XXXIII Congresso de Iniciação Científica da Unicamp

# INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE GOTAS EM DISPERSÕES ÓLEO-ÁGUA EM TANQUE AGITADO

**Palavras-Chave:** PROCESSAMENTO DE IMAGENS; DISPERSÃO DE GOTAS; TANQUE AGITADO

**Autores:**
GABRIEL ANTUNES SOZO; FEQ-UNICAMP
Dr. WILLIAM D. P. FONSECA; CEPETRO-UNICAMP
Prof. Dr. GUILHERME J. CASTILHO (Orientador); FEQ-UNICAMP

## 1 INTRODUÇÃO

Os escoamentos líquido-líquido estão presentes tanto em atividades do cotidiano quanto em processos industriais complexos, sendo comuns nas indústrias alimentícia, química e farmacêutica, onde a formação de dispersões entre líquidos imiscíveis é frequentemente desejada [1, 2]. No entanto, em determinadas situações, a presença dessas dispersões pode ser indesejável, impactando negativamente a eficiência do processo. Um exemplo recorrente ocorre nas operações de produção e armazenamento de petróleo, nas quais a separação da fase dispersa representa uma das etapas mais críticas da cadeia produtiva.

Para promover ou evitar a formação dessas dispersões, são amplamente utilizados sistemas de agitação e mistura, compostos por tanques agitados mecanicamente, com agitadores montados no topo. A aplicação desses sistemas, especialmente sob condições de alta rotação, promove intensos níveis de cisalhamento e turbulência, favorecendo a fragmentação da fase dispersa. Como consequência, formam-se dispersões óleo-em-água (O/A) que, dependendo das condições de operação, podem dificultar a separação de fases e comprometer a eficiência do processo [3].

A compreensão do comportamento das gotas dispersas nesse tipo de escoamento é, portanto, essencial para o desenvolvimento de estratégias de controle e otimização desses sistemas multifásicos. A caracterização da dinâmica das gotas, como movimentos, interações, ruptura e coalescência, exige técnicas experimentais capazes de capturar fenômenos transientes com alta resolução temporal. Entre essas técnicas, destacam-se os métodos baseados em aquisição de imagens, como a *High-Speed Imaging* (HSI), que permite o registro de eventos rápidos por meio de câmeras de alta velocidade [4].

Diante desse cenário, o presente estudo propõe uma investigação experimental do comportamento de dispersões óleo-em-água em um tanque agitado com entrada superior baseando-se na distribuição de densidade de gotas, entendendo os comportamentos comparativos às velocidades de rotação. Os experimentos foram conduzidos em um tanque transparente com volume total de 2,85 L, equipado com um impulsor de pás retas. A agitação foi controlada por variação da rotação do eixo: 600 e 750 rpm. As imagens foram adquiridas por uma câmera de alta velocidade (Phantom VEO310-L), posicionada na seção de observação lateral do tanque. A partir do processamento dessas imagens, foram extraídas quantidades físicas relevantes, como a área projetada das gotas e o diâmetro de Sauter ($D_{32}$), fornecendo uma base quantitativa para a análise da influência da intensidade de agitação sobre a morfologia da dispersão.

## 2 EXPERIMENTOS

Esta seção descreve o projeto e a implementação do protótipo de um tanque agitado transparente desenvolvido para viabilizar a investigação experimental das dispersões O/A. Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Caracterização de Escoamentos Multifásicos (LACEM), vinculado à Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

### 2.1 Tanque agitado

Para permitir a visualização e medições da fase dispersa, foi desenvolvido um sistema de agitação construído com materiais transparentes. O núcleo do sistema é um tanque cilíndrico de acrílico com volume total de 2,85 L, fundo plano e quatro defletores verticais (chicanas) igualmente espaçados, fixados ao longo da parede interna em intervalos de 90°. Montado no centro do tanque, encontra-se um impulsor de quatro pás, em configuração de bombeamento

descendente, conectado a um agitador mecânico IKA (modelo RW 20 D). O tanque é aberto para a atmosfera e repousa sobre um suporte rígido, a fim de minimizar as vibrações durante a operação.

A Figura 1 fornece uma visão do tanque agitado e do arranjo do impulsor a partir das perspectivas superior e lateral, destacando o layout geométrico do sistema de mistura. A Figura 2 apresenta uma ilustração da configuração experimental completa utilizada para a obtenção de imagens de alta velocidade. Nessa configuração, os componentes são identificados da seguinte forma: (A) o tanque agitado transparente, (B) o agitador mecânico suspenso, (C) a câmera de alta velocidade Phantom VEO 310-L, posicionada ortogonalmente à parede do tanque, e (D) o sistema de retroiluminação LED, localizado atrás do tanque para melhorar o contraste das imagens e facilitar a detecção da borda das gotas.

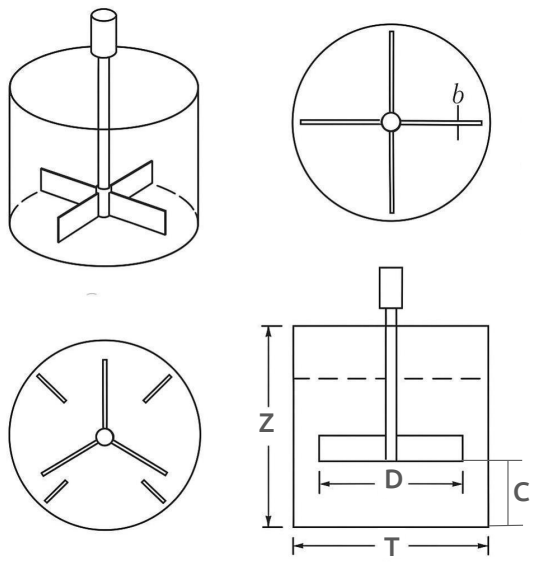


Figura 1: Ilustração do tanque agitado.

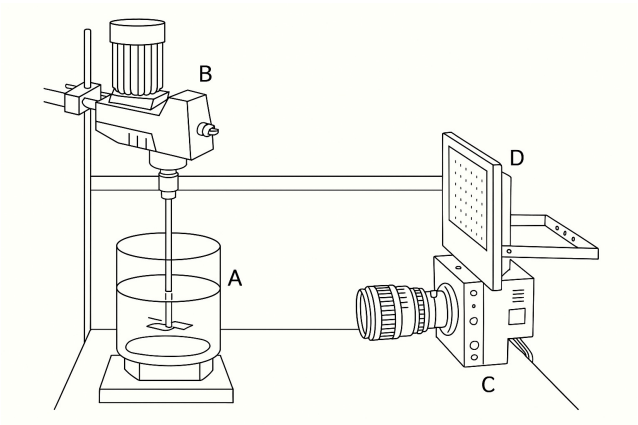


Figura 2: Setup experimental: (A) Tanque, (B) Impulsor, (C) Câmera de alta velocidade e (D) Luz LED.

O posicionamento e o alinhamento dos componentes ópticos (câmera e fonte de luz) foram ajustados para maximizar a clareza visual das gotas de óleo em movimento e permitir medições precisas. As principais dimensões geométricas do tanque e do sistema agitado estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros geométricos do sistema de agitação.

| **Parâmetro** | **Símbolo** | **Valor (mm)** |
|---|---|---|
| Diâmetro do tanque | $T$ | 150 |
| Altura do líquido | $Z$ | 150 |
| Diâmetro do impelidor | $D$ | 50 |
| Distância do fundo | $C$ | 50 |
| Número de chicanas | $N_b$ | 4 |
| Largura da chicana | $b$ | 15 |
| Espessura da chicana | $e$ | 1,5 |
| Diâmetro do eixo | $D_s$ | 8,0 |

## 2.2 Aquisição de imagens

Imagens de alta velocidade foram empregadas para investigar o comportamento das gotas em dispersões O/A formadas no tanque agitado. Essa técnica permite a visualização de fenômenos rápidos e transientes com alta resolução temporal, possibilitando a observação detalhada da formação, deformação, ruptura e coalescência de gotas sob condições de escoamento turbulento. A partir da análise quadro a quadro, é possível extrair informações quantitativas sobre a evolução do tamanho das gotas ao longo do tempo.

Para permitir a visualização da fase dispersa, uma câmera de alta velocidade Phantom VEO310-L foi posicionada ortogonalmente à parede lateral transparente do tanque. Um painel de LED de alta intensidade foi instalado no lado oposto para fornecer iluminação de fundo uniforme, aprimorando a detecção das gotas. Esse arranjo óptico garantiu um campo de visão claro e minimizou os efeitos de ofuscamento e/ou sombreamento.

As imagens foram adquiridas a uma taxa de quadros de 2.000 fps, com uma resolução espacial de 1.280 × 800 pixels e um tempo de exposição de 5 segundos. O índice de exposição (IE) foi definido como 12.500 para garantir brilho suficiente. Cada aquisição durou aproximadamente 6,2 segundos, capturando até 12.388 quadros consecutivos por sequência. Um modo de aquisição pré-disparo foi empregado para incluir eventos que ocorreram antes e depois do sinal de início, garantindo que o comportamento transitório das gotas fosse totalmente capturado.

O sistema de agitação foi operado em duas velocidades diferentes do impulsor: 600 e 750 rpm. Essas condições correspondem a números de Reynolds de aproximadamente 28.000, 35.000, respectivamente, calculados usando a expressão:

$$Re = \frac{\rho_c N D^2}{\mu_c} \tag{1}$$

onde $\rho_c$ e $\mu_c$ são a densidade e a viscosidade dinâmica da fase contínua (água), $N$ é a velocidade do rotor

em rotações por minuto (rpm) e $D$ é o diâmetro do rotor. Os números de Reynolds selecionados garantiram condições totalmente turbulentas, favorecendo a fragmentação de gotas e a dinâmica de dispersão ativa.

Cada execução experimental seguiu um procedimento padronizado para garantir repetibilidade e condições de dispersão controladas. Inicialmente, o tanque foi preenchido com água (fase contínua) e o agitador mecânico foi acionado na velocidade de rotação desejada. O sistema foi deixado atingir o regime permanente antes da introdução da fase dispersa. Uma vez alcançadas as condições hidrodinâmicas estáveis, óleo mineral (previamente tingido de preto com um corante não reativo para melhorar o contraste de fase nas imagens) foi injetado no tanque a uma vazão constante. A fração volumétrica da fase dispersa correspondeu a 0,1% do volume da fase contínua. O óleo, com uma viscosidade dinâmica de aproximadamente 14 cP, dispersou-se gradualmente em gotículas devido ao cisalhamento gerado pelo impulsor. A aquisição de imagens em alta velocidade foi iniciada durante essa fase de injeção e continuada ao longo do desenvolvimento da dispersão para capturar a evolução da formação, movimento e interação das gotículas. A Figura 3 apresenta um quadro extraído de uma sequência de aquisição em alta velocidade, ilustrando a qualidade visual do campo de gotículas e o contraste obtido entre as gotículas de óleo e a fase aquosa contínua.

Figura 3: Quadro representativo de uma sequência de imagens de alta velocidade mostrando gotículas de óleo dispersas em água.

## 3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

O processamento de imagens neste estudo teve como objetivo extrair, segmentar e quantificar gotas dispersas em vídeos adquiridos pela câmera de alta velocidade, viabilizando a análise estatística do tamanho e da distribuição espacial das gotas. Para isso, foi desenvolvido um conjunto de rotinas computacionais em `Python`, utilizando a biblioteca `OpenCV`. As etapas foram organizadas de forma sequencial, conforme ilustrado na Figura 4 e descritas a seguir.

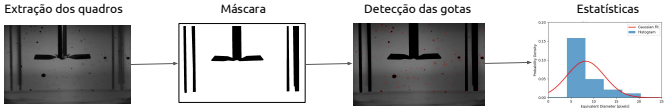


Figura 4: Procedimento de processamento e análise de imagens.

### 3.1 Extração dos quadros e mascaramento das partes sólidas

O primeiro script é responsável por converter os vídeos de alta velocidade em uma sequência de quadros, os quais representam os instantes do experimento. Como o aparato experimental contém componentes fixos que interferem na análise (como impelidor e chicanas), foi necessário mascará-los nas imagens. Para isso, foi desenvolvido um script que permite desenhar manualmente as regiões a serem excluídas. Essas regiões são preenchidas com valor nulo (NAN) e armazenadas como uma máscara binária. A máscara gerada é então aplicada automaticamente a todos os quadros extraídos. Esse processo sobrepõe as regiões mascaradas nas imagens originais, tornando-as brancas na escala de cinza (intensidade máxima), o que impede sua detecção nas etapas seguintes.

### 3.2 Segmentação e filtragem das gotas

Após o mascaramento das regiões sólidas do sistema de agitação, o processamento principal teve início com a aplicação do método CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*) [5], utilizado para a melhoria do contraste local das imagens, especialmente em regiões com variações de iluminação. Em seguida, foi aplicado a limiarização adaptativa sobre as imagens em escala de cinza (0–255), convertendo-as em imagens binárias nas quais regiões escuras correspondem às gotas, enquanto o restante é interpretado como fundo. As imagens binárias passam então por operações morfológicas, destinadas à remoção de ruídos e à preservação das bordas das gotas. Na etapa seguinte, realiza-se uma filtragem geométrica baseada na área e na circularidade dos contornos, permitindo a exclusão de artefatos e a identificação precisa das gotas como objetos individuais de formato aproximadamente esférico.

### 3.3 Parâmetros quantitativos

A partir das imagens processadas e segmentadas, foi possível calcular parâmetros quantitativos que descrevem a distribuição e a evolução temporal das gotas de óleo na fase contínua. Os dados foram extraídos individualmente para cada quadro, permitindo uma análise detalhada da dispersão. Os parâmetros avaliados para as rotações de 600 e 750 rpm foram: número de gotas ($N$), área média das gotas ($\bar{A}$) e diâmetro médio de Sauter ($D_{32}$).

O número de gotas em cada quadro foi determinado pela contagem dos contornos identificados após a aplicação dos critérios de filtragem por área e circularidade. A área média das gotas foi calculada a partir do diâmetro equivalente de cada gota, assumindo uma geometria circular. Para cada gota, sua área foi estimada como:

$$A_i = \pi \left( \frac{d_{eq,i}}{2} \right)^2 \tag{2}$$

A área média das gotas no quadro foi então obtida por:

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} A_i \tag{3}$$

O diâmetro equivalente de cada gota foi definido como o diâmetro de um círculo com mesma área $A_i$:

$$d_{eq,i} = 2\sqrt{\frac{A_i}{\pi}} \tag{4}$$

E o valor médio dos diâmetros equivalentes foi dado por:

$$\bar{d}_{eq} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} d_{eq,i} \tag{5}$$

O diâmetro médio de Sauter representa o diâmetro de uma esfera que possui a mesma razão volume/superfície, sendo amplamente utilizado para caracterização de sistemas dispersos. Ele foi calculado com base nos diâmetros equivalentes, conforme a expressão:

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N} d_{eq,i}^3}{\sum_{i=1}^{N} d_{eq,i}^2} \tag{6}$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises apresentadas a seguir foram realizadas com base nos vídeos adquiridos a 2000 fps para as duas rotações do sistema de agitação: 600 e 750 rpm. Como a máscara utilizada para excluir as regiões sólidas do sistema não foi aplicada de forma dinâmica ao longo da rotação, a análise foi conduzida em quadros espaçados por um intervalo fixo, correspondente ao tempo necessário para que o impelidor retornasse à mesma posição angular. Esse intervalo foi de 39 quadros. A seguir, são apresentados os resultados referentes ao número de gotas detectadas, ao diâmetro médio de Sauter ($D_{32}$) e à área média das gotas ao longo do tempo, representado aqui pelo número do quadro analisado.

### 4.1 Número de gotas

A Figura 5 apresenta a evolução do número de gotas detectadas pelo tempo ao longo do experimento. Observa-se que, para 750 rpm, o número de gotas é maior do que para 600 rpm. Este comportamento está associado ao aumento da taxa de cisalhamento e da dissipação de energia no sistema, que favorecem o processo de quebra de gotas. Em 750 rpm, o número de gotas tende a crescer ao longo do tempo, refletindo uma intensificação gradual do processo de fragmentação das gotas maiores. Já para 600 rpm, observa-se um regime com menor variação temporal e número médio inferior de gotas, sugerindo um equilíbrio mais precoce entre os mecanismos de quebra e coalescência.

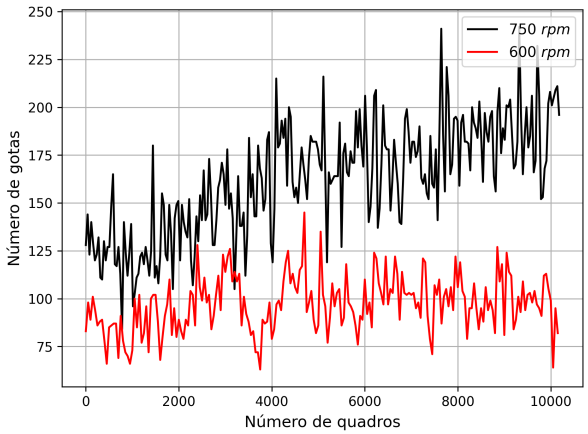


Figura 5: Evolução do número de gotas ao longo dos quadros para 600 e 750 rpm.

### 4.2 Diâmetro de Sauter e área média das gotas

A Figura 6 mostra a evolução do diâmetro médio de Sauter ($D_{32}$) ao longo dos quadros analisados. Nota-se que, em 600 rpm, os valores de $D_{32}$ permanecem consistentemente mais elevados que em 750 rpm, o que é coerente com a menor taxa de cisalhamento e menor intensidade da fragmentação das gotas. A redução dos valores de $D_{32}$ em 750 rpm indica que a energia fornecida ao sistema é suficiente para quebrar gotas maiores em menores, com menor oportunidade de coalescência, resultando em uma distribuição de gotas com maior número (Fig. 5) e menor volume individual (Fig. 6).

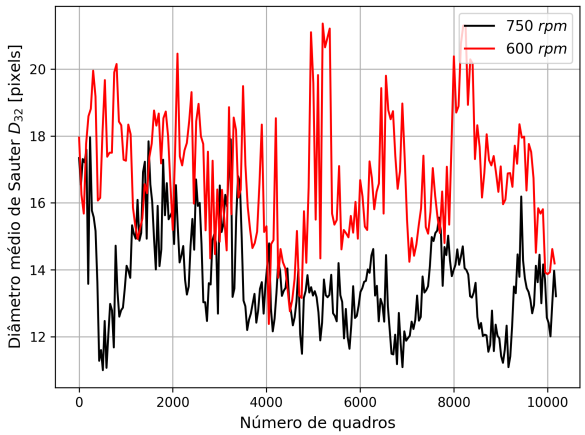


Figura 6: Evolução do diâmetro de Sauter ao longo dos quadros para 600 e 750 rpm.

A Figura 7 apresenta a evolução da área média das gotas. De maneira similar ao observado para $D_{32}$, os valores para 600 rpm são maiores do que para 750 rpm, reforçando a hipótese de que a menor energia de agitação nessa condição resulta em gotas maiores e em menor número. Para a rotação de 750 rpm, a área média apresenta oscilações mais intensas, refletindo o caráter transiente do processo de dispersão e o maior número de gotas pequenas.

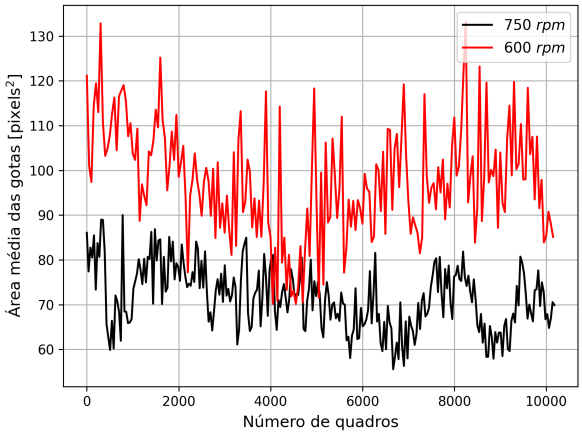


Figura 7: Evolução da área média das gotas ao longo dos quadros para 600 e 750 rpm.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvido um *framework* computacional para processar imagens adquiridas por câmera de alta velocidade visando a quantificação de gotas em escoamentos líquido-líquido. O método proposto inclui extração de quadros, aplicação de máscaras, segmentação adaptativa e cálculo de parâmetros estatísticos relevantes, como número de gotas, área média e diâmetro médio de Sauter.

A abordagem foi aplicada para investigar experimentalmente a influência da rotação (600 e 750 rpm) na dinâmica de dispersões óleo-em-água em um tanque agitado equipado com impulsor de pás retas. As análises mostraram que o aumento da rotação intensifica os efeitos de cisalhamento e turbulência no interior do tanque, promovendo a fragmentação mais eficiente da fase dispersa. Como consequência, observou-se um aumento no número de gotas formadas e uma redução consistente nos valores médios de área projetada e diâmetro de Sauter ($D_{32}$). Esses resultados mostram o papel direto da intensidade de agitação sobre o equilíbrio entre os mecanismos de quebra e coalescência, fornecendo uma base quantitativa para o controle da morfologia das dispersões em sistemas líquido-líquido.

O uso de imagens de alta velocidade com análise estatística automatizada mostrou-se uma ferramenta promissora para caracterizar sistemas dispersos com alta resolução temporal, ainda pouco explorada para fins quantitativos em estudos de dispersão líquido-líquido.

## Referências

[1] J. Solsvik e H. A. Jakobsen, “Single drop breakup experiments in stirred liquid–liquid tank”, Chemical Engineering Science **131**, 219–234 (2015).

[2] B. O. Hasan, “Breakage of drops and bubbles in a stirred tank: A review of experimental studies”, Chinese journal of chemical engineering **25**, 698–711 (2017).

[3] R. Afshar Ghotli et al., “Liquid-liquid mixing in stirred vessels: a review”, Chemical Engineering Communications **200**, 595–627 (2013).

[4] Y. S. Tian et al., “A new image-based microfluidic method to test demulsifier enhancement of coalescence-rate, for water droplets in crude oil”, Journal of Petroleum Science and Engineering **208**, 109720 (2022).

[5] A. M. Reza, “Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement”, Journal of VLSI signal processing systems for signal, image and video technology **38**, 35–44 (2004).