

ANÁLISE DO CRESCIMENTO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DA INCRUSTAÇÃO EM TROCADORES DE CALOR

Márcio Madi, Cesar O. R. Negrão e Rodrigo Massoqueti

Laboratório de Ciências Térmicas - LACIT

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais - PPGEM

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR

Av. Sete de Setembro, 3165, CEP 80.230-901 Curitiba-PR, e-mail: negrao@cefetpr.br

Resumo: A supervisão do desempenho de trocadores de calor é uma forma de quantificar as despesas relacionadas à incrustação e de identificar o período adequado de sua limpeza. Jerónimo et al. (1997) apresentou uma metodologia que permite o monitoramento da performance de trocadores de calor. A técnica consiste em comparar a efetividade medida e calculadas (do trocador limpo e sujo na condição de projeto). A partir destas efetividades, Jerónimo et al. (1997) propuseram um índice de incrustação que varia entre 0 e 1. O presente trabalho identifica uma grande similaridade entre este índice de incrustação e a resistência térmica da incrustação de trocadores de calor da bateria de pré-aquecimento de uma refinaria de petróleo. Propõe-se então uma forma para estimar a resistência térmica de incrustação a partir do índice de incrustação. Os resultados sugerem uma correlação muito boa entre as variáveis. A técnica mostra-se muito adequada para avaliação da resistência térmica da incrustação devido à sua facilidade de implementação.

Palavras-chave: Trocadores de calor, Resistência térmica, Incrustação.

1 INTRODUÇÃO

A deposição de impurezas, compostos metálicos e demais partículas nas superfícies de um trocador de calor caracteriza a incrustação. A relação entre incrustação em trocadores de calor e perda de eficiência no processo vem sendo motivo de vários estudos (Bott, 1995). Sendo assim não poderia ser diferente no refino de petróleo, principalmente no pré-aquecimento do petróleo. Isto ocorre devido aos altos custos no aquecimento do petróleo.

A destilação em uma refinaria tem início com o bombeamento do petróleo (cru) através de uma rede de trocadores de calor. Enquanto ocorre o aquecimento do cru, tem-se simultaneamente o resfriamento dos produtos que deixam as torres de destilação. Este conjunto de trocadores de calor é chamado de bateria de pré-aquecimento.

Desde o primeiro momento de funcionamento de um trocador de calor, origina-se o mecanismo de formação da incrustação. Devido às variações nas temperaturas das correntes e principalmente nas propriedades termofísicas dos fluidos de trabalho, tem-se sempre uma taxa de formação diferente para cada condição de operação.

Os depósitos de material na superfície dos trocadores influenciam diretamente na vazão do petróleo e na eficiência de troca de calor. Isto acarreta um custo maior com o combustível queimado nos fornos, já que o petróleo chega no forno com uma temperatura abaixo daquela que poderia chegar com os t

trocadores limpos. Estudos publicados nos últimos vinte anos têm procurado quantificar o custo adicional de energia devido à presença da incrustação. A estimativa é de que milhões de dólares são gastos todos os anos na queima de combustível extra para suprir a perda da eficiência.

A supervisão do desempenho da bateria de pré-aquecimento é uma forma de quantificar as despesas relacionadas à incrustação e de identificar o período adequado de limpeza dos trocadores de calor. Jerónimo et al. (1997) apresenta uma metodologia que permite o monitoramento da performance de trocadores de calor. A técnica consiste em comparar efetividades medidas e calculadas (do trocador limpo e sujo na condição de projeto). Os valores calculados são avaliados de correlações encontradas na literatura, baseadas no NTU e na razão entre as capacidades térmicas das correntes quente e fria. A efetividade medida é obtida de temperaturas e vazões medidas em campo. Tonin, Negrão e Lima (2003), por sua vez, aplicaram a metodologia de Jerónimo et al. (1997), confirmando a sua potencialidade. Eles ainda estenderam a técnica para o monitoramento de uma rede completa, quantificando as despesas relacionadas à perda de desempenho desta rede.

Baseado nos resultados da metodologia de Jerónimo et al. (1997), o presente trabalho sugere uma estimativa para avaliação da resistência térmica da incrustação. Inicialmente, será apresentada a forma tradicional de se avaliar a resistência térmica da incrustação. Na seqüência, será descrita de maneira sucinta a formulação de Jerónimo et al. (1997) para em seguida apresentar a metodologia proposta.

2 RESISTÊNCIA TÉRMICA DA INCRUSTAÇÃO

A resistência térmica da incrustação em um trocador de calor pode ser definida como:

$$R_f = \frac{1}{(UA)_f} - \frac{1}{(UA)_{cl}} \quad (1)$$

onde U é o coeficiente global de transferência de calor e A é a área de transferência de calor. Os índices f e cl representam o trocador sujo e limpo, respectivamente. R_f inclui a resistência térmica em ambos lados do trocador de calor.

Como se considera que ambos fluidos não mudam de fase no trocador de calor, o valor de $(UA)_f$ pode ser avaliado pelo emprego de valores medidos de temperatura e vazão, de acordo com o balanço de energia em um dos lados do trocador de calor (Liu and Kakaç, 1998):

$$(UA)_f = \frac{(\dot{m}c_p)_c(T_{c2} - T_{cl})}{LMTDF_t} = \frac{(\dot{m}c_p)_h(T_{h1} - T_{h2})}{LMTDF_t} \quad (2)$$

onde \dot{m} é o fluxo de massa, c_p é o calor específico do fluido, T é a temperatura e F_t é um parâmetro o qual depende do tipo de trocador de calor. Os índices c , h , 1 e 2 indicam, respectivamente, as correntes fria e quente e a entrada e a saída do trocador de calor. LMTD é a diferença de temperatura média logarítmica, dada por:

$$LMTD = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{cl})}{\ln \frac{(T_{h1} - T_{c2})}{(T_{h2} - T_{cl})}} \quad (3)$$

Para um trocador de calor com um passe no casco e n passes nos tubos, F_t será (Liu and Kakaç, 1998):

$$F_t = \frac{\left[\sqrt{R^2 + 1} \ln(1 - \varepsilon_m) / (1 - R\varepsilon_m) \right]}{\left[(R - 1) \ln \frac{2 - \varepsilon_m (R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - \varepsilon_m (R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})} \right]} \quad (4)$$

onde ε_m é a efetividade medida do trocador de calor que é baseada em valores medidos de temperatura:

$$\varepsilon_m = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{(\dot{m}c_p)_h (T_{h1} - T_{h2})}{(\dot{m}c_p)_h (T_{h1} - T_{c1})} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c1}} \cdot 100 \quad (5)$$

onde \dot{Q} é o calor transferido pelo trocador de calor e o índice max representa o calor máximo possível a ser transferido pelo trocador de calor. Note que a capacidade térmica da corrente quente, $(\dot{m}c_p)_h$, é considerada a menor entre as correntes quente e fria, o que é usual em baterias de pré-aquecimento. R é a razão entre a mínima e a máxima capacidades térmicas das correntes de fluidos e pode ser obtida do balanço de energia (segundo igualdade da Eq. (2)):

$$R = \frac{(\dot{m}c_p)_h}{(\dot{m}c_p)_c} = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{h2}} \quad (6)$$

Variações diárias da composição do cru podem alterar as vazões dos produtos e as propriedades do cru. Estas variações modificam a razão de capacidades térmicas, R , e o coeficiente global de transferência de calor, U . O coeficiente global do trocador limpo varia com a vazão e com as propriedades termofísicas dos fluidos. Portanto, o cômputo de UA_{cl} (Eq. (1)) deve levar em consideração estas variações e pode ser avaliado por:

$$(UA)_{cl} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} \right)} \quad (7)$$

onde h é o coeficiente de convecção e A é a área de transferência de calor. Para o caso de trocador de calor tipo casco-tubo, os índices i e o indicam o lado interno e externo dos tubos, respectivamente. O cálculo dos coeficientes de convecção é baseado em correlações da literatura (Liu and Kakaç, 1998), as quais consideram os efeitos de vazão e propriedades termofísicas dos fluidos. A resistência térmica do metal é pequena quando comparada às demais.

2.1 Metodologia de Jerónimo et al. (1997)

Por conveniência a metodologia de Jerónimo et al. (1997) será apresentada de forma sucinta. Esta consiste em comparar as efetividade medida (Eq. (5)) com valores calculados de efetividades para trocadores limpo e sujo. Os valores limpo e sujo da efetividade são calculados por (Liu and Kakaç, 1998):

$$\varepsilon_p = \frac{2}{1 + R + \sqrt{(1 + R^2)} \frac{1 + e^{-[NTU_p \sqrt{(1 + R^2)}]}}{1 - e^{-[NTU_p \sqrt{(1 + R^2)}]}}} \times 100 \quad (8)$$

R é obtido de valores medidos de temperaturas (Eq. (6)) e NTU_p é um valor calculado (predito) para o Número de Unidades de Transferência:

$$NTU_p = \frac{(UA)_p}{(\dot{m}c_p)_h} \quad (9)$$

Devido às mudanças nas propriedades do cru e vazões dos produtos, o valor de U é constantemente modificado e consequentemente, as efetividades dos trocadores de calor. Jerónimo et al. (1997) propõem algumas correlações para estimar as mudanças de NTU como uma função das vazões mássicas. Estas correlações são baseadas no número de Nusselt de ambas correntes de fluidos. Entretanto, eles assumiram que as mudanças nas composições do cru e dos produtos não alteram o valor de NTU .

Para um trocador de calor contra-corrente, as seguintes correlações foram definidas:

Corrente de menor capacidade térmica escoando no casco:

$$\frac{(NTU)_p}{(NTU)_d} = \frac{\left[(\dot{m}c_p)_{min,d} / (\dot{m}c_p)_{min} \right]^{1-b}}{\left\{ 1 + (UA/hA)_d \left[\left((\dot{m}c_p)_{min,d} / (\dot{m}c_p)_{min} \right)^{a-b} (R/R_d)^a - 1 \right] \right\}} \quad (10)$$

b) Corrente de menor capacidade térmica escoando nos tubos:

$$\frac{(NTU)_p}{(NTU)_d} = \frac{\left[(\dot{m}c_p)_{min,d} / (\dot{m}c_p)_{min} \right]^{1-a}}{\left\{ 1 + (UA/hA)_d \left[\left((\dot{m}c_p)_{min,d} / (\dot{m}c_p)_{min} \right)^{b-a} (R/R_d)^b - 1 \right] \right\}} \quad (11)$$

O índice p refere-se ao valor predito e de projeto do trocador de calor. h é o coeficiente de convecção da corrente de maior produto $\dot{m}c_p$. De acordo com os coeficientes encontrados na literatura (Liu and Kakaç, 1998), a e b são aproximadamente 0,8 e 0,6, respectivamente. No caso da corrente fria possuir o menor valor, R deve ser redefinido como: $(\dot{m}c_p)_c / (\dot{m}c_p)_h$. A obtenção completa das correlações (10) e (11) pode ser encontrada em Tonin (2003). O valor de projeto de UA , e consequentemente NTU_d , é calculado pela adição de uma resistência térmica da incrustação estabelecida em projeto ao valor de UA_{cl} (Eq. (7)). Valores de projeto da resistência térmica da incrustação são sugeridos pela TEMA (1978). Substituindo R e NTU_p na Eq. (8), tanto a efetividade limpa, ε_{cl} , quanto suja, ε_f , podem ser calculadas. Estes valores são então comparados à efetividade (Eq. (5)). A comparação indica o atual estágio de incrustação do trocador de calor.

Além disso, Jerónimo et al. (1997) define um índice de incrustação para o trocador de calor:

$$IF = \frac{(\varepsilon_{cl} - \varepsilon_m)}{(\varepsilon_{cl} - \varepsilon_f)} \quad (12)$$

IF igual a zero representa o trocador limpo e IF=1 indica o trocador sujo na condição de projeto.

3 COMPARAÇÃO ENTRE IF E A RESISTÊNCIA TÉRMICA DA INCRUSTAÇÃO

3.1 Caso Teste

Um ramal da bateria de pré-aquecimento da refinaria REPAR[#] (Fig. (1)) foi utilizado para análise. Como mostrado, o cru é aquecido em três trocadores de calor (TC-01, TC-02, TC-03) antes das unidades de dessalinização (V-02 e V-05) e em quatro trocadores (TC-04, TC-05, TC-06 e TC-07) após. Resíduo de vácuo, gasóleo pesado e leve, diesel pesado e nafta pesada são os produtos da destilação que trocam calor com o cru. Os dados foram obtidos entre Outubro de 1998 e Abril de 2001. Todos os trocadores de calor foram limpos em Outubro de 1998, imediatamente antes do início do monitoramento.

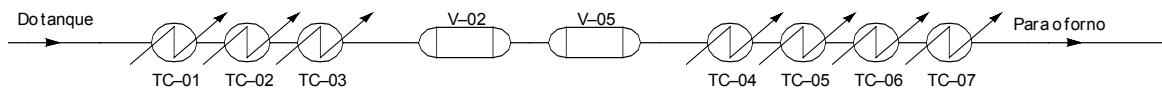


Figura 1. Rede de trocadores de calor analisada.

3.2 Resistência da Incrustação

Tonin (2003) levantou a resistência térmica da incrustação para todos os trocadores de calor da figura 1, utilizando a Eq. (1). Como ocorrem diariamente variações da composição do cru e das vazões dos produtos, ambos efeitos foram considerados na avaliação de UA_{cl} . Os valores de UA_f foram baseados em valores medidos, conforme a Eq. (2).

As figuras 2, 3 e 4, reproduzidas do trabalho de Tonin (2003), mostram a evolução da resistência térmica da incrustação com o tempo para os trocadores TC-01, TC-03 e TC-06, respectivamente. Apesar da oscilação da resistência térmica, o valor médio claramente aumenta com o tempo. As oscilações podem tanto estarem relacionadas à precisão das correlações quanto com às incertezas de medição^{##}. Como pode ser visto, a resistência térmica do trocador TC-01 quase não se altera durante o primeiro ano de operação e após junho de 2000, esta sofre uma mudança brusca. De acordo com a TEMA (1978), a resistência térmica do trocador TC-01, estabelecida no estágio de projeto, é da ordem de $6,6 \times 10^{-6}$ K/W. Este valor é aproximadamente duas vezes menor do que a resistência térmica alcançada no final do monitoramento.

Como mostrado na Fig. 3, a resistência térmica da incrustação para o trocador de calor TC-03 cresce a uma taxa constante, porém a resistência de projeto não é atingida durante o período de monitoramento (seu valor de projeto é de $4,9 \times 10^{-6}$ K/W). Por outro lado, a Fig. 4 mostra que a resistência térmica da incrustação para o trocador de calor TC-06 alcança quatro vezes seu valor de projeto ($5,1 \times 10^{-6}$ K/W). Para todos os demais trocadores de calor da Fig. 1, a resistência térmica da incrustação aumenta a uma taxa constante, como mostrado nas Fig. 3 e 4.

[#] Refinaria Presidente Getúlio Vargas da PETROBRAS localizada em Araucária, Paraná.

^{##} Detalhes sobre incertezas de medição, consultar Tonin (2003).

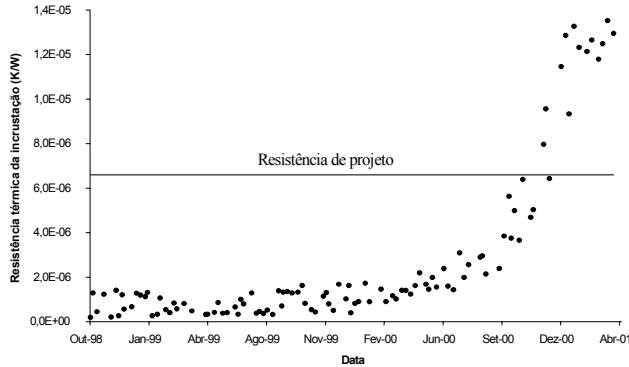


Figura 2 – Resistência térmica da incrustação do trocador de calor TC-01.

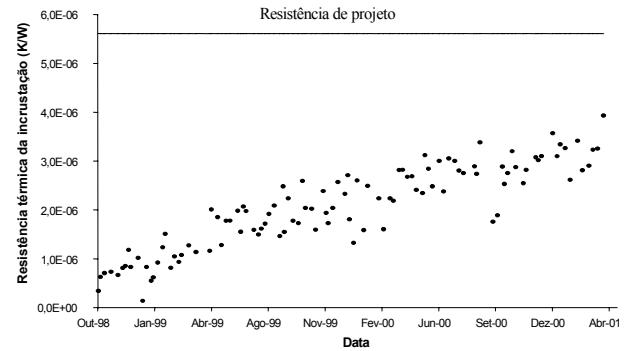


Figura 3 – Resistência térmica da incrustação do trocador de calor TC-03.

3.3 Metodologia de Jerónimo et al. (1997)

Na Fig. 5, o índice de incrustação de Jerónimo et al. (1997) é mostrado para o trocador TC-01. Note que se IF é igual a zero, a efetividade medida coincide com a efetividade calculada para o trocador limpo e se IF é igual a 1, a efetividade medida iguala-se à efetividade calculada para o trocador sujo na condição esperada em projeto. Qualquer valor acima de um indica que o trocador de calor está mais sujo do que previsto em projeto. Como se vê, o índice de incrustação é praticamente zero até outubro de 1999, indicando que a incrustação não é significativa. De Fevereiro a Outubro de 2000 (8 meses), a incrustação aumenta exponencialmente e IF alcança rapidamente seu valor de projeto. Como observado por operadores da refinaria, a causa desta elevada taxa de incrustação é o depósito de produtos corrosivos provenientes da torre de destilação. Em Abril de 2001, o valor médio do índice de incrustação é de 1,8, em outras palavras, 80% mais alto do que seu valor previsto em projeto.

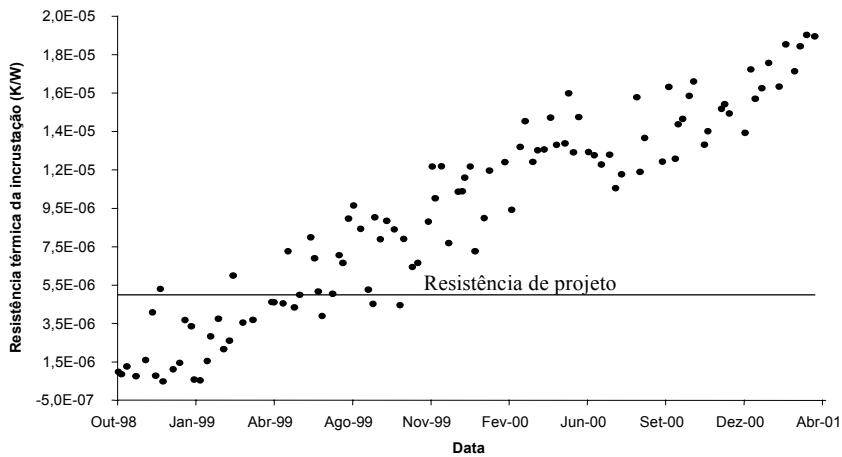


Figure 4 – Resistência térmica da incrustação do trocador TC-06.

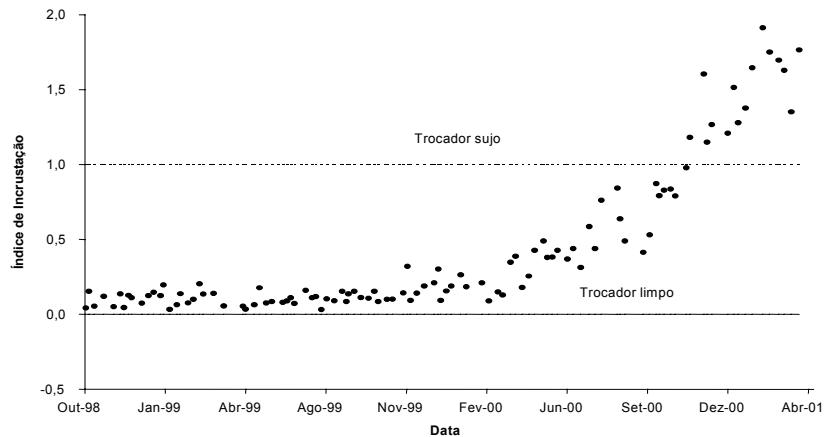


Figure 5. Índice de Incrustação para o trocador de calor TC-01.

As Fig. 6 e 7 mostram o índice de incrustação para o trocador de calor TC-03 e TC-06, respectivamente, que crescem a uma taxa aproximadamente constante. O índice de incrustação para o trocador TC-03 não alcança seu valor de projeto durante o monitoramento, enquanto que para o trocador TC-06 seu valor atinge quase quatro vezes seu valor de projeto.

Maiores detalhes sobre tais resultados podem ser encontrados em Tonin (2003) e Tonin, Negrão e Lima (2003).

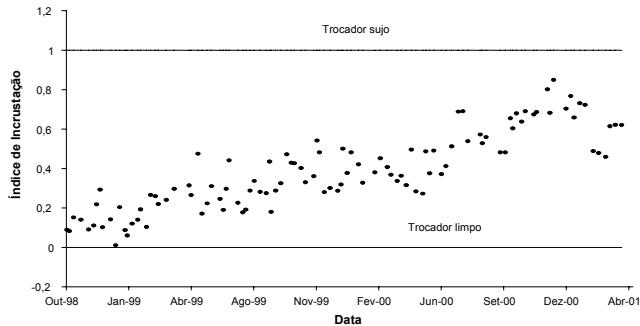


Figure 6. Índice de Incrustação para o trocador de calor TC-03.

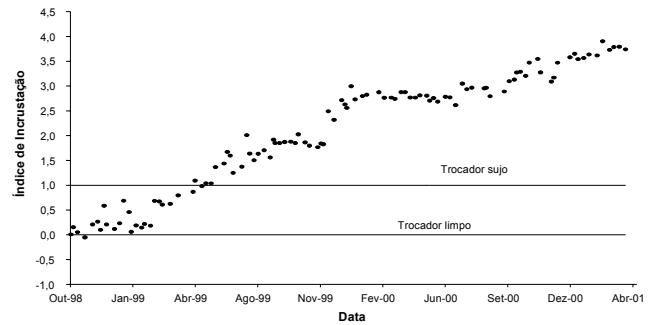


Figure 7. Índice de Incrustação para o trocador de calor TC-06.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Uma comparação das Fig. 2 e 3 com as Fig. 5 e 6, respectivamente, revela que a resistência térmica da incrustação e o índice de incrustação apresentam comportamentos similares. É possível verificar que para a resistência térmica da incrustação igual a zero, o índice de incrustação também é nulo. No momento que a resistência coincide com seu valor de projeto, o índice iguala-se a um. Para o trocador TC-01, cujo índice de incrustação é aproximadamente igual a dois em abril de 2001, a resistência térmica da incrustação será aproximadamente duas vezes seu valor de projeto. Esta similaridade é observada em todos os trocadores de calor da Fig 1. Uma vez que a avaliação índice de incrustação não é complexa, esta variável pode ser usada para inferir a resistência térmica da incrustação. A seguinte relação é então sugerida:

$$R_{fe}(t) = R_{fd} IF(t) \quad (13)$$

onde R_{fe} é a resistência térmica da incrustação e R_{fd} é a resistência térmica da incrustação estabelecida em projeto. As Fig. 8, 9 e 10 mostram a relação entre R_{fe} (estimada pela Eq. (13)) e R_f (avaliada pela Eq. (1)) para o TC-01, o TC-03 e o TC-06, respectivamente.

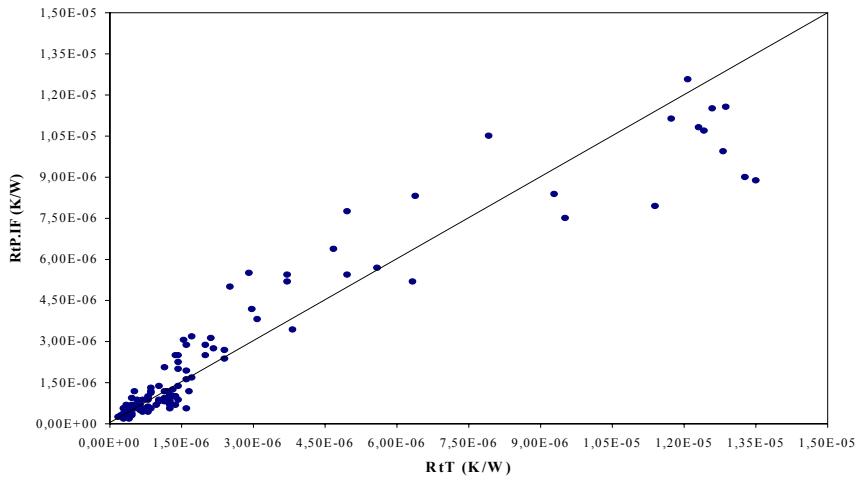


Figura 8 – Comparação entre a resistência térmica de incrustação com o seu valor correspondente estimado para o trocador TC-01.

Como pode ser visto, há uma boa concordância entre as duas variáveis. O coeficiente de correlação (R^2) para a linha reta (1,0 e 0,0 são os coeficientes angular e linear desta reta, respectivamente) da Fig. 8, 9 e 10 são, respectivamente, 0,88, 0,62 e 0,87. Portanto, existe uma forte relação entre a resistência térmica da incrustação e o índice de incrustação, apesar de terem origens diferentes.

5 CONCLUSÕES

O estudo da resistência térmica da incrustação se justifica pela tentativa de evitar e/ou minimizar o problema, quantificar as perdas ocasionadas pelos seus efeitos e determinar o período adequado para limpeza dos equipamentos. Por exemplo, o monitoramento do desempenho térmico de trocadores de calor possibilita quantificar as perdas de energia relacionadas com a incrustação e/ou identificar o período apropriado para limpeza.

Uma metodologia para monitoramento de trocadores de calor encontrada na literatura (Jerônimo et al., 1997) foi estudada. Ao aplicar esta metodologia a uma bateria de pré-aquecimento do cru de uma refinaria, identificou-se que o índice de incrustação definido por Jerônimo et al. (1997) apresentava comportamento muito parecido com o crescimento da resistência térmica da incrustação dos trocadores de calor. O presente trabalho então sugere que a resistência térmica da incrustação possa ser estimada a partir do índice de incrustação através de uma simples relação linear. A correlação entre estas variáveis é boa e cresce para altos índices de incrustação.

A simplicidade para obtenção do índice de incrustação justifica a utilização da metodologia proposta. Cabe ressaltar que não há necessidade de cálculo das propriedades térmofísicas para o petróleo, uma vez que estas mudam diariamente. Apenas as temperaturas de entrada e saída do trocador bem como a vazão de uma das correntes de fluidos devem estar disponíveis durante o monitoramento. Assim sendo, pode-se facilmente inferir o valor da resistência térmica da incrustação para qualquer instante do monitoramento. Além disso, o crescimento aproximadamente linear da resistência térmica da incrustação para a maioria dos trocadores de calor observados sugere que extrapolações possam ser feitas em um universo de tempo não muito distante. Com isto, pode-se antecipar a ocorrência da

incrustação, prever as despesas associadas e portanto programar a limpeza do trocador de calor. Outros testes deverão ser realizados no futuro para comprovar a validade da metodologia proposta.

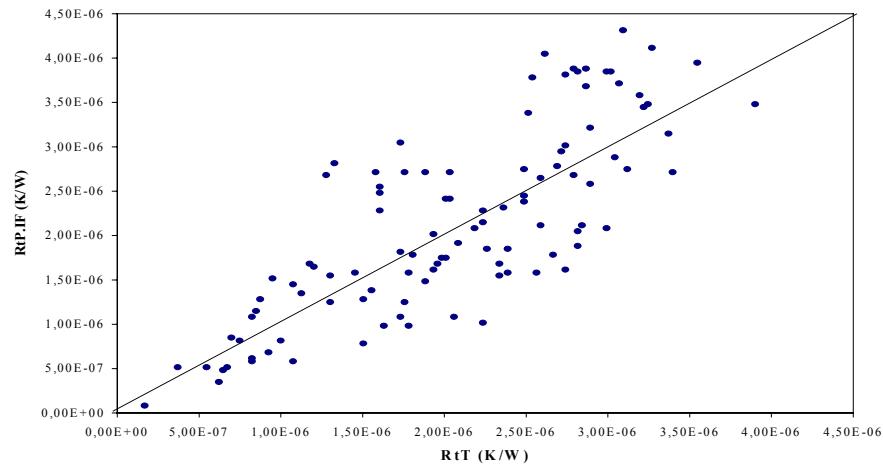


Figura 9 – Comparaçāo entre a resistācia tērmica de incrustaçāo com o seu valor correspondente estimado para o trocador TC-03.

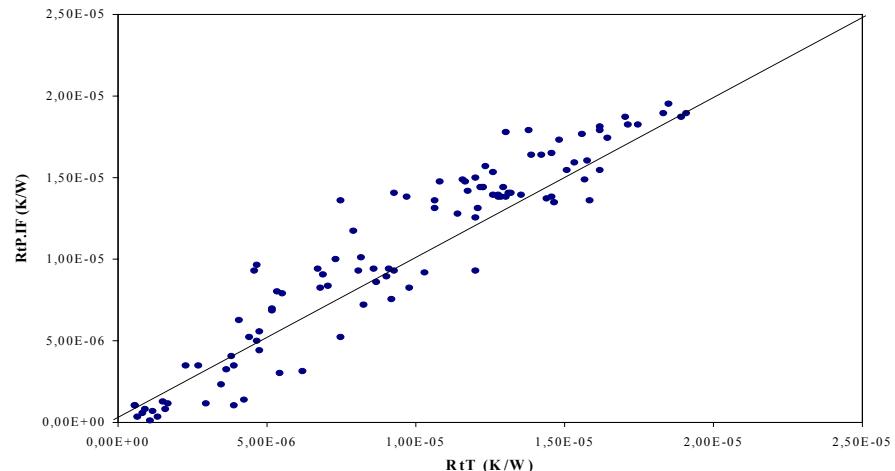


Figura 10 – Comparaçāo entre a resistācia tērmica de incrustaçāo com o seu valor correspondente estimado para o trocador TC-06.

6 REFERÊNCIAS

- Bott, T. R. Fouling of Heat Exchangers. 1. ed. New York: Elsevier, 1995. 524p.
- Jerónimo, M. A. S; Melo, L. F; Braga, A. S; Ferreira, P. J. B. F; Martins, C. Monitoring The Thermal Efficiency of Fouled Heat Exchangers – a Simplified Method. *Experimental Thermal and Fluid Science*, V. 14, P 455 – 463, 1997.
- Kakaç, S; Liu, H., Heat Exchangers – Selection, Rating and Thermal Desing. 1. ed. New York: CRC Press, 1998. 424p.
- TEMA. Standards of the Tubular Exchangers Manufactures Association, 6. ed. New York, 1978.
- Tonin, P. C. Metodologia Para Monitoramento de Desempenho Térmico de Redes de Trocadores de Calor. 2003. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação

em Engenharia Mecânica e de Materiais, CEFET-PR, Curitiba.

Tonin, P. C; Negrão, C. O. R; Lima, L. G., An approach for monitoring the thermal performance of Heat Exchanger Networks, 17th International Congress of Mechanical Engineering, Anais do COBEM 2003, São Paulo, Nov-2003, CDROM.

ANALYSIS OF THE FOULING THERMAL RESISTANCE RISE OF HEAT EXCHANGERS

Márcio Madi, Cezar O. R. Negrão e Rodrigo Massoqueti

Thermal Science Laboratory - LACIT

Postgraduate Program of Mechanical and Materials Engineering - PPGEM

Federal Center of Technological Education of Paraná – CEFET-PR

Av. Sete de Setembro, 3165, CEP 80.230-901 Curitiba, Paraná, Brazil, e-mail: negrao@cefetpr.br

Abstract. The supervision of heat exchanger performance allows the evaluation of the expenses related to fouling and the identification of appropriate cleaning time. Jerónimo et al. (1997) presented an approach to monitor the performance of heat exchangers. The method consists in the comparison of measured effectiveness with the computed counterparts (clean and dirt heat exchanger at the design condition). Based on those effectiveness, Jerónimo et al. (1997) proposed an index of fouling which varies from 0 to 1. The current work identifies a great similarity of this index with the thermal resistance of fouling of a pre-heat train of a refinery. An approach to estimate the thermal resistance of fouling based on the index of fouling is thus suggested. The results show a good correlation between the variables. Besides, the technique is quite adequate for the evaluation of the thermal resistance of fouling once its implementation is simple.

Keywords. Heat exchangers, Thermal resistance, Fouling.