

**Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

---

## REVISÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA A INCRUSTAÇÃO POR COQUE NO PROCESSAMENTO DO PETRÓLEO

Clovis Bombardelli<sup>1</sup>, Admilson Teixeira Franco<sup>1</sup>, Mabrouk M. Abugderah<sup>2</sup>, Cezar O. R. Negrão<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR  
*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM*  
Av. Sete de Setembro, 3165 – CEP 80230-901 – Curitiba / PR  
[cbombardelli@yahoo.com.br](mailto:cbombardelli@yahoo.com.br), [admilson@cefetpr.br](mailto:admilson@cefetpr.br), [negrão@cefetpr.br](mailto:negrão@cefetpr.br)

<sup>2</sup>Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – Campus de Toledo / Pr  
Rua da Faculdade, 2550 – CEP 85903-000 – Toledo / PR  
[mabruk@unioeste.br](mailto:mabruk@unioeste.br)

**Resumo** – A incrustação na indústria do petróleo tem se mostrado um problema de grande importância atualmente, tanto em termos econômicos quanto em relação ao meio ambiente. Muitos modelos matemáticos para prever a incrustação em equipamentos podem ser encontrados na literatura, mas poucos são direcionados especificamente para incrustação por coque. Uma revisão entre os principais modelos permite correlacionar melhor suas características e encontrar o mais adequado para prever a incrustação por coque em cada situação específica. Uma melhor previsão dos níveis de incrustação permite um melhor aproveitamento dos resíduos do petróleo e uma vida útil mais longa aos equipamentos, sendo o fator mais importante na motivação deste trabalho. Embora extensiva aos modelos de incrustação de outras áreas, a pesquisa enfatizou os modelos mais salientes relatados em problemas de incrustação com o petróleo.

Palavras-Chave: Modelos matemáticos, Incrustação, Coque, Petróleo.

**Abstract** – Fouling in petroleum processing has been shown as a problem of great economical and environmental interest. Many mathematical models for fouling prediction in various equipments can be found in the literature, but few are specific for coke fouling. An extensive review of the main models published in the literature was carried out to allow better correlation of the fouling characteristics and finding the most appropriate one for coke with specific situations. A better forecast of the fouling levels allows a better use of the petroleum residual and makes longer equipments useful life, being the most important factor to motivate this work. Although the existence of fouling models of other areas is very extensive, this research work emphasizes the most salient fouling models found in petroleum processing fouling.

Keywords: Modeling, Fouling, Coke, Petroleum.

## 1. Introdução

A incrustação pode ser definida como a formação de depósitos sobre superfícies aquecidas que gradativamente impedem a transferência de calor e aumentam a resistência ao escoamento no caso de tubulações. A incrustação que ocorre nos equipamentos que processa petróleo tem se mostrado um problema de grande importância atualmente, em termos econômicos e em relação ao meio ambiente (Andersen e Speight, 1999).

A principal espécie de incrustação encontrada no processamento do petróleo é do tipo coque, que surge da decomposição térmica das frações pesadas do petróleo. Uma revisão entre os principais modelos permite correlacionar melhor suas características e encontrar o mais adequado para prever a incrustação por coque em cada situação específica, tanto no pré-aquecimento quanto nas etapas de destilação.

Além dos modelos considerados básicos, uma prévia classificação dos principais modelos próprios para uso em casos de incrustação por reação química pode ser encontrada em Bott (1995), contendo detalhes e restrições de aplicação. Outros modelos mais recentes têm sido desenvolvidos, entre eles, o modelo de Polley et al. (2002) e o modelo específico para equipamentos de destilação (Bombardelli et al., 2005).

## 2. Modelos Básicos.

Os primeiros modelos de incrustação surgiram de forma genérica e não incluíam nenhum mecanismo específico para o processo de incrustação, mas apenas relacionavam a variação da incrustação ao longo do tempo. O primeiro modelo foi sugerido por Kern e Seaton (1959) baseando-se na hipótese da existência de dois processos independentes entre si como mostrado pela Equação 1, um de deposição e outro de remoção, ambos dependentes da tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento (Taborek et al., 1972).

$$\frac{d\hat{m}_i}{dt} = \theta_{dep} - \theta_{rem} \quad (1)$$

Kern e Seaton (1959) mostram que a taxa de deposição é constante e a taxa de remoção é diretamente proporcional à quantidade de material depositado (Sommerscales, 1990). O resultado apresenta um comportamento que converge para um valor limite máximo, chamado de assintótico. Konak (1973) estendeu o modelo, incluindo uma ordem genérica  $n$  para a taxa de deposição, para incluir os processos químicos incrustantes de ordem superiores. Epstein (1981), analisando o mesmo problema sob outro ponto de vista, baseando-se em trabalhos anteriores de Badger e Othmer (1924) generaliza um modelo para ordens superiores, resultando num modelo não-assintótico, conhecido pelo nome *modelo de incrustação decrescente*.

Os modelos básicos consistem de formas matemáticas de ajustes de dados experimentais, sem nenhuma relação com a física ou a química dos processos envolvidos na incrustação. Estes modelos aparentemente atrativos pela simplicidade têm severas limitações (Bott, 1995). Os parâmetros destes modelos surgem por ocasião do ajuste dos dados experimentais particulares a cada caso, entretanto, a maior dificuldade na escolha do modelo mais adequado a cada caso é a falta de dados experimentais precisos, tornando a escolha incerta. Atualmente modelos mais específicos têm sido desenvolvidos para cada situação, recebendo o nome genérico de modelos mecanicistas.

## 3. Modelos mecanicistas.

Recentemente, os modelos de incrustação básicos têm se tornados menos populares, pois cada mecanismo particular de incrustação exige um modelo específico. Entretanto, existe a dificuldade de se visualizar os fenômenos de deposição e remoção ocorrendo simultaneamente. Segundo Taborek et al. (1972), este fato pode ser entendido sob dois pontos de vista: remoção de material já depositado ou supressão do mecanismo de deposição. Qual é a mais adequada ainda está em aberto para questionamentos, dependendo muito do mecanismo de adesão. Tanto o processo de deposição como o de remoção ou mesmo de supressão da deposição são fenômenos físico-químicos complexos.

Os modelos mecanicistas são baseados nos mecanismos de deposição, sendo ao todo em número de quatro: reação química, transferência de massa, sedimentação ou evaporação. Uma classificação foi feita por Panchal e Watkinson (1993), em três casos distintos. A adoção dos mecanismos depende do caso escolhido.

- **Caso 1: O precursor é gerado no meio fluido**

*Caso 1a:* O precursor é gerado no meio fluido na forma de uma reação  $A \xrightarrow{r_1} B$ , seguido de uma transferência de matéria para as paredes onde o material adere e sofre outra reação  $B \xrightarrow{r_2} C$ , de envelhecimento;

*Caso 1b:* O mesmo caso anterior, mas em duas etapas apenas. Ocorre uma reação do tipo  $A \longrightarrow B \longrightarrow C$  no meio fluido, seguida de transferência de massa e adesão nas paredes;

- Caso 2: O precursor é formado na região de filme**  
*Caso 2a:* O precursor é gerado na região de filme. O reagente sofre difusão do meio fluido para a região de filme, onde sofre reação do tipo  $A \longrightarrow B$ , seguido de difusão do produto  $B$  para as paredes onde este sofre uma reação de envelhecimento  $B \longrightarrow C$  ;  
*Caso 2b:* O reagente sofre difusão do meio fluido para a região de filme onde sofre uma reação do tipo  $A \longrightarrow B \longrightarrow C$ , seguida de transferência de massa com adesão às paredes;
- Caso 3: O precursor é formado na interface fluido/parede**  
*Caso 3a:* A formação do precursor ocorre na parede, ou seja, na interface fluido - incrustação, através de uma reação em série  $A \longrightarrow B \longrightarrow C$ .

Os quatro mecanismos podem ocorrer simultaneamente, entretanto, na maioria dos modelos para a incrustação por coque, somente os dois primeiros mecanismos existem, ocorrendo a duas ou três etapas. Entre os modelos pesquisados mais simples se encontra o modelo de [Fernandez-Baujin e Solomon \(1976\)](#) desenvolvido a partir de um balanço material, que considera que todo reagente precursor que chega ao volume de controle por transferência de massa sofre reação gerando o agente incrustante. O volume de controle é assumido como sendo uma película formada sobre a parede incrustada. O modelo resulta na expressão diferencial da Equação (2) e tem sua aplicação limitada a superfícies planas, mas pode ser considerado como um dos modelos mecanicistas fundamentais, de onde derivam os demais.

$$\frac{dR_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{x_i}{\lambda_i} \right) = \frac{\alpha}{\lambda_i \cdot \rho_i} \left( \frac{C_b}{\frac{1}{k_{dif}} + \frac{1}{k_r}} \right) \quad (2)$$

Na Equação (2)  $\alpha$  é o coeficiente estequiométrico,  $C_b$  é a concentração do reagente precursor da incrustação,  $\lambda$  é a condutividade térmica e  $\rho$  é a massa específica do material incrustado.  $k_{dif}$  e  $k_r$  são, respectivamente, as constantes de difusão e de reação química, ambas de primeira ordem. Este modelo depende de um processo de difusão e de uma reação química. O mais lento entre os dois define a velocidade da incrustação. A difusão poderá ser desprezada se a constante de difusão for muito grande em relação à reação química. O mesmo raciocínio também se aplica com relação à reação química. Eliminando o efeito de difusão, o modelo assume a forma da Equação (3).

$$\frac{dR_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{x_i}{\lambda_i} \right) = \frac{\alpha}{\lambda_i \cdot \rho_i} k_r \cdot C_b \quad (3)$$

Como a cinética de uma reação depende da temperatura, introduzindo o fator de Arrhenius para corrigir o valor da constante de cinética, a expressão assume a forma básica da modelagem para os processos de incrustação encontrados na literatura, mostrada pela Equação (4), a qual exige também um volume de reação representado pela variável  $V$ . Normalmente, em trocadores de calor, o volume de reação corresponde à película formada pela camada limite térmica.

$$\frac{dR_i}{dt} = \frac{\alpha}{\lambda_i \cdot \rho_i} V \cdot k_r \cdot C_b \cdot \exp \left( -\frac{E}{RT} \right) \quad (4)$$

O fenômeno da difusão é complexo e difícil de ser estimado. Uma forma de contornar esta limitação consiste em substituir a difusão por um parâmetro de probabilidade,  $P$ , transformando a expressão de [Fernandez-Baujin e Solomon \(1976\)](#) na Equação (5), como fizeram [Paterson e Fryer \(1988\)](#). Associando a probabilidade de adesão às condições do escoamento, [Pateson e Fryer \(1988\)](#) demonstraram que a incrustação é inversamente proporcional à velocidade média do escoamento.

$$\frac{dR_i}{dt} = \frac{\alpha}{\lambda_i \cdot \rho_i} P \cdot V \cdot k_r \cdot C_b \cdot \exp \left( -\frac{E}{RT} \right) \quad (5)$$

[Crittenden e Kolaczowski \(1979\)](#) melhoraram o modelo da Equação 6, incluindo a convecção do agente incrustante de volta ao meio fluido, com a introdução da parcela relativa ao fenômeno de remoção, de forma que a Equação (3) assume a forma da Equação (6). O processo de difusão na remoção foi admitido como sendo independente da deposição e que a concentração do agente incrustante no meio fluido fosse nula.

$$\frac{dR_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{x_i}{\lambda_i} \right) = \frac{\alpha}{\lambda_i \cdot \rho_i} \left( \frac{C_b}{\frac{1}{k_{dif}} + \frac{1}{k_r}} - k_{dif2} \cdot C_i \right) \quad (6)$$

Na Equação (6),  $k_{dif2}$  é a constante de difusão no fenômeno de remoção e  $C_i$  é a concentração de agente incrustante formado no volume de controle.

### 3.1 Modelo de Takatsuka et al. (1989).

Mais especificamente para o coque, Takatsuka et al. (1989) apresentam o modelo tubular para craqueamento de petróleo em fornalhas. Foi observado que em vários tipos de fornalhas, a taxa de coqueamento depende da temperatura, da pressão, da velocidade do fluido e das propriedades do óleo processado. Todas essas variáveis podem ser previstas antecipadamente ao longo de todo o comprimento da tubulação. Os produtos são facilmente aderidos às paredes internas da tubulação causando a incrustação e produzindo uma diminuição no diâmetro interno, como mostra a Figura 1

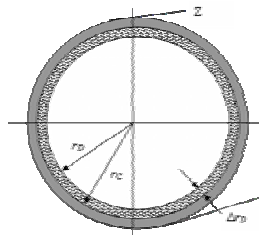


Figura 1 – Incrustação em tubulação (Takatsuka et al., 1989)

A taxa de coqueamento resulta de uma série de fenômenos complexos, mas pode ser assumido de forma simplificada como sendo proporcional ao coqueamento de um componente hipotético presente no fluido de concentração  $C_{b^*}$ . A taxa de deposição é explicitada através de um balanço material entre dois processos difusivos e um processo de reação química de craqueamento onde os reagentes são exclusivamente do tipo solúveis em n-heptano (maltenos). Como resultado se tem a Equação (7). Takatsuka et al. (1989) admitem a assertiva válida no intervalo de baixa conversão tal como ocorre no craqueamento em tubos. Os produtos insolúveis em n-heptano (asfaltenos) foram observados, mas foram considerados de ordem desprezível.

$$\theta_{dep} = \alpha C_{b^*} = \frac{\beta}{1 + \beta} (a \cdot \phi_1 + b \cdot \phi_2) \quad (7)$$

Na Equação (7)  $\beta = e(k_r / k_{dif1})$  e  $C_b = a \cdot \phi_1 + b \cdot \phi_2$  de forma que a concentração do agente incrustante existente no meio fluido,  $C_b$ , é estimada através do conhecimento das constantes  $a$  e  $b$ . Além destas constantes são necessárias também as concentrações relativas de coque  $C_{TI}$ , asfaltenos,  $C_{HITS}$ , e maltenos,  $C_M$ , e os parâmetros de solubilidade,  $\delta_{TI}$ ,  $\delta_{TS}$ ,  $\delta_{HI}$  e  $\delta_{HS}$ , respectivamente, relativos aos insolúveis em tolueno,  $TI$ , solúveis em tolueno,  $TS$ , insolúveis na fração malteno,  $HI$  e solúveis na fração malteno,  $HS$  para definir as funções  $\phi_1$  e  $\phi_2$  tornando o modelo extremamente complicado.

As concentrações  $C_{TI}$ ,  $C_{HITS}$  e  $C_M$  são obtidas da solução simultânea de um conjunto de oito equações algébricas, que surgem do modelo de decomposição térmica do óleo adotado, usando-se o método Newton-Raphson para equações não-lineares.

O volume de reação foi considerado como sendo indicado pela espessura da camada limite térmica definida pela Equação (8).

$$e = \frac{10 \cdot r_c}{Re} \sqrt{\frac{2}{f}} \quad (8)$$

onde  $r_c$  é o raio da tubulação na condição limpa [m],  $Re$  é o Número de Reynolds e  $f$  é o fator de atrito. A taxa de deposição é aplicada na determinação do novo raio,  $r_D$ , pelo emprego da Equação (9). Na Equação (9),  $t$  corresponde ao tempo e  $\rho_i$  à massa específica do material incrustado.

$$r_D = r_C - \frac{\theta_{dep}}{\rho_i} \cdot t \quad (9)$$

Além da complexidade, o modelo de Takatsuka et al. (1989) foi criticado por Wiehe (1993), por considerar o mecanismo químico não condizente com os fatos experimentais. Takatsuka et al. (1989) admitiu que apenas a fração malteno sofresse decomposição, enquanto que a fração asfaltenos sofre policondensação para suprir o hidrogênio necessário ao craqueamento. Wiehe (1993) demonstrou que ambos, maltenos e asfaltenos sofrem decomposição.

### 3.2 Modelo de Polley et al. (2002).

A maioria dos modelos encontrados é derivada de pequenas modificações do modelo de Crittenden e Kolaczowski (1979), atribuindo significado físico às constantes de deposição e de remoção. O modelo de Polley et al. (2002) figura entre os mais recentes e consiste de um refinamento aplicado ao modelo de Ebert e Panchal (1997), pois verificaram que o modelo não conseguia se aproximar dos valores de incrustação experimentais obtidos por Knudsen et al. (1999). Desta forma, Polley et al. (2002) fizeram as seguintes modificações no modelo de Ebert e Panchal (1997):

- A espessura do filme de transferência de calor foi assumida variar com o número de Reynolds na potência de 0,8;
- Assumiu-se que a reação é função da temperatura da parede;
- O termo de deposição, ao invés de ser baseado na tensão de cisalhamento, foi baseado no número de Reynolds na potência de 0,8.

$$\frac{dR_i}{dt} = \alpha \cdot \text{Re}^{-0,8} \cdot \text{Pr}^{-0,33} \cdot \exp\left(-\frac{E}{R T_w}\right) - \gamma \cdot \text{Re}^{0,8} \quad (10)$$

O termo de deposição da Equação (10),  $(\alpha \cdot \text{Re}^{-0,8} \cdot \text{Pr}^{-0,33})$ , expressa o Número de Nusselt para escoamentos turbulentos internos. O termo de deposição sofre influência da reação química, da temperatura da parede e da dinâmica do fluido, e o termo de remoção é uma função do escoamento do fluido (Fiorentin et al., 2004). Este modelo tem sido empregado na estimativa de incrustação em baterias de pré-aquecimento no processamento do petróleo.

### 3.3. O modelo de Bombardelli (2005).

Este modelo é específico para prever a incrustação em ambientes onde a temperatura encontra-se uniformemente distribuída, mas acima limite de início das reações de decomposição térmica como é o caso da destilação. A tentativa de se usar qualquer um dos modelos já existentes para determinar o processo de incrustação nestes ambientes, mostrou-se difícil pela impossibilidade de se obter dados experimentais da mesma forma como são obtidos nos casos de trocadores de calor. O modelo é apresentado pela Equação (11).

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot (1 - \beta)^{t^*(u_f, T)} \cdot e(u_f, T) \cdot \frac{\rho_f}{\rho_i} \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (11)$$

onde  $e$  é a espessura da subcamada viscosa [ $m$ ] e  $K$  é a constante de tempo de reação [ $s^{-1}$ ]. O recíproco de  $K$  é o tempo de adesão, ou seja, o tempo que o material da película necessita para sofrer decomposição integral de seu conteúdo, convertendo-se em produtos voláteis e coque.  $\rho_f$  e  $\rho_i$  são respectivamente as massas específicas do fluido e do material incrustado [ $kg/m^3$ ]. Todos os demais termos são adimensionais.  $\alpha$  é a quantidade de coque, em termos percentuais, obtida na conversão integral,  $\beta$  é um valor relacionado à eficiência de limpeza dos eventos *burst*, e  $t^*$  é o tempo adimensional, equivalente à soma de todos os eventos *burst* (Bombardelli, 2005). Tanto  $e$  como  $t^*$  são dependentes das condições de temperatura,  $T$ , e da velocidade média de escoamento do fluido,  $u_f$ .

O modelo é baseado na existência de velocidades nulas junto às paredes que permitem ao fluido um tempo de residência muito superior ao tempo médio de permanência do fluido ao processo, dando condições para que as reações de decomposição ocorram. Este fato determina a espessura de um filme dependente das condições do escoamento onde o tempo médio permite as reações. A influência do escoamento é assumida na forma de probabilidade de adesão e explicitada pelo termo  $(1 - \beta)^{t^*(u_f, T)}$ , levando em conta os mecanismos de adesão sugeridos por Vatistas (1989). O valor de  $\beta$  é atribuído para resultar em 1 quando a velocidade média do escoamento tender para zero, de forma que todo material incrustante permaneça aderido. A vantagem deste modelo em relação aos demais está na facilidade de se adequar valores para as constantes de ajuste, baseadas em resultados laboratoriais com relativa facilidade de execução.

## 4. Conclusões

Os modelos mantêm entre si grandes semelhanças e qualquer um deles pode ser aplicado na incrustação por coque, desde que tenha suas constantes bem ajustadas. Um fator que dificulta o emprego dos modelos é a falta de maiores informações com respeito às constantes de ajuste para cada aplicação em particular. Entre os dados disponíveis na literatura se observa uma grande disparidade de valores, principalmente com relação à energia de ativação requerida nos modelos. Também não existem técnicas e métodos que garantam a obtenção destes dados de forma experimental precisa. Em parte esta deficiência é explicada pelas altas temperaturas envolvidas nos processos de incrustação observados na indústria do petróleo, tornando difícil sua obtenção por via experimental. Para o caso de incrustação em trocadores de calor esta deficiência é menor, pois os dados podem ser obtidos indiretamente através das temperaturas e vazões do equipamento. Com relação aos demais equipamentos do processo, as técnicas e conhecimentos são ainda insuficientes. O modelo sugerido para a destilação tem mostrado bons resultados em simulações, mas requer ainda muitos ensaios para ser confiável.

## 5. Agradecimentos

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP - e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-CEFET-PR).

## 6. Referências

- ANDERSEN, S.I., SPEIGHT, J.G., *Thermodynamic models for asphaltene solubility and precipitation*, Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 22, p. 53-66, 1999;
- BADGER, W.L., OTHMER, D.F., *Studies in evaporator design*, VIII, Trans, AIChE, v. 16(2), p. 159-168, 1924;
- BOMBARDELLI, C., FRANCO, A.T., ABUGDERAH, M.M., *Proposal of a coke fouling mathematical model for the distillation process*, in 18th International Congress of Mechanical Engineering, ABCM, November, Ouro Preto, 2005;
- BOTT, T.R., *Fouling of heat exchangers*, 1<sup>st</sup> ed., New York: ELSEVIER, 25 p., 1995;
- CRITTENDEN, B.D., KOLACZKOWSKI, S.T., *Mass transfer and chemical kinetics in hydrocarbon fouling*, Proc. Conference Fouling: Science or Art?, University of Surrey, UK, mars, 1979;
- EBERT, W.A., PANCHAL, C.B., *Analysis of Exxon crude-oil-slip stream coking data*, In: Engineering Foundation Conference on Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchangers, June, 18-23, p. 451-460, 1995;
- EPSTEIN, N., *Fouling: technical aspects*, In: Fouling of heat transfer equipment, In: Somerscales, E.F.C., Knudsen, J.G., (eds.), Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1981;
- FERNANDEZ-BAUJIN J.M., SOLOMON, S.M., In: Albright, L.F., Crynes, B.L., (eds.), *Industrial and laboratory pyrolysis*, AIChE Symposium, Ser. 32, p. 345-372, 1976;
- FIORNTIN, L.D., BOMBARDELLI, C., FRANCO, A.T., NEGRÃO, C.O.R., *Estudo de modelos matemáticos para a previsão de incrustação por coque em tubulações*, Paper CIT04-0558, Rio de Janeiro, 2004;
- KERN, D.O., SEATON, R.E., *A theoretical analysis of thermal surface fouling*, British Chemical Engineering, v. 4, No 5, p. 258-262, 1959;
- KONAK, A.R., *Prediction of fouling curves in heat transfer equipment*, Trans Inst. Chem. Engrs, v. 51, p. 377, 1973;
- KNUDSEN, J.G., DAHCHENG, L., EBERT, W.A., *The determination of the threshold fouling curve for a crude oil*, Applied Thermal Design, v. 15, p. 3-10, 1999;
- PANCHAL, C.B., WATKINSON, A.P., *Chemical reaction fouling model for single-phase heat transfer*, AIChE Symposium, Ser. 295, v. 89, p. 77-82, 1993;
- PATERSON, W.R., FRYER, P.J., *A reaction engineering approach to the analysis of fouling*, Chemical Engineering Science, v. 43, p. 1714-1717, 1988;
- POLLEY, G.T., WILSON, D.I., YEAP, B.L., PUGH, S.J., *Evaluation of laboratory crude oil threshold fouling data for application to refinery pre-heat trains*, Applied Thermal Engineering, v. 22, p. 777-788, 2002;
- SOMERSCALES, E.F.C., *Fouling of heat transfer surfaces: an historical review*, Heat Transfer Engineering, v. 11, N° 1, p. 19-36, 1990;
- TAKATSUKA, T., KAJIYAMA, R., HASHIMOTO, H., MATSUO, I., HANAZAWA, T., *A tubular fouling model for residue cracking furnaces*, Journal of Chemical of Japan, v. 22, p. 149-154, 1989;
- TABOREK, J., AOKI, T., RITTER, R.B., PALEN, J.W., KNUDSEN, J.G., *Predictive methods for fouling behavior*, Chemical Engineering Progress, v. 68, N° 7, p. 69-78, 1972;
- VATISTAS, N., *The effect of adhesion time on particle deposition*, Chemical Engineering Science, v. 44, p. 1603-1608, 1989.
- WIEHE, I.A., *Kinetics, catalysis and reaction engineering: a phase-separation kinetic model for coke formation*, Industrial Engineering Chemical Resources, v. 32, p. 2447-2454, 1993;