

## MODELO DE ESCOAMENTO DE ÓLEOS PARAFÍNICOS

Isvi Raquel de Figueirêdo Souza (1); Luiz Carlos Lobato dos Santos (1); Luiz Mário Nelson de Góis (2).

(1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPEQ), Universidade Federal da Bahia (UFBA).

(2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPEQ), UNIFACS.

E-mail para contato: isvi.raquel@gmail.com

**Resumo:** Durante o escoamento do óleo parafínico é comum ocorrer a deposição de parafinas na parede interna da tubulação, sendo um dos principais problemas para a garantia de escoamento, por limitar o fluxo e aumentar a perda de carga. Além disso, ainda pode gerar grandes danos a equipamentos, proporcionar operação em condições de elevado risco e, até mesmo, parada completa de produção, impactando em menor lucratividade. Assim, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver um modelo para perda de carga para escoamento monofásico de óleos parafínicos em linhas horizontais, alterando a vazão, a temperatura externa e o BSW, observando sua influência na pressão do escoamento. Foram utilizados dados experimentais de óleos parafínicos de poços de petróleo para validação do modelo. Os resultados mostraram boa adequação do modelo aos dados dos oito experimentos, com altos valores de coeficiente de adequação ( $R^2$ ), acima de 0,98. Experimentos com maior teor de BSW e menor temperatura ambiente sofreram maior impacto na perda de carga, revelando valores maiores, sendo bem representado pelo modelo.

**Palavras-chave:** óleos parafínicos, perda de carga, escoamento monofásico.

## INTRODUÇÃO

O petróleo pode ser classificado em parafínico quando for constituído por 75% ou mais de parafinas. Iniciando a produção, a chegada dos hidrocarbonetos às instalações na superfície depende de fatores associados à garantia de escoamento, que visam a melhoria na vazão e recuperação do petróleo (FERREIRA; CARDOSO, 2011).

No reservatório, onde a temperatura varia entre 70-150°C e a pressão está acima de 2000 psi, as moléculas de parafina estão dissolvidas no petróleo bruto. Ao perder temperatura para a vizinhança, durante o escoamento, atinge a temperatura do início do aparecimento de cristais (TIAC) e desencadeia a deposição de parafinas na parede da tubulação mais fria. Tal fato limita o fluxo de petróleo, levando ao aumento da perda de carga no oleoduto por fricção, aumento do consumo de energia, mau funcionamento de equipamentos e redução do diâmetro interno efetivo da tubulação, resultando em perda de lucratividade. Por isso, é importante estudar o fenômeno de deposição de parafina de modo a operar os sistemas de escoamento de petróleo de forma segura e econômica (AUM, 2012; ALCÂNTARA, 2015; XIE; XING, 2017).

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

Boa parte dos estudos em escoamento de óleos parafínicos baseiam-se nos mecanismos de deposição de parafina em oleodutos, a exemplo dos trabalhos de Burger *et al.* (1981) e Wang *et al.* (2015), porém existem poucos estudos sobre a perda de carga nesse tipo de escoamento.

Ribeiro *et al.* (1997), desenvolveram um modelo para predição da perda de carga a partir de do cálculo prévio da espessura do depósito, apresentando bons resultados apesar da falta de uma precisão ótima aos dados experimentais de perda de carga. Bordalo e Oliveira (2007) estudaram o escoamento de óleo parafínico nos regimes monofásico e bifásico água-óleo, percebendo que no regime monofásico a perda de carga era continuamente maior do que no escoamento bifásico.

Alcântara (2015), desenvolveu um modelo de perda de carga em escoamentos de óleos parafínicos baseado na Lei de Poiseuille, adicionando parcelas que descrevessem a deposição de parafinas, a partir do conhecimento do efeito isolante térmico, que ocorre devido ao aumento da camada de depósito formada. Assim, o modelo foi destinado somente ao escoamento laminar, já que a lei de Poiseuille limita-se ao estudo da perda de carga em escoamento permanente, newtoniano e laminar. Uma forma de ampliar as possibilidades do estudo seria utilizar a equação de Darcy-Weisbach, que é destinada a escoamentos tanto laminar quanto turbulento.

A partir do exposto, o objetivo principal desse estudo foi desenvolver um modelo de perda de carga para escoamento de óleo parafínico, modificando a equação base (Lei de Poiseuille) do modelo de Alcântara (2015), para a equação de Darcy-Weisbach, mantendo as outras parcelas desenvolvidas pelo autor.

## **METODOLOGIA**

Os dados experimentais de Tarantino (2013) foram utilizados neste estudo e simulados no Microsoft Excel<sup>®</sup>. Os experimentos foram realizados com emulsão água/óleo parafínico escoando a diferentes vazões (Q), teores de água (BSW-*Basic Sediment and Water*) e em diferentes temperaturas (T) (TABELA 1).

**Tabela 1 – Variáveis dos experimentos**

Experimento	EXP 1	EXP 2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6	EXP 7	EXP 8
BSW (%)	5	5	5	5	35	35	35	35
Vazão (mL/min)	150	150	200	200	150	150	200	200
Temperatura (°C)	20	25	20	25	20	25	20	25

**Fonte:** Tarantino (2013).

### Descrição do Modelo

A partir da observação do comportamento da perda de carga e da temperatura de saída dos experimentos, Alcântara (2015) notou a existência de uma mudança comportamental da perda de carga quando a temperatura de saída do fluido tende a ficar constante. Assim, foi desenvolvido um modelo que caracterizasse o comportamento da perda de carga até o ponto da temperatura de transição ( $T_t$ ), e outro após esse ponto, quando a temperatura de saída tende a permanecer constante.

A equação de Darcy-Weisbach, assim como a Lei de Poiseuille, não é adequada para a análise da perda de carga do escoamento de óleo parafínico, pois não consegue prever a deposição de parafina na parede da tubulação. Porém, consegue prever a variação de pressão de grande parte dos escoamentos. Assim, inicia-se o modelo com base na equação de Darcy-Weisbach, utilizando uma constante  $C$  como forma de ajuste aos dados experimentais, e considerando fluxo permanente desenvolvido, fluido incompressível e escoamento em estado estacionário sem variação de cota (Equação 1).

$$\Delta p = C_f \frac{l \rho v^2}{2D} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $f$  é o fator de fricção,  $\rho$  a massa específica,  $V$  a velocidade do escoamento,  $D$  o diâmetro interno da tubulação e  $C$  é a constante de ajuste.

Para escoamento laminar o fator de fricção de Darcy é uma função do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação. Quando o escoamento se apresenta em regime laminar, o fator de atrito é dado pela Equação 2 a seguir:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Equação 2})$$

Alcântara (2015) estimou o efeito da deposição das parafinas baseando-se no efeito isolante térmico causado por esses compostos ao precipitarem e se depositarem. A formação da camada de precipitado leva ao aumento da perda de carga devido, principalmente, à redução progressiva do diâmetro efetivo interno da tubulação e ao aumento da rugosidade das paredes do sistema.

Ao substituir a equação base de Alcântara (2015) pela equação de Darcy-Weisbach modificada, tem-se a Equação 4 que foi utilizada neste estudo:

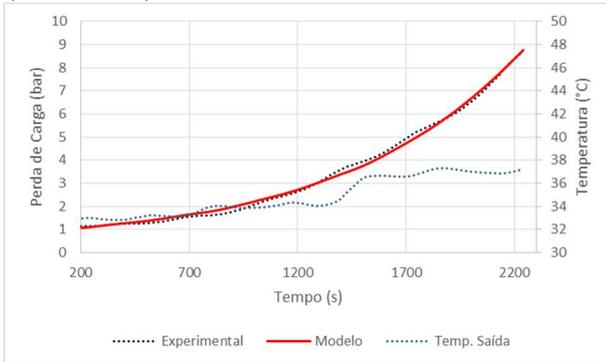
$$\Delta P = Cf \frac{l\rho v^2}{2D} + B \sum_{t=200}^{t=t_i} \exp[Af(T)] + E \sum_{t=t_i}^{t_i} [f(T)'_i - f(T)''_i] \quad (\text{Equação 4})$$

Onde os termos  $f(T)$ ,  $f(T)'$  e  $f(T)''$  foram utilizados como preditores dos fenômenos de precipitação, deposição e arraste das parafinas, respectivamente.

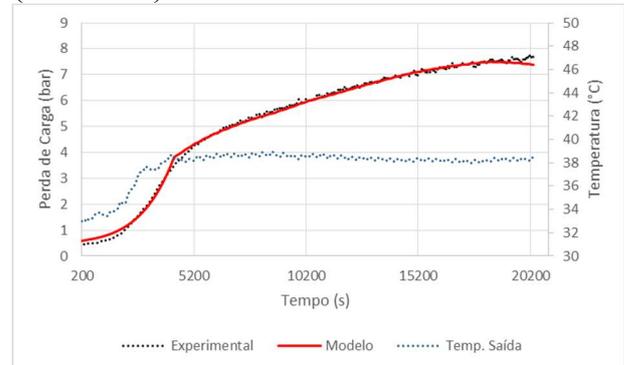
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os comportamentos de perda de carga e a temperatura de saída podem ser visualizados juntamente com a perda de carga calculada, para os 8 experimentos, nas figuras a seguir.

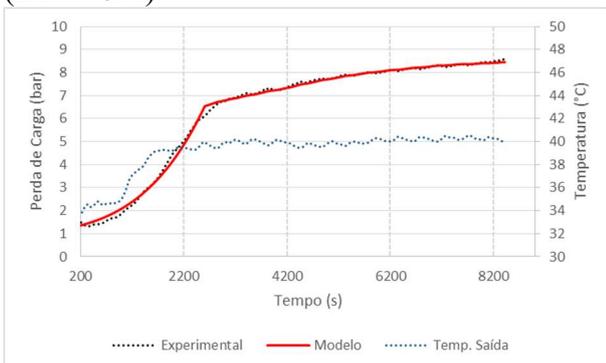
**Figura 2 – Aplicação do Modelo ao EXP 1 (BSW=5%)**



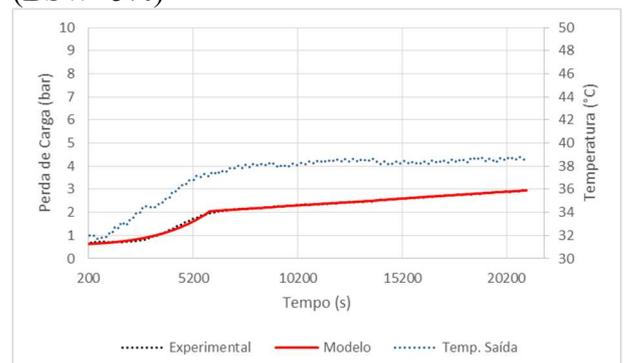
**Figura 3 – Aplicação do Modelo ao EXP 2 (BSW=5%)**



**Figura 4 – Aplicação do Modelo ao EXP 3 (BSW=5%)**



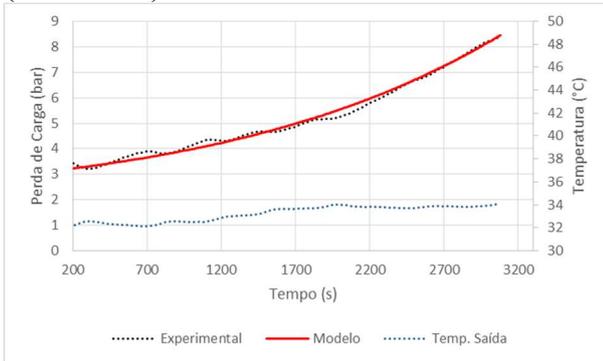
**Figura 5 – Aplicação do Modelo ao EXP 4 (BSW=5%)**



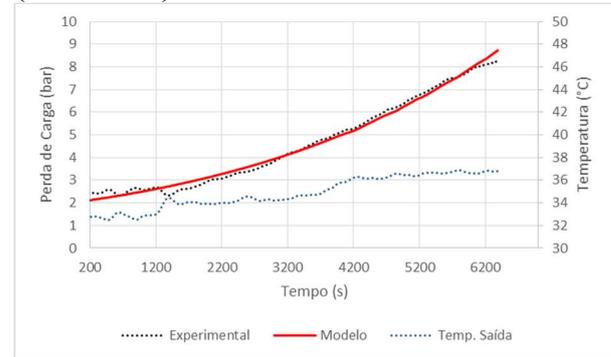
Conforme observado nas figuras de 2 a 5, pode ser observada uma menor perda de carga comparado com os quatro últimos experimentos com maior BSW (35%) proporcionalmente ao tempo de experimento. Percebe-se, inicialmente, que o crescimento da temperatura é acompanhado por um aumento exponencial da perda de carga. Nos experimentos 2, 3 e 4, a temperatura de saída permanece aproximadamente constante, levando a um comportamento mais linear da perda de carga. Já no experimento 1 não se visualiza o segundo comportamento, devido a pressão de segurança do equipamento ter sido atingida.

Com relação aos experimentos com BSW de 35%, os resultados são apresentados através das figuras 6 a 9.

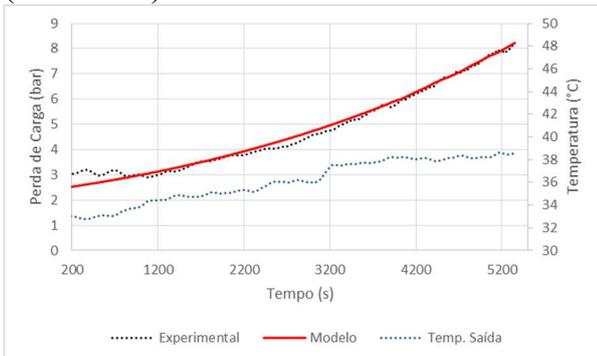
**Figura 6 – Aplicação do Modelo ao EXP 5 (BSW 35%)**



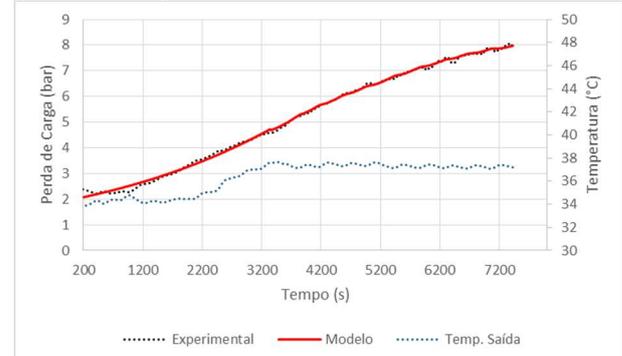
**Figura 7 – Aplicação do Modelo ao EXP 6 (BSW 35%)**



**Figura 8 – Aplicação do Modelo ao EXP 7 (BSW 35%)**



**Figura 9 – Aplicação do Modelo ao EXP 8 (BSW 35%)**



Em concordância com Oliveira *et al.* (2009), os experimentos 5, 6, 7 e 8, de maior BSW, apresentaram maior perda de carga, possivelmente pelo fato de a presença de emulsões água/óleo com maior teor de água aumentar a viscosidade fluido, aumentando assim a perda de carga por atrito. Percebe-se que o modelo utilizando a equação base de Darcy-Weisbach modificada conseguiu bom ajuste aos dados experimentais.

A Tabela 2 mostra a comparação dos coeficientes de determinação entre os modelo atual e o de Alcântara (2015), revelando a possibilidade de se usar a equação de Darcy-Weisbach, que considera as perdas por atrito de escoamento laminares e turbulentos.

**Tabela 2 – Coeficientes de Determinação**

R <sup>2</sup>	EXP 1	EXP 2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6	EXP 7	EXP 8
Modelo com Equação 4	0,997	0,990	0,992	0,999	0,990	0,991	0,986	0,998
Modelo de Alcântara (2015)	0,996	0,999	0,998	0,998	0,992	0,991	0,983	0,998

**Fonte:** Dados do estudo, 2018.

## CONCLUSÃO

O modelo utilizado neste trabalho mostrou-se eficaz em demonstrar a perda de carga em escoamento de óleos parafínicos, considerando os principais fenômenos de precipitação, deposição e arraste de partículas de parafina. Comparando-se com o modelo de Alcântara, mostrou-se mais abrangente por considerar as perdas por atrito e considerar a possibilidade de estudos de escoamento em regime turbulento.

## REFERÊNCIAS

ALCÂNTRA, M.L. **Desenvolvimento de um modelo para a perda de carga em escoamento de óleos parafínicos**. 2015. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

AUM, Y.K.P.G. **Modelagem e simulação da deposição de parafinas em escoamento turbulento**. 2012. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

BORDALO, S.N; OLIVEIRA, R.C. **Escoamento bifásico óleo-água com precipitação de parafinas em dutos submarinos de produção de petróleo**. 4º PDPETRO, 2007.

BURGER, E.D.; PERKINS T.K.; STRIEGLER, J.H. Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline. **Journal of Petroleum Technology**, p. 1075-1086, 1981.

FERREIRA, C.D.A; CARDOSO, L.F. **Estudo da garantia de escoamento em um campo de óleo pesado em lâmina d'água rasa**. 2011. 109 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo). Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

OLIVEIRA, M.C.K; CARVALHO, R.M; CARVALHO, A.B; COUTO, B.C; FARIA, F.R.D; CARDOSO, F.L.P. Waxy crude oil emulsion gel: Impact on flow assurance. **Energy Fuels**, v. 24, p. 2287-2293, 2009.

RIBEIRO, F.S.; MENDES, P.R.S.; BRAGA, S.L. Obstruction of pipelines due to paraffin deposition during the flow of crude oils. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.40, n.18, p. 4319-4328, 1997.

TARANTINO, G.B. **Estudo e avaliação do escoamento de petróleo parafínico**. 2013. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

WANG, W.; HUANG, Q.; WANG, C.; LI, S.; QU, W.; ZHAO, J.; HE, M., Effect of operating conditions on wax deposition in a laboratory flow loop characterized with DSC technique. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v.119(1), p.471-485, 2015.

XIE, Y; XING, Y.A prediction method for the wax deposition rate based on a radial basis function neural network. **Petroleum**, v.3, p.237-241, 2017.