

Artigo Técnico

Efeito das incrustações em condensadores do tipo casco e tubo. Prejuízo ou Oportunidade?

Baseado no trabalho de conclusão de curso da Faculdade de Engenharia Mecânica da PUCRS, [este artigo teve o objetivo](#) de analisar a influência das incrustações sobre o coeficiente global de transferência de calor em tubos de cobre aplicados em trocadores de calor do tipo Casco e Tubo. Foi apresentada a influência no dimensionamento de trocadores de calor em aplicações típicas de condicionamento de ar, tanto no setor HVAC-R como no setor industrial. Além disso, analisa de que maneira o fator de incrustação atua no efeito da troca térmica no condensador, colaborando na diminuição da eficiência e na capacidade frigorígena. Foram verificadas as causas e os mecanismos causadores das incrustações, além de verificar por método matemático os custos envolvidos.

INCRUSTAÇÕES

Incrustação (“*fouling*”) é qualquer tipo de depósito indesejável em superfície de transmissão de calor que aumente significativamente as resistências à transferência de calor e ao escoamento, aumentando, também, a perda de carga sobre o regime. Neste caso, as incrustações precipitam de forma a se fixarem na área interna dos tubos de cobre do condensador, local onde a água de condensação atua e região onde ocorrem as trocas térmicas. Não foram levadas em consideração incrustações no lado externo dos tubos, local onde escoa o refrigerante, já que este se encontra em um circuito fechado no ciclo de refrigeração da máquina. Deste modo é irrelevante o processo externo de incrustação, apesar de existirem fatores de incrustações normatizados para os refrigerantes.

O principal meio de incrustação nesses tipos de trocadores é por *precipitação de partículas*, principalmente de origem cálcica que se acumulam nas paredes dos tubos de cobre. No entanto, é comum verificar em limpezas, *incrustações por oxidação*, *incrustações lamacentas* ou *orgânicas* tais como algas e colônias de origem bacteriana. Atualmente, para aumentar a área da troca térmica, tem-se a opção de utilizar tubos aletados por fora e ranhurados por dentro (Figura1), cujas reentrâncias são um convite para a fixação de impurezas. A questão é que, de qualquer modo, as incrustações provocam uma resistência térmica condutiva, não permitindo que a troca de calor seja realizada com efetividade. É importante ressaltar que esta análise foi verificada em um condensador do tipo Casco e Tubo utilizado em um chiller. Este componente faz parte de um sistema de água aberto, onde o circuito de condensação está sujeito as impurezas, poluição e intempéries do meio, visto que a torre de arrefecimento geralmente encontra-se em ambientes abertos, tais como pátios ou terraços.

Para efeito de projeto, seleção de chillers e trocadores de calor industriais, utiliza-se a norma *Tubular Exchangers Manufacturers Association* (TEMA). A partir desta norma, são obtidos os fatores de incrustação para inúmeros tipos de fluidos em circunstâncias termo e fluidodinâmicas variáveis, tais como a velocidade e temperatura do fluido. No entanto, sabe-se que estes fatores de incrustação são de origem empírica, ou seja, foram obtidos através de testes e análises em campo. A natureza da incrustação em um determinado processo influencia significativamente o projeto do trocador de calor, na escolha do material e a programação da limpeza e manutenção. Cabe lembrar que a incrustação aumenta com o aumento da temperatura e a diminuição da velocidade da água.

EFICIÊNCIA

As incrustações não alteram somente a capacidade do trocador de calor. Sabe-se que no fim da vida útil, este equipamento chega a perder até 25% de sua capacidade nominal em função da perda de tubos, tamponamentos e por sujeira. Com base nos cálculos de transferência de calor e de acordo com as teorias de *Nusselt* e *Dittus-Boelter*, a resistência térmica por condução, ocasionada pela sujeira incrustada na superfície dos tubos, chega a representar 14% do total das resistências, perdendo apenas para a resistência térmica por convecção externa. O valor do coeficiente global de transferência de calor, utilizado para o cálculo da capacidade térmica, está intimamente ligado ao fator de incrustação. Embora a capacidade térmica do trocador seja significativamente alterada a longo prazo, a pior consequência está na eficiência energética. A eficiência enérgica representa custos. A (Figura 2) ilustra o comportamento de um chiller de 100TR de capacidade nominal, compressor do tipo parafuso com refrigerante R134a. Os eixos representam a capacidade térmica do equipamento (TR), o fator de incrustação (m^2C/W) e a eficiência energética a 100%. Com o passar do tempo e tendo como premissa que a taxa de adição de incrustação é muito maior que a taxa de remoção, surge um perfil interessante com relação à eficiência do chiller. O fato é que com o aumento

das camadas de incrustações, a eficiência diminui, pois o sistema está desperdiçando energia térmica com o compressor realizando praticamente o mesmo trabalho mecânico. Com base na análise matemática, no período em que o condensador atinge o nível de incrustação mínimo regido pela TEMA, para água de torre de arrefecimento não tratada, o sistema chega a perder *ITR de energia*, o equivalente a um *Split de 12000 BTU/h*. No entanto, é importante lembrar que dados registrados a longo prazo, isto é, a partir da meia vida do trocador, o mesmo já pode desperdiçar até 10TR. Como já comentado, dependendo do foco analisado, esta não é a principal dor de cabeça. O problema está nos custos ocasionados pela diminuição no rendimento ocasionada pela perda de eficiência do trocador em função da sujidade.

CUSTOS

Nos Estados Unidos, estima-se que os gastos ocasionados pelas incrustações em trocadores de calor ocasionados pelas incrustações, tanto no setor HVAC-R como no setor industrial, sejam da ordem de *US\$5 bilhões por ano*. Os custos que envolvem a eficiência da máquina estão de maneira indireta associadas à incrustação no qual a mesma esta submetida no momento da medição do *approach* (“Aproximação”). Atualmente, a eficiência de uma máquina é assunto muito importante quando falamos de sustentabilidade, LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), Green Buildings (*Prédios Verdes*) e, lembre-se: Sempre haverá uma medição no consumo de energia do seu prédio (Figura 3).

Se considerarmos Chillers que atuam, por exemplo, em um Shopping, 10h por dia e 365 dias por ano (desconsiderando paradas programadas), e ainda já considerando que estes equipamentos estariam atuando no seu consumo médio conforme a norma **ARI 550/590** em **NPLV** (*Non-Standard Part Load Value*), utilizando água de torre de arrefecimento tratada, os resultados com relação a eficiência energética e conseqüente gastos, são significativos. Se estes Chillers tiverem uma eficiência inicial de **NPLV 0,550 kW/TR**, no período de aproximadamente 1 ano terá sua eficiência reduzida a **NPLV 0,600 kW/TR**. Se neste Shopping tivermos 3 máquinas idênticas, o custo será de aproximadamente R\$18.900,00 neste mesmo período. Considerando as mesmas condições, quando falamos do setor industrial que utiliza água gelada para processos, o custo pode chegar a R\$56.400,00 **em 1 ano**. Se não for realizada a devida limpeza, este custo logicamente aumentará, talvez não de maneira linear, pois estamos lidando com um sistema caótico que está sujeito a remoção e adição de sujeira ao longo do tempo e depende de outros fatores fluidodinâmicos. Esta série de mecanismos causadores de incrustações são os principais agentes que influenciam o tamponamento dos tubos, pois provocam corrosão (Figura 4), perda de material do tubo causando rachaduras e furos além é claro de piorar ainda mais a capacidade frigorígena do trocador. Por isso, a manutenção periódica de acordo com o indicado pelo fabricante é importante. Utilizando de técnicas mecânicas como o varetamento, ou limpezas com produtos químicos, além de evitar gastos pela diminuição da eficiência, aumentará a vida útil do trocador. Basta verificar, portanto, o custo-benefício deste tratamento em função dos gastos gerados pela sujeira.

MANUTENÇÃO

A medição das incrustações não é obtida de maneira direta e sim indireta. Quando técnicos realizam a inspeção do chamado *approach* estão na verdade verificando, de modo sensorial, a diferença de temperatura da saída da água do condensador, em relação à temperatura de condensação do refrigerante sobre os tubos. Naturalmente quanto mais próximo do zero esta diferença, mais eficiente a troca térmica. No entanto sabe-se que não existe a troca térmica perfeita, portanto existem limites do *approach* que indicam a eminência da manutenção.

É notório que a grandeza envolvida neste processo é a temperatura, porém quanto mais incrustados os tubos, maior será a diferença no *approach*. Para os fabricantes de chillers, as aplicações padrão de água operarão com uma aproximação menor do que 5,5°C. Se O Approach ultrapassar 5,5°C, a limpeza dos tubos do condensador é recomendada.

Na era da sustentabilidade esses pequenos detalhes fazem a diferença na natureza e no bolso.

Referência: A quem interessar, o trabalho completo sobre este tema está publicado de forma eletrônica e física na Biblioteca da PUCRS sob o título: “EFEITO DO FATOR DE INCRUSTAÇÃO SOBRE O COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM TROCADORES DO TIPO CASCO E TUBO”

Bruno de Rosso Ribeiro
INGERSOLL RAND/TRANE
bruno.ribeiro@trane.com