

11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

AVALIAÇÃO DE COMPÓSITOS DE EVA:DENDRÍMERO MODIFICADO COMO MELHORADORES DE FLUXO DE SISTEMAS MODELO PARAFÍNICOS

AUTORES:

Bruna F. Alves¹, Thiago M. Rossi², Luiz C. C. Marques³, Bluma G. Soares^{1,2}, Elizabete F. Lucas^{1,2}

INSTITUIÇÃO:

¹Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, ²Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, ³Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobrás

AVALIAÇÃO DE COMPÓSITOS DE EVA:DENDRÍMERO MODIFICADO COMO MELHORADORES DE FLUXO DE SISTEMAS MODELO PARAFÍNICOS

Resumo

A cristalização de parafinas do petróleo a baixas temperaturas pode causar uma série de problemas relacionados à produção e logística na indústria de petróleo. Como métodos preventivos, os aditivos poliméricos podem ser usados para reduzir a viscosidade e/ou o ponto de fluidez dos petróleos. No entanto, os aditivos disponíveis não agem com eficiência em todos os tipos de petróleo, uma vez que este é uma mistura complexa de composição variada. Portanto, é necessário o estudo de novos aditivos que sejam capazes de melhorar o escoamento de uma maior variedade de óleos. Para aperfeiçoar a propriedade de um material, os compósitos são uma alternativa promissora como aditivos redutores de ponto de fluidez. Neste trabalho, foram produzidos compósitos de poli(etileno-co-acetato de vinila) (EVA) contendo 10% em mol de acetato de vinila com um dendrímero baseado em poli(amidoamina) (PAMAM, geração 2,5), cedido para o estudo. O dendrímero foi quimicamente modificado para a inserção de cadeias hidrocarbônicas contendo 18 átomos de carbono em sua estrutura. Os compósitos de EVA:dendrímero modificado foram produzidos através do método de solução e em proporções variadas. O desempenho dos materiais foi avaliado através dos testes de ponto de fluidez, reologia, microcalorimetria e microscopia óptica. Os compósitos foram aplicados a sistemas modelo com 5% m/v de parafinas de diferentes comprimentos moleculares e em diferentes concentrações. O dendrímero modificado atuou como um eficiente redutor de viscosidade, mas não foi capaz de reduzir o ponto de fluidez dos sistemas parafínicos. Já os compósitos foram capazes de reduzir não apenas a viscosidade, mas também o ponto de fluidez de ambos os sistemas parafínicos, tendo reduzido o ponto de fluidez dos sistemas contendo parafinas de menor e maior comprimento molecular. O melhor resultado foi obtido pelo compósito contendo a razão 80:20 m:m de EVA:dendrímero modificado, na concentração de 500 ppm, o qual reduziu o ponto de fluidez de -3 para <-24 °C nos sistemas com parafinas de menor comprimento molecular e de 21 para -1,5 °C nos sistemas com parafinas de maior comprimento molecular. Esses resultados podem ser relacionados às diferentes morfologias dos cristais, induzidas pela presença dos compósitos nos sistemas.

Palavras-chave: redutor de ponto de fluidez, compósitos poliméricos, dendrímero, viscosidade.

Abstract

Crystallization of petroleum waxes at low temperatures can cause production and logistics problems in the oil industry. As preventive methods, polymeric additives can be used to reduce viscosity and/or the pour point of oil. However, the available additives do not act efficiently on all types of oil due to their complex and varied composition. Therefore, it is necessary to study new additives that will be able to improve the flow of a greater variety of oils. To improve the property of a material, composites are a promising alternative as pour point reducers. In this work, poly (ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) composites containing 10 mol % of vinyl acetate, with poly (amidoamine) (PAMAM, generation 2.5) dendrimer, supplied for the study, were produced. The supplied dendrimer was chemically modified to insert hydrocarbon chains containing 18 carbon atoms in its structure. EVA: modified dendrimer composites were produced by the solution method and in some ratios. Materials performances were evaluated by pour point, rheology microcalorimetry and optical microscopy tests. The composites were

applied in model systems with 5 wt/v% of wax from different molecular lengths and at different concentrations. The modified dendrimer acted as an efficient viscosity reducer, but it was not able to reduce the pour point of waxy systems. Composites were able to reduce not only viscosity, but also the pour point of both waxy systems, having reduced the pour point of system containing smaller and longer wax molecular lengths. The best result was obtained by the 80:20 wt:wt EVA:modified dendrimer ratio, with 500 ppm, which reduced the pour point from -3 to $<-24^{\circ}\text{C}$ in systems with smaller wax molecular length and reduced from 21 to -1.5°C in systems with longer wax molecular length. These results can be related to different crystal morphologies, induced by the presence of composites in the systems.

Keywords: pour point depressant, polymeric composites, dendrimers, viscosity.

Introdução

Na indústria do petróleo, a cristalização e consequente precipitação de parafinas é um sério problema operacional que ocorre em condições de redução da temperatura durante as operações de produção e/ou logística, prejudicado ou até bloqueado o fluxo do óleo (TARANTINO, VIEIRA, *et al.*, 2016). Para evitar esse problema, uma alternativa é o uso de aditivos químicos, que atuam com pelo menos um dos seguintes mecanismos: i) redução do ponto de fluidez, ii) inibição da deposição de parafina e/ou iii) modificação da morfologia do cristal. A eficiência do aditivo depende de sua estrutura e concentração. No entanto, como o petróleo é uma mistura complexa, os aditivos não funcionam para todos os tipos de petróleo, o que justifica os estudos sobre a avaliação de outras moléculas, comerciais ou sintetizadas em laboratórios de pesquisa em sistemas modelo (BARROS, 2022; HUANG, WANG, *et al.*, 2018; STECKEL, NUNES, *et al.*, 2022). Dentre os aditivos utilizados como melhoradores de fluxo, o poli(etileno-co-acetato de vinila) (EVA) apresenta eficiente desempenho para alguns tipos de óleo, dependendo da concentração e o teor de acetato de vinila no EVA (ALVES, PEREIRA, *et al.*, 2019; MACHADO, LUCAS, 2001). Além de aplicações biológicas, na indústria de petróleo os dendrímeros já foram usados em algumas aplicações como deslocamento de petróleo, desemulsificação, estabilização de argila e redução de viscosidade (NIKZAMIR, HANIFEHPOUR, *et al.*; 2021, ZHANG, YU, 2022). No entanto, estudos da aplicação desses materiais na redução do ponto de fluidez (PP) não são encontrados na literatura. Deste modo, a estrutura ramificada dos dendrímeros e sua aplicação nas diversas áreas citadas motivaram o estudo desse material como redutor de PP. Assim, para melhorar as propriedades do EVA, neste trabalho foram produzidos compósitos de EVA com dendrímero, o qual é uma macromolécula regular sintética ramificada. Por ter um custo significativamente maior que o EVA e objetivando não encarecer o produto, o dendrímero foi usado como carga na matriz polimérica. Assim, foram desenvolvidos compósitos de EVA:dendrimer modificado e seus desempenhos foram avaliados como melhorador de fluxo e redutores de ponto de fluidez de sistemas de modelos parafínicos.

Metodologia

Para a produção do compósito, foram utilizados o poli(etileno-co-acetato de vinila), com 10 % em mol de acetato de vinila (EVA) comercial (Brasken S.A.) e um dendrímero baseado em poli(amidoamina) (PAMAM, geração 2,5) modificado com a inserção de cadeias hidrocarbônicas contendo 18 átomos de carbono em sua estrutura, denominado G2.5-C18 (LADPOL/COPPE/UFRJ). Os compósitos foram

preparados pelo método de solução, com 2,78% m/v dos sólidos, nas proporções 90:10, 80:20 e 75:25 m/m de polímero:dendrímico, dissolvidos em tolueno. A mistura foi realizada em um banho ultrassônico por 1 h, seguida de agitação magnética a 80 ° C até a evaporação do solvente. A secagem do material foi realizada por liofilização. Os compósitos de polímero:dendrímico, nas proporções de 75:25, 80:20 e 90:10 m/v, foram chamados de EVA:G2.5-C18 75:25, EVA:G2.5-C18 80:20 e EVA: G2.5-C18 90:10, respectivamente. Os compósitos, o dendrímico e o EVA foram caracterizados por análise termogravimétrica (TGA), com o analisador Q50 da *TA Instrument*, com 7 mg de amostra, atmosfera de nitrogênio, taxa de aquecimento de 10 ° C/min e faixa de temperatura de 25 a 600 ° C. Para preparar o sistema modelo foram utilizadas duas parafinas com diferentes faixas de comprimentos de cadeia: i) parafina com ponto de fusão de 44-46 °C e predomínio de 23 e 24 átomos de carbono na cadeia, chamada de WAX-A; e ii) parafina com ponto de fusão de 56-58 °C e predomínio de 27 e 29 átomos de carbono na cadeia, chamada de WAX-C (OLIVEIRA, NUNES, et al., 2016). As parafinas foram solubilizadas em tolueno a 45 ° C por 90 min. Para os sistemas modelo aditivados a 500 e 750 ppm, os compósitos foram adicionados após os 30 min iniciais de preparação. Foi utilizada a concentração de 5% m/v de parafina.

O desempenho dos compósitos nos sistemas parafínicos foi avaliado por ponto de fluidez, reologia (viscosidade), microscopia óptica (morfologia) e microcalorimetria (temperatura inicial do aparecimento de cristais). Os testes de ponto de fluidez foram realizados com base na ASTM D97 (ASTM D97, 2012) e os resultados foram obtidos em duplicata, com erro de $\pm 1,5$ °C. Os testes de reologia foram realizados usando o viscosímetro *Themo Scientific IQ Haake*, com resfriamento no modo degrau, de 40 a 5 ° C, isoterma de 180 s para cada taxa de temperatura e cisalhamento de 200 s⁻¹. As análises de microcalorimetria foram realizadas no Micro DSC VII (Setaram), com rampa de resfriamento de 80 a - 10 ° C a 0,8 ° C/min. As análises foram realizadas em duplicata e o erro foi de $\pm 1,2$ °C. As análises de microscopia óptica foram realizadas no microscópio óptico *Axio-Zeiss system*, acoplado com controlador de temperatura (*LINKAN*). As análises dos sistemas modelo com WAX-C foram realizadas com rampa de aquecimento até 30 °C a 2 °C/min, seguida de uma rampa de resfriamento para 0 °C a 0.8 °C/min. As imagens da cristalização das parafinas foram obtidas por luz transmitida, com polarização e objetiva de 20x.

Resultados e Discussão

As curvas obtidas pela análise termogravimétrica dos EVA, G2.5-C18, EVA: G2.5-C18 80:20 e EVA: G2.5-C18 90:10 permitiram identificar que o EVA iniciou sua degradação térmica a 323 ° C, com uma diminuição de 20 % em massa, e a principal perda de massa (80 % em massa) ocorreu a 444 ° C. O EVA: G2.5-C18 80:20 apresentou a primeira perda de massa (31 % em massa) a 319 ° C e a segunda (65 % em massa) a 441 ° C. As perdas de massa do EVA: G2.5-C18 90:10 ocorreram a 316 ° C (28 % em massa) e 443 ° C (70 % em massa). O teor de EVA nos compósitos foi relacionado à segunda perda de massa, garantindo que o polímero foi degradado termicamente, sem a interferência de G2.5-C18. Assim, o teor EVA foi de aproximadamente 81 e 88 % em massa para o EVA: G2.5-C18 80:20 e EVA:G2.5-C18 90:10, respectivamente. Além disso, os resultados de TGA evidenciam que os materiais compósitos começaram a degradar em temperaturas acima das encontradas na condição de produção de petróleo, confirmando sua adequabilidade para a aplicação abordada neste trabalho.

Os resultados da temperatura inicial do aparecimento de cristais (WAT) e ponto de fluidez (PP) para os sistemas modelo com 5 % m/v de WAX-A e WAX-C, puro e com EVA ou compósitos, estão mostrados na Tabela 1. Como esperado, a WAT dos sistemas contendo WAX-A (com menor comprimento molecular) foi inferior à dos sistemas com WAX-C (com maior comprimento molecular). No entanto, ao comparar os sistemas com o mesmo tipo de parafina, não houve variação significativa no WAT para os sistemas sem e com aditivo, conforme o esperado (MACHADO, LUCAS, 2001; STECKEL, NUNES, et al., 2022). Além disso, nenhuma variação na WAT foi observada ao usar diferentes concentrações de EVA:G2.5-C18 (500 e 750 ppm) (ALVES, ROSSI, et al., 2022).

Tabela 1. Temperatura inicial de aparecimento de cristais (WAT) e ponto de fluidez dos sistemas modelo contendo 5 %m/v de WAX-A e WAX-B, puros e com diferentes concentrações EVA, G2.5-C18 e compósitos de EVA:G2.5-C18.

Aditivos	Concentração de aditivo (ppm)	WAT ($\pm 1,2$ °C)		Ponto de fluidez ($\pm 1,5$ °C)	
		WAX-A	WAX-C	WAX-A	WAX-C
		5%	5 m/v%	5%	5 m/v%
-	0	3,9	21,2	-3,0	21,0
EVA	500	3,8	20,7	<-24	18,0
	750	-	21,2	-	18,0
G2.5-C18	500	3,9	21,6	-4,5	21,0
EVA:G2.5-C18 75:25	500	-	20,5	-	1,5
EVA:G2.5-C18 80:20	500	3,5	20,3	<-24	-1,5
	750	-	20,5	-	6,0
EVA:G2.5-C18 90:10	500	-	20,6	-	6,0
	750	-	-	-	15,0

Semelhante ao observado para a WAT, o PP dos sistemas com WAX-A foi inferior ao do sistema com WAX-C. Também foi verificado que os aditivos agiram com mais eficiência no sistema com WAX-A do que nos sistemas com WAX-C. O EVA, na concentração de 500 ppm, foi eficiente no sistema contendo WAX-A, reduzindo o PP de -3 para <-24 ° C. No entanto, não reduziu o ponto de fluidez da WAX-C em uma ampla faixa de concentração (ALVES, ROSSI, et al., 2022). O desempenho do dendrímero G2.5-C18 puro foi ainda pior que o do EVA, pois não reduziu o ponto de fluidez dos sistemas com WAX-A ou WAX-C. Por outro lado, todos os compósitos em diferentes concentrações foram capazes de reduzir, em alguma extensão, o ponto de fluidez dos sistemas contendo WAX-A e WAX-C. Quanto à concentração, os compósitos reduziram o ponto de fluidez nas duas concentrações testadas. Na concentração de 500 ppm, a qual foi considerada a concentração ótima, o EVA: G2.5-C18 80:20 e EVA: G2.5-C18 90:10 reduziram o PP de 21°C (PP do sistema sem aditivo) para -1,5 °C e 6,0 °C, respectivamente. Como já verificado na literatura (MACHADO, LUCAS, 2001), o aumento da concentração de aditivos contribui para a nucleação dos cristais de parafina, o que explica o aumento do PP nas concentrações maiores que 500 ppm. Em relação à composição de EVA:dendrímero, o EVA: G2.5-C18 80:20 foi mais eficiente que o EVA: G2.5-C18 90:10 e EVA:G2.5-C18 75:25. Isso pode ser explicado devido à maior presença de ramificações no EVA:G2.5-C18 80:20 do que no EVA:G2.5-C18 90:10, o que favorece o impedimento estérico dos cristais. No entanto, como as cadeias de hidrocarbonetos C18 são radialmente dispostas no dendrímero, o maior número de cadeias ramificadas na matriz de EVA forma uma rede de cera radial, semelhante a camadas de "creme", o que dificulta o

fluxo do sistema (ALVES, ROSSI, et al., 2022). Assim, a proporção de 80:20 foi a ideal para reduzir o ponto de fluidez.

Por reologia, foram verificados os comportamentos de fluxo dos sistemas modelo com WAX-A e WAX-C, aditivados a 0, 500 e 750 ppm. Para todas as curvas de fluxo dos sistemas modelo, o comportamento clássico de fluido newtoniano acima da temperatura de cristalização e o comportamento do fluido não newtoniano abaixo da temperatura de cristalização foram verificados. (OLIVEIRA, GONÇALVES, et al., 2018). As curvas de fluxo do sistema modelo contendo 5 % m/v de WAX-C, sem e com a adição de EVA (500 ppm), G2.5-C18 (a 500 ppm) e diferentes proporções de EVA:G2.5-C18 (a 500 e 750 ppm) estão mostradas na Figura 1. Como esperado, todos os sistemas apresentaram um comportamento semelhante: baixas viscosidades a temperaturas mais altas e aumento da viscosidade com a diminuição da temperatura. Todas as curvas começaram a mostrar maior viscosidade em torno da mesma temperatura (25 - 23 °C), independentemente da presença ou tipo/concentração do aditivo, o que corrobora com a observação de nenhuma variação de WAT por microcalorimetria. Foi observado que, a 5 ° C, a menor viscosidade foi alcançada com o sistema parafínico contendo o dendrímero G2.5-C-18 puro como aditivo. Apesar dessa capacidade de reduzir a viscosidade, o G2.5-C18 não foi capaz de reduzir o ponto de fluidez dos sistemas parafínicos (Tabela 1). Isso pode ser explicado com base na proposição de que o dendrímero induz a formação de camadas de redes de cristal radial, o que dificulta o fluxo no teste de ponto de fluidez, mas essas camadas são mais facilmente dispersas sob cisalhamento. Ao comparar a viscosidade de EVA:G2.5-C18 em diferentes composições, a 500 ppm, foi observado que quanto maior a proporção de polímero, maior a viscosidade. No entanto, todos reduziram a viscosidade para temperaturas inferiores às observadas para o sistema de parafina pura ou o sistema modelo com EVA. Entre os compósitos, a viscosidade diminuiu ligeiramente na seguinte ordem: EVA:G2.5-C18 90:10 > EVA:G2.5-C18 80:20 > EVA:G2.5-C18 75:25. Assim, foi evidente que o dendrímero contribuiu para a diminuição da viscosidade e sua maior proporção no composto foi responsável por reduzi-la. Corroborando com os resultados de PP, o EVA: G2.5-C18 80:20 também apresentou atuação eficiente como redutor de viscosidade.

As Figuras 2a-2d mostram as micrografias dos sistemas de modelos de 5 % m/v de WAX-C sem e com 500 ppm de EVA, EVA: G2.5-C18 90:10 e EVA: G2.5-C18 80:20, respectivamente. As imagens foram registradas a 0 ° C. Ao comparar com o sistema de modelo puro (Figura 2a), todos os aditivos reduziram o tamanho dos cristais e revelaram morfologias distintas. Relacionando os resultados da Figura 8 com a Tabela 1, foi observado que: i) o EVA reduziu o tamanho dos cristais (Figura 2b) mas não foi capaz de modificar o PP e ii) o EVA: G2.5-C18 90:10 reduziu o tamanho dos cristais e provocou uma morfologia diferente, com cristais tipo estrela (Figura 2c), conseguindo uma redução do PP de 21 para 6 ° C. O EVA: G2.5-C18 80:20 modificou o tamanho dos cristais e reduziu-os mais que o EVA: G2.5-C18 90:10 (Figura 2d), tendo reduzido o PP de 21 para -1,5 ° C. Desse modo, com base nas morfologias exibidas na Figura 2, pode-se afirmar que a morfologia dos cristais é função da estrutura do aditivo e da interação compósito-parafina (ALVES, ROSSI, et al., 2022)

.

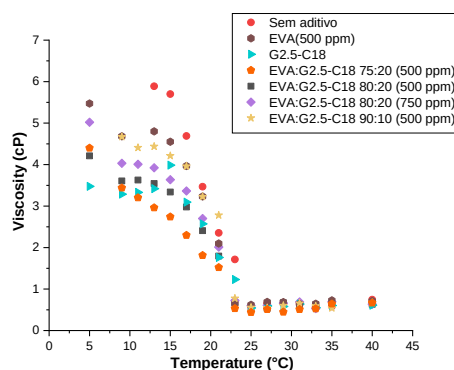


Figura 1. Curva de fluxo dos sistemas modelo puro e aditivados com EVA, G2.5-C18 e compostos de EVA:G2.5C-18 em diferentes proporções e concentrações.

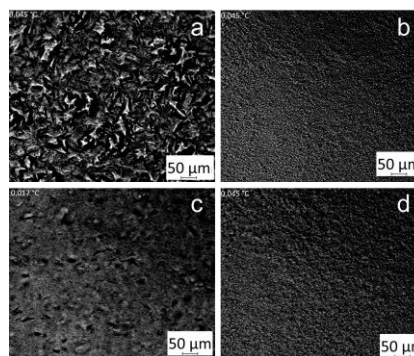


Figura 2. Micrografias dos sistemas modelo com 5 % m/v de WAX-C (a) puro e aditivados com 500 ppm de EVA (b), EVA: G2.5-C18 90:10 (c) e EVA: G2.5-C18 80:20 (d), a 0°C, puro.

Conclusões

Os compostos de EVA:dendrímico foram obtidos com sucesso pelo método da solução. Devido à sua arquitetura radial e estrutura ramificada, o dendrímico modificado contribuiu para a redução da viscosidade, mas não foi capaz de reduzir o ponto de fluidez para nenhuma solução de sistema modelo parafínico testada. Os compostos não foram capazes de reduzir a WAT dos sistemas, porém foram capazes de reduzir o ponto de fluidez, mesmo nos sistemas contendo parafinas com maiores tamanhos de cadeia, diferentemente do EVA que atuou somente no sistema contendo parafinas com tamanhos de cadeias menores. Entre as composições e concentrações utilizadas neste trabalho, a proporção 80:20 m/m EVA:dendrímico, a 500 ppm, apresentou os valores ótimos para redução de ponto de fluidez e melhoria da viscosidade. O desempenho de todos os aditivos testados foi intimamente relacionado à sua influência na modificação de tamanho e/ou morfologia dos cristais parafina. Por sua vez, as morfologias dos cristais foram influenciadas pela estrutura do aditivo, comprimento molecular parafínico e interação composto-parafina. Para os sistemas contendo 5 % m/v de parafina de maior comprimento de cadeia, o composto, além de reduzir os tamanhos dos cristais, promoveu uma morfologia característica desse novo material desenvolvido para otimizar a garantia de escoamento de sistemas parafínicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (303583/2019-3), CAPES, FAPERJ (E-26/200.974/2021), ANP e Petrobras pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

ALVES, B. F., ROSSI, T.M., MARQUES, L.C.C., *et al.* "Composites of EVA and hydrophobically modified PAMAM dendrimer: effect of composition on crystallization and flow assurance of waxy systems", **Fuel**, 125962, 2022. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125962.

ALVES, B. F., PEREIRA, P. H. R., NUNES, R. de C. P., *et al.* "Influence of solvent solubility parameter on the performance of EVA copolymers as pour point modifiers of waxy model-systems", **Fuel**, v. 258, 2019. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116196.

ASTM D97. **American Society of testing and materials, ASTM D97: Standard Test. Method for Pour Point of Petroleum Products.** New York, 2012.

BARROS, H. **Síntese e caracterização de estruturas anfífilas e avaliação na inibição de inchamento de argilominerais em fluidos de base aquosa.** 2022. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

HUANG, H., WANG, W., PENG, Z., *et al.* "The influence of nanocomposite pour point depressant on the crystallization of waxy oil", **Fuel**, v. 221, p. 257–268, 2018. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.040.

MACHADO, A. L. C., LUCAS, E. F. "The influence of vinyl acetate content of the poly(ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) additive on the viscosity and the pour point of a Brazilian crude oil", **Petroleum Science and Technology**, v. 19, n. 1–2, p. 197–204, 2001. DOI: 10.1081/LFT-100001234.

NIKZAMIR, M., HANIFEHPOUR, Y., AKBARZADEH, A., *et al.* "Applications of Dendrimers in Nanomedicine and Drug Delivery: A Review", **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**, v. 31, n. 6, p. 2246–2261, 2021. DOI: 10.1007/s10904-021-01925-2.

OLIVEIRA, L. M. S. L., NUNES, R. C. P., MELO, I. C., *et al.* "Evaluation of the correlation between wax type and structure/behavior of the pour point depressant", **Fuel Processing Technology**, v. 149, p. 268–274, 2016. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.04.024.

OLIVEIRA, M., GONÇALVES, M., MARQUES, L. **Fundamentos de garantia de escoamento.** 1a. ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2018.

STECKEL, L., NUNES, R. C. P., ROCHA, P. C. S., *et al.* "Pour point depressant: identification of critical wax content and model system to estimate performance in crude oil", **Fuel**, v. 307, 2022. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121853.

TARANTINO, G. B., VIEIRA, L. C., PINHEIRO, S. B., *et al.* "Characterization and evaluation of waxy crude oil flow", **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 33, n. 4, p. 1063–1071, 2016. DOI: 10.1590/0104-6632.20160334s20150103.

ZHANG, Y., YU, W. "Synthesis of Hyperbranched Polymers and Prospects for Application in Oilfield Chemistry", **Frontiers in Energy Research**, v. 10, 2022. DOI: 10.3389/fenrg.2022.894096.