# CALIBRAÇÃO PARAMÉTRICA DO SSDI E IDENTIFICAÇÃO DE REGIMES DISTINTOS DE QUEBRA DE JATO A PARTIR DAS PROPRIEDADES DO CASO

Nicholas Otoichi Haraguchi Garcia, Bruno Yan dos Anjos, Luiz Adolfo Hegele Jr.

## INTRODUÇÃO

Em vazamentos submarinos de óleo, o diâmetro mediano das gotas ($d_{50}$) define o destino do poluente: gotas grandes ascendem e formam mancha na superfície; gotas pequenas permanecem dispersas na coluna d'água. A injeção submarina de dispersante químico (SSDI, *subsea dispersant injection*) reduz a tensão interfacial óleo-água e, com ela, o $d_{50}$. A correlação de Weber modificado de Johansen, Brandvik e Farooq (2013), baseada em Hinze (1955) e em Wang e Calabrese (1986), prediz o $d_{50}$ com duas constantes empíricas, A = 24,8 e B = 0,08, comuns a todas as condições, uma hipótese que falha nos casos com dispersante.

Os objetivos foram: (i) reformular A e B como funções das propriedades de cada caso, preservando a estrutura da correlação; e (ii) verificar se os casos com e sem dispersante ocupam regimes distintos de quebra de jato.

## DESENVOLVIMENTO

Foram analisados 90 ensaios de bancada com dez óleos e três configurações de bocal (2 mm, 3 mm e 2 mm com gás associado): 30 casos sem tratamento e 60 com os dispersantes Corexit 9500 e IBC. Da velocidade efetiva do jato obtiveram-se os números de Weber (We), Reynolds (Re), capilar (Ca = We/Re) e Ohnesorge (Oh). A correlação fornece $\delta = d_{50}/D$, sendo D o diâmetro do bocal, pela equação implícita $\delta = A\cdot(We^*)^{-3/5}$, com $We^* = We/(1 + B\cdot Ca\cdot\delta^{1/3})$.

Propõe-se que A e B dependam de quatro descritores do caso:

$$\ln A = \beta_{A0} + \beta_{A1}\cdot\ln Oh_{ref} + \beta_{A2}\cdot g_D + \beta_{A3}\cdot\varphi_g + \beta_{A4}\cdot\ln(\sigma_{ref}/\sigma_{eff})$$

$$\ln B = \beta_{B0} + \beta_{B1}\cdot\ln Oh_{ref} + \beta_{B2}\cdot g_D + \beta_{B3}\cdot\varphi_g + \beta_{B4}\cdot\ln(\sigma_{ref}/\sigma_{eff})$$

em que $Oh_{ref} = \mu/(\rho\cdot\sigma_{ref}\cdot D)^{1/2}$ é o Ohnesorge do óleo sem tratamento, com viscosidade $\mu$ e densidade $\rho$; $g_D = \min[\max(\ln(D/3\text{ mm}), \ln(2/3)), 0]$ é a coordenada do bocal, limitada à faixa calibrada de 2 a 3 mm; $\varphi_g$ é a fração volumétrica de gás; e $\sigma_{ref}/\sigma_{eff}$ é a redução de tensão interfacial do caso. A forma exponencial garante A, B > 0. Os dez coeficientes $\beta$ foram ajustados por mínimos quadrados robustos (perda soft-L1 sobre ln(previsto/medido)) em duas calibrações: Global, única para os dez óleos (10 parâmetros), e Local, que mantém as sensibilidades da Global e recalibra $\beta_{A0}$ e $\beta_{B0}$ por óleo (28 parâmetros). O erro relativo médio, |previsto − medido|/medido, foi comparado ao da correlação original (referência) e ao de A e B escalares recalibrados (2 e 20 parâmetros); as versões Global foram ainda avaliadas por validação cruzada, excluindo um óleo por vez.

Os regimes foram avaliados pela razão We*/We, que mede a atenuação do Weber pelo termo viscoso, calculada com os coeficientes da calibração Local e com as constantes originais. No limite $B\cdot Ca\cdot\delta^{1/3} \gg 1$, a correlação assume a forma explícita $\delta = A^{5/4}\cdot B^{3/4}\cdot Re^{-3/4}$, independente de We e de $\sigma$. Usou-se ainda o mapa Oh × Re, em que cada fronteira é uma linha de Weber constante, pois $Oh\cdot Re = We^{1/2}$. Adotou-se a fronteira de atomização líquido–líquido Oh = 18/Re (We = 324), obtida com $CO_2$ líquido em água (TANG et al., 2002 apud RIESTENBERG et al., 2004); como o $CO_2$ é muito menos viscoso que o óleo, propõe-se supor a fronteira universal no Ohnesorge modificado $Z^* = (3\mu + \mu_a)/(\rho\cdot\sigma\cdot D)^{1/2}$ (MASUTANI; ADAMS, 2001), que inclui a viscosidade da água $\mu_a$: como $Z^*/Oh = 3 + \mu_a/\mu$, a reta publicada equivale a $Z^*\cdot Re \approx 326$ para o $CO_2$, e o limite de cada óleo passa a ser $We = [326/(3 + \mu_a/\mu)]^2$.

## RESULTADOS

Sobre os 90 casos, o erro relativo médio passou de 64,3% (referência) para 22,1% (Local) e 23,6% (Global) (Figura 1); com dispersante, de 86,4% para 25,5% e 26,8%; sem tratamento, de 20,1% para 15,3% e 17,3%. Com A e B escalares recalibrados, os erros foram de 30,1% (Local) e 57,9% (Global), 35,1% e 76,6% com dispersante, e a Local produziu $B < 0$, sem sentido físico, em 18 casos (dois óleos). Na validação cruzada, a Global proposta errou 30,1% nos óleos excluídos do ajuste, contra 62,4% da escalar. Diante dos ±50% de limite de confiança de 95% dos melhores modelos avaliados por Cooper, Adams e Gros (2021), em outro banco, ficaram nessa faixa todas as previsões sem tratamento e 90,0% (Local) e 86,7% (Global) das com dispersante.

A mediana de We*/We foi de 0,97 sem tratamento e de $8{,}0 \times 10^{-4}$ com dispersante (45 dos 60 casos tratados abaixo de 0,01); com as constantes originais, 0,91 e 0,043, de modo que a separação não decorre do ajuste. Sem dispersante o termo viscoso é desprezível e vale a escala em We; com dispersante ele domina, e a forma explícita em Re reproduz a solução completa com erro mediano de 0,07%, em acordo com escalas em Reynolds para jatos com e sem dispersante (LI et al., 2016) e com modelos que incorporam a viscosidade do óleo sob baixa tensão interfacial (ZHAO et al., 2014; LI et al., 2017). Como essa forma não contém σ, a sensibilidade do $d_{50}$ a $\sigma_{ref}/\sigma_{eff}$ é $n = (5\beta_{A4} + 3\beta_{B4})/4 \approx 0{,}08$: para $\sigma_{ref}/\sigma_{eff}$ de 2,3 a 2950, o fator é de 1,1 a 1,9, contra reduções medidas de 1,4 a 20 vezes (mediana de 7,1).

No plano Oh × Re (Figura 2), todos os casos com dispersante ($We \geq 1554$) situam-se acima da fronteira $Oh = 18/Re$, e 48 dos 60 permanecem acima dela após a transferência por Z*, cujo limite varia de $We = 1{,}0 \times 10^4$ a $1{,}2 \times 10^4$ conforme o óleo (os 12 restantes são dos dois óleos mais viscosos). A classificação dos casos sem tratamento (We entre 245 e 764) depende dessa correção: 22 dos 30 ficam acima da fronteira original e nenhum acima da corrigida. O deslocamento dos casos tratados é coerente com a intensificação da atomização pela redução da tensão interfacial em jatos de óleo em água (BOUFADEL et al., 2020), cujas fronteiras diferem das de jatos em gás (MASUTANI; ADAMS, 2001).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A formulação proposta preservou a estrutura da correlação, reduziu o erro de predição do $d_{50}$, sobretudo com dispersante, e reduziu à metade o erro para óleos fora da calibração. Os casos tratados ocupam a região de atomização e seguem uma lei de escala em Reynolds, na qual a redução do $d_{50}$ decorre da troca de regime, e não de uma dependência forte das constantes em relação a $\sigma_{ref}/\sigma_{eff}$. São limitações a faixa restrita de bocais, o uso de fronteiras obtidas com $CO_2$ líquido, que deixa indefinida a classificação dos casos sem tratamento, e o desempenho com dispersante abaixo do patamar de ±50% dos melhores modelos.

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 (nº 0050.0125248.23.9), regulamentado pelas cláusulas de investimento em PD&I da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, Resolução 918/2023).

**Palavras-chave:** vazamento submarino; dispersante químico; tamanho de gota; correlação de Weber modificado; regime de quebra de jato.

**ANEXOS**

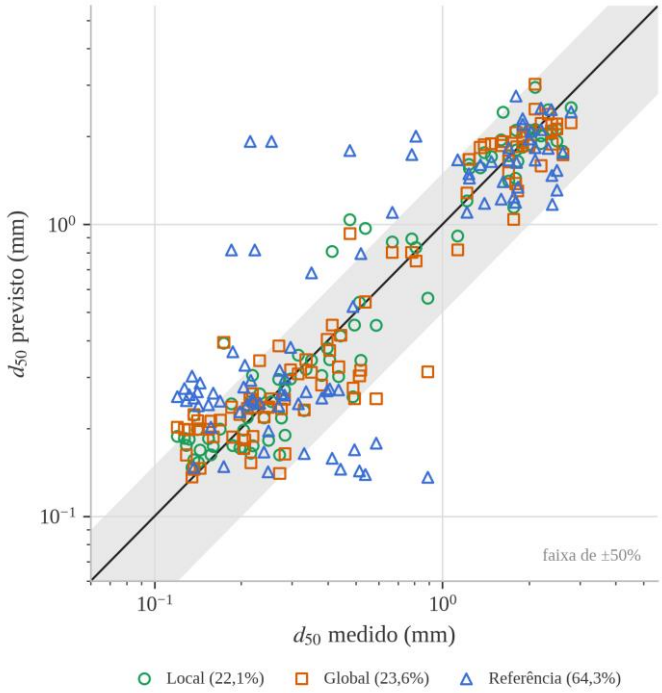



**Figura 1.** *Diâmetro mediano previsto contra o medido para os 90 casos (30 sem tratamento e 60 com dispersante), com o erro relativo médio de cada método; a faixa cinza indica ±50%.*

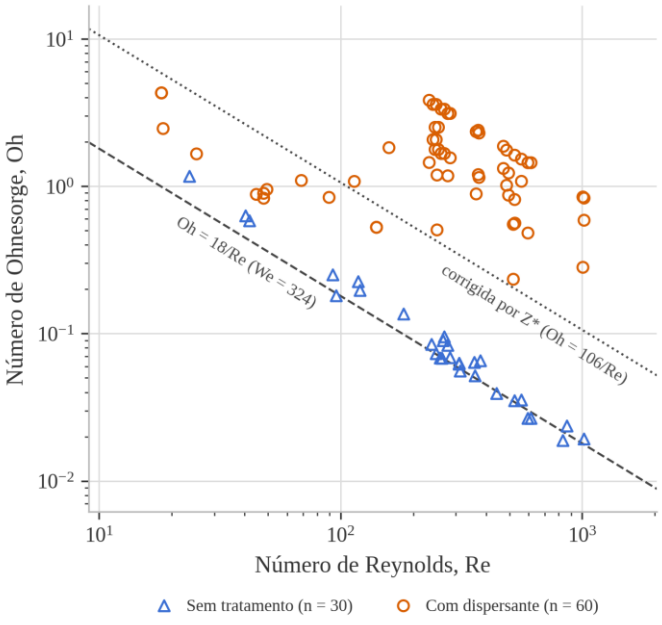



**Figura 2.** *Casos sem tratamento e com dispersante no plano Ohnesorge × Reynolds, com a fronteira de atomização para jatos líquido–líquido, Oh = 18/Re (TANG et al., 2002 apud RIESTENBERG et al., 2004), e a mesma fronteira transferida pelo Ohnesorge modificado Z* proposto, representada pela mediana dos óleos (Oh = 106/Re).*

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BOUFADEL, M. C.; SOCOLOFSKY, S.; KATZ, J.; YANG, D.; DASKIRAN, C.; DEWAR, W. **A review on multiphase underwater jets and plumes: droplets, hydrodynamics, and chemistry.** Reviews of Geophysics, v. 58, art. e2020RG000703, 2020.

COOPER, C.; ADAMS, E.; GROS, J. **An evaluation of models that estimate droplet size from subsurface oil releases.** Marine Pollution Bulletin, v. 163, art. 111932, 2021.

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.

LI, P.; WENG, L.; NIU, H.; ROBINSON, B.; KING, T.; CONMY, R.; LEE, K.; LIU, L. **Reynolds number scaling to predict droplet size distribution in dispersed and undispersed subsurface oil releases.** Marine Pollution Bulletin, v. 113, n. 1, p. 332-342, 2016.

LI, Z.; SPAULDING, M.; McCAY, D. F.; CROWLEY, D.; PAYNE, J. R. **Development of a unified oil droplet size distribution model with application to surface breaking waves and subsea blowout releases considering dispersant effects.** Marine Pollution Bulletin, v. 114, n. 1, p. 247-257, 2017.

MASUTANI, S. M.; ADAMS, E. E. **Experimental study of multi-phase plumes with application to deep ocean oil spills**. Final report. Honolulu: University of Hawaii; U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service, 2001.

RIESTENBERG, D.; CHIU, E.; GBORIGI, M.; LIANG, L.; WEST, O. R.; TSOURIS, C. **Investigation of jet breakup and droplet size distribution of liquid $CO_2$ and water systems: implications for $CO_2$ hydrate formation for ocean carbon sequestration.** American Mineralogist, v. 89, n. 8-9, p. 1240-1246, 2004.

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.

ZHAO, L.; BOUFADEL, M. C.; SOCOLOFSKY, S. A.; ADAMS, E.; KING, T.; LEE, K. **Evolution of droplets in subsea oil and gas blowouts: development and validation of the numerical model VDROP-J.** Marine Pollution Bulletin, v. 83, n. 1, p. 58-69, 2014.

**DADOS CADASTRAIS**

**BOLSISTA:** Nicholas Otoichi Haraguchi Garcia
**MODALIDADE DE BOLSA:** Bolsa de Inovação
**VIGÊNCIA:** 08/2025 a 12/2026 Total: 16 meses
**ORIENTADOR(A):** Luiz Adolfo 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