CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA ÓPTICO PARA DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS EM UMA BANCADA EXPERIMENTAL DE DISPERSÃO MECÂNICA SUBAQUÁTICA

Gabriel Romão Guergoleti, Pedro Manuel Granados Bonilla, Aníbal Alexandre Campos Bonilla, Luiz Adolfo Hegele Junior

INTRODUÇÃO

A dispersão mecânica subaquática consiste na fragmentação de uma fase líquida dispersa pela ação de forças hidrodinâmicas, sendo o tamanho das gotas um dos principais parâmetros utilizados para caracterizar o processo. Modelos de quebra de gotas em escoamentos turbulentos, como os propostos por Hinze (1955) e Wang e Calabrese (1986), relacionam o tamanho das gotas às condições do escoamento e às propriedades das fases envolvidas, destacando-se a dissipação de energia turbulenta, a tensão interfacial e a viscosidade. A determinação experimental direta da taxa de dissipação de energia turbulenta apresenta desafios (Wang et al., 2021). Dessa forma, uma alternativa é controlar as condições responsáveis pela geração do escoamento turbulento por meio das condições de saída dos jatos. Nesse contexto, a caracterização dos sistemas hidráulicos de uma bancada experimental permite estabelecer relações entre rotação, vazão e pressão e, consequentemente, definir condições de operação reproduzíveis. A bancada utilizada neste trabalho foi desenvolvida para investigar a interação entre jatos de água e óleo e integra sistemas hidráulicos, aquisição de imagens e medição do tamanho de partículas por difração a laser (BONILLA et al., 2026). A determinação do tamanho das partículas por análise de imagens apresenta potencial para caracterizar as dispersões produzidas na bancada, porém a confiabilidade das medidas depende das condições de aquisição e processamento. O sistema óptico utilizado neste trabalho possui configuração previamente estabelecida, enquanto o processamento das imagens é realizado por software desenvolvido para identificação dos contornos e estimativa dos diâmetros das partículas (ARISTIZABAL ALDANA et al., 2025). Assim, torna-se necessário avaliar as medidas obtidas por imagens por meio da comparação com uma técnica de referência (KELLY et al., 2006). Para isso, o LISST-200X, baseado em difração a laser, foi utilizado como instrumento de referência. Dessa forma, este trabalho busca caracterizar os subsistemas hidráulicos da bancada e avaliar a confiabilidade do sistema de aquisição e análise de imagens na determinação do tamanho de partículas, utilizando o LISST-200X como referência.

DESENVOLVIMENTO

A caracterização experimental foi realizada em três etapas. Inicialmente, foram determinadas as condições de temperatura para os fluidos utilizados no sistema de óleo. Em seguida, foram caracterizados os subsistemas hidráulicos de água e óleo. Por fim, foi avaliado o sistema de aquisição e análise de imagens por meio da comparação com o LISST-200X. Para determinação das condições térmicas, o sistema de óleo foi operado em circuito fechado, utilizando um bocal com dimensões equivalentes às do sistema aberto. A temperatura foi monitorada durante a operação na rotação máxima da bomba, sendo definida, para cada fluido, a menor temperatura na qual o aumento de 1 °C ocorresse em intervalo superior a 90s, correspondente à duração prevista dos ensaios. A caracterização hidráulica foi realizada para diferentes rotações das bombas, determinando-se as relações entre rotação, vazão e pressão. Após a estabilização das condições de operação, a vazão foi obtida pelo tempo necessário para coletar um volume conhecido, enquanto a pressão foi registrada na saída da bomba. Para cada condição foram realizadas cinco medições em diferentes baterias experimentais, permitindo avaliar a repetibilidade dos resultados. No sistema de óleo, os ensaios foram realizados nas temperaturas previamente estabelecidas para cada fluido. Avaliaram-se 30 amostras distintas de

areia para construção. Câmera e iluminação ficaram submersas, frente a frente, no aquário. Fotografou-se uma grade micrométrica a 12,4 cm da tampa da caixa de proteção da câmera com foco automático, depois fixado no modo manual. Retirada a grade, registrou-se uma imagem de fundo antes dos ensaios. O LISST-200X, adotado como referência, foi posicionado abaixo da câmera para amostrar o mesmo fluxo. Obtiveram-se múltiplas imagens e medições por amostra. O software de Aristizabal Aldana et al. (2025) forneceu as distribuições de tamanho por imagens, cujos D_{50} foram comparados aos de referência para avaliar a concordância e determinar uma relação de correção.

RESULTADOS

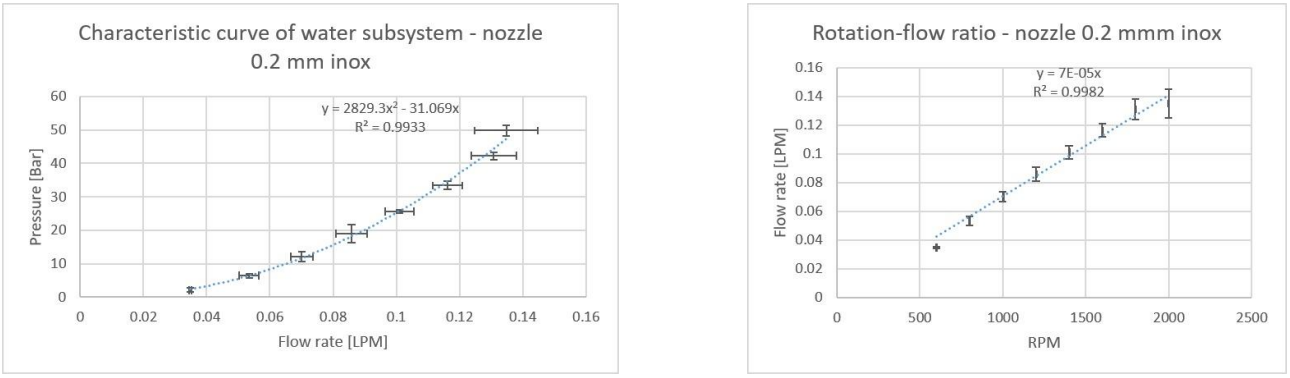
A caracterização do subsistema hidráulico de água, utilizando bocal de 0,2 mm, apresentou uma relação não linear entre pressão e vazão, sendo representada por uma equação de segundo grau com coeficiente de determinação $R^2 = 0{,}9933$. A relação entre vazão e rotação apresentou comportamento aproximadamente linear, indicando que a rotação da bomba pode ser utilizada como variável de controle da vazão do sistema. Para o subsistema de óleo, foram avaliados os fluidos óleo vegetal, 20W50 e 15W40. As temperaturas de operação estabelecidas foram, respectivamente, 27 °C, 29 °C e 34 °C. As curvas de pressão em função da vazão apresentaram comportamento crescente e dependente da viscosidade do fluido, com maiores pressões observadas para o 15W40 e menores para o óleo vegetal. As relações entre vazão e rotação apresentaram comportamento aproximadamente linear, com R^2 superiores a 0,999 para os três fluidos, indicando boa repetibilidade da relação entre a rotação da bomba e a vazão obtida. A comparação entre o sistema de aquisição e análise de imagens e o LISST-200X foi realizada utilizando 30 amostras distintas de areia. Para cada amostra, foram obtidas múltiplas imagens e múltiplas distribuições de tamanho pelo LISST-200X. A partir dos valores de D_{50} obtidos pelos dois métodos, foi determinada a relação de correção entre a medida por imagens e a medida de referência. O fator de correção médio obtido foi de 0,20, com desvio padrão de 0,014 (7%), indicando baixa dispersão relativa entre as medições. Entretanto, durante a análise dos resultados, foram identificadas inadequações no procedimento experimental adotado para a comparação entre os métodos, o que impede, nesta etapa, a definição de um fator de correção definitivo. Apesar da boa repetibilidade observada nas medições, os resultados obtidos evidenciaram a necessidade de revisão da metodologia experimental utilizada nos ensaios. Dessa forma, novos testes estão sendo desenvolvidos com condições experimentais aprimoradas, visando estabelecer uma comparação adequada entre o sistema de análise de imagens e o LISST-200X e, posteriormente, determinar uma relação de correção confiável para as medidas obtidas pelo sistema óptico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização dos subsistemas hidráulicos permitiu estabelecer relações consistentes entre rotação, vazão e pressão, com repetibilidade entre as baterias experimentais. A comparação entre o sistema de imagens e o LISST-200X, realizada com 30 amostras de areia, permitiu determinar um fator de correção de $0{,}200 \pm 0{,}014$ para as medidas obtidas por imagens. Os resultados obtidos servem como base para o aprimoramento da metodologia experimental e para a realização de novos ensaios, visando validar adequadamente a utilização do sistema óptico na caracterização das gotas produzidas na dispersão mecânica subaquática. 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).

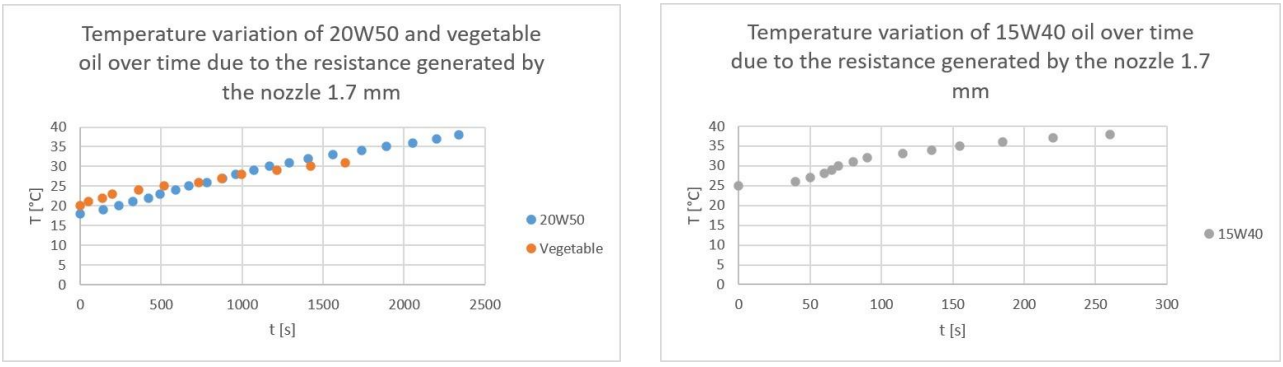
Palavras-chave: dispersão mecânica subaquática; bancada experimental; caracterização hidráulica; análise de imagens.

ANEXOS

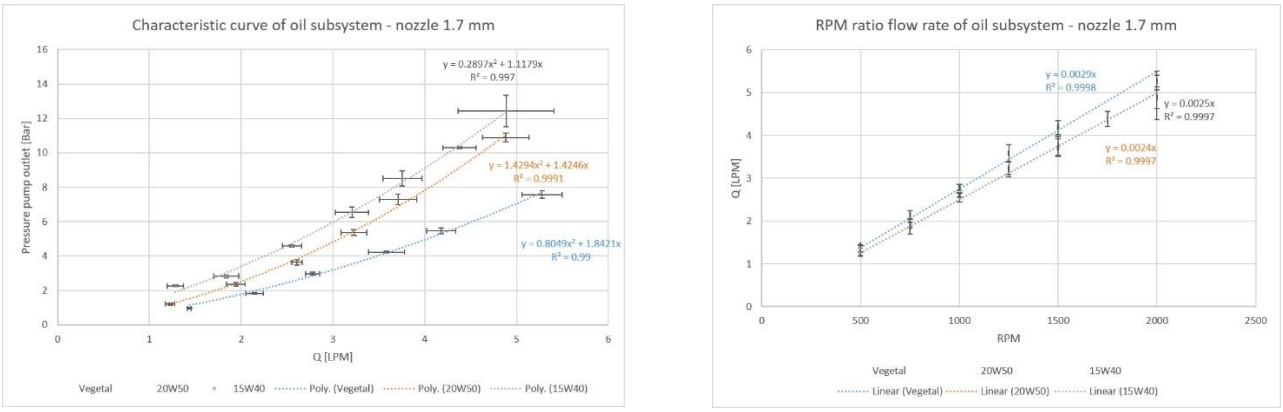


(a) (b)

Figura 1. Caracterização do sistema de água com bocal de 0,2 mm: (a) pressão em função da vazão; (b) vazão em função da rotação.



(a) (b)



(c) (d)

Figura 2. Caracterização do sistema de óleo com bocal de 1,7 mm: aquecimento dos óleos (a) vegetal e 20W50 e (b) 15W40; (c) pressão em função da vazão; (d) vazão em função da rotação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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.
WANG, G. et al. Estimation of the dissipation rate of turbulent kinetic energy: a review. Chemical Engineering Science, v. 229, art. 116133, 2021.
GRANADOS BONILLA, P. M.; KUWAKINO, E. S.; CAMPOS BONILLA, A. A.; HEGELE JÚNIOR, L. A. Design and construction of an experimental test bench for mechanical oil dispersion. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM), 13., 2026, São Luís. Anais [...]. ABCM, 2026.
ARISTIZABAL ALDANA, J. F.; CAMPOS BONILLA, A. A.; HEGELE JÚNIOR, L. A. Comparative analysis of classical and deep learning methods for bubble segmentation: application to bubble dispersion mechanics. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM), 28., 2025, Curitiba. Proceedings [...]. ABCM, 2025a.
ARISTIZABAL ALDANA, J. F.; CAMPOS BONILLA, A. A.; HEGELE JÚNIOR, L. A. Diameter histogram estimation of dispersed subaquatic bubbles using image processing. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM), 28., 2025, Curitiba. Proceedings [...]. ABCM, 2025b.
KELLY, R. N. et al. Graphical comparison of image analysis and laser diffraction particle size analysis data obtained from the measurements of nonspherical particle systems. AAPS PharmSciTech, v. 7, n. 3, p. E93–E106, 2006.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Gabriel Romão Guergoleti
MODALIDADE DE BOLSA: Bolsa de Inovação
VIGÊNCIA: 07/2026 a 12/2026 – Total: 6 meses
ORIENTADOR(A): Aníbal Alexandre Campos Bonilla
CENTRO DE ENSINO: CESFI
DEPARTAMENTO: Departamento de Engenharia de Petróleo
ÁREAS DE CONHECIMENTO: Engenharia de Petróleo
TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Modelagem Física e Numérica de Jato Submarino de Óleo Baseada em Experimentos – Subjet
Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: NPP4318-2023