DEPENDÊNCIA HIDRODINÂMICA DOS COEFICIENTES EMPÍRICOS NA PREVISÃO DE TAMANHO DE GOTA EM DISPERSÃO QUÍMICA SUBMARINA DE ÓLEO

Luiz Fernando Damasco, Eduardo C. Pentiado, Bruno Y. dos Anjos, Luiz A. Hegele Jr.

INTRODUÇÃO

Em um vazamento submarino, o tamanho das gotas formadas na saída do poço governa o destino do óleo na coluna d'água. Gotas menores sobem mais devagar, permanecem mais tempo submersas e ficam mais expostas à dissolução e à biodegradação, de modo que menos óleo alcança a superfície (JOHANSEN; BRANDVIK; FAROOQ, 2013). A injeção subsuperficial de dispersante químico é uma das técnicas empregadas para reduzir o diâmetro mediano em volume, d_{50}, definido como o diâmetro abaixo do qual se encontra metade do volume de óleo disperso.

Este trabalho integra o projeto de *upscaling* conduzido pelo Geoenergia Lab da UDESC, em cooperação com a Petrobras e com dados experimentais do SINTEF Ocean. A previsão do d_{50} apoia-se em uma correlação de Weber modificada, na qual o diâmetro adimensional d_{50}/D decorre da quebra inercial, corrigida pela resistência viscosa do óleo. $d_{50}/D = A \cdot [\, We / (1 + B \cdot Ca \cdot (d_{50}/D)^{1/3}) \,]^{-3/5}$

O coeficiente A fixa a amplitude da quebra inercial e o coeficiente B pondera o peso da viscosidade. Ambos são tratados como constantes empíricas e obtidos por ajuste aos dados experimentais, de modo que a qualidade da previsão depende da determinação desses dois valores. Neste trabalho, a proposta é otimizar as regressões de A e B para representar os coeficientes e reduzir o erro entre o diâmetro calculado e o medido e, por consequência, o erro da distribuição de tamanhos reconstruída a partir dele.

O objetivo é otimizar as metodologias de regressão de A e B, representando esses coeficientes em função de grupos adimensionais e buscando melhorar as estimativas de vazamento de óleos em escala de campo.

DESENVOLVIMENTO

A base reúne 60 observações de dispersão química da planilha experimental do SINTEF Ocean, abrangendo dez óleos, três configurações de liberação e dois dispersantes comerciais sendo eles Finasol (IBC) e Corexit (C9500). A identidade dos óleos foi confirmada contra a tabela de tipos de óleo do projeto, verificando que a ordem dos ensaios se repete nas três abas da planilha.

A equação é implícita, pois o diâmetro aparece nos dois lados. Cada observação foi resolvida por Newton-Raphson com derivada analítica, controle de positividade, amortecimento de passo e etapa preliminar de ponto fixo nos casos de forte correção viscosa. A linha de base adotada foi com os dados do SINTEF, sendo A = 24,6 e B = 0,08.

O erro foi analisado como resíduo logarítmico entre o diâmetro adimensional medido e o previsto, o que identifica quais grandezas se associam às falhas sistemáticas. Quatro grupos adimensionais foram tomados como candidatos: Reynolds, Froude, capilaridade e o Weber modificado.

Sete estratégias foram avaliadas de forma incremental, da recalibração de um par constante até a modelagem dos coeficientes como funções dos grupos adimensionais, ajustada por regressão regularizada no espaço logarítmico. Na etapa final, todas as quinze combinações não vazias dos quatro grupos foram cruzadas com três famílias, conforme variem apenas A, apenas B ou ambos, resultando em 450 avaliações.

Todas as avaliações foram feitas por validação leave-one-oil-out: em cada rodada um óleo inteiro é retirado, o modelo é ajustado nos nove restantes e a previsão ocorre sem recalibração nele. Dois critérios de agregação foram mantidos lado a lado, a média do erro quadrático entre óleos e a média das reduções percentuais de cada óleo, porque ponderam de forma diferente os óleos de erro elevado.

RESULTADOS

A formulação de referência estabelece a linha de base com RMSE médio de 0,3121 mm e erro relativo absoluto médio de 86,6%. A Tabela 1 reúne o desempenho das estratégias avaliadas.

O melhor resultado da busca foi obtido com A e B dependentes simultaneamente dos números de Froude e de capilaridade, alcançando RMSE médio de 0,2184 mm e erro relativo de 55,4%, o que corresponde a reduções de 30,0% e 36,0% em relação à referência. O erro diminui em oito dos dez óleos, conforme a Figura 1(b).

Entre os 45 candidatos avaliados, esse foi o único a apresentar o melhor desempenho nos dois critérios de agregação, como mostra a Figura 1(a). Apenas quatro dos 45 obtiveram redução média positiva quando cada óleo é ponderado igualmente, o que reduz a possibilidade de o resultado decorrer da métrica adotada.

A família de modelo apresentou comportamento consistente entre os candidatos. Dos dez melhores por erro quadrático médio, nove pertencem à família em que ambos os coeficientes variam, o que sugere que a limitação da formulação atual não se concentra em um único termo.

A etapa anterior, em que a família e a regularização foram escolhidas apenas dentro dos óleos de treinamento, com Reynolds e Froude, obteve RMSE médio de 0,2150 mm e erro relativo de 52,7%. Como ali a escolha do modelo não teve acesso ao óleo de teste, esse valor é a estimativa livre de viés de seleção, e concorda com a busca exaustiva: duas rotas independentes convergem para uma redução em torno de 30%.

Cabe registrar a principal limitação metodológica. Na busca exaustiva, o vencedor foi escolhido após comparar todos os candidatos no próprio conjunto de teste, o que introduz viés de seleção e torna a estimativa otimista. A confirmação depende de uma camada externa de validação com óleos reservados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicam que o erro da equação de previsão apresenta estrutura associada a grandezas hidrodinâmicas. Permitir que os coeficientes empíricos variem com essas grandezas reduziu o erro médio de previsão em cerca de 30%, em validação sobre óleos que não participaram do ajuste, e duas rotas de seleção independentes chegaram ao mesmo patamar.

A identificação da combinação exata permanece em aberto. A busca apontou os números de Froude e de capilaridade como os mais informativos, e a etapa sem viés de seleção havia apontado Reynolds e Froude. A concordância entre as duas rotas está no ganho obtido e na família de modelo em que ambos os coeficientes variam, sem que se possa fixar ainda um conjunto único de variáveis.

Os resultados são evidência exploratória, dado o número reduzido de observações por óleo, o viés de seleção da etapa final e a piora observada em parte dos óleos. A continuidade prevista é aplicar validação aninhada com óleos reservados, separar os resultados por bocal, presença de gás e dispersante, e estender a avaliação à distribuição completa de gotas, além do diâmetro mediano.

Palavras-chave: vazamento submarino de óleo; correlação de Weber modificada; coeficientes empíricos; validação cruzada.

ANEXOS

Tabela 1. *Desempenho das estratégias avaliadas por validação leave-one-oil-out sobre as 60 observações da base experimental.*

Estratégia	RMSE médio (mm)	ARE médio (%)	Redução do RMSE (%)
Referência (A e B fixos)	0,31	86,6	—
A e B constantes recalibrados	0,28	75,3	8,2
A e B dependentes de Re	0,23	59,1	25,0
Correção residual regularizada	0,24	63,7	19,9
A ou B com Re e Fr, seleção interna	0,21	52,7	31,1
A e B com Fr e Ca, busca exaustiva	0,21	55,4	30,0

Fonte: elaborada pelos autores (2026).

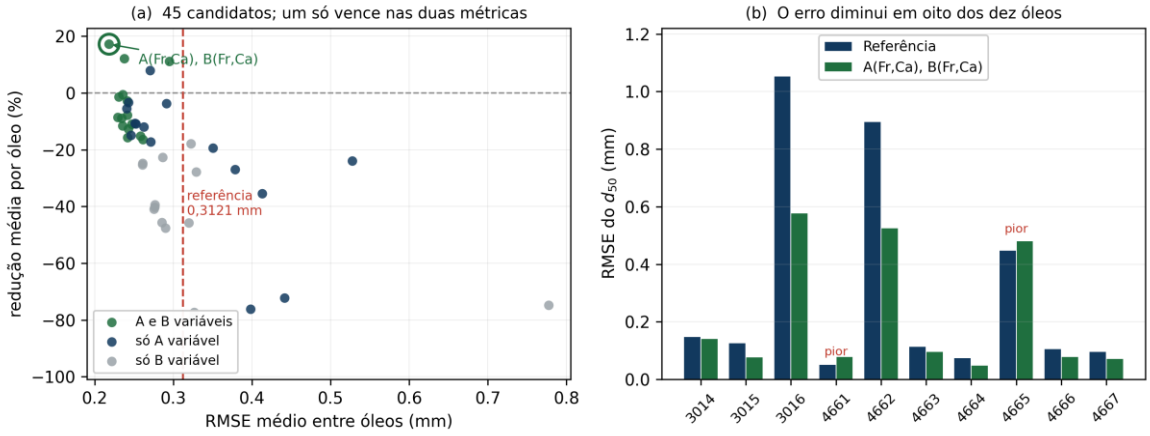


Figura 1. *(a) Os 45 candidatos da busca exaustiva nos dois critérios de agregação; o candidato destacado é o único que apresenta o melhor desempenho em ambos. (b) Erro de previsão por óleo, comparando a formulação de referência e o candidato selecionado.*

Fonte: elaborada pelos autores (2026).

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

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.

HINZE, J. O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. AIChE Journal, v. 1, n. 3, p. 289-295, 1955.

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.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Luiz Fernando Damasco
MODALIDADE DE BOLSA: Bolsa de inovação
VIGÊNCIA: 08/2026 a 01/2027– Total: 06 meses
ORIENTADOR(A): Luiz A. Hegele Jr.
CENTRO DE ENSINO: Cesfi
DEPARTAMENTO: Departamento de engenharia de petróleo
ÁREAS DE CONHECIMENTO: Engenharias / Engenharia de petróleo
TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: SUBJET — Modelagem física e numérica de jato submarino de óleo baseada em experimentos
Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: NPP4318-2023