



AVALIAÇÃO DA FLOCULAÇÃO-FLOTAÇÃO DE ÁGUA PRODUZIDA SINTÉTICA CONTENDO SURFACTANTE RESIDUAL PROVENIENTE DE PROCESSOS EOR

Pedro W. Bohrer¹; Thiago C. Silva¹; Laíza Faleiro Cardoso¹; Júlia T. Oliveira¹; Henrique A. Oliveira¹; André C. Azevedo¹.

¹Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM), Departamento de Engenharia de Minas, PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves 9500, Setor 6, Porto Alegre, RS, 91501-970, Brasil.
pedro.wainberg@ufrgs.br

Palavras-Chave: DTC, índice de floculação, TOG.

Introdução

As tecnologias de Recuperação Avançada de Petróleo (*Enhanced Oil Recovery* – EOR) baseadas em espuma, utilizam surfactantes para promover a formação de espuma *in situ*, aumentando o controle de mobilidade do gás e a eficiência de varredura do reservatório. Essa estratégia melhora a recuperação de petróleo, especialmente em reservatórios heterogêneos (Clark & Santiso, 2018; Ribeiro et al., 2026).

Entre os surfactantes empregados nesses processos, os zwitteriônicos destacam-se pela elevada capacidade de formação e estabilidade de espuma, além da alta tolerância à salinidade e às condições severas encontradas em reservatórios de petróleo (Deng et al., 2025; Moore et al., 2025). Esses surfactantes vêm sendo investigados para aplicações em reservatórios do pré-sal brasileiro (Creatto et al., 2021). Sua estrutura molecular favorece a adsorção na interface óleo/água (O/A), reduzindo a coalescência das gotículas de óleo e a drenagem do filme líquido, aumentando a retenção de CO₂ e conferindo comportamento viscoelástico às espumas, características que favorecem o controle da mobilidade do gás durante o processo de recuperação (Zhang et al., 2026).

Contudo, parte do surfactante injetado pode retornar com os fluidos produzidos e alcançar o *topside*, interferindo nas etapas de separação O/A e no tratamento da água produzida (AP) (Cassar et al., 2021). Devido à elevada atividade interfacial desses compostos, ocorre redução da tensão interfacial e inibição da coalescência das gotículas de óleo, favorecendo a formação de emulsões múltiplas (água-em-óleo-em-água – A/O/A) e aumentando a estabilidade da emulsão (Alvarenga et al., 2025; Wu, 2025; Xiong et al., 2023).

Em plataformas *offshore*, o tratamento de AP é tipicamente composto por etapas primárias de separação gravitacional e hidrociclone, seguidas de processos físico-químicos, como floculação e flotação por ar dissolvido (FAD), para a remoção do óleo disperso e emulsionado (Walsh, 2019). Para atender ao limite de descarte estabelecido pela legislação brasileira (29 mg/L de teor de óleos e graxas – TOG, média mensal) (CONAMA, 2007), a eficiência do tratamento é fundamental. Nesse contexto, a desestabilização química da emulsão e a formação de flocos desempenham papel decisivo na remoção do óleo por flotação (Wang et al., 2022).

A eficiência da floculação depende diretamente das características da emulsão, especialmente da distribuição do tamanho das gotículas e das propriedades interfaciais. A presença de surfactantes torna as emulsões mais estáveis e menos suscetíveis à agregação,



podendo comprometer tanto a formação quanto a resistência dos flocos, bem como sua interação com as microbolhas durante a flotação (Dudek et al., 2020; Fang et al., 2023). Como consequência, o tratamento de AP contendo surfactantes residuais pode exigir maior condicionamento químico para recuperar a eficiência da remoção de óleo (Huang et al., 2025). Nesse contexto, o índice de floculação (IF), obtido por analisador fotométrico de dispersão (PDA), constitui uma ferramenta para o monitoramento em tempo real da cinética de formação dos flocos, permitindo avaliar indiretamente o potencial de remoção de óleo por flotação (Daraei et al., 2023; Gregory & Nelson, 1986). Apesar desse potencial, sua aplicação em emulsões oleosas ainda é pouco explorada.

Reagentes à base de ditiocarbamato (DTC) são amplamente utilizados no tratamento de AP *offshore* como parte do condicionamento químico prévio à flotação (Gao et al., 2011; Hao et al., 2022). Entretanto, o impacto de surfactantes residuais provenientes de processos EOR sobre a eficiência da floculação–flotação com DTC permanece pouco compreendido, especialmente quanto à formação de flocos, ao TOG residual e ao aumento da demanda de reagentes necessário para restabelecer a eficiência do processo.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de um surfactante zwitteriônico empregado em processos de recuperação avançada de petróleo sobre a eficiência da floculação–flotação de água produzida sintética utilizando um reagente à base de DTC, por meio da determinação do TOG residual e do monitoramento da cinética de floculação utilizando o índice de floculação (IF).

Material e Métodos

A água produzida sintética (APS) foi preparada pela emulsificação de petróleo cru em solução salina preparada com água deionizada (DI) e sais de pureza analítica (NaCl, KCl, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; Vetec Química[®], Brasil). A emulsificação (Figura 1) foi realizada em homogeneizador Ultra-Turrax (IKA[®], T25) a 13.400 rpm por 13 min, seguida de 10 min de repouso para remoção da fase livre. O petróleo foi adicionado gradualmente (12–16 gotas/L a cada 12 s), resultando em emulsões com concentração de óleo entre 100 e 150 mg/L. O surfactante zwitteriônico foi adicionado nos dois minutos finais da emulsificação, em concentrações de 0 a 44 mg/L. As emulsões apresentaram pH entre 5,5 e 6,0 e composição iônica de Cl^- (44.780 mg/L), Na^+ (24.830 mg/L), Mg^{2+} (5.220 mg/L), Ca^{2+} (2.330 mg/L), K^+ (1.110 mg/L), Fe^{2+} (10 mg/L) e SO_4^{2-} (250 mg/L).

O TOG das emulsões e das águas tratadas foi determinado por espectrofotometria no infravermelho (Standard Methods 5520 C) em analisador Horiba[®] OCMA350, utilizando ácido clorídrico (HCl, 37% - Neon[®], Brasil) para o ajuste de pH, tetracloreto (C₂Cl₄ – Dinâmica Química[®], Brasil) como solvente de extração e sulfato de sódio anidro (Na₂SO₄ – Dinâmica Química[®], Brasil) para desidratação da fase orgânica (APHA, 2017).

Os ensaios de floculação–flotação por ar dissolvido (FAD) foram realizados em unidade de bancada composta por uma coluna de floculação/flotação (d= 90 mm; h= 30 cm) equipada com agitador mecânico de bancada (Fisatom[®]), e um vaso saturador pressurizado para geração de microbolhas, conforme apresentado na Figura 1. A floculação foi realizada adicionando o DEDTC em mistura sob agitação rápida (800 rpm, 30 s), seguido de uma etapa de agitação lenta (120 rpm, 5 min) para formação dos flocos. A água saturada com ar foi despressurizada por meio de válvula agulha, operando a 4 bar e taxa de reciclo de 20%.

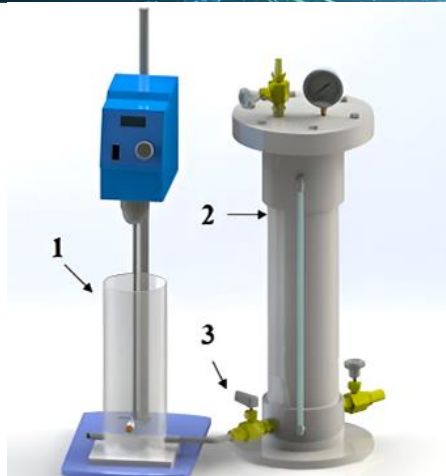


Figura 1. Representação esquemática do aparato experimental de floculação–FAD em bancada, composto por: (1) coluna de floculação–flotação, (2) vaso saturador e (3) válvula de agulha para despressurização e geração de microbolhas.

A cinética de floculação foi monitorada em sistema independente (Figura 2), utilizando um analisador fotométrico de dispersão (PDA 2000, Rank Brothers®, Reino Unido). Durante os ensaios, a suspensão foi continuamente recirculada por uma bomba peristáltica através de uma célula de fluxo de 3 mm de diâmetro interno, à vazão de 60 mL/min, sendo os dados registrados por um *data logger* ADC-20 acoplado ao software PicoLog®. O índice de floculação (IF) foi a partir da razão entre a raiz quadrada da média do sinal flutuante (V_{rms}) e a intensidade média da luz transmitida ($\bar{V}$), conforme proposto por Gregory & Nelson (1986).



Figura 2. Representação esquemática do sistema de análise por dispersão fotométrica, composto por: (1) coluna de floculação, (2) bomba peristáltica, (3) analisador fotométrico de dispersão, (4) linha de recirculação da APS e (5) sistema de aquisição de dados.

Resultados e Discussão

A Figura 3 apresenta o efeito da concentração de surfactante zwitteriônico residual sobre os valores de TOG após o tratamento da APS pelo processo de floculação–flotação, em função da concentração do DEDTC.

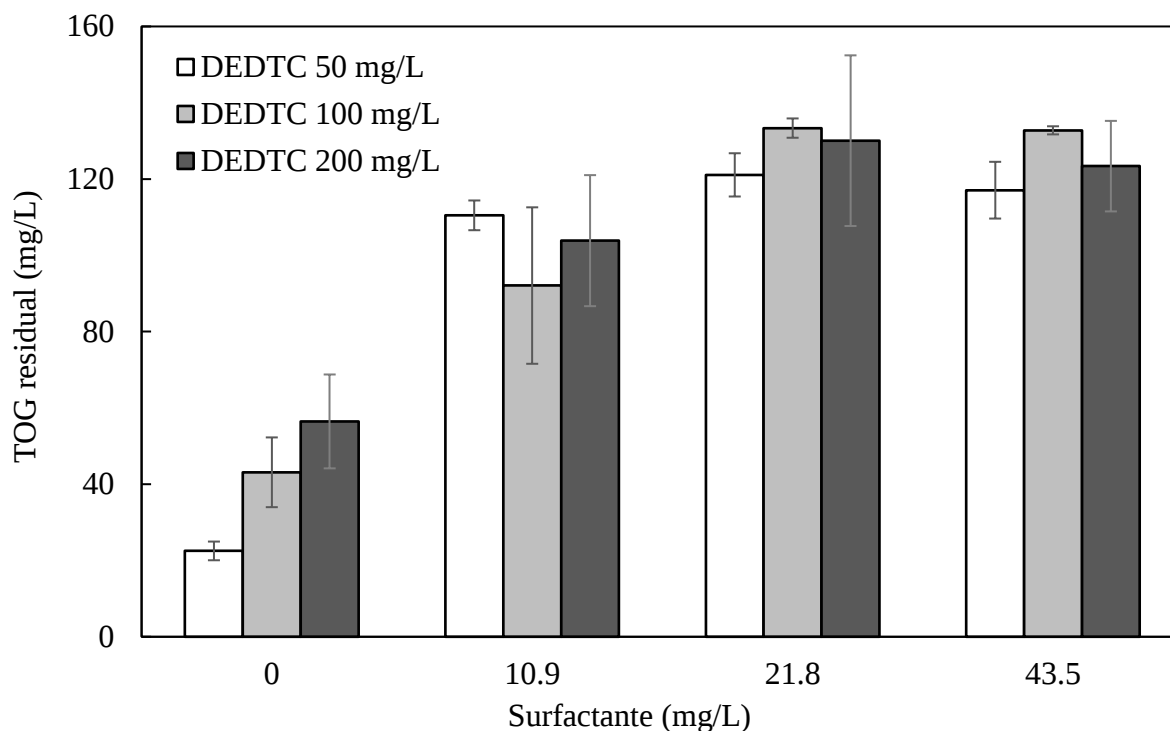


Figura 3. TOG residual após floculação–flotação para APS em função da concentração de surfactante (0–43,5 mg/L), para diferentes dosagens de DEDTC (50–200 mg/L).

Na ausência de surfactante a dosagem de 50 mg/L apresentou o melhor desempenho, resultando em TOG residual de 22,5 mg/L (74,1% de remoção), abaixo do limite estabelecido pela legislação brasileira para descarte *offshore*. A adição de apenas 10,9 mg/L de surfactante elevou o TOG residual para valores superiores a 90 mg/L em todas as dosagens de DEDTC. Em 21,8 e 43,5 mg/L de surfactante, o TOG residual permaneceu entre 120 e 135 mg/L, evidenciando que pequenas concentrações do reagente zwitteriônico foram suficientes para comprometer significativamente a eficiência do tratamento.

O comportamento observado indica que o efeito estabilizante promovido pelo surfactante predominou sobre o aumento da dosagem de DEDTC. Estudos realizados por Yang et al. (2024) demonstram que surfactantes zwitteriônicos adsorvem-se espontaneamente na interface óleo/água, formando uma camada interfacial organizada que aumenta a estabilidade da emulsão. Além disso, Jing et al. (2024) observaram que esses surfactantes reduzem significativamente a tensão interfacial e promovem a formação de gotas menores e mais uniformes, contribuindo para a estabilização da dispersão óleo/água. Essa elevada estabilidade também foi observada por Choudhary et al. (2026), que obtiveram emulsões de petróleo pesado com estabilidade de até três dias utilizando um surfactante zwitteriônico. Esses resultados sugerem que a estabilização interfacial promovida pelo surfactante residual dificulta a aproximação e a coalescência das gotículas de óleo, limitando a formação de agregados e,

consequentemente, a eficiência da flotação. Assim, o aumento da dosagem de DEDTC não foi suficiente para compensar a elevada estabilidade da emulsão.

A fim de avaliar o efeito da dosagem de DEDTC sobre a formação de flocos na ausência de surfactante residual, a Figura 4 apresenta a evolução temporal do índice de floculação (IF) para as diferentes dosagens de DEDTC avaliadas. Os valores de IF_{max} , tempo para atingir IF_{max} , taxa de crescimento dos flocos e TOG residual são apresentados na Tabela 1.

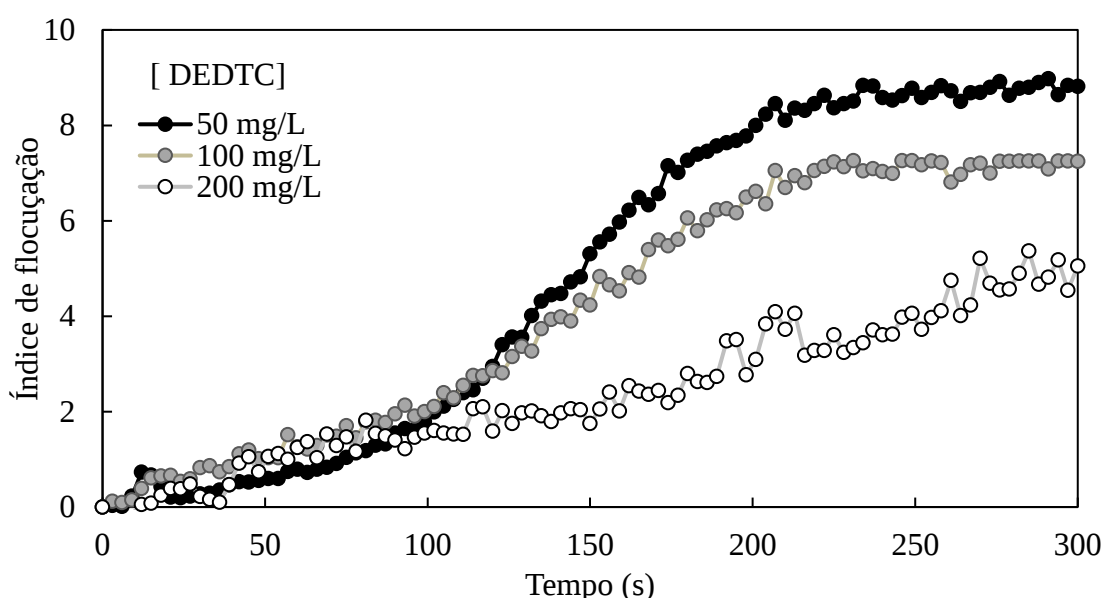


Figura 4. Índice de floculação (IF) em função do tempo para a água produzida sintética (APS) em diferentes dosagens de DEDTC (50, 100 e 200 mg/L), na ausência do surfactante zwitteriônico.

<i>DEDTC</i>	<i>50 mg/L</i>	<i>100 mg/L</i>	<i>200 mg/L</i>
IF_{max}	8,97	7,26	4,55
<i>Tempo IF_{max} (s)</i>	249	255	258
<i>Taxa de crescimento do IF (1/s)</i>	0,034	0,026	0,018
<i>TOG residual (mg/L)</i>	22,51	43,12	56,46

Tabela 1. Parâmetros obtidos nos ensaios de floculação (IF_{max} , tempo para IF_{max} e taxa de crescimento do IF) e respectivos valores de TOG residual para a água produzida sintética (APS) em diferentes dosagens de DEDTC (50, 100 e 200 mg/L), na ausência do surfactante zwitteriônico.

O IF está relacionado à formação e ao crescimento dos flocos, sendo amplamente utilizado como indicador da eficiência da coagulação e floculação (Gregory & Nelson, 1986; Ramphal & Sibiya, 2014; Khedher et al., 2023). Em todas as condições observou-se aumento progressivo do IF seguido por um platô após aproximadamente 200 s, indicando equilíbrio entre crescimento e ruptura dos agregados (Yukselen & Gregory, 2004).

A dosagem de 50 mg/L (Tabela 1) apresentou crescimento mais rápido do IF durante os estágios iniciais da floculação, refletido na maior taxa de crescimento do índice. Como consequência, essa condição resultou no maior IF_{max} (8,97) e na menor concentração residual de óleo após o tratamento (TOG= 22,51 mg/L). Por outro lado, embora a concentração de 100 mg/L de **DEDTC** tenha atingido um valor de IF adequado (7,26), a concentração de TOG

residual aumentou, sugerindo que diferenças nas características dos flocos, como tamanho, estrutura ou capacidade de interação com as microbolhas, influenciaram a eficiência da remoção de óleo.

A velocidade de formação dos agregados é particularmente importante em aplicações *offshore* devido ao reduzido tempo de residência disponível (Piccioli et al., 2020). Assim, a rápida formação de flocos favorece a captura pelas microbolhas e sua ascensão durante a flotação por ar dissolvido (Ramphal & Sibiya, 2014). Dessa forma, nas condições avaliadas, a dosagem de 50 mg/L de DEDTC mostrou-se suficiente para promover elevada formação de flocos e alcançar a maior eficiência de remoção de óleo, indicando que o aumento da concentração do reagente não proporciona benefícios adicionais ao processo.

Para avaliar o efeito da concentração de surfactante residual (0–43,5 mg/L) na formação de flocos em 50 mg/L de DEDTC, a Figura 5 apresenta a evolução temporal do índice de floculação (IF) para cada condição. Os valores de IF_{max} , tempo para atingir IF_{max} , taxa de crescimento dos flocos e TOG residual são apresentados na Tabela 2.

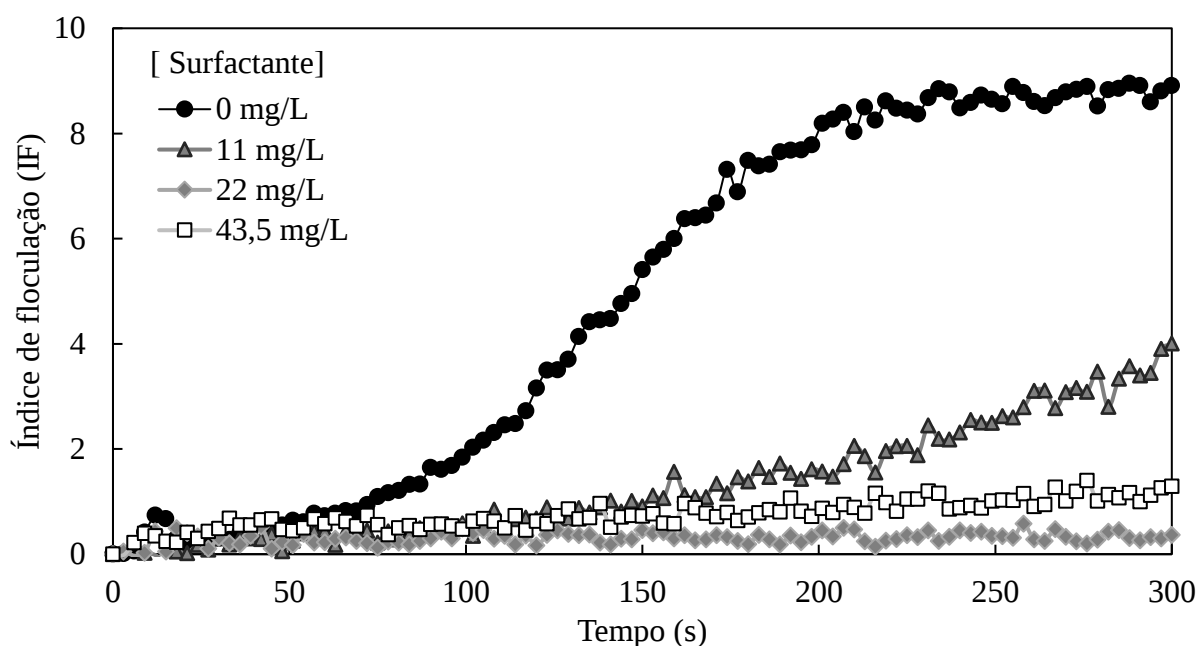


Figura 5. Índice de floculação (IF) em função do tempo para a água produzida sintética (APS) contendo 50 mg/L de DEDTC e diferentes concentrações de surfactante zwitteriônico (0–43,5 mg/L).

Surfactante	0 mg/L	11 mg/L	22 mg/L	43,5 mg/L
IF_{max}	8,9	4,04	0,58	1,40
Tempo IF_{max} (s)	288	300	273	291
Taxa de crescimento do IF (1/s)	0,030	0,013	0,002	0,004
TOG residual (mg/L)	22,51	92,08	133,35	132,77

Tabela 2. Parâmetros obtidos nos ensaios de floculação (IF_{max} , tempo para IF_{max} e taxa de crescimento do IF) e respectivos valores de TOG residual para a água produzida sintética (APS) contendo 50 mg/L de DEDTC e diferentes concentrações de surfactante zwitteriônico (0–43,5 mg/L).



Em contraste com o comportamento observado na ausência de surfactante (Figura 4 e Tabela 1), a adição do surfactante zwitteriônico promoveu uma redução significativa da formação de flocos (Figura 5). A presença de apenas 11 mg/L de surfactante reduziu o IF_{max} de 8,9 para 4,04 (redução de 55%) e elevou o TOG residual de 22,51 para 92,08 mg/L, aproximadamente quatro vezes superior ao valor obtido na ausência do surfactante (Tabela 2). Em concentrações de 22 e 43,5 mg/L, a formação de flocos foi praticamente suprimida (IF_{max} < 1,5), resultando em TOG residual próximo de 133 mg/L. A forte correlação entre a redução do IF e o aumento do TOG residual demonstra que o surfactante residual comprometeu diretamente a etapa de floculação. Como o IF representa a formação e o crescimento dos agregados, sua redução indica que o surfactante comprometeu a etapa de floculação, limitando a disponibilidade de flocos para remoção do óleo.

Mesmo com o aumento da dosagem de DEDTC, o efeito estabilizante promovido pelo surfactante permaneceu predominante. Embora o DEDTC forme complexos estáveis com Fe²⁺, sua baixa funcionalidade molecular limita a formação de estruturas agregadas extensas, quando comparado a reagentes poliméricos contendo múltiplos grupos funcionais (Li et al., 2003; Xin et al., 2022). Assim, reagentes contendo múltiplos sítios de coordenação ou cadeias poliméricas representam alternativas promissoras para aumentar a eficiência da floculação (Jia et al., 2009; Hao et al., 2022; Ajiboye et al., 2022).

Em termos de aplicação, os resultados indicam que o retorno de surfactantes de processos EOR pode exigir a reformulação do condicionamento químico empregado no tratamento de AP, uma vez que o aumento isolado da dosagem de DEDTC não restabeleceu a eficiência da floculação–flotação. A continuidade do estudo envolverá a avaliação de outros reagentes à base de DTC, seguida da validação das condições mais promissoras em planta piloto contínua de 5 m³/h, sob condições dinâmicas mais próximas às operações *offshore*.

Conclusões

Os resultados demonstraram que o DEDTC foi eficiente na remoção de óleo da água produzida sintética na ausência de surfactante residual, sendo a dosagem de 50 mg/L suficiente para promover elevada formação de flocos, alcançar a menor concentração residual de TOG entre as condições avaliadas, atendendo ao limite médio mensal estabelecido pela legislação brasileira para descarte *offshore*. Entretanto, a presença do surfactante zwitteriônico comprometeu significativamente a eficiência do processo de floculação–flotação. O monitoramento do índice de floculação evidenciou que a redução da eficiência do tratamento esteve associada à supressão da formação e do crescimento dos agregados, indicando que a estabilização da emulsão promovida pelo surfactante limita a etapa de floculação e, consequentemente, a remoção de óleo. Além disso, o IF demonstrou ser uma ferramenta adequada para inferir a eficiência do processo, uma vez que permitiu correlacionar a dinâmica de formação e crescimento dos agregados com o desempenho da remoção de óleo, constituindo um parâmetro complementar para a avaliação de processos de floculação–flotação na presença de interferentes capazes de alterar a estabilidade das emulsões. O aumento da concentração de DEDTC, isoladamente, não foi suficiente para superar o efeito estabilizante do surfactante. Dessa forma, a avaliação de DTCs modificados, reagentes poliméricos com múltiplos sítios de interação e combinações de floculantes representa uma estratégia promissora para o tratamento



de águas produzidas contendo surfactantes residuais de processos EOR. Como continuidade da pesquisa, as condições mais promissoras serão validadas em planta piloto contínua (5 m³/h), sob condições dinâmicas de escoamento mais próximas às operações *offshore*.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UFRGS, ao PPGE3M, à CAPES e ao CENPES/Petrobras pelo suporte institucional e financeiro das bolsas, e do custeio no âmbito do PROEX/PPGE3M, processo nº [88881.844968/2023-01].

Referências

- AJIBOYE, T. O.; AJIBOYE, T. T.; MARZOUKI, R.; ONWUDIWE, D. C. The Versatility in the Applications of Dithiocarbamates. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, p. 1317, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23031317>
- ALVARENGA, B. G.; DUNCKE, A. C. P.; PÉREZ-GRAMATGES, A.; PERCEBOM, A. M. Impact of Residual Zwitterionic Surfactants on Topside Water–Oil Separation of Pre-Salt Light Crude Oil Emulsions. **ACS Omega**, 10, 50340–50348, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c07388>.
- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater (23. ed)**. American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2017.
- CASSAR, C.; MOURET, A.; SALAÜN, M.; KLOPFER, M. Effect of Enhanced-Oil-Recovery Chemicals on Oil/Water-Separation Processes, from Laboratory Scale to Flow-Loop Scale. **SPE Production & Operations**, v. 36, n. 4, p. 845-856, 2021. DOI: <https://doi.org/10.2118/200455-PA>
- CHOUDHARY, R.; SINGH, S.; KUMAR, S.; GAUTAM, S.; KUMAR, A. Performance evaluation of a zwitterionic surfactant for the emulsification of an Indian heavy crude oil for pipeline transportation. **Fuel**, 405, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136547>
- CLARK, J. A.; SANTISO, E. E. Carbon sequestration through CO₂ foam-enhanced oil recovery: a green chemistry perspective. **Engineering**, v. 4, n. 3, p. 336-342, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.006>
- CONAMA. **Resolução CONAMA no 393, de 8 de agosto de 2007**. Estabelece as condições e padrões para o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, 2007.
- CREATTO, E.J.; ALVARENGA, B.G.; DE MOURA, P.G.; PÉREZ-GRAMATGES, A. Viscosity-driven stabilization of CO₂-in-brine foams using mixtures of cocamidopropyl hydroxysultaine and sodium dodecyl sulfate. **J. Mol. Liq.**, 329, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115614>
- DARAEI, H.; AKYOL, B.; KHEDHER, M.; BERTONE, E.; AWAD, J.; STEWART, R.A.; CHOW, C.W.K.; DUAN, J.; VAN LEEUWEN, J. Continuous floc image analyser (C-FIA) for tracking floc particle dynamics during coagulation-flocculation-settling processes. **Environ. Sci. (Camb)**, 9, 1331–1341, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2ew00389a>
- DENG, X.; OTAIBI, M.; FAHMI, M.; MURTAZA, M.; KAMAL, M.S.; PATIL, S.; HUSSAIN, S. M. S. Synergistic effects of chelating agents and surfactants for chemical EOR in carbonates. **Pet. Sci.**, 22, 4753–4765, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2025.07.009>
- DUDEK, M.; VIK, E.A.; AANESSEN, S.V.; ØYE, G. Colloid chemistry and experimental techniques for understanding fundamental behaviour of produced water in oil and gas production. **Adv. Colloid Interface Sci.**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102105>
- FANG, S.; HU, W.; TANG, Q.; WANG, M.; WANG, X.; DUAN, M. Synthesis of polytriethanolamine based surfactant and its flotation performance evaluation of oilfield produced water treatment. **Journal of Dispersion Science and Technology**, 44(2), 309–316, 2023.



GAO, B.; JIA, Y.; ZHANG, Y.; LI, Q.; YUE, Q. Performance of dithiocarbamate-type flocculant in treating simulated polymer flooding produced water. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 1, p. 37-43, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60370-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60370-1)

GREGORY, J.; NELSON, D. W. MONITORING OF AGGREGATES IN FLOWING SUSPENSIONS. In: **Colloids and Surfaces** (Vol. 18), 1986.

HAO, Z.; ZHANG, W.; CHEN, W.; MEI, P.; LAI, L. Relationship between the molecular structure of different dithiocarbamates and their oil removal performance. **Water Science & Technology**, v. 86, n. 3, p. 467-478, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2022.221>

HUANG, B.; CHEN, H.; HUANG, K.; ZHANG, W.; FU, C. Study on the coalescence characteristics of oil droplets and molecular mechanism of oil film drainage in alkali-surfactant-polymer flooding produced water. **Process Safety and Environmental Protection**, 203, 107772, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107772>

JIA, Y.; GAO, B.; LU, L.; WANG, X.; XU, X. Flocculation mechanism and oil removal performance of dithiocarbamate. **China Environmental Science**, 29(2), 201–206, 2009. DOI: [https://doi.org/1000-6923\(2009\)02-0201-06](https://doi.org/1000-6923(2009)02-0201-06)

JING, J.; SHAN, Y.; WANG, N.; SUN, J.; JIANG, C.; CAO, L.; SONG, X. The Influencing Factors and Mechanism of Anionic and Zwitterionic Surfactant on Viscosity Reduction in Heavy O/W Emulsions. **ACS Omega**, 9(37), 39259–39276, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c07009>

KHEDHER, M.; AWAD, J.; DONNER, E.; DRIGO, B.; FABRIS, R.; HARRIS, M.; BRAUN, K.; CHOW, C. W. K. Using the Flocculation Index to optimise coagulant dosing during drinking water treatment. **Journal of Water Process Engineering**, 51, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103394>

LI, Y.; ZENG, X.; LIU, Y.; YAN, S.; HU, Z.; NI, Y. Study on the treatment of copper-electroplating wastewater by chemical trapping and flocculation. **Separation and Purification Technology**, v. 31, n. 1, p. 91-95, 2003. DOI: [10.1016/S1383-5866\(02\)00162-4](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(02)00162-4).

MOORE, L. R.; KEMEFA, C.; TAYLOR, J.; ERICKSON, G. Impact of Water Chemistry on Zwitterionic Foams for Enhanced Oil Recovery. **Journal of Surfactants and Detergents**, 28(6), 1225–1234, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsde.12874>

PICCIOLI, M.; AANESEN, S. V.; ZHAO, H.; DUDEK, M.; ØYE, G. Gas flotation of petroleum produced water: A review on status, fundamental aspects, and perspectives. **Energy and Fuels**, 34(12), 15579–15592, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03262>

RAMPHAL, S. R.; SIBIYA, M. S. Optimization of coagulation-flocculation parameters using a photometric dispersion analyser. **Drinking Water Engineering and Science**, 7(2), 73–82, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/dwes-7-73-2014>

RIBEIRO, J. A. E.; OLIVEIRA, L. B. S.; OLIVEIRA, G. V. B.; SILVA, D. C.; WANDERLEY NETO, A. O.; RODRIGUES, M. A. F. Technological advances and operational challenges of the FAWAG (Foam-Assisted Water Alternating Gas) method in advanced oil recovery: a comprehensive review of principles, applications, and future perspectives. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 257, p. 214206, 2026.

WALSH, J. M. **Produced water: equipment, process configuration, applications**. 1st ed. Houston: Petro Water Technology, LLC, 2019. v. 2. ISBN 978-1-7322736-1-0.

WANG, C.; LÜ, Y.; SONG, C.; ZHANG, D.; RONG, F.; HE, L. Separation of emulsified crude oil from produced water by gas flotation: A review. **Science of the Total Environment**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157304> Wu, 2025

WU, Q.; LIU, T.; XU, X.; YANG, J. A Lignin-Based Zwitterionic Surfactant Facilitates Heavy Oil Viscosity Reduction via Interfacial Modification and Molecular Aggregation Disruption in High-Salinity Reservoirs. **Molecules**, 30(11), 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules30112419>



XIN, Y.; ZHAO, L.; SONG, K.; LV, X.; YANG, B.; GUO, F.; HU, M. The physicochemical mechanism of iron removal of aluminum sulfate solution by a novel synthesis process. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 182, p. 334-343, 2022. DOI: 10.1016/j.cherd.2022.03.014

XIONG, D.; AHMED, S.; ALAMERI, W.; AL-SHALABI, E.W. Experimental Evaluation of Zwitterionic and Cationic Surfactants to Optimize Bulk Foam Properties for Gas Mobility Control in High-Salinity Carbonates. **Energy and Fuels**, 37, 260–272, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03127>

YANG, D.; HE, D.; HUANG, Y.; MA, L.; YANG, R.; DUAN, M.; FANG, S.; XIONG, Y. Real-time and quantitative investigation of zwitterionic surfactant interaction at oil-water interface: Interferometry experimental and MD simulation insights. **Journal of Molecular Liquids**, 398, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124265>

YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. The effect of rapid mixing on the break-up and re-formation of flocs. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 79(7), 782–788, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.1056>

ZHANG, Q.; DUAN, X.; ZHANG, Y.; JIN, Y., LI, C.; ZHOU, S.; ZHANG, W. Effect of hydrophilic headgroup structure on the self-assembly of cocamidopropyl betaine and cocamidopropyl hydroxysultaine. **Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.**, 739, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2026.140073>