

# FOULING EM TROCADORES DE CALOR DE PETRÓLEO: UMA BREVE REVISÃO

**Julia B. H. Cavalcante**<sup>1</sup>; Cristiane Leal; Fernando Luiz P. Pessoa; Fernanda M. Torres; Antonio Rimaci Miguel Jr; Ana Lucia Barbosa de Souza<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bolsista Iniciação científica- PETROBRÁS; jbhcavalcante@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Assistente; Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador-BA; ana.lbs@fieb.org.br.

## RESUMO

O processo de deposição de material sólido (*fouling*) que ocorre em trocadores de calor nas refinarias é um fenômeno que gera preocupação, por ter uma associação com a eficiência dos trocadores. O presente trabalho traz uma revisão bibliográfica dos estudos que avaliaram a deposição em trocadores de calor na indústria petroquímica. Em paralelo, buscou-se constatar quais os equipamentos utilizados nos experimentos, buscando visualizar as condições de determinação das taxas de deposição já previstas. Os resultados do levantamento bibliográfico mostraram que vários avanços foram feitos acerca desse tema, nos quais experimentos laboratoriais foram bastante precisos, entretanto existe um desafio em transpor os resultados obtidos nesses experimentos para a realidade industrial.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Fouling*; trocador de calor; petróleo.

## 1. INTRODUÇÃO

A deposição (*fouling*), de material sólido na superfície dos equipamentos, é um fenômeno comum em diversos processos petroquímicos onde há trocadores de calor, envolvendo correntes orgânicas e/ou inorgânicas, contudo é particularmente relevante e complexo no refino de petróleo. Isso porque os mecanismos fenomenológicos que regem a formação de deposição são variados e complexos, e o óleo cru, pela sua composição, apresenta condições para o desenvolvimento de grande parte desses mecanismos.<sup>1</sup>

O material depositado restringe a área transversal dos tubos e casco do equipamento, afetando a vazão de escoamento do fluido, além de aumentar a resistência térmica das paredes, limitando o desempenho energético de projeto do equipamento. A resistência é geralmente representada por um fator de incrustação,  $R_f$ , que mede a resistência térmica introduzida pela ação do depósito. Essa restrição no desempenho energético, demanda uma compensação, o que geralmente se configura em aumento dos custos de operação tanto com combustível para os fornos quanto com a limpeza dos trocadores. Esse custo com a remediação da deposição, na indústria petroquímica em geral, pode chegar a 0,25% do PIB dos países industrializados.<sup>2</sup>

Os estudos relativos ao fenômeno de deposição em processos químicos remontam o surgimento e expansão as atividades de refino de petróleo e dos processos petroquímicos das indústrias secundárias e terciárias do setor, mais precisamente nas décadas de 60 e 70. Entretanto, com a crise do petróleo na década 70, o interesse pela gestão energética dessas plantas industriais cresceu consideravelmente.<sup>3</sup>

Estudos realizados através de equipamentos, em escala laboratorial, passaram a ser realizados, porém quando aplicado a nível industrial os resultados obtidos eram insuficientes para obter conclusões. Graças a isso, foram desenvolvidos sistemas contemplando células testes em unidades industriais. Porém, devido a variação de parâmetros importantes como vazão e pressão, as análises dos resultados e compreensão do fenômeno tornam-se bastante difíceis e pouco conclusivas.<sup>4</sup>

Neste contexto, esse trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros descritos na literatura que influenciam a deposição em trocadores de calor na indústria petroquímica, bem como os trabalhos onde foram utilizados aparatos experimentais para coletar dados e analisar o fenômeno.

## 2. METODOLOGIA

Como abordagem metodológica, realizou-se uma revisão da literatura. Várias bases de dados foram utilizadas, para busca de artigos científicos, como ScienceDirect e Scopus. Após a identificação dos artigos, foi utilizado o Mendeley®, para construir a base de dados do relatório e assim analisar os artigos em duplicatas.

A busca pelos artigos compreendeu três etapas: (i) trabalhos publicados a partir da década de 70 e que fossem artigos disponíveis em sua versão completa. (ii) As publicações foram selecionadas quanto ao título ou resumo e (iii) apenas publicações que se concentraram na avaliação experimental da deposição nos trocadores de calor da indústria petroquímica foi considerado, totalizando 20 pesquisas científicas.

As pesquisas foram analisadas para entender como foi desenvolvido o estudo nessa área. De acordo com Wilson et al. (2015), o primeiro estudo quantitativo da incrustação de reação química relacionada ao petróleo bruto foi o trabalho sobre o gás óleo de Watkinson e Epstein em 1969. Os autores observaram que os primeiros

trabalhos na área voltados a compreensão dos mecanismos de deposição buscaram desenvolver modelos numéricos baseados em fenômenos físicos estabelecidos e apoiados em experimentos.<sup>4</sup>

Toda a evolução dos trabalhos desenvolvido, a princípio, foi concentrado em descrever como os depósitos eram formados ao longo do tempo, e quais seriam as melhores alternativas para mitigar o efeito de resistência térmica gerado por esses depósitos. O foco deste presente trabalho foram os estudos recentes, nos quais foram desenvolvidos sistemas contemplando células testes em unidades industriais e pesquisas relacionadas aos potenciais de deposição dos óleos, principalmente, através de experimentos laboratoriais. Parâmetros como vazão (Q), temperatura de bulk (T), resistência a deposição (R<sub>f</sub>), velocidade do fluido (v), pressão (P) e tempo de experimento (t) foram buscados nesses trabalhos, assim como qual equipamento de teste e óleo avaliado.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 01 estão dispostos os trabalhos encontrados a partir das exigências feitas na pesquisa.

Tabela 01- Identificação e avaliação dos artigos científicos analisados.

Ref.	Ano	Tipo de equipamento	Tipo de óleo	Propriedades Experimentais					
				Q	T	R <sub>f</sub>	v	P	t
EBERT & PANCHAL <sup>5</sup>	1995	-	-		X	X	X		
PANCHAL & KURU <sup>15</sup>	1997	-	-	X	X	X	X	X	
ASOMANING <i>et al.</i> <sup>16</sup>	2000	-	-		X	X			
WATKINSON <i>et al.</i> <sup>6</sup>	2000	-	-		X	X			
WIEHE <i>et al.</i> <sup>7</sup>	2001	HLPS	-		X	X			
ISOGAI & NAKAMURA <sup>8</sup>	2003	HLPS	Crude benzene		X			X	X
WATKINSON <sup>9</sup>	2003	HLPS e PFRU	Asfaltênico		X	X			X
SALEH <i>et al.</i> <sup>17</sup>	2005	-	Gippsland crude oil		X	X	X	X	
SRINIVASAN & WATKINSON <sup>10</sup>	2005	-	Asfaltênico		X	X	X		X
BENNET <i>et al.</i> <sup>11</sup>	2009	HTFU	-	X	X	X			
CRITTENDEN <i>et al.</i> <sup>18</sup>	2009	-	Maya crude oil		X	X	X		
JAMIALAHMADI <i>et al.</i> <sup>19</sup>	2009	-	Iranian asphaltenic crude oil		X	X	X		
FAN <i>et al.</i> <sup>12</sup>	2010	HLPS	-		X	X	X		
PETKOVIC & WATKINSON <sup>20</sup>	2013	HLPS	-		X	X			X
MOZDIANFARD & BEHRANVAND <sup>21</sup>	2013	-	-		X	X		X	
YANG <i>et al.</i> <sup>22</sup>	2013	-	-		X	X		X	
LESTINA & ZETTLER <sup>23</sup>	2014	HTFU	-		X	X	X	X	
LANE & HARRIS <sup>24</sup>	2015	RFU	-		X	X		X	
SHETTY <i>et al.</i> <sup>13</sup>	2016	-	-		X	X	X	X	
HO <sup>14</sup>	2016	HLPS	-		X				

Na última fase foi realizada uma análise qualitativa do conteúdo dos artigos selecionados. Ebert & Panchal (1995) introduziram a abordagem do "limiar de incrustação" para descrever a taxa inicial de reação do óleo cru na reunião desta série de conferências realizada em 1995.<sup>5</sup>

Watkinson et al. (2000) avaliaram nas taxas de incrustação os efeitos da temperatura da parede do equipamento, da velocidade do fluxo e principalmente da composição do óleo cru em diferentes porcentagens de oxigênio e nitrogênio. Wiehe et al. (2001) e Isogai & Nakamura (2003) mediram a taxa de incrustação em seus processos utilizando o Hot Liquid Process Simulator (HLPS). Considerado um avanço nesse ramo, utilizar de simuladores intensifica os estudos acerca desse tema complexo e com tantas variáveis a serem analisadas.<sup>6,7,8</sup>

Watkinson (2003) inovou ao trazer as taxas de incrustação medidas por dois equipamentos: HLPS e Portable Fouling Research Unit (PFRU). Com diferentes tempos de análises e óleos crus utilizados, foi possível identificar correlações entre as incrustações e a reação química no fluxo laminar. Dessa forma o autor abriu um espaço nesse tema para que análises mais aprofundadas fossem realizadas utilizando esses simuladores.<sup>9</sup>

Srinivasan & Watkinson (2005), trabalharam com três óleos crus e apresentaram o estudo da composição do depósito, apresentando um aspecto inovador do trabalho já que, apesar de ser aparentemente clara a ligação entre os compostos presentes no material depositado e os mecanismos que regeram sua formação, ainda são poucos os trabalhos que buscam estabelecer esse tipo de conexão.<sup>10</sup>

Bennet et al. (2009) inovaram ao utilizarem um equipamento novo para determinar as taxas de incrustação: High-Temperature Fouling Unit (HTFU). Os autores analisaram quatro óleos crus e através da temperatura isocinética identificaram quais óleos apresentaram mais depósitos.<sup>11</sup>

Fan et al. (2010) realizaram experimentos em um sistema HLPS com o objetivo de avaliar a performance desse aparato experimental bem como estabelecer procedimentos de experimentos para o estudo dos mecanismos de deposição em óleos crus. O fluido avaliado apresentou dois fatores relevantes: instabilidade do asfaltenos e alto teor de sólidos suspensos, sendo que ambos favorecem a ocorrência de deposição.<sup>12</sup>

O trabalho de Shetty et al. (2016) teve como objetivo principal desenvolver um modelo matemático mais assertivo para a predição de taxas de deposição. A fim de comprovar a maior eficácia do modelo, foram realizados testes experimentais em um sistema no qual amostras de óleo circulam em altas temperaturas e pressões. Os autores comprovaram que um aumento da temperatura de bulk gera um decréscimo na taxa de deposição, mostrando que os modelos existentes baseados no limiar de deposição se mostram falhos. O modelo melhorado proposto, que leva em consideração os efeitos das temperaturas de superfície e de bulk.<sup>13</sup>

Ho et al. (2016) se propuseram a fazer um trabalho de desenvolvimento de modelo matemático baseado em resultados experimentais. Utilizaram o aparato HLPS para realizar testes com cinco tipos diferentes de óleo, e em seguida desenvolveram um modelo matemático que busca relacionar as propriedades dos óleos com a seu potencial de incrustação.<sup>14</sup>

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante deste cenário, com a revisão literatura produzida dos últimos 50 anos, foi possível identificar que com o desenvolvimento tecnológico, novos modelos têm sido propostos para entender o mecanismo de deposição em trocadores de calor. Desta forma, é possível que, através da pesquisa realizada, sejam feitos experimentos próprios a fim de coletar dados para desenvolvimento de um novo modelo que possa auxiliar no controle da deposição.

#### 5. REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> SPEIGHT J. **Fouling in refineries**. Reino Unido: 2015.; <sup>2</sup> VALLE R O. **Determinação da taxa de Incrustação em Trocadores de Calor com o Auxílio de Métodos de Otimização**. Rio de Janeiro: 2012.; <sup>3</sup> BOTT, T. R. **General Fouling Problems**. Netherlands: 1988.; <sup>4</sup> WILSON D. I., ISHIYAMA E. M., POLLEY G. T. **Twenty Years of Ebert And Panchal – What Next? Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning**. Irlanda: 2015.; <sup>5</sup> EBERT W., PANCHAL C. **Analysis of Exxon crude-oil-slip stream coking data**. Chicago: 1995.; <sup>6</sup> WATKINSON A., NAVANEETHA\_SUNDARAM B., POSARAC D. **Fouling of a Sweet Crude Oil under Inert and Oxygenated Conditions**. 2000.; <sup>7</sup> WIEHE I. A., KENNEDY R. J., DICKAKIAN G. **Fouling of Nearly Incompatible Oils**. 2001.; <sup>8</sup> ISOGAI S., NAKAMURA M. **Analysis and Steps to Mitigate Heat Exchanger Fouling in an Aromatics Plant**. 2003.; <sup>9</sup> WATKINSON A. **Comparison of Crude Oil Fouling Using Two Different Probes**. 2003.; <sup>10</sup> SRINIVASAN M., WATKINSON A. **Fouling of Some Canadian Crude Oils**. 2005.; <sup>11</sup> BENNET C. A., KISTLER R. S., NANGIA K., AL-GHAWAS W., AL-HAJJI N., AL-JEMAZ A. **Observation of an Isokinetic Temperature and Compensation Effect for High-Temperature Crude Oil Fouling**. 2009.; <sup>12</sup> FAN Z., RAHIMI P., MCGEE R., WEN Q., ALEM T. **Investigation of Fouling Mechanisms of a Light Crude Oil Using an Alcor Hot Liquid Process Simulator**. 2010.; <sup>13</sup> SHETTY N., DESHANNAVAR U. B., MARAPPAGOUNDER R., PENDYALA R. **Improved threshold fouling models for crude oils**. *Energy*. 2016.; <sup>14</sup> HO, T. C. **A study of crude oil fouling propensity**. 2016.; <sup>15</sup> PANCHAL C., KURU W. C. **Field-fouling units for refinery experiments**. 1997.; <sup>16</sup> ASOMANING S., PANCHAL C. B., LIAO C. F. **Correlating Field and Laboratory Data for Crude Oil Fouling**. 2000.; <sup>17</sup> SALEH Z., SHEIKHOLESLAMI R., WATKINSON A. P. **Fouling Characteristics of a Light Australian Crude Oil**. 2005.; <sup>18</sup> CRITTENDEN B. D., KOLACZKOSKI S. T., TAKEMOTO T., PHILLIPS D. Z. **Crude Oil Fouling in a Pilot-Scale Parallel Tube Apparatus**. 2009.; <sup>19</sup> JAMIALAHMADI M., SOLTANI B., MÜLLER-STEINHAGEN H., RASHTCHIAN D. **Measurement and prediction of the rate of deposition of flocculated asphaltene particles from oil**. 2009.; <sup>20</sup> PETKOVIC B., WATKINSON A. **Fouling of a heated rod in a stirred tank system**. 2013.; <sup>21</sup> MOZDIANFARD M., BEHRANVAND E. **A Field Study of Fouling in CDU Preheaters at Esfahan Refinery**. 2013.; <sup>22</sup> YANG M., WOOD Z., RICKARD B., CRITTENDEN B., GOUGH M., DROEGEMUELLER P., HIGLEY T. **Mitigation of crude oil fouling by turbulence enhancement in a batch stirred cell**. 2013.; <sup>23</sup> LESTINA T. G., ZETTLER H. U. **Crude Oil Fouling Research: HTRI's Perspective**. 2014.; <sup>24</sup> LANE M., HARRIS J. **Impact of mixing on crude oil fouling tests**. 2015.