

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTUDO DA CORRELAÇÃO $Re^{-1} \cdot We$ NA DISPERSÃO DE CARGAS LÁBEIS EM UM ATOMIZADOR DUPLO FLUIDIZADO

AUTORES:

Higor de Bitencourt Rodrigues, Alícia Carvalho Ribeiro, Guilherme do Nascimento, Vinicius do Vale, Henry França Meier, Jonathan Utzig, Natan Padoin, Cíntia Soares

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Santa Catarina

ESTUDO DA CORRELAÇÃO $Re^{-1} \cdot We$ NA DISPERSÃO DE CARGAS LÁBEIS EM UM ATOMIZADOR DUPLO FLUIDIZADO

Resumo

A dispersão eficiente de cargas lábeis é crucial para o tratamento catalítico fluidizado, especialmente em setores petrolíferos. Um dos dispersores mais utilizados é o atomizador duplo fluidizado assistido a gás, cuja eficiência é diretamente influenciada pela geometria do bico, pelas condições operacionais e pelas propriedades físicas do fluido, como a viscosidade e a tensão superficial. Dois números adimensionais merecem destaque para a caracterização do escoamento, o número de Weber e o de Reynolds, uma vez que o primeiro relaciona as forças inerciais com as de tensão superficial, controlando a fragmentação das gotas, e o segundo está associado à razão entre as forças inerciais e as viscosas, influenciando a estabilidade e a forma do jato de líquido antes da atomização, e ambos levam em consideração a geometria do atomizador, sendo fundamentais para a compreensão do processo de formação do spray. Neste estudo, foram realizados experimentos materiais com um atomizador duplo fluidizado assistido a gás e foi variado os números de Reynolds e Weber, mantendo a correlação $Re^{-1} \cdot We$ constante em $\sim 2,31$, correlação a qual foi atribuída como um possível adimensional para investigação do escoamento em um bico atomizador e comparação da eficiência entre diferentes atomizadores. O objetivo foi avaliar a variação controlada das condições operacionais com $Re^{-1} \cdot We$ constante e como isso pode influenciar na dispersão de carga em termos de eficiência de atomização. Para avaliar essa eficiência, utilizou-se o tamanho médio das gotas produzidas, medido pelos diâmetros D10, D20 e D32 (diâmetro de Sauter). Esses parâmetros foram obtidos por meio da técnica de *Shadowgraphy*. A correlação $Re^{-1} \cdot We$ constante sugere estabilizar os diâmetros médios D10 e D20 em diferentes condições operacionais, mas não o D32. Além disso, observou-se que o aumento da pressão do sistema e a redução da razão da quantidade de movimento entre o líquido e o gás melhoram a eficiência da atomização, mesmo com $Re^{-1} \cdot We$ constante. Isso sugere que a pressão e a redução da razão da quantidade de movimento entre líquido e o gás desempenham um papel crucial na eficiência da atomização, mesmo para um $Re^{-1} \cdot We$ constante (e razão gás-líquido).

Palavras-chave: Atomização, atomizador duplo fluidizado, correlação $Re^{-1} \cdot We$, *Shadowgraphy*.

Abstract

Efficient dispersion of labile charges is crucial for fluidized catalytic treatment, especially in the petroleum sector. One of the most commonly used atomizers is the gas-assisted dual-fluid atomizer, whose efficiency is directly influenced by the nozzle geometry, operating conditions, and the fluid's physical properties, such as viscosity and surface tension. Two dimensionless numbers are key for characterizing the flow: the Weber number and the Reynolds number. The former relates inertial forces to surface tension forces, controlling droplet fragmentation, while the latter is associated with the ratio of inertial forces to viscous forces, influencing the stability and shape of the liquid jet before atomization. Both take into account the atomizer geometry and are essential for understanding the spray formation process. In this study, experiments were conducted using a gas-assisted dual-fluid atomizer, varying the Reynolds and Weber numbers while keeping their correlation ($Re^{-1} \cdot We$) constant at ~ 2.31 . This

correlation was identified as a potential dimensionless number for investigating flow in an atomizer nozzle and for comparing the efficiency between different atomizers. The objective was to assess how controlled variations in operational conditions with a constant $Re^{-1} \cdot We$ influence charge dispersion in terms of atomization efficiency. To evaluate this efficiency, the mean droplet sizes were measured, using diameters D10, D20, and D32 (Sauter mean diameter). These parameters were obtained using the Shadowgraphy technique. The constant $Re^{-1} \cdot We$ correlation suggests that the mean diameters D10 and D20 are stabilized under different operating conditions, but not the Sauter diameter (D32). Additionally, it was observed that increasing system pressure and reducing the momentum ratio between the liquid and gas improved atomization efficiency, even with a constant $Re^{-1} \cdot We$. This suggests that pressure and the consequent reduction of the momentum ratio between the liquid and gas play a crucial role in atomization efficiency, even for a constant $Re^{-1} \cdot We$ (and gas-liquid ratio).

Keywords: Atomization, dual-fluid atomizer, $Re^{-1} \cdot We$ correlation, Shadowgraphy.

Introdução

A dispersão eficiente de cargas lábeis de fontes renováveis, não-renováveis ou residuais, é fundamental para o processo de tratamento catalítico fluidizado no setor petrolífero. Atomizadores assistidos a gás são frequentemente empregados para essa finalidade, e entender a dinâmica do comportamento de suas dispersões é de significativa importância para o aprimoramento do processo. A performance de um atomizador é diretamente afetada pela geometria do bico, pelas condições operacionais e por propriedades físicas intrínsecas ao(s) fluido(s), como massa específica, viscosidade e tensão superficial (LEFEBVRE, Arthur H.; MCDONELL, Vincent G., 2017).

Propostas de modelos de representação da dinâmica da atomização de cargas ao longo dos anos buscaram se basear na condensação das variáveis de maior significância para o fenômeno em torno de determinados números adimensionais, como é caso com os números de Weber e Reynolds. O número de Weber é uma forma de contabilizar a relação entre as forças inerciais que atuam sobre um fluido em relação à tensão superficial entre tal e o meio (RAJESH, K. R. et al., 2018) enquanto o número de Reynolds busca representar a relação entre as forças inerciais com as forças viscosas que atuam sobre o fluido, produtos da geometria do atomizador que influenciam também na estabilidade e formato do jato de líquido antes da atomização (WANG, Jietuo; DALLA BARBA, Federico; PICANO, Francesco., 2021).

No presente estudo, foram conduzidos experimentos utilizando um atomizador do tipo duplo fluido assistido a gás, variando os valores de Re e We de maneira em que sua relação $Re^{-1} \cdot We$ permanecesse constante, com o intuito de compreender como a variação controlada desses números adimensionais influencia na dispersão de carga. A resposta à tais estímulos utilizada na eficiência da atomização foi estimada na forma da distribuição dos tamanhos das gotas produzidas na dispersão do fluido, D10, D20 e D32, obtidos por meio de experimentos materiais utilizando a técnica de *Shadowgraphy*, amplamente utilizada para estudar a trajetória, o tamanho das gotas e o comportamento transitório do spray resultante (PRAKASH, R. Surya et al., 2018).

Metodologia

A técnica de *Shadowgraphy* foi aplicada para visualização de gotas geradas por um spray produzido de um bico atomizador do tipo duplo fluido escoando água e ar comprimido à temperatura ambiente ($\sim 27^\circ\text{C}$). Foram adquiridas imagens em 3 distâncias axiais diferentes (6, 9 e 12 cm) abaixo da saída do spray, na posição azimutal representada na Figura 1 – a).

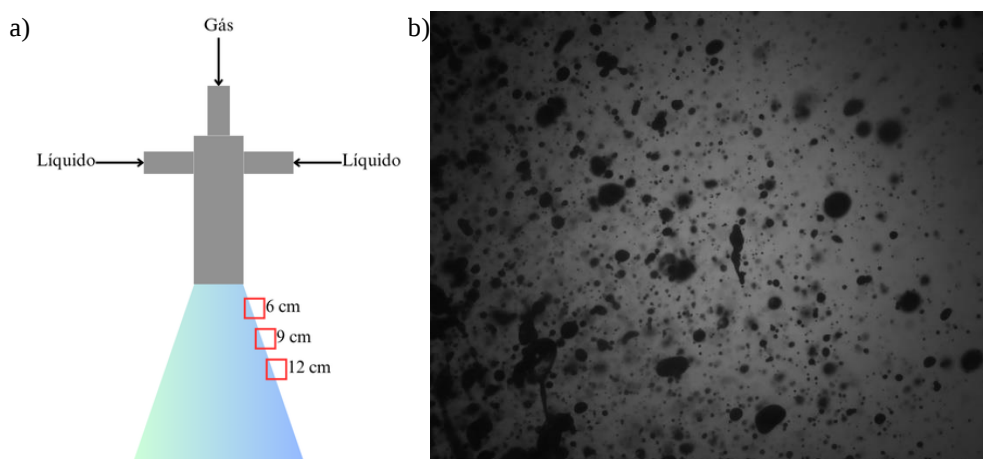


Figura 1 – a) Posições de captura das fotos do spray gerado pelo bico atomizador duplo fluidizado (desenho não está em escala); b) Demonstração da técnica de *Shadowgraphy* aplicada ao spray gerado pelo bico atomizador duplo fluidizado deste estudo (foto adquirida em valor de Reynolds de ~ 19.000).

Cada quadro possuiu uma resolução de ~ 360 pixels/cm (com variação de ± 2 pixels/cm) e as fotos foram adquiridas a 250 Hz com 7 μs de exposição utilizando uma câmera de alta velocidade da IDT acoplada com lente de zoom 12x da Navitar. Durante 40 segundos foram obtidas 10.000 imagens juntamente com dados de vazões mássicas e pressões nos bocais de líquido e gás, os quais permitiram o cálculo dos adimensionais Re e We e suas manutenções durante as aquisições. Ao todo, 150 imagens foram selecionadas por experimento, realizado em duplicata, e tratadas a partir de código em Python para determinação dos diâmetros médios das gotas (Figura 1 – b).

Os experimentos foram conduzidos mantendo a relação $Re^{-1} \cdot We$ em $\sim 2,31$. Os valores de Re usados foram de aproximadamente 19.000, 26.000, 36.000, 47.000 e 53.000 – mantendo a condição de experimento em uma região do tipo *fyber-type* (para atomizadores com escoamento coaxial) (LASHERAS, Juan C.; HOPFINGER, E. J., 2000).

Resultados e Discussão

Por meio dos experimentos realizados conforme descritos na Metodologia, foi possível obter valores de diâmetros médios, D10, D20 e D32, também foi possível extrair dados de razão de quantidade de movimento entre o líquido e o gás (J) e pressões absolutas nos bocais de líquido (p_{Liq}) e gás (p_{Gas}) do atomizador.

A partir da técnica de *Shadowgraphy* e utilizando um script doméstico baseado em bibliotecas de linguagem Python para o reconhecimento do tamanho das gotas, obteve-se valores médios dos diâmetros D10, D20 e D32 em distâncias axiais de 6, 9 e 12 cm, respectivamente nas Figura 2, Figura 3 e Figura 4, da saída do spray. Analisando os resultados observa-se que os diâmetros D10 e D20 demonstraram pouca variação conforme o incremento das vazões de líquido e ar, em comparação com o D32. Em 6 cm o D10 e D20 apresentaram uma diferença, da condição mais branda para a mais intensa, de -2,65 e 15,83 μm , respectivamente, para 9 cm foi de 5,26 e 28 μm , respectivamente, e para 12 cm foi de 25,15 e 49,73 μm . Já o D32 teve uma diferença, da condição mais branda para a mais intensa, de 140,43 μm em 6 cm, 181,31 μm em 9 cm e 215,72 μm em 12 cm.

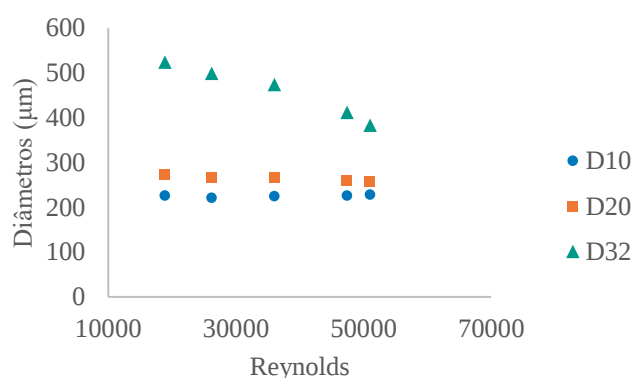


Figura 2 – Diâmetros variando com diferentes valores de Reynolds ($\text{Re}^{-1} \cdot \text{We}$ constante) na distância axial de 6 cm.

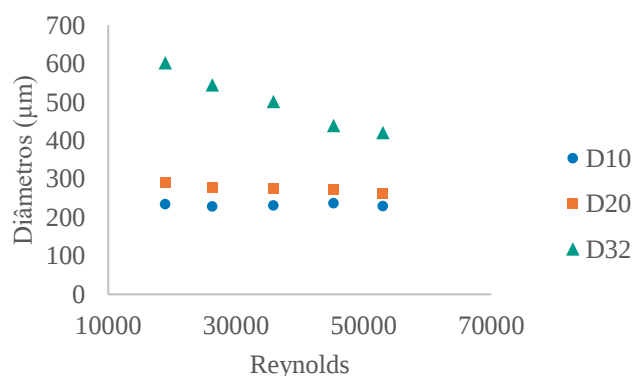


Figura 3 – Diâmetros variando com diferentes valores de Reynolds ($\text{Re}^{-1} \cdot \text{We}$ constante) na distância axial de 9 cm.

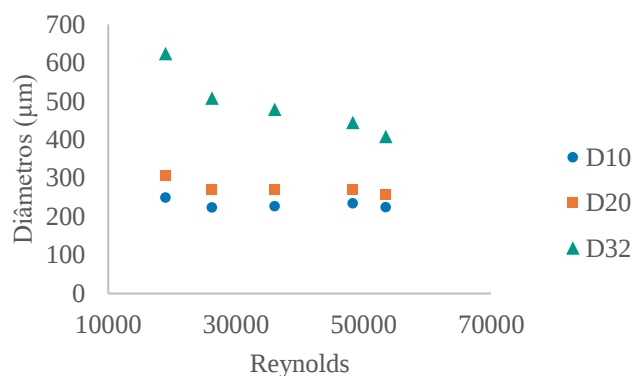


Figura 4 – Diâmetros variando com diferentes valores de Reynolds ($Re^{-1} \cdot We$ constante) na distância axial de 12 cm.

De todos os experimentos realizados, a relação $Re^{-1} \cdot We$ permaneceu constante em $\sim 2,31$ com um desvio padrão amostral de $\pm 0,11$, e a razão gás-líquido permaneceu em 6,41% com um desvio padrão amostral de $\pm 0,0025$. No entanto, verificou-se variações nos valores de pressões absolutas nos bocais de líquido e gás (Figura 5 Figura 6) e de razões de quantidade de movimento (Figura 7).

Esses resultados são um indicativo de que manter a relação $Re^{-1} \cdot We$ constante para um mesmo bico atomizador preserva também o valor de razão gás-líquido em diferentes condições operacionais, no entanto, a pressão absoluta nos bocais de líquido e gás crescem conforme as condições são incrementadas, juntamente com a redução da razão da quantidade de movimento entre líquido e gás. Conforme os resultados de diâmetros médios obtidos, manter constante o valor de $Re^{-1} \cdot We$ altera pouco os valores de D10 e D20 quando comparados com o D32, mesmo com o acréscimo de pressão no sistema, o que não acontece com o D32. O aumento da pressão, juntamente com a redução da razão da quantidade de movimento sugere melhorar a qualidade da atomização, uma vez que reduz o D32.

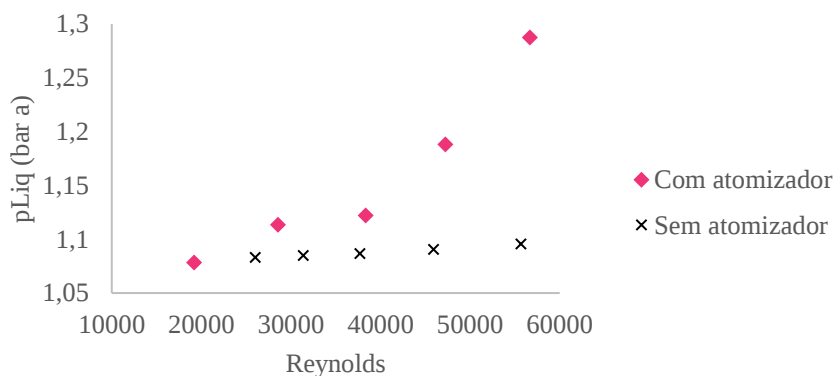
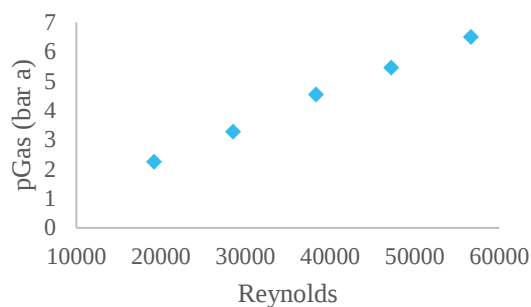
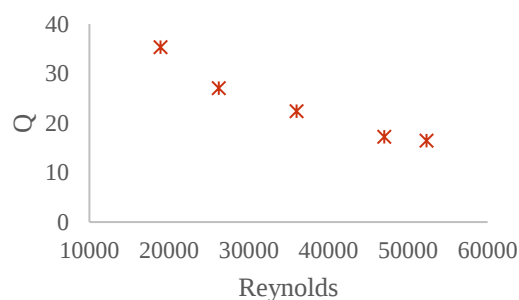


Figura 5 – Pressão de líquido para relação $Re^{-1} \cdot We$ constante, com o atomizador e sem o atomizador (pressão “zero”, da linha de operação).

Figura 6 – Pressão de gás para relação $Re^{-1} \cdot We$ constante.Figura 7 – Razão da quantidade de movimento para relação $Re^{-1} \cdot We$ constante.Tabela 1 – Valores dos diâmetros médios obtidos para diferentes condições operacionais com a relação $Re^{-1} \cdot We$ constante.

Distância Axial (cm)	Reynolds	Weber	Diâmetros (μm)		
			D10	D20	D32
6	18.925	41.816	225,36	273,50	523,09
	26.204	58.226	220,32	264,62	497,81
	36.064	83.959	224,25	265,30	473,33
	47.446	111.813	225,62	259,03	410,85
	51.068	129.686	228,01	257,67	382,65
9	18.956	41.857	234,28	290,40	601,74
	26.322	57.953	227,90	278,21	544,26
	35.898	83.711	230,79	275,55	500,75
	45.333	108.741	236,21	273,13	438,60
	53.053	128.078	229,03	262,40	420,42
12	18.988	41.736	249,32	307,27	623,63
	26.286	58.116	223,32	269,54	507,65
	36.119	85.893	226,93	269,34	479,23
	48.323	110.855	234,06	270,84	445,08
	53.486	128.887	224,17	257,54	407,91

Conclusões

A utilização da correlação $Re^{-1} \cdot We$ constante pode ser um bom indicativo para a comparação da atomização entre diferentes bicos atomizadores uma vez que leva em consideração parâmetros geométricos e do escoamento. Entretanto, para um mesmo bico atomizador esta relação constante, em diferentes condições experimentais, sugere estabilizar os valores dos diâmetros médios D10 e D20, exceto o D32. O aumento da pressão do sistema e redução da razão da quantidade de movimento entre líquido e gás demonstra alterar a eficiência da atomização, sendo que quanto maior a pressão e menor o Q, melhor é a qualidade da atomização, para um mesmo bico atomizador nas condições de operação realizadas neste estudo.

Agradecimentos

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) amparo à pesquisa e oportunidade de Doutorado.

Aos laboratórios LABMAC (UFSC) e LFC-LVV (FURB, Universidade Regional de Blumenau) pela disposição dos espaços físicos para realização dos experimentos materiais.

Referências Bibliográficas

LASHERAS, Juan C.; HOPFINGER, E. J. Liquid jet instability and atomization in a coaxial gas stream. **Annual review of fluid mechanics**, v. 32, n. 1, p. 275-308, 2000.

LEFEBVRE, Arthur H.; MCDONELL, Vincent G. **Atomization and sprays**. CRC press, 2017.

PRAKASH, R. Surya et al. Liquid jet in crossflow—effect of liquid entry conditions. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 93, p. 45-56, 2018.

RAJESH, K. R. et al. Drop size characteristics of sprays emanating from circular and non-circular orifices in the atomization regime. **Journal of Aerosol Science**, v. 174, p. 106245, 2023.

WANG, Jietuo; DALLA BARBA, Federico; PICANO, Francesco. Direct numerical simulation of an evaporating turbulent diluted jet-spray at moderate Reynolds number. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 137, p. 103567, 2021.