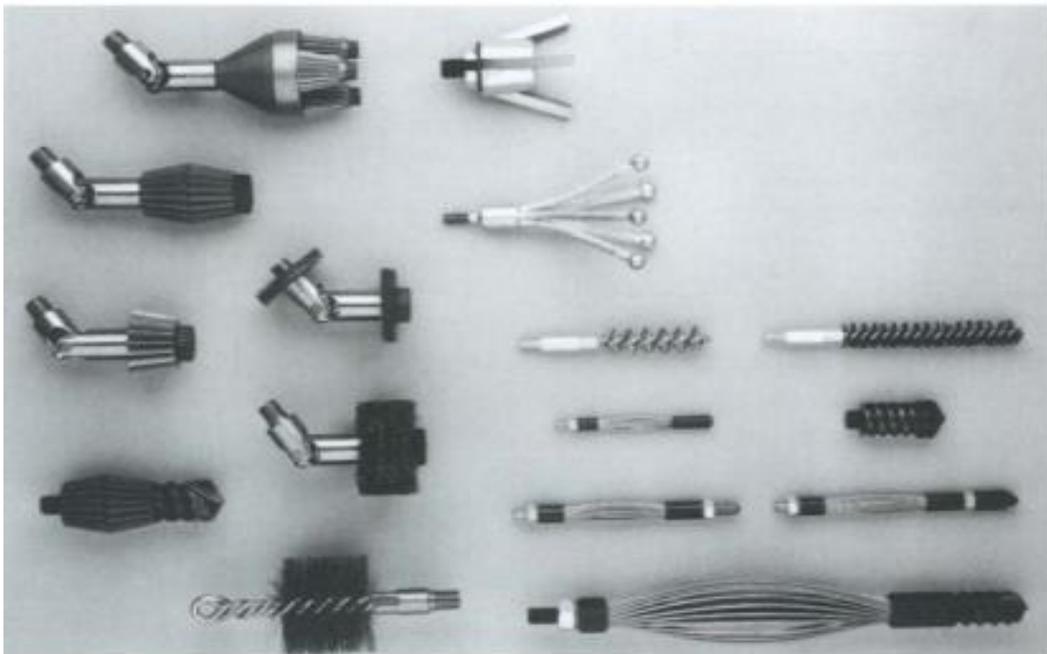
3.1.2.2 Limpeza mecânica

Técnica comum na indústria. Geralmente firmas especializadas são contratadas para estes serviços.

3.1.2.2.1 Água, vapor e lanças de ar

Segundo BOTT (1995), a limpeza com água pode ser um bom método, mas para depósitos tenaz, é necessário que a pressão da água seja muito forte, ou sejam usadas lanças de vapor e detergentes. Também pode ser necessário adicionar abrasivos a ar à alta velocidade para remover os depósitos. A natureza do abrasivo depende do depósito e do risco ao equipamento. A efetividade dessa técnica depende da facilidade de acesso às superfícies incrustadas. É necessário cuidado, pois trabalha-se com altas pressões. A figura 10 mostra alguns dispositivos utilizados para limpeza com água, vapor e lanças de ar.

Figura 10. Alguns dispositivos para limpar tubos obstruídos.

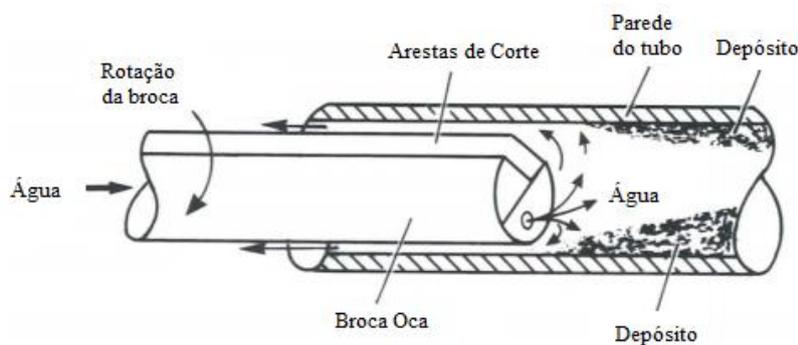


Fonte: Bott (1995)

3.1.2.2.2 Perfuração de tubos e rodding

Pela dificuldade de remoção de depósitos, às vezes é necessário perfurar um eixo de tubos pra restaurar a área de fluxo. Segundo BOTT (1995), como uma massa de depósitos se acumula no fim dos tubos, alguns outros métodos não são possíveis. Vários dispositivos são aplicados pela rotação de um eixo, incluindo brocas e ferramentas de corte e polimento, e escovas. A perfuração é obtida com o auxílio de um motor de ar comprimido e abastecimento de água, para ajudar na lubrificação e afastar os depósitos removidos, como indica a Figura 11. Para o uso dessa técnica é necessário um bom acesso ao feixe de tubos. Geralmente é aplicada nas superfícies internas dos tubos.

Figura 11. A técnica de perfuração de um tubo de trocador de calor usando uma broca oca.



Fonte: Bott (1995)

3.1.2.2.3 O uso de balas, raspadores ou lavadores

Uma alternativa para a perfuração é o uso de raspadores que são aplicados ao longo do comprimento do tubo para raspar os depósitos. Ele é impulsionado pelo

tubo por vapor ou água de alta pressão. Essa técnica só é aplicada nas superfícies internas dos tubos. Os limpadores mecânicos podem ser fabricados de metal, borracha ou plástico.

Uma das principais preocupações na utilização destes projecteis é o provável desgaste no interior dos tubos de trocador e calor. HOVLAND ET AL.(1988) apud BOTT (1995) demonstraram que a erosão devido ao uso desses produtos de limpeza é desprezível.

3.1.2.2.4 *Limpeza com explosivo*

De acordo com BOTT (1995), outra alternativa é o uso de explosões controladas, onde a energia para remover o depósito é transmitida por uma onda de choque no ar adjacente para a superfície a ser limpa, ou pela vibração dos tubos ocorrida pela explosão. É possível começar a limpeza com a estrutura ainda quente. As vantagens são limpeza rápida, avanços na eficiência termal, melhoria na segurança, sem corrosão, sem problemas com lodo, bom para regiões em que os jatos de alta pressão não alcançariam e custo mais baixo.

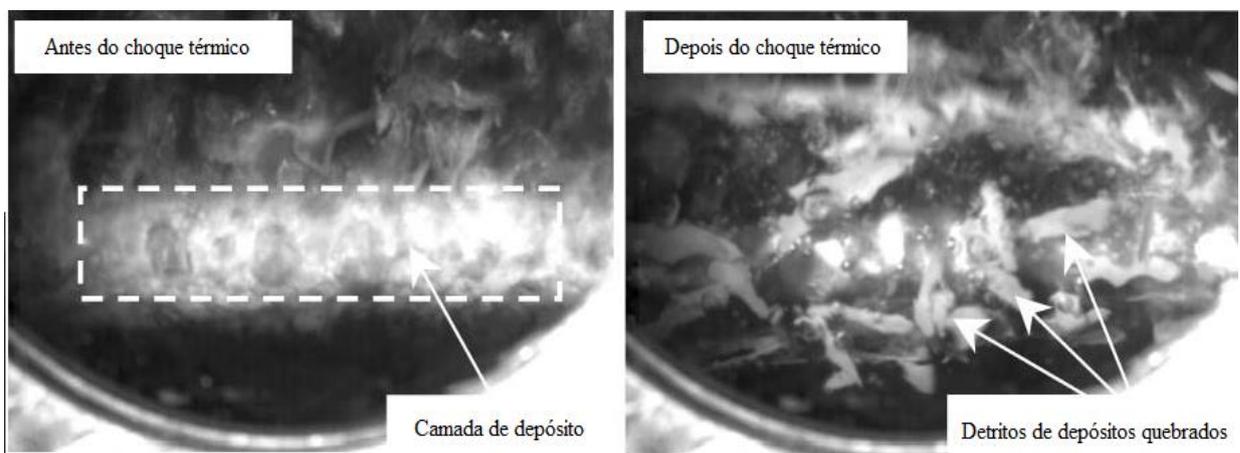
3.1.2.3 Absorção de vapor

Segundo BOTT (1995), essa técnica é realizada por meio da admissão de vapor no trocador de calor para haver contato entre o vapor e a superfície a ser limpa. Ocorre pela combinação da temperatura, diferença de temperatura associada à expansão termal diferencial e à suscetibilidade do depósito de vaporizar e penetração de água quente. Esse método não é recomendado para uso geral, onde há riscos de danificar o equipamento, principalmente em equipamentos de combustão, onde misturas de materiais de construção estão presentes.

3.1.2.4 Choque térmico

Por causa das diferenças na expansão termal, que em geral, existe entre depósitos incrustados e o metal das superfícies, ocorrem rachaduras nas camadas de incrustação que podem descamar. É uma técnica parecida com a absorção de vapor. Choque térmico pode ser aplicado de duas formas: resfriamento rápido de uma superfície quente ou rápido aquecimento de uma superfície fria. Geralmente o que ocorre é o primeiro, como mostrado na figura 12. Experimentos de BRIDGWATER e LOO (1984) revelaram que o fator chave é a energia elástica armazenada devido a tensões térmicas e a liberação dessa energia devido à propagação dos defeitos na estrutura cristalina.

Figura 12. Choque térmico com resfriamento rápido.



Fonte: Müller-Steinhagem et al. (2011)

3.1.2.5 Limpeza química

Segundo BOTT (1995), antes da limpeza química alguns fatores devem ser analisados, como: natureza do depósito, material de construção do trocador de calor

e de equipamentos associados (para evitar corrosão), habilidade de aquecer o equipamento, volume do sistema, grau de limpeza requerido, perigo associado à limpeza e requerimentos de segurança, custo e tempo. A remoção de depósitos dependerá da velocidade e da temperatura de operação. Quanto maiores melhor para o processo de limpeza, aumentando a raspagem e melhorando a taxa de reação química.

A circulação de solventes inflamáveis precisa de cuidado especial, pois o trocador de calor pode não estar localizado numa área à prova de fogo. Nenhuma limpeza química, especialmente envolvendo ácidos, alcalinos e outros agentes agressivos, deve ser feita sem controle, para reduzir potenciais riscos de corrosão. De acordo com MÜLLER-STEINHAGEN (2009), as vantagens da limpeza química são que ela é relativamente rápida. As superfícies não sofrem danos mecânicos. As soluções químicas geralmente alcançam áreas inacessíveis e ela requer menos trabalho braçal do que a limpeza mecânica.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

A partir da metodologia apresentada no capítulo 3, este capítulo traz à análise dos dados dos processos de limpeza *on-line* e *off-line*, e deste modo, foram utilizados alguns fatores de riscos que foram analisados para melhor identificar os métodos encontrados na literatura. Foram adotados riscos da limpeza para: o operador, o equipamento, o meio ambiente e a contaminação na indústria.

Deste modo, um mapa comparativo foi desenvolvido para analisar os métodos de limpeza *on-line* e *off-line* com os riscos, como é mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Mapa comparativo dos riscos dos métodos de limpeza

	RISCOS DAS LIMPEZAS			
	Operador	Equipament o	Meio Ambiente	Contaminaç ão
<i>ON-LINE</i>				
Circulação de bolas-esponjas	-	-	-	-
Sistemas de gaiola e escova	-	-	-	-
Injeção de gás ou ar	-	-	-	-
Tecnologia sônica	-	x	-	-
Lavagem com água	-	-	-	-
Sopradores de fuligem	-	-	-	-
Inserções de tubo	-	-	-	-
Limpeza química	-	x	x	x
<i>OFF-LINE</i>				
Limpeza Manual	x	x	-	-
Lanças de Ar, Água e Vapor	x	-	-	-
Perfuração de tubos e rodding	-	x	-	-
O uso de balas, raspadores	-	-	-	-

Tabela 1. Continuação

Limpeza com explosivos	-	x	-	-
Absorção de vapor	-	x	-	-
Choque térmico	-	x	-	-
Limpeza química	x	x	x	x

Fonte: O autor

Da mesma forma, foi desenvolvido um mapa comparativo do alcance estimado dos métodos de limpezas a partir da literatura. Como é mostrado na tabela 2.

Tabela 2. Mapa comparativo do alcance

	ALCANCE ESTIMADO	
	Tubo	Casco
ON-LINE		
Circulação de bolas-esponjas	X	-
Sistemas de gaiola e escova	X	-
Injeção de gás ou ar	X	X
Tecnologia sônica	X	X
Lavagem com água	X	X
Sopradores de fuligem	X	X
Inserções de tubo	X	X
Limpeza química	X	X
OFF-LINE		
Limpeza Manual	X	X
Lanças de Ar, Água e Vapor	X	X
Perfuração de tubos e rodding	X	-
O uso de balas, raspadores	X	-
Limpeza com explosivos	X	X
Absorção de vapor	X	X
Choque térmico	X	X
Limpeza química	X	X

Fonte: O autor

Através das tabelas acima, podemos avaliar a eficiência dos métodos a partir do alcance estimado no tubo e casco como mostra abaixo a tabela 3.

Tabela 3. Mapa comparativo do alcance e eficiência

	ALCANCE ESTIMADO		EFICIÊNCIA*
	Tubo	Casco	
ON-LINE			
Circulação de bolas-esponjas	X	-	3
Sistemas de gaiola e escova	X	-	3
Injeção de gás ou ar	X	X	1
Tecnologia sônica	X	X	3
Lavagem com água	X	X	2
Sopradores de fuligem	X	X	2
Inserções de tubo	X	X	3
Limpeza química	X	X	3
OFF-LINE			
Limpeza Manual	X	X	3
Lanças de Ar, Água e Vapor	X	X	2
Perfuração de tubos e rodding	X	-	1
O uso de balas, raspadores	X	-	3
Limpeza com explosivos	X	X	2
Absorção de vapor	X	X	2
Choque térmico	X	X	2
Limpeza química	X	X	3

Fonte: O autor

* Os valores apresentados para a eficiência são: 1 (Baixa), 2 (Razoável) e 3 (Ótima)

5 CONCLUSÃO

Mesmo com a existência de diversos métodos de limpeza e mitigação, seus efeitos ainda são muito grandes sobre a eficiência dos trocadores, representando altos custos ao processo. Sabendo-se que a incrustação nos trocadores de calor é um problema de operação crônico, a limpeza deles é de extrema importância e deve ser realizada de uma forma a otimizar a produção da refinaria, diminuindo o tempo de parada, os custos e impactos no meio ambiente.

Programando a manutenção e a limpeza periódica nos equipamentos observa-se que aumenta-se a vida útil dos equipamentos, padroniza a pressão de operação do sistema, aumenta a produtividade dos campos de produção e reduz os riscos de alta pressão, minimizando os riscos de impacto ambiental.

Como forma de avaliação desses mecanismos de limpeza com os riscos apresentados na análise de dados, alguns dos fatores mais importantes na seleção do método mais adequado à aplicação desejada foram reunidos na tabela 3.

Nesse contexto, os métodos de limpeza *on-line* podem ser vistos como uma importante alternativa no controle da incrustação e aumento do intervalo entre limpezas *off-line*. Dessa forma, é de fundamental importância o desenvolvimento de novos métodos de limpeza *on-line* e melhoramento dos métodos já existentes.

Recomenda-se a realização de novos trabalhos que proporcionem simulação da eficiência dos métodos de limpeza e obtenção do grau de incrustação no trocador de calor para elaboração de um check-list de métodos para cada grau encontrado.

REFERÊNCIAS

- BOTT, T. R. **Fouling of heat exchangers**. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 1995.
- BRIDGWATER, J.; LOO, C. E. **Removal of crystalline scale: mechanisms and the role of thermal stress**. 1984.
- BRONS, G.; RUDY, T. M. A logical approach to troubleshooting crude preheat exchanger fouling. In: **2nd International Conference on Petroleum and Gas Phase Behaviour and Fouling**, 2000, Copenhagen, pp. 15-20.
- CALLOW, M. **Ship fouling: problems and solutions**. 1990.
- HEWITT, G. F.; SHIRES, G.; BOTT, T. R. **Process heat transfer**. 1994.
- E-proceedings of conferences on heat exchanger fouling and cleaning**. Disponível em <<http://heatexchanger-fouling.com/proceedings.htm>> Acesso em 29 de agosto de 2017.
- GHIZZE, A. **Manual de trocadores de calor, vasos e tanques**. IBRASA.
- Heat Exchanger: **A Global strategic business report**, Global Industry Analysts, Inc., San Jose, CA, 2008.
- INCROPERA, FRANK P.; DEWITT, DAVID P.: **Fundamentos de transferência de calor e massa**, 4. ed. 1998 LTC Editora.
- JONSSON, G. R., LALOT, S., PALSSON, O. P., DESMET, B. (2007). Use of extended Kalman filtering in detecting fouling in heat exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 50, ed. 13-14.
- KERN D. Q.; SEATON, R. E.: **A theoretical analysis of thermal surface fouling**. British Chemical Engineering, v.4, p. 258-262, 1959.

MÜLLER-STEINHAGEN, H. **Heat exchanger fouling: Mitigation and Cleaning Technologies.** Stuttgart: ChemE, 2000.

MÜLLER-STEINHAGEN, H., MALAYERI, M.R., WATINKSON, A.P. **Heat exchanger fouling: Mitigation and Cleaning Estrategies,** vol 32, n 3-4, 2009.

RITCHIE, J. M., DROEGEMUELLER, P., AND SIMMONS, M. J. H., **hiTRAN Wire Matrix Inserts in fouling applications, heat transfer engineering,** vol. 30, no. 10–11, pp. 876–884, 2009.

TABOREK, J.; AOKI, T.; RITTER, R. B.; PALEN, J. W.; KNUDSEN, J. G.; **Predictive methods for fouling behavior.** Chemical engineering progress, v. 68, p. 69-78, 1972.

WALLHAUBER, E.; HUSSEIN, M. A.; BECKER, T. **Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry.** Food Control, vol. 27, ed. 1, pp. 1-10. 2012.

WIEHE, I. A, **The oil compatibility model and crude oil compatibility, energy & fuels,** vol. 14, 2000.

WILSON, D. I.; WATKINSON, A. P. **Chemical reaction fouling – a review.** Engineering and Thermal Sciences, v. 14, p. 361-374, 1997.

ZUBAIR, M. S.; ANWAR, K. S.; YOUNAS, M.; BUDAIR, M. O.; **A risk based heat exchanger analysis subject to fouling. Part I: Performance evaluation. Energy,** v. 25, p. 427-443, 2000.