

Mecanismos de deposição de parafinas para aplicação em modelos: uma revisão

Wax deposition mechanisms for application in models: a review

Mecanismos de deposición de parafinas para aplicación en modelos: revisión

Recebido: 01/06/2020 | Revisado: 03/06/2020 | Aceito: 19/06/2020 | Publicado: 01/07/2020

Davi Nascimento Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0582-5901>

Universidade Federal da Bahia, Brasil

E-mail: davi.nf@hotmail.com

George Simonelli

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8031-1401>

Universidade Federal da Bahia, Brasil

E-mail: gsimonelli@ufba.br

Luiz Carlos Lobato dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3824-7802>

Universidade Federal da Bahia, Brasil

E-mail: lclsantos@ufba.br

Resumo

A deposição de parafinas é um problema antigo na indústria do petróleo e, devido aos prejuízos econômicos que pode causar, diversos estudos têm sido conduzidos durante décadas a fim de compreendê-lo. Na literatura, os mecanismos de deposição são comumente utilizados em modelos para a predição do referido fenômeno, com destaque para os mecanismos de difusão molecular e cisalhantes. Dada a importância dos mecanismos de deposição na representação da deposição de parafinas, este trabalho tem como objetivo a realização de uma breve revisão sobre os principais mecanismos abordados na literatura e o uso destes em modelos deposicionais. A revisão realizada mostrou que a deposição de parafinas ainda não é um fenômeno totalmente compreendido, e que a adoção dos mecanismos deve estar atrelada às condições de contorno do problema. Além disso, foi possível verificar que poucos modelos disponíveis na literatura tratam de mecanismos que não sejam o de difusão molecular ou cisalhantes.

Palavras-chave: Deposição de parafinas; Mecanismos de deposição; Modelos de deposição.

Abstract

Wax deposition is an old problem in the oil industry. Due to the economic losses, several studies have been conducted in order to understand it. In the literature, deposition mechanisms are commonly used in models for the prediction of this phenomenon, with emphasis on the mechanisms of molecular diffusion and shear dispersion and removal. Given the importance of deposition mechanisms in the representation of paraffin deposition, this paper aims to carry out a brief review of the main mechanisms addressed in the literature and their use in depositional models. The review carried out showed that paraffin deposition is not completely understood, and that the adoption of mechanisms to represent it must be linked to the boundary conditions of the problem. In addition, it was possible to notice that few models available in the literature deal with mechanisms other than molecular diffusion or shear dispersion and removal.

Keywords: Wax deposition; Deposition mechanisms; Deposition models.

Resumen

La deposición de cera es un viejo problema en la industria petrolera. Debido a las pérdidas económicas, se han realizado varios estudios para entenderlo. En la literatura, los mecanismos de deposición se usan comúnmente en modelos para la predicción de este fenómeno, con énfasis en los mecanismos de difusión molecular y dispersión y eliminación de cizalladura. Dada la importancia de los mecanismos de depósito en la representación del depósito de parafina, este trabajo tiene como objetivo llevar a cabo una breve revisión de los principales mecanismos abordados en la literatura y su uso en modelos de depósito. La revisión realizada mostró que la deposición de parafina no se comprende completamente y que la adopción de mecanismos para representarla debe estar vinculada a las condiciones límite del problema. Además, fue posible notar que pocos modelos disponibles en la literatura tratan con mecanismos distintos a la difusión molecular o la dispersión y eliminación de cizalladura.

Palabras clave: Deposición de parafina; Mecanismos de deposición; Modelos de deposición.

1. Introdução

A deposição de parafinas é um problema presente na indústria do petróleo há décadas, e causa problemas de garantia de escoamento em quase todos os seus estágios de produção (Ehsani et al., 2019). A deposição ocorre quando a temperatura atinge valores abaixo da temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC) e há um diferencial de temperatura

entre o óleo cru e a superfície fria (Leporini et al., 2019). O crescimento dos depósitos pode causar o aumento da potência requerida para o bombeamento, redução do fluxo e eventual bloqueio total da linha, causando assim perda de produção (Jung et al., 2014; Leiroz & Azevedo, 2005; Pan et al., 2009; Xie & Xing, 2016).

Diante dos prejuízos que pode causar, seu estudo torna-se de grande relevância, pois um melhor entendimento do processo de deposição de parafinas pode ser útil na adoção da melhor estratégia de prevenção ou remediação (Giacchetta et al., 2017). Como parte desse processo de conhecimento, pode-se destacar o estudo dos mecanismos de deposição, que são utilizados em boa parte dos modelos de deposição de parafinas presentes na literatura. Segundo Burger et al. (1981), a deposição e precipitação dos cristais parafínicos depende de diversos mecanismos, estes compreendidos como uma função complexa do perfil de temperatura, do arranjo de fases e das propriedades dos fluidos. Além disso, Souza (2014) destaca que a qualidade da previsão destes modelos depende do bom entendimento dos mecanismos associados à deposição de parafinas.

Tendo em vista a importância dos mecanismos de deposição de parafinas, este artigo tem como objetivo a realização de uma revisão bibliográfica sobre eles. Após a seção 2 (metodologia), serão apresentados alguns mecanismos de deposição de parafinas, bem como a sua aplicação em modelos encontrados na literatura.

2. Metodologia

Neste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica assistemática, também conhecida como narrativa. As bases consultadas foram: Periódicos Capes, Taylor & Francis Group e OnePetro. Segundo Jahan et al. (2016), as revisões narrativas não demandam a especificação dos detalhes requeridos em revisões sistemáticas, tais como palavras-chave e critérios de inclusão e exclusão de trabalhos.

3. Mecanismos de Deposição

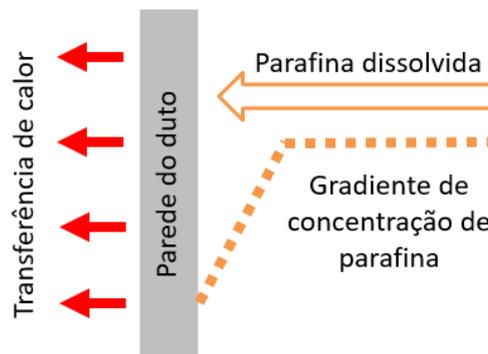
Dada a importância do entendimento dos mecanismos de deposição para o estudo da deposição de parafinas, nesta seção serão mostrados os seguintes mecanismos: difusão molecular, difusão Browniana, dispersão por cisalhamento, efeitos gravitacionais, taxa de incorporação de partículas sólidas, efeito Soret, efeito Saffman, termoforesis e turboforesis.

3.1 Difusão molecular

Durante o fluxo em um duto, quando a temperatura externa é inferior à temperatura do fluido, é formado um gradiente de temperatura na direção radial, sendo a parede do duto a região mais fria (Brown et al., 1993; Cabanillas, 2006). Se a temperatura atingida nas paredes do duto for inferior àquela necessária à formação de cristais, então estarão presentes partículas sólidas precipitadas no fluido e a fase líquida estará em equilíbrio com a fase sólida (Burger et al., 1981).

Como a solubilidade da parafina no óleo é função crescente da temperatura, é gerado pelo gradiente de temperatura um gradiente de concentração de parafinas na solução, e esse faz com que as parafinas sejam direcionadas à parede através do mecanismo de difusão molecular (Cruz, 2011; Santos, 2009; Leiroz, 2004; Bordalo & Oliveira, 2007; Burger et al., 1981; Cabanillas, 2006; Brown et al., 1993). Tal mecanismo pode ser visto no esquema presente na Figura 1.

Figura 1 – Esquema representativo do mecanismo de deposição de parafinas por difusão molecular.



Fonte: adaptada de Burger et al. (1981).

Conforme a Figura 1, à medida que o material deslocado por difusão (parafina dissolvida) alcança a zona fria, precipitará e será incorporado ao depósito formado por outras partículas anteriormente precipitadas que já haviam se aderido às paredes, resultando assim num processo de contínua aglutinação na superfície interna da tubulação (Bordalo & Oliveira, 2007).

Burger et al. (1981) sugerem que a taxa de transporte em direção às paredes da tubulação sejam estimadas através da equação de difusão de Fick (Equação 1).

$$\frac{dm_m}{dt} = \rho_w A D_m \frac{dC}{dT} \frac{dT}{dr} \quad (1)$$

Onde, dm_m/dt é a taxa de deposição de parafina por difusão molecular, ρ_w é a massa específica da parafina sólida, A é a área de deposição, D_m é o coeficiente de difusão da parafina líquida no óleo, dC/dT é o gradiente de solubilidade da parafina no óleo e dT/dr é o gradiente radial de temperatura.

3.2 Difusão browniana

A difusão Browniana é um mecanismo de deposição de parafinas que considera o transporte de partículas na fase sólida (Santos, 2009). Quando existem regiões, na presença de fluxo, nas quais a temperatura está abaixo da TIAC, haverá precipitação de parafinas e, conseqüentemente, a presença de cristais sendo transportados em solução (Santos, 2009; Leiroz, 2004; Cruz, 2011; Cabanillas, 2006). Estes cristais colidirão continuamente com moléculas de óleo agitadas termicamente e, deste modo, serão gerados movimentos aleatórios dos cristais em suspensão (Burger et al., 1981).

Quando existir um gradiente de concentração de cristais sólidos, haverá transporte líquido desses no sentido crescente do perfil de concentração (Burger et al., 1981; Leiroz, 2004). O fluxo de partículas pode ser obtido através de uma expressão de Fick para a difusão Browniana com o uso de um coeficiente de difusão de partículas sólidas (Santos, 2009). O coeficiente de difusão Browniana (D_b) para partículas esféricas e sem interação pode ser obtido através da Equação 2 (Green, 1957, apud Burger et al., 1981).

$$D_b = \frac{RT_a}{6\pi\mu dN} \quad (2)$$

Onde: R é a constante universal dos gases, T_a é a temperatura absoluta do fluido, “ d ” é o diâmetro da partícula, N é o número de Avogadro e μ é a viscosidade.

Alguns autores modelaram a deposição de parafinas desprezando o mecanismo de difusão Browniana (Brown et al., 1993; Bern et al., 1980; Burger et al., 1981; Pan et al., 2009). Entretanto, Leiroz e Azevedo (2005), ao simular o processo de deposição de parafinas em um duto considerando apenas o mecanismo de difusão molecular, observaram que os resultados obtidos subestimaram a espessura dos depósitos observados experimentalmente,

indicando assim a possibilidade de atuação de outros mecanismos, entre eles o de difusão Browniana. Majeed et al. (1990) também desconsideraram a difusão Browniana ao afirmarem que a concentração de cristais seria maior na parede, e, portanto, o fluxo Browniano ocorreria no sentido do centro do tubo, afastando-os das paredes. Entretanto, Leiroz (2004) afirmou que tal argumento é falho, pois desconsidera os cristais que ficam aprisionados nos depósitos formados junto à parede.

Apesar da significância da difusão Browniana na deposição de parafinas não ser uma unanimidade na literatura, pode-se afirmar que é possível alcançar resultados de boa qualidade sem se considerar o referido mecanismo. Tal afirmação é reforçada pelos resultados alcançados por alguns autores que compararam modelos que desconsideram a difusão browniana com experimentos. Como exemplo, é possível citar os trabalhos conduzidos por Ehsani et al. (2019), que obtiveram desvios abaixo de 2%, e Duan et al. (2017), com desvios de até 5,93%.

3.3 Dispersão por cisalhamento

A dispersão por cisalhamento é um mecanismo de transporte lateral de partículas sólidas em suspensão, ou seja, é um mecanismo responsável pelo transporte de cristais (Santos, 2009; Leiroz, 2004; Cruz, 2011). Em casos onde o escoamento é laminar, a viscosidade produz um perfil de velocidade com valor máximo no centro (onde a tensão cisalhante é nula), enquanto que nas paredes seu valor é nulo (e a tensão de cisalhamento é máxima). Em regiões intermediárias, as partículas sólidas passam a ter velocidade angular, provocando, desta forma, colisões que podem ocasionar o deslocamento lateral destas em direção às paredes (Bordalo & Oliveira, 2007; Burger et al., 1981).

Entretanto, estudos realizados por Leiroz e Azevedo (2005) indicaram que tal mecanismo na verdade é pouco relevante quanto ao processo de deposição, mas pode ser relevante na remoção de depósitos. Assim, com o aumento na taxa de cisalhamento e, conseqüentemente, o aumento da quantidade de partículas dispersas na tubulação, é possível supor que a dispersão por cisalhamento pode facilitar a ocorrência de difusão Browniana (Cabanillas, 2006). Segundo Bern et al. (1980), os parâmetros que afetam o mecanismo de dispersão por cisalhamento são a taxa de cisalhamento nas paredes, a quantidade de parafinas na solução e o formato e tamanho das partículas de parafina. Para casos nos quais a fração volumétrica de sólidos é baixa, o coeficiente de dispersão (D_s) pode ser aproximado pela Equação 3 (Eckstein, 1975, apud Burger et al., 1981).

$$D_S = \frac{d^2 \gamma C_w^*}{10} \quad (3)$$

Onde: d é o diâmetro da partícula, γ é a taxa de cisalhamento na parede, e C_w^* é a concentração volumétrica de parafinas no depósito.

3.4 Efeitos gravitacionais

A ação da gravidade foi considerada um suposto mecanismo de deposição de parafinas em função da tendência de deposição dos cristais no fundo das linhas de transporte, devido à sua densidade ser superior em comparação à do óleo solvente (Santos, 2009; Leiroz, 2004). Porém, a ação da gravidade foi descartada como um mecanismo relevante após os testes de centrifugação realizados por Burger et al. (1981). Tais testes foram empregados objetivando a determinação da solubilidade da parafina no óleo, a distribuição dos precipitados por tamanho e a taxa de deposição através do mecanismo gravitacional em uma camada de óleo. Sob as condições do experimento, foi observada a formação de uma camada de gel que evitou a decantação dos precipitados, e os resultados obtidos indicaram que os efeitos gravitacionais pouco contribuem para a deposição total. Os estudos realizados por Leiroz (2004) também mostraram indícios da irrelevante influência da gravidade no processo de deposição de parafinas. Parte dos resultados obtido pela autora pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 – Simetria nos depósitos formados nas placas superior e inferior com escoamento da esquerda para a direita.



Fonte: Leiroz (2004).

Após a realização de experimentos utilizando um canal com placas paralelas resfriadas, Leiroz (2004) observou que a espessura dos depósitos parafínicos formados em ambas as placas, superior e inferior, sujeitas à mesma temperatura, foram iguais. Tal fato pode ser constatado na Figura 2.

3.5 Taxa de incorporação de partículas sólidas

A taxa de incorporação de partículas sólidas foi um mecanismo proposto por Burger et al. (1981). Tal mecanismo é responsável pela incorporação de cristais provenientes de outros mecanismos, tais como a difusão Browniana ou a dispersão por cisalhamento, na camada de depósito (Leiroz, 2004). A taxa de incorporação é diretamente proporcional à área superficial disponível, à concentração volumétrica de sólidos na interface sólido/líquido e à taxa de cisalhamento na parede, sendo assim representada pela Equação 4 (Burger et al., 1981).

$$W_{sb} = k^* C_w^* \gamma A \quad (4)$$

Onde: W_{sb} é a taxa de incorporação de partículas sólidas, k^* é uma constante de deposição, C_w^* é a concentração de partículas sólidas na região da interface sólido/líquido, γ é a taxa de cisalhamento na parede e A é a área superficial disponível.

Segundo Leiroz (2004) há equilíbrio quando a taxa de transporte das partículas por difusão Browniana e dispersão por cisalhamento é igual àquela de incorporação ao depósito. Não havendo tal equilíbrio, existem duas possibilidades: se a taxa de incorporação for superior àquele fluxo produzido por outros mecanismos, a taxa de crescimento será resultado da combinação destes; se o fluxo de partículas for superior à taxa de incorporação do depósito, o crescimento deste será representado pela taxa descrita pela Equação 4.

3.6 Outros mecanismos

Outros mecanismos de deposição são abordados na literatura, entre eles: efeito Soret, efeito Saffman, termoforesis e turboforesis.

O efeito Soret é observado por meio da tendência de movimento de parafinas dissolvidas de uma área quente para outra mais fria em função do gradiente de temperatura (Merino-Garcia et al., 2007). Ou seja, tal efeito consiste no transporte de massa devido à difusão térmica, sendo este fluxo diretamente proporcional ao gradiente de temperatura e ao coeficiente de difusão de Soret (Cruz, 2011), o qual é função também da pressão e das propriedades dos componentes (Souza, 2014).

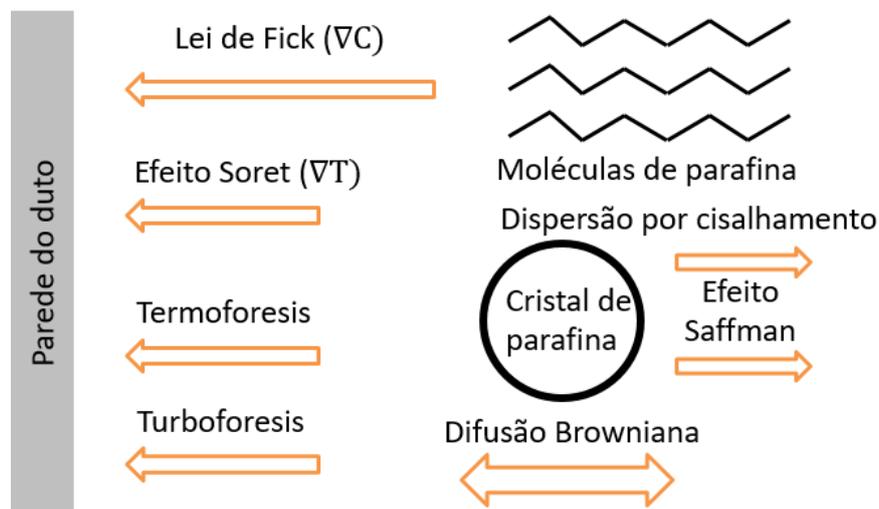
Segundo Merino-Garcia et al. (2007), o efeito Saffman, ou de sustentação, é caracterizado pela suspensão das partículas ocasionada pela diferença de velocidade entre estas e o fluido. A presença do gradiente de velocidade induz uma distribuição de pressão não

uniforme, surgindo assim uma força perpendicular à direção do escoamento agindo sobre a partícula (Cruz, 2011).

A termoforesis é definida como o movimento de partículas sólidas na presença de um gradiente de temperatura, de uma região quente para outra fria (Zheng, 2002). Na presença de uma diferença de temperatura, os cristais de parafina contidos no óleo tendem a se movimentar da região quente para a fria, de modo que a intensidade do movimento e a direção das partículas são diretamente proporcionais ao gradiente de temperatura (Cruz, 2011).

A turboforesis é um mecanismo de deposição de parafina que ocorre mediante a variação do nível de turbulência na secção transversal de um duto (Cruz, 2011). O tamanho da partícula é um parâmetro crítico neste mecanismo, devendo ser conhecido, assim como a sua distribuição, para que o fluxo de massa seja quantificado (Merino-Garcia et al., 2007). Na Figura 3 é possível observar um esquema que representa como agem alguns dos mecanismos apresentados.

Figura 3 – Mecanismos de transporte radial de parafinas e relativas direções de fluxo de massa.



Fonte: Adaptado de Merino-Garcia et al. (2007).

Na Figura 3 é possível ver a comparação entre alguns mecanismos de deposição e suas respectivas forças governantes, bem como o sentido do fluxo de massa que pode provocar.

4. Aplicação dos mecanismos de deposição em modelos

Baseados em alguns dos mecanismos apresentados nas seções anteriores e em outros encontrados na literatura, diversos autores desenvolveram modelos visando a predição da deposição de parafinas. Alguns estudos podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Trabalhos que estudaram a deposição de parafinas e os mecanismos considerados.

Autor	Mecanismos	Autor	Mecanismos
Majeed et al. (1990)	DM	Pan et al. (2009)	DM, RC
Hsu et al. (1998)	DM	Eskin et al. (2013)	DM
Singh et al. (2000, 2001)	DM, DI	Jung et al. (2014)	DM, RC
Nazar et al. (2001)	DM, RC	Souza (2014)	DM
Banki et al. (2002)	DM	Zhou et al. (2016)	DM
Azevedo (2003)	DM, DC	Zheng et al. (2016)	DM, RC
Hernandez et al. (2003)	DM, RC, DI	Duan et al. (2017)	DM, RC
Ramirez-Jaramillo et al. (2004)	DM, RC, DI	Giacchetta et al. (2017)	DM
Leiroz e Azevedo (2005)	DM	Ehsani et al. (2019)	DM

Difusão Molecular (DM), Dispersão por cisalhamento (DC), Remoção por cisalhamento (RC), Difusão interna (DI). Fonte: Adaptado de Rosvold, 2008.

Apesar de alguns autores considerarem o mecanismo de difusão molecular como o principal responsável pela deposição de parafinas em dutos (Pan et al., 2009; Brown et al., 1993; Burger et al., 1981; Leiroz & Azevedo, 2005; Jung et al., 2014), é importante ressaltar que a escolha dos mecanismos considerados pelos modelos encontrados na literatura, de um modo geral, é baseada nas condições de contorno do problema analisado.

A importância dessa observação pode ser corroborada pelos estudos conduzidos por Sun et al. (2020). Tais autores observaram em seus experimentos que apesar de haver tendência de crescimento da espessura dos depósitos parafínicos com o tempo, em um certo instante a mesma estabilizará. A estabilização é atribuída ao aumento da tensão de cisalhamento exercida nos depósitos, causada pelo aumento da velocidade devido à redução da área disponível ao fluxo. Os autores ainda observaram que após alcançar uma espessura estável,

esta sofreu decréscimo com o aumento da vazão, destacando assim que a influência dos mecanismos cisalhantes está ligada às características do escoamento.

Kosta e Geroulis (2011) tiveram conclusão semelhante ao indicarem em seu estudo que os fatores mais significativos na formação dos depósitos parafínicos são o gradiente de temperatura entre parede do duto e fluido, tensão e taxa de cisalhamento, difusão molecular e taxa de cristalização. Apesar de concluírem que a difusão das moléculas parafínicas é a grande responsável pela formação dos depósitos em regime laminar, ressaltaram os efeitos da tensão de cisalhamento sobre o fenômeno com o aumento da velocidade do fluxo.

É importante ressaltar ainda que, apesar dos mecanismos de difusão molecular e dos cisalhantes serem os mais utilizados nos modelos encontrados na literatura, ainda não está clara qual a porcentagem de contribuição de cada mecanismo (Azevedo & Teixeira, 2003).

5. Considerações Finais

Apesar de ser um problema antigo, a deposição de parafinas continua sendo um fenômeno bastante estudado e permanece sem ser totalmente compreendido. Dada a existência de um gradiente de temperatura e o alcance de um valor inferior à TIAC como premissas para a deposição, o mecanismo de difusão molecular acaba por figurar como “mecanismo-base” para quase todos os modelos fenomenológicos encontrados na literatura. Entretanto, estudos indicam que os mecanismos cisalhantes se tornam mais significativos à medida que há aumento da velocidade do fluxo.

Além disso, a revisão realizada mostrou que ainda não há consenso quanto à significância do mecanismo de difusão Browniana, o qual trata do transporte de cristais de parafina. Também foi possível notar que existem poucos modelos desenvolvidos que tratem de mecanismos que não sejam a difusão molecular e os cisalhantes.

Desta forma, sugere-se a realização de estudos que abordem outros mecanismos de deposição em conjunto com os de difusão molecular e cisalhantes. A quantificação da contribuição de cada mecanismo pode servir como base para a sua adoção ou não em estudos futuros, bem como para a determinação da sua significância para determinadas condições operacionais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- Azevedo, L. F. A. & Teixeira A. M. (2003). A Critical Review of the Modeling of Wax Deposition Mechanisms. *Petroleum Science and Technology* (June), 21(3-4): 393-408. <https://doi.org/10.1081/LFT-120018528>.
- Bern, P. A., Withers, V. R., & Cairns, R. J. R. (1980). Wax deposition in crude oil pipelines. European Offshore Petroleum Conference & Exhibition. London. <https://doi.org/10.2118/206-1980-MS>.
- Bordalo, S. N., & Oliveira, R. C. (2007, October 21-24). escoamento bifásico óleo-água com precipitação de parafinas em dutos submarinos de produção de petróleo. Congresso Brasileiro em P&D em Petróleo e Gás, Campinas, SP.
- Brown, T. S., Niesen, V. G., & Erickson, D. D. (1993). Measurement and Prediction of the Kinetics of Paraffin Deposition. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 353–368. <https://doi.org/10.2523/26548-MS>.
- Burger, E. D., Perkins, T. K., & Striegler, J. H. (1981). Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline. *Journal of Petroleum Technology* (June), 33(06): 1075-1086. <https://doi.org/10.2118/8788-PA>.
- Cabanillas, J. P. (2006) Deposição de parafina em escoamento laminar na presença de cristais em suspensão [Masters dissertation, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Repository. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.8715>.
- Cruz, S. R. (2011) Estudo da deposição da parafina em escoamento multifásico em dutos. [Masters dissertation, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. Pontifícia

Universidade Católica do Rio de Janeiro Repository.

<https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.18475>.

Duan, J., Liu, H., Jiang, J., Xue, S., Wu, J., & Gong, J. (2017). International Journal of Heat and Mass Transfer Numerical prediction of wax deposition in oil – gas stratified pipe flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer (February)*, 105: 279–289.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.082>.

Ehsani, S., Haj-shafiei, S., & Mehrotra, A. K. (2019). Experiments and modeling for investigating the effect of suspended wax crystals on deposition from ' waxy ' mixtures under cold flow conditions. *Fuel (January)*, 243: 610–621.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.089>.

Eskin, D., Ratulowski, J., & Akbarzadeh, K. (2013). A model of wax deposit layer formation. *Chemical Engineering Science (June)*, 97(28): 311-319.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.04.040>.

Giacchetta, G., Marchetti, B., Leporini, M., Terenzi, A., Dall'Acqua, D., Capece, L., & Cocci Grifoni, R. (2017). Pipeline wax deposition modeling: A sensitivity study on two commercial software. *Petroleum (June)* 5(02): 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2017.12.007>.

Hernandez, O. C., Hensley, H., Sarica, C., Brill, J. P., Volk, M., & Delle-Case, E. (2003). Improvements in Single-Phase Paraffin Deposition Modeling. *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 3987–3995.

Hsu, J., Santamaria, M., & Brubaker, J. (1994). Wax Deposition of Waxy Live Crudes Under Turbulent Flow Conditions. *SPE Annual Technical Conference And Exhibition*, 179-192.

<https://doi.org/10.2118/28480-MS>.

Jahan, N., Naveed, S., Zeshan, M., & Tahir, M. A. (2016). How to conduct a systematic review: a narrative literature review. *Cureus*, 8(11).

Jung, S.-Y., Lee, D.-G., & Lim, J.-S. (2014). *A Simulation Study of Wax Deposition in Subsea Oil Production System*. Retrieved from www.isopec.org.

Leiroz, A. T. (2004) Estudo sobre a deposição de parafina em linhas de petróleo [Doctoral thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Repository. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.5206>.

Leiroz, A. T., & Azevedo, L. F. A. (2005). Studies on the Mechanisms of Wax Deposition in Pipelines. *Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/17081-MS>.

Leontaritis, K. J., & Geroulis, E. (2011). Wax Deposition Correlation-Application in Multiphase Wax Deposition Models. *Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/21623-MS>

Leporini, M., Terenzi, A., Marchetti, B., Giacchetta, G., & Corvaro, F. (2019). Experiences in numerical simulation of wax deposition in oil and multiphase pipelines: Theory versus reality. *Journal of Petroleum Science and Engineering* (March) 174: 997-1008. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.11.087>.

Majeed, A., Bringedal B., & Overa S. (1990) Model Calculates Wax Deposition for N. Sea Oils. *Oil and Gas Journal* (June) 88: 63-69.

Merino-Garcia, D., Margarone, M., & Corraera, S. (2007). Kinetics of waxy gel formation from batch experiments. *Energy and Fuels*, 21(3), 1287–1295. <https://doi.org/10.1021/ef060385s>.

Nazar, A. R. S., Dabir, B., Vaziri, H., Islam, M. R., & Scotia, N. (2001). Experimental and Mathematical Modeling of Wax Deposition and Propagation in Pipes Transporting Crude Oil. *SPE Production And Operation Symposium*. <https://doi.org/10.2118/67328-MS>

Pan, S., Zhu, J., Zhang, D., Razouki, A., Talbot, M., & Wierzchowski, S. (2009). Case Studies on Simulation of Wax Deposition in Pipelines. *International Petroleum Technology Conference*. <https://doi.org/10.2523/IPTC-13420-MS>.

Ramirez-Jaramillo, E., Lira-Galeana, C., & Manero, O. (2004). Modeling wax deposition in pipelines. *Pet. Sci. Technol.* 22(7-8):821–861. <https://doi.org/10.1081/LFT-120038726>.

Rosvold, K. (2008). Wax Deposition Models [Masters dissertation, Norwegian University of Science and Technology]. Norwegian University of Science and Technology.

Santos, J. S. T. (2009) Estudo experimental e numérico da parafinação em escoamento de hidrocarbonetos em dutos produtores [Doctoral thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Singh, P., Walker, J., Lee, H. S., Gharfeh, S., Thomason, & B., Blumer, D. (2006) An Application of Vacuum Insulation Tubing (VIT) for Wax Control in an Arctic Environment. *Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/18316-MS>.

Souza, L. B. (2014). Deposição de parafina em linhas de petróleo. Estudo numérico e experimental [Doctoral Thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Respository.
<https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.24627>.

Sun, D., Zhu, Z., Hu, Z., & Wu, M. (2020). Experimental and theoretical study on wax deposition and the application on a heat insulated crude oil pipeline in Northeast China. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies Nouvelles*, 75, 3.
<https://doi.org/10.2516/ogst/2019064>.

Xie, Y., & Xing, Y. (2016). A prediction method for the wax deposition rate based on a radial basis function neural network. *Petroleum* (June) 3(02): 237-241.
<https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.08.003>.

Zheng, F. (2002). Thermophoresis of spherical and non-spherical particles: A review of theories and experiments. *Advances in Colloid and Interface Science*, 97(1–3), 255–278.
[https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(01\)00067-7](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(01)00067-7).

Zheng, S., Haji-akbari, A., & Fogler, H. S. (n.d.). A Fundamental Wax Deposition Model for Water-in-Oil Dispersed Flows in Subsea Pipelines. *Transport Phenomena and Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1002/aic>.

Zhou, Y., Gong, J., & Wang, P. (2016). Modeling of wax deposition for water-in-oil dispersed flow. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* (Nov.) 11(01): 108-117. <https://doi.org/10.1002/apj>.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Davi Nascimento Ferreira – 33,34%

George Simonelli – 33,33%

Luiz Carlos Lobato dos Santos – 33,33%