DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE PARA PREVISÃO DO TAMANHO DE GOTA EM VAZAMENTOS SUBMARINOS DE ÓLEO: REPRODUÇÃO E APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE UPSCALING

Eduardo Cavalheiro Pentiado, Luiz Fernando Damasco, Bruno Yan dos Anjos, Luiz A. Hegele Júnior

INTRODUÇÃO

O tamanho das gotas formadas na saída de um vazamento submarino influencia o destino do óleo. Gotas menores sobem mais lentamente, ficam mais expostas à dissolução e à biodegradação e, por isso, uma quantidade menor de óleo alcança a superfície (JOHANSEN; BRANDVIK; FAROOQ, 2013). Existem duas técnicas de resposta que atuam sobre esse diâmetro da gota, sendo elas a injeção submarina de dispersante químico (SSDI), que reduz a tensão interfacial entre óleo e água, e a dispersão mecânica submarina (SSMD), em que um jato de água aplicado ortogonalmente fragmenta as gotículas por transferência de momento (BRANDVIK et al., 2021). No SSDI, a previsão do diâmetro da gota sustenta-se na teoria de quebra de gotas em escoamento turbulento, governada pela competição entre inércia, tensão interfacial e viscosidade (CALABRESE; CHANG; DANG, 1986; WANG; CALABRESE, 1986). No SSMD, apoia-se na quantidade de movimento transferida pelo jato, traduzida em um fator de redução empírico aplicado ao diâmetro não tratado (BRANDVIK et al., 2021).

O projeto SUBJET, conduzido pelo Geoenergia Lab da UDESC em convênio com a Petrobras, avalia essas técnicas para dez óleos brasileiros. Ensaios em mesoescala realizados pelo SINTEF Ocean geraram 180 observações de diâmetro mediano. Esses dados foram utilizados para consolidar uma metodologia de upscaling, que transfere resultados obtidos com bocais de 2 e 3 mm para a escala de um vazamento real (GEOENERGIA LAB, 2026). Antes deste trabalho, a metodologia estava disponível apenas em um relatório técnico e em planilhas com fórmulas embutidas. O objetivo foi implementá-la integralmente em um software, verificar a reprodução dos valores publicados, aplicá-la a cenários operacionais e torná-la extensível a novos óleos, visando a escalabilidade futura do presente protótipo.

DESENVOLVIMENTO

A base reúne dez óleos em três configurações de liberação: bocal de 3 mm sem gás, bocal de 2 mm sem gás e bocal de 2 mm com gás. Foram consideradas 90 observações de SSDI e 90 de SSMD, consolidadas em uma tabela mestra de 180 linhas. No SSDI, o diâmetro é obtido pelo modelo de Weber modificado e corrigido por um termo viscoso proporcional ao número de capilaridade. Como o modelo é implícito em d_{50}/D, a solução é iterativa. O gás e a flutuabilidade são incorporados por meio da massa específica da mistura, da velocidade equivalente de momento e do número de Froude. No SSMD, o jato é descrito por fatores de ampliação de momento e de eficiência, que produzem o fator de redução aplicado ao diâmetro não tratado. A distribuição é reconstruída pela função Rosin-Rammler, que fornece d_{10}, d_{90} e o span. Foram implementadas três estratégias de calibração. A estratégia Local é ajustada por óleo. A estratégia Global utiliza um único conjunto de coeficientes para toda a base. A estratégia Reference utiliza os coeficientes publicados pelo SINTEF Ocean. Nas estratégias utilizadas, os coeficientes minimizam a diferença entre os valores medidos e previstos no espaço logarítmico de d_{50}/D. O software foi desenvolvido utilizando linguagem Python e organizado em camadas de física, cálculos, dados, casos de uso e interface gráfica. Ele opera nos modos de reprodução e de aplicação e reúne 131 testes automatizados, que verificam o exemplo numérico do Capítulo 8, as estatísticas do Capítulo 4 e os cenários do Capítulo 5 do relatório de referência.

RESULTADOS

O exemplo numérico do Capítulo 8, para o óleo 3015, foi conferido termo a termo em 59 verificações: velocidade efetiva de 2,07 m/s, número de Weber de 300,59 e diâmetro não tratado de 21,90 mm, com desvios relativos entre 10^{-9} e 10^{-7}. Para as 180 observações, os valores reproduzidos diferiram dos publicados em no máximo 0,53% para o d_{50} previsto do SSDI, 0,29% para o fator de redução do SSMD e 0,51% para o d_{50} tratado. As Figuras 1 e 2 recuperam a estrutura do ajuste: no SSDI, a estratégia Local apresentou inclinação de 0,83 e R^2 de 0,83; no SSMD, 0,82 e 0,88, contra inclinação de 0,90 da estratégia Reference. A estratégia Local foi mais precisa nas grandezas isoladas, mas a Reference apresentou o menor erro no diâmetro tratado, pois os desvios se compõem de forma multiplicativa.

Nos cenários operacionais, com diâmetro de liberação de 0,50 m e vazão de 11.200 m^3/d, foram reproduzidos 140 valores, correspondentes a dez óleos, sete condições de tratamento e dois cenários de vazão. O desvio mediano foi de 0,33% sem gás e 0,39% com gás, e 90% dos valores ficaram dentro de 5%. O diâmetro não tratado variou de 16,2 a 25,6 mm e as técnicas de resposta o reduziram para 0,85 a 3,59 mm: no óleo 3015, o dispersante levou o diâmetro de 21,6 para 0,99 mm; no óleo 4662, de maior viscosidade, os dispersantes chegaram a 14,5 mm, enquanto o jateamento a 55% da vazão alcançou 3,59 mm.

A reimplementação também permitiu revisar a metodologia desenvolvida pelo SINTEF Ocean e replicada pelo Geoenergia Lab. Para o óleo 3015, o otimizador do software reduziu a função objetivo em 0,05% em relação aos coeficientes publicados, que se mostram levemente subótimos. Os Capítulos 5 e 8 adotam viscosidades distintas para o mesmo óleo e cenário, o que resulta em diâmetros não tratados de 21,63 e 21,90 mm, ambos reproduzidos pelo software. A reta $c + d \cdot \mu/\sigma$ do fator de redução produziria diâmetro negativo fora da faixa de calibração, condição atingida pelo óleo 3014; o software identifica o caso e marca as saídas operacionais como extrapoladas, pois o diâmetro de liberação é 167 vezes maior que o maior bocal ensaiado. Na validação leave-one-oil-out, somente o coeficiente A foi previsível a partir das propriedades do óleo, com erro de 16% a 23%, e os coeficientes c e d apresentaram correlação com o teor de parafina de +0,76 e −0,75.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia de upscaling desenvolvida pelo SINTEF Ocean foi reproduzida, no âmbito do projeto SUBJET, pelo Geoenergia Lab da UDESC para fins de estudo, pesquisa e avaliação de sua aplicabilidade. O trabalho resultou no desenvolvimento de um software executável e auditável, capaz de reproduzir os cálculos, resultados experimentais e cenários operacionais da metodologia de referência. A implementação permitiu avaliar as equações associadas à dispersão química submarina (SSDI) e à dispersão mecânica submarina (SSMD), além de identificar possibilidades de aprimoramento dos modelos e coeficientes de calibração. Os resultados demonstraram a capacidade do software em reproduzir o exemplo numérico e os cenários operacionais publicados, evidenciando também limitações relacionadas à base experimental, à faixa de calibração e à extrapolação para condições distintas das originalmente estudadas. Como continuidade, pretende-se aprimorar as equações de SSDI e SSMD, investigar novas correlações para as propriedades dos óleos, ampliar a base de dados e avaliar os intervalos de validade dos parâmetros calibrados. Busca-se ainda incorporar funcionalidades para análise de diferentes óleos, condições logísticas e cenários operacionais, visando apoiar o planejamento e a tomada de decisões em situações de vazamento submarino. Dessa forma, o software poderá evoluir de uma ferramenta de reprodução e pesquisa para uma solução integrada de suporte às estratégias de resposta a vazamentos de óleo.

Palavras-chave: vazamento submarino; dispersão submarina; upscaling; tamanho de gota.

ANEXOS

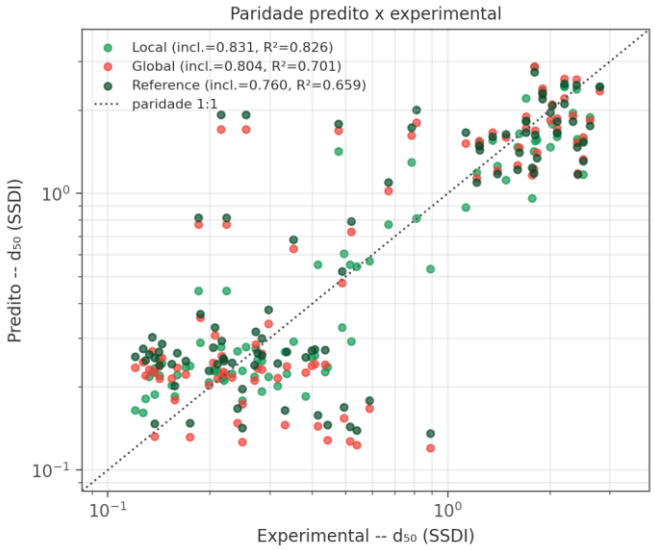


Figura 1. *Paridade 1:1 entre os valores previstos pelo software e os medidos em laboratório para o diâmetro mediano do SSDI, nas 90 observações experimentais do SINTEF Ocean, nas três estratégias de calibração.*

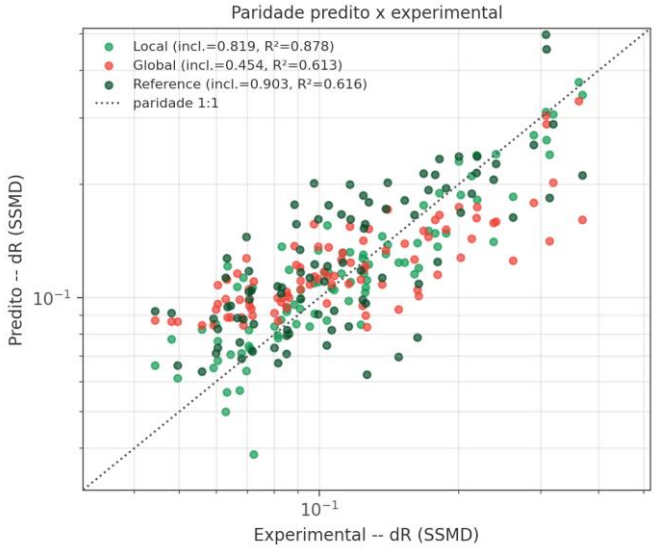


Figura 2. *Paridade 1:1 entre os valores previstos pelo software e os medidos em laboratório para o fator de redução do SSMD, nas 90 observações experimentais do SINTEF Ocean, para três estratégias de calibração.*

AGRADECIMENTOS

Este estudo faz parte do projeto "Modelagem física e numérica de jato submarino de óleo baseada em experimentos", um acordo de cooperação entre UDESC e Petrobras (número 0050.0125248.23.9), regulamentado pelas cláusulas de investimento em P, D&I da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, Resolução 918/2023).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANDVIK, P. J.; DAVIES, E.; LEIRVIK, F.; JOHANSEN, Ø.; BELORE, R. Large-scale basin testing to simulate realistic oil droplet distributions from subsea release of oil and the effect of subsea dispersant injection. *Marine Pollution Bulletin*, v. 163, 111934, 2021.

CALABRESE, R. V.; CHANG, T. P. K.; DANG, P. T. Drop breakup in turbulent stirred-tank contactors. Part I: effect of dispersed-phase viscosity. *AIChE Journal*, v. 32, n. 4, p. 657-666, 1986.

GEOENERGIA LAB. *Upscaling SUBJET*: sumário executivo. Balneário Camboriú: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2026. Relatório técnico.

JOHANSEN, Ø.; BRANDVIK, P. J.; FAROOQ, U. Droplet breakup in subsea oil releases. Part 2: predictions of droplet size distributions with and without injection of chemical dispersants. *Marine Pollution Bulletin*, v. 73, n. 1, p. 327-335, 2013.

WANG, C. Y.; CALABRESE, R. V. Drop breakup in turbulent stirred-tank contactors. Part II: relative influence of viscosity and interfacial tension. *AIChE Journal*, v. 32, n. 4, p. 667-676, 1986.

BOLSISTA: Eduardo Cavalheiro Pentiado
MODALIDADE DE BOLSA: Bolsa de Inovação
VIGÊNCIA: 01/08/2026 a 01/01/2027 / Total: 6 meses
ORIENTADOR(A): Luiz A. Hegele Júnior
CENTRO DE ENSINO: CESFI
DEPARTAMENTO: Departamento de Engenharia de Petróleo
ÁREAS DE CONHECIMENTO: Engenharia / Engenharia de Petróleo
TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Modelagem física e numérica de jato submarino de óleo baseada em experimentos
Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: NPP4318-2023