ANÁLISE EXPERIMENTAL DA FORMAÇÃO DE REGIMES TURBULENTOS EM ENSAIOS DE JAR TEST APLICADOS A PROCESSOS DE SANEAMENTO

Carlos Eduardo Rodrigues Leão[(1)]
Graduando em Engenharia Química pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.
Bruno de Oliveira Lázaro[(2)]
Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Civil. Doutorando em Engenharia Mecânica. Técnico responsável pelo Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Coordenador do GEHA – Grupo de Estudos em Hidráulica Aplicada.

Endereço[(1)]**:** Avenida João Naves de Ávila, 2121, *Campus* Santa Mônica, Bloco 1Y, Sala 1Y113, Laboratório de Hidráulica, Bairro Santa Mônica – Uberlândia – Minas Gerais – CEP: 38408-000 – Brasil. E-mail: carlos.leao2207@ufu.br.

RESUMO

A eficiência dos processos de mistura em sistemas de saneamento está diretamente relacionada ao comportamento hidrodinâmico imposto pela agitação mecânica, influenciando fenômenos como suspensão de partículas, formação de vórtices, separação de fases e intensidade turbulenta. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar experimentalmente a formação de regimes turbulentos em ensaios de Jar Test submetidos a diferentes velocidades de agitação, correlacionando os resultados com aplicações em processos de tratamento de água e efluentes. O estudo foi conduzido utilizando cinco jarros contendo 2 L de água associados a 50 mL de diferentes materiais: areia, sílica, rejeito de minério de ferro, óleo e água pura, esta última adotada como condição de controle. Cada sistema foi submetido a ciclos de agitação de 1 minuto nas rotações de 50, 100, 200, 400 e 600 rpm. A análise foi realizada com base em registros fotográficos e videográficos, permitindo avaliar a formação de vórtices, padrões de recirculação, comportamento de suspensão e sedimentação de partículas, eficiência de mistura e estabilidade de interfaces. Os resultados evidenciaram que o aumento da rotação promoveu intensificação turbulenta e respostas hidrodinâmicas distintas entre os materiais analisados, demonstrando a aplicabilidade do Jar Test como ferramenta experimental para avaliação e otimização de processos de mistura em saneamento.

PALAVRAS-CHAVE: Jar Test, Regimes turbulentos, Saneamento.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de tratamento de água e de efluentes constituem processos complexos nos quais a eficiência operacional depende da adequada integração entre fenômenos hidráulicos, físico-químicos e de transferência de massa e energia. Nesse contexto, a agitação mecânica desempenha papel fundamental em diferentes etapas de Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), uma vez que influencia diretamente a dispersão de reagentes, a homogeneização de fases, a suspensão de partículas sólidas, a estabilidade de interfaces e o desempenho global das operações unitárias subsequentes (BORGES, 2018; ALMEIDA, 2020).Com base nessa abordagem, entende-se que o controle das condições hidrodinâmicas deixa de representar apenas um parâmetro operacional e passa a configurar um fator determinante para a eficiência dos processos de coagulação, floculação, sedimentação e separação físico-química. Ainda sob essa perspectiva, a mistura hidráulica constitui uma das variáveis mais relevantes no desempenho de sistemas de tratamento de água e esgoto (CHANG *et al.*, 2005).

Durante a etapa de mistura rápida, a energia transferida ao fluido deve ser suficientemente elevada para assegurar a dispersão homogênea e instantânea de coagulantes, alcalinizantes ou outros reagentes empregados no condicionamento da água ou do efluente. Tal homogeneização favorece a neutralização de cargas superficiais, intensifica os mecanismos de contato entre partículas e estabelece condições adequadas para a formação de agregados primários. Em contrapartida, a distribuição inadequada da energia de agitação pode resultar em zonas mortas, baixa eficiência de dispersão e heterogeneidade hidráulica, comprometendo etapas posteriores do tratamento (JARVIS *et al.,* 2005; OLIVEIRA *et al.,* 2016; OLIVEIRA, 2018; MORUZZI *et al.,* 2020). Na sequência operacional, os processos de floculação também dependem fortemente do controle da intensidade de agitação. Diferentemente da mistura rápida, em que predominam elevados gradientes de velocidade e intensa transferência de

energia, a floculação requer condições hidrodinâmicas mais moderadas, capazes de promover colisões interparticuladas sem ocasionar ruptura estrutural dos flocos formados (TANG *et al,* 2002).

Desse modo, a relação entre cisalhamento, dissipação energética e estabilidade de agregados torna-se essencial para a eficiência de separação sólido-líquido em decantadores e sistemas de clarificação. Portanto, a adequada gestão da energia de agitação representa um equilíbrio entre intensificação hidráulica e preservação estrutural dos mecanismos de agregação (SILVA, 2020). Do ponto de vista da mecânica dos fluidos e da hidráulica aplicada, a variação da velocidade de agitação modifica significativamente o regime de escoamento no interior de sistemas agitados. Assim sendo, à medida que a rotação das pás aumenta, observam-se alterações na distribuição de tensões cisalhantes, intensificação de correntes de recirculação, formação de vórtices, redistribuição de gradientes de velocidade e transição progressiva entre regimes predominantemente laminares, transicionais e turbulentos (JOHNSON *et al*., 1996; MORUZZI *et al.,* 2017).

Tais modificações afetam diretamente a eficiência de mistura e o comportamento hidráulico do sistema, uma vez que a turbulência pode favorecer a homogeneização do meio, aumentar o transporte convectivo e ampliar a dispersão de partículas e fases. Entretanto, níveis excessivos de turbulência também podem induzir instabilidades locais, elevada dissipação de energia, emulsificação indesejada, ressuspensão não uniforme e perdas operacionais, sobretudo em sistemas nos quais coexistem materiais com propriedades físicas contrastantes (RIBEIRO, 2021). Além da intensidade de agitação, a resposta hidrodinâmica do sistema está intrinsecamente relacionada às propriedades físicas e reológicas dos materiais submetidos ao escoamento. Parâmetros como massa específica, viscosidade, granulometria, densidade relativa, comportamento interfacial e tendência à sedimentação interferem diretamente na resistência ao movimento, na suspensão de partículas e na estabilidade das fases presentes.

Dessa maneira, materiais particulados de maior densidade, como rejeitos minerais ou sólidos sedimentáveis, tendem a demandar maior transferência de energia para manutenção em suspensão homogênea, ao passo que partículas de menor granulometria podem apresentar recirculação mais estável e distribuição mais uniforme no meio líquido. De forma análoga, sistemas líquido-líquido imiscíveis, como misturas envolvendo água e óleo, respondem de maneira distinta à ação do cisalhamento, podendo apresentar deformação interfacial, dispersão de gotículas e até processos parciais de emulsificação em condições de elevada turbulência (CHENG *et al.,* 2010; ANÍCIO, 2019).

Com base nesta perspectiva, a compreensão da interação entre propriedades físicas dos materiais e intensidade de agitação torna-se particularmente relevante para o setor de saneamento. Em aplicações reais, a inadequada definição de parâmetros hidráulicos pode resultar em aumento de consumo energético, baixa eficiência de mistura, sedimentação prematura de sólidos, formação de zonas de recirculação ineficientes e comprometimento do desempenho de processos físico-químicos e de separação. Consequentemente, a otimização operacional de sistemas de agitação não se restringe à melhoria hidráulica local, mas também se associa à racionalização energética, à estabilidade operacional e ao aprimoramento global do tratamento.

Nesse contexto, o ensaio de Jar Test, tradicionalmente empregado em estudos de coagulação e floculação, apresenta potencial adicional como ferramenta experimental para avaliação hidrodinâmica em pequena escala. Sua configuração permite o controle sistemático de parâmetros como rotação, tempo de mistura e características do meio, possibilitando a observação direta de padrões de escoamento, formação de estruturas turbilhonares, comportamento de suspensão, sedimentação de partículas e separação de fases.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe uma análise experimental do desenvolvimento de regimes turbulentos em ensaios de Jar Test submetidos a diferentes velocidades de agitação e materiais com características físicas contrastantes, incluindo sistemas particulados, fase líquida imiscível e condição de referência. Buscou-se avaliar o comportamento hidrodinâmico associado à formação de vórtices, padrões de recirculação, suspensão e sedimentação de partículas, eficiência de mistura e estabilidade interfacial, estabelecendo correlações entre energia de agitação e desempenho hidráulico. Dessa forma, os resultados pretendem contribuir para o entendimento de fenômenos de mistura em pequena escala e para a otimização de processos aplicados ao saneamento ambiental.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Hidrodinâmica da agitação mecânica em sistemas de mistura

A agitação mecânica constitui um dos principais mecanismos de transferência de energia em sistemas de mistura, sendo amplamente empregada em processos industriais, laboratoriais e operações de tratamento de água e efluentes. Sua função está associada à indução de movimento no fluido, promovendo circulação

interna, redistribuição de massa, homogeneização de componentes e intensificação de fenômenos de transporte.

Hidraulicamente, o aumento da velocidade de rotação do agitador altera significativamente a distribuição de velocidades e o padrão de escoamento no interior do recipiente. A intensificação da agitação favorece o desenvolvimento de correntes de recirculação, aumento de gradientes de velocidade e redistribuição das tensões cisalhantes. Como consequência, a mistura torna-se mais eficiente em termos de dispersão e transporte convectivo, reduzindo heterogeneidades hidráulicas e regiões de baixa circulação (SUAVE, 2021).
Entretanto, a elevação excessiva da intensidade de agitação pode provocar efeitos adversos no sistema. Altos níveis de cisalhamento e dissipação energética podem induzir instabilidades locais, formação excessiva de vórtices, redistribuição não uniforme de partículas ou fases líquidas, dentre outros fenômenos. Assim, o controle da agitação representa um fator essencial para o equilíbrio entre intensificação hidráulica, eficiência de mistura e estabilidade do escoamento (XIAO *et al.,* 2013).

Regimes de escoamento e propriedades dos materiais

O comportamento hidrodinâmico de sistemas agitados está diretamente relacionado ao regime de escoamento estabelecido no meio. Em termos gerais, o escoamento pode ser classificado como laminar, transicional ou turbulento, conforme a relação entre forças viscosas e inerciais presentes no fluido. Em sistemas submetidos à agitação, o aumento da rotação tende a favorecer a transição para condições mais turbulentas, caracterizadas por maior instabilidade, intensificação da mistura e aumento da dissipação de energia (XIAO *et al.,* 2011).

A turbulência promove significativa ampliação do transporte convectivo e da redistribuição de partículas, além de favorecer a formação de estruturas turbilhonares e de zonas de recirculação. Tais mecanismos são fundamentais para a homogeneização do meio, especialmente em aplicações que exigem dispersão eficiente de sólidos ou interação entre diferentes fases. Contudo, o comportamento hidráulico do sistema não depende exclusivamente da intensidade de agitação, mas também das propriedades físicas dos materiais envolvidos.

Neste sentido, parâmetros como densidade, viscosidade, granulometria e comportamento interfacial influenciam diretamente a resposta hidrodinâmica do sistema. Em misturas sólido-líquido, partículas de maior massa específica demandam maior transferência de energia para manutenção em suspensão, enquanto partículas finas tendem a apresentar distribuição mais homogênea. Já em sistemas líquido-líquido imiscíveis, como água e óleo, a ação do cisalhamento pode modificar a estabilidade da interface e promover dispersão parcial de gotículas. Dessa forma, a interação entre regime de escoamento e propriedades físicas dos materiais torna-se determinante para a dinâmica de mistura e separação (WU e LEE, 1998).

Aplicações do Jar Test em análises hidrodinâmicas de sistemas de saneamento

O Jar Test é tradicionalmente empregado em estudos de coagulação e floculação, sendo amplamente utilizado na avaliação de dosagem química e eficiência de separação em processos de tratamento de água e efluentes. Sua principal vantagem reside na possibilidade de controlar variáveis operacionais, como velocidade de agitação, tempo de mistura e características do meio, permitindo reprodutibilidade experimental em pequena escala (VAHEDI eGORCZYCA, 2012; MORUZZI *et al.,* 2017; ANÍCIO, 2019; RIBEIRO, 2021).

Além de sua aplicação convencional, o equipamento apresenta potencial significativo como ferramenta de análise hidrodinâmica. A variação controlada da rotação possibilita observar alterações no comportamento do escoamento, no desenvolvimento de vórtices, na intensidade de recirculação e na distribuição de fases ou partículas suspensas. Dessa forma, o sistema torna-se útil para investigar a influência da energia de agitação sobre a resposta hidráulica de materiais com propriedades físicas distintas (MORUZZI *et al.,* 2017).

Em ensaios envolvendo sólidos sedimentáveis, líquidos imiscíveis e meio homogêneo, o Jar Test permite avaliar fenômenos como suspensão de partículas, sedimentação, dispersão interfacial e estabilidade do escoamento. Assim, sua aplicação experimental contribui para a compreensão de mecanismos de mistura em pequena escala e para a otimização de condições operacionais relacionadas a processos de saneamento e separação físico-química (SPICER e PRATSINIS, 1996; MORUZZI *et al.,* 2020).

Ao se integrar os conceitos de transferência de energia, regimes de escoamento e influência das propriedades físicas dos materiais, observa-se que a resposta hidrodinâmica em sistemas agitados depende diretamente da interação entre intensidade de agitação e características físicas do meio. Nesse contexto, o Jar Test apresenta-

se como ferramenta experimental adequada para a análise, em pequena escala, de fenômenos como formação de vórtices, padrões de recirculação, suspensão de partículas e estabilidade interfacial.

A Figura 1 sintetiza essa relação entre os fundamentos teóricos discutidos e sua aplicação na investigação experimental proposta neste estudo.

Figura 1 – Fundamentos hidrodinâmicos do Jar Test.

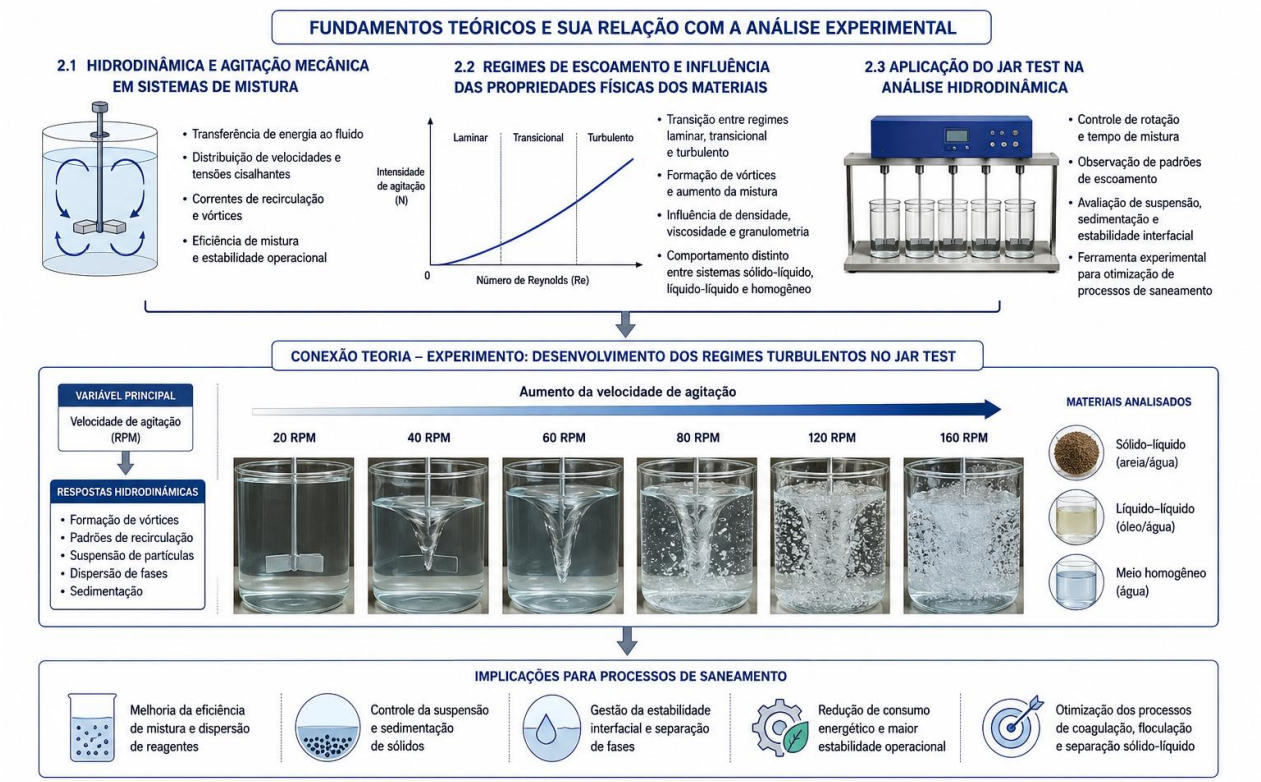


Figura 1 – Síntese da fundamentação teórica e sua integração com a análise experimental no Jar Test.

Fonte: Os autores, 2026.

A partir dessa base conceitual, torna-se possível compreender que a intensidade de agitação não atua isoladamente na definição do comportamento hidráulico, estando sua resposta diretamente associada às propriedades físicas dos materiais e às condições operacionais impostas ao sistema. Assim, a avaliação experimental em diferentes velocidades de rotação e distintos meios de análise permite investigar, de forma comparativa, a formação de estruturas turbulentas, os padrões de mistura e os mecanismos de suspensão, sedimentação e separação de fases.

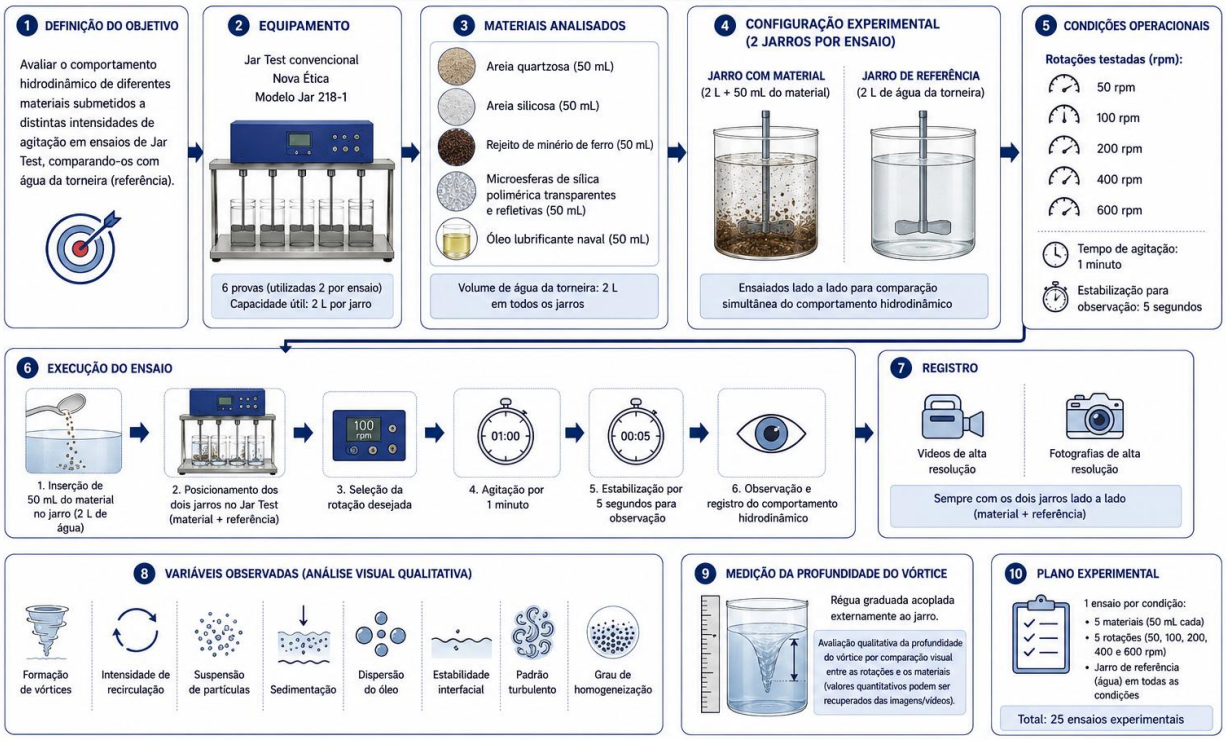
METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi estruturada com o objetivo de avaliar comparativamente o comportamento hidrodinâmico de diferentes materiais submetidos a distintas intensidades de agitação mecânica em ensaios de Jar Test, buscando compreender como propriedades físicas e reológicas específicas influenciam a dinâmica do escoamento em sistemas líquido-particulados e líquido-líquido. A análise concentrou-se na formação de vórtices, nos padrões de recirculação interna, na estabilidade interfacial, na suspensão ou sedimentação de partículas e na capacidade de dispersão dos materiais sob diferentes níveis de fornecimento de energia mecânica.

O delineamento experimental foi concebido para permitir comparação visual direta entre cada material ensaiado e uma condição de referência composta exclusivamente por água da torneira. Essa estratégia reduziu interferências visuais e operacionais associadas à interpretação isolada dos fenômenos e forneceu um parâmetro hidrodinâmico-base para análise dos padrões de turbulência, profundidade aparente do vórtice e comportamento global do escoamento.

Dessa forma, tornou-se possível identificar qualitativamente alterações associadas à densidade aparente dos materiais, à viscosidade relativa, à granulometria dos sólidos, à tendência de sedimentação e à interação entre fases dispersas e o fluido contínuo. O encadeamento metodológico completo, desde a preparação dos materiais até as etapas de observação e registro experimental, está apresentado esquematicamente na Figura 2, que sintetiza a sequência lógica adotada para execução e padronização dos ensaios.

Figura 2 – Procedimentos metodológicos adotados.



Fonte: Os autores, 2026.

Os experimentos foram conduzidos em equipamento Jar Test convencional da marca Nova Ética, modelo Jar 218-1, composto por sistema mecânico de agitação vertical com múltiplas hastes rotacionais e capacidade útil de 2 L por jarro. Embora o equipamento dispusesse de seis posições independentes de ensaio, a investigação foi realizada de forma individualizada, utilizando-se apenas dois jarros por condição experimental, o que permitiu maior controle visual, melhor padronização analítica e redução de variáveis associadas à execução simultânea de múltiplos testes.

A configuração experimental foi mantida constante em todos os ensaios. O jarro posicionado à esquerda foi destinado ao material sob análise, enquanto o jarro posicionado à direita foi preenchido exclusivamente com água da torneira, funcionando como condição de referência visual e hidrodinâmica. Ambos permaneceram submetidos à mesma rotação, tempo de agitação e geometria operacional. Essa disposição lateral permitiu observação simultânea dos fenômenos e favoreceu comparação direta entre o comportamento induzido pelo material e o padrão desenvolvido pela água em condição isolada.

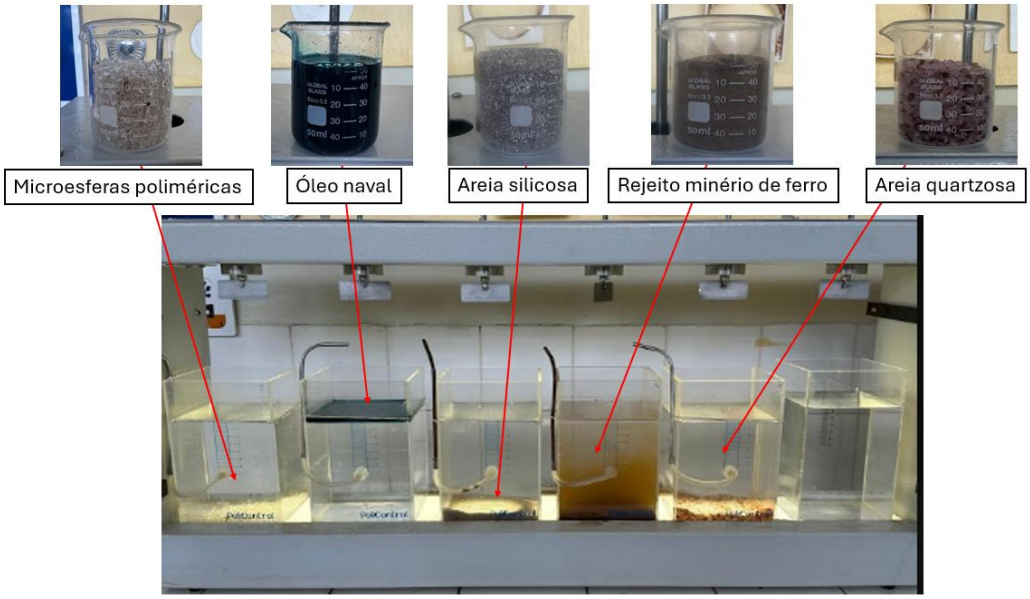
Foram selecionados cinco materiais com características físico-hidrodinâmicas distintas, de modo a representar respostas variadas frente à transferência de energia mecânica no sistema. Os materiais avaliados foram: areia quartzosa, areia silicosa, rejeito de minério de ferro, microesferas de sílica polimérica transparentes e refletivas e óleo lubrificante naval, conforme apresentado na Figura 3.

A escolha dos materiais sólidos buscou representar diferentes comportamentos relacionados à densidade específica, mobilidade particulada, tendência de sedimentação e resposta a regimes turbulentos. A areia quartzosa e a areia silicosa permitiram avaliar partículas minerais de comportamento granular relativamente estável.

O rejeito de minério de ferro foi inserido como material de maior densidade e maior potencial de deposição. As microesferas de sílica polimérica transparentes e refletivas foram empregadas devido à elevada capacidade de visualização durante o escoamento, favorecendo a identificação de trajetórias internas e zonas de recirculação.

Por fim, o óleo lubrificante naval, por sua vez, foi utilizado para representar um sistema líquido-líquido, permitindo observar efeitos associados à viscosidade elevada, à dispersão em fase aquosa e à estabilidade interfacial sob diferentes intensidades de mistura.

Figura 3 – Materiais utilizados para o procedimento experimental e Jar Test utilizado.



Fonte: Os autores, 2026.

Em cada ensaio experimental, o jarro de teste foi inicialmente preenchido com 2 L de água da torneira, estabelecendo uma condição fluida-base uniforme entre todas as análises. Em seguida, foram adicionados 50 mL do material correspondente, mantendo-se padronização volumétrica em todas as condições experimentais.

Para os materiais sólidos, esse volume foi adotado de modo a garantir presença visual suficiente para observação do deslocamento particulado sem comprometer a leitura do escoamento. Para o óleo, o mesmo volume permitiu avaliar ruptura de interface, fragmentação e dispersão da fase sob ação da agitação mecânica.

O jarro de referência permaneceu preenchido exclusivamente com 2 L de água da torneira, sem adição de qualquer fase sólida ou líquida. Essa condição foi mantida ao longo de todo o plano experimental, funcionando como base comparativa para identificação das alterações hidrodinâmicas induzidas por cada material.

Os ensaios foram realizados separadamente para cada material e para cada condição operacional. Não foram conduzidas replicatas experimentais, de modo que cada combinação entre material e rotação correspondeu a um único ensaio. Essa estratégia foi adotada por se tratar de uma investigação de caráter predominantemente visual e comparativo, direcionada à análise qualitativa dos padrões hidrodinâmicos desenvolvidos.

As rotações avaliadas foram 50, 100, 200, 400 e 600 rpm, abrangendo condições de baixa, moderada e elevada intensidade de agitação mecânica. Essa faixa operacional foi definida para representar diferentes níveis de fornecimento de energia ao sistema, permitindo observar a transição entre regimes com baixa mobilização do fluido e condições com maior turbulência e recirculação interna.

Para cada ensaio, ambos os jarros eram posicionados simultaneamente no equipamento, assegurando equivalência geométrica e operacional. Após o posicionamento, definia-se a rotação desejada e iniciava-se a agitação mecânica por 1 minuto, tempo estabelecido para permitir o desenvolvimento do padrão hidrodinâmico dominante, a formação do vórtice e a redistribuição inicial dos materiais no interior do sistema.

Ao término da agitação, adotava-se um intervalo padronizado de 5 segundos para estabilização visual, permitindo redução de perturbações transitórias imediatas e favorecendo observação mais clara da configuração residual do escoamento. Na sequência, realizava-se a análise comparativa entre os dois jarros.

A avaliação experimental foi conduzida de forma predominantemente qualitativa, com base em observação visual simultânea e comparação direta entre a condição ensaiada e a condição de referência. Entre os principais parâmetros observados destacaram-se: formação e geometria aparente do vórtice; profundidade relativa do cone de sucção; intensidade de recirculação interna; mobilidade e suspensão de partículas; deposição no fundo do jarro; dispersão do óleo na fase aquosa; estabilidade ou ruptura interfacial; grau de homogeneização; distribuição espacial do material e persistência de estruturas turbulentas após a interrupção da agitação.

A profundidade aparente do vórtice foi considerada um dos principais parâmetros comparativos entre materiais e rotações, por representar indiretamente a resposta do sistema à transferência de energia mecânica. Em condições de menor resistência ao escoamento, maiores níveis de energia convertidos em movimento rotacional tenderam a favorecer maior desenvolvimento geométrico do vórtice.

Com o objetivo de assegurar comparabilidade entre todas as condições avaliadas, foram mantidos constantes os principais parâmetros operacionais e geométricos do sistema experimental. Entre as variáveis controladas destacaram-se o volume total de fluido em cada jarro, a geometria dos recipientes, o posicionamento lateral fixo no equipamento, o tempo de agitação, o intervalo de estabilização, o volume de material adicionado e a manutenção permanente de um jarro de referência contendo apenas água da torneira. Dessa forma, as diferenças observadas entre os ensaios puderam ser atribuídas predominantemente às propriedades físicas e reológicas dos materiais e à variação da intensidade de agitação aplicada.

Além disso, buscou-se padronizar os critérios de registro e análise visual. Todas as fotografias e vídeos foram obtidos sob a mesma configuração experimental, com enquadramento simultâneo dos dois jarros e preservação do campo comparativo entre condição ensaiada e referência. Essa uniformização reduziu interferências interpretativas e contribuiu para maior consistência analítica.

A síntese das principais condições operacionais adotadas ao longo dos ensaios está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Síntese das condições operacionais da metodologia da pesquisa.

Variável experimental	Condição adotada
Equipamento utilizado	Jar Test Nova Ética – modelo Jar 218-1
Número de jarros por ensaio	2
Condição de referência	Água da torneira
Volume por jarro	2 L
Volume de material adicionado	50 mL
Materiais avaliados	5
Rotações avaliadas	50, 100, 200, 400 e 600 rpm
Tempo de agitação	1 minuto
Tempo de estabilização	5 segundos
Ensaios por condição	1
Registro experimental	Fotografias e vídeos em alta resolução
Tipo de análise	Qualitativa comparativa
Total de condições experimentais	25

Fonte: Os autores, 2026.

Ao todo, o plano experimental permitiu avaliar, de forma sistemática, comparativa e controlada, como propriedades densimétricas, particuladas e reológicas distintas influenciam a resposta hidrodinâmica do sistema sob diferentes intensidades de agitação mecânica. O delineamento adotado forneceu base metodológica consistente para interpretação dos fenômenos de mistura, recirculação, dispersão de fases e formação de vórtices, com aplicabilidade potencial em estudos associados a processos de mistura e tratamento em sistemas de ETA e ETE.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme apresentado nas seções anteriores, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento fluidodinâmico de diferentes materiais submetidos a distintas intensidades de agitação mecânica em ensaios de Jar Test. Para isso, foram analisadas condições experimentais representativas de sistemas líquido-particulados e líquido-líquido, buscando compreender como propriedades físicas específicas influenciam a formação de estruturas de escoamento, a suspensão de partículas, a dispersão de fases e o desenvolvimento de regimes turbulentos.

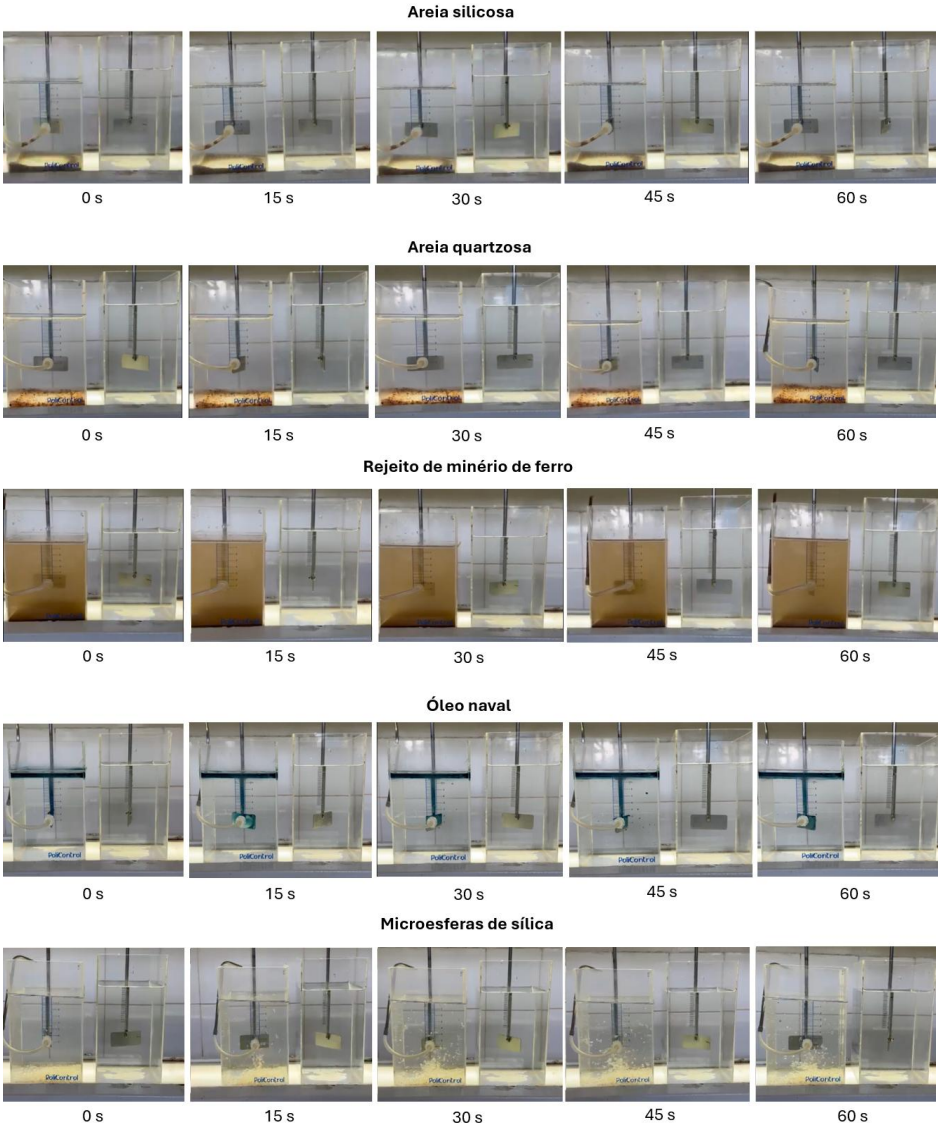
A análise dos resultados fundamentou-se em registros videográficos e fotográficos obtidos em alta resolução ao longo dos ensaios, os quais permitiram acompanhar a evolução temporal dos fenômenos hidrodinâmicos observados em cada condição experimental. A comparação sistemática entre os diferentes materiais e as distintas rotações investigadas possibilitou identificar variações significativas na formação de vórtices, nos padrões de recirculação interna, na estabilidade interfacial e nos mecanismos de mistura promovidos pela agitação mecânica.

A utilização de imagens sequenciais obtidas durante os 60 s de operação de cada ensaio mostrou-se particularmente relevante para a interpretação dos fenômenos analisados, uma vez que permitiu visualizar não apenas a configuração final do escoamento, mas também sua evolução dinâmica ao longo do tempo (espectro temporal) e ao longo do espaço do reator estático (espectro espacial). Dessa forma, tornou-se possível avaliar qualitativamente a influência da intensidade de agitação e das propriedades físicas dos materiais sobre a resposta hidrodinâmica do sistema, estabelecendo relações entre o fornecimento de energia mecânica e os padrões de escoamento desenvolvidos no interior dos jarros.

Comportamento hidrodinâmico sob agitação de 50 rpm

A Figura 4 apresenta os resultados das configurações ensaiadas para os diferentes materiais sob a agitação de 50 rpm. Os reatores a esquerda representam o material testado, enquanto os reatores a direita representam a água pura.

Figura 4 – Registros fotográficos na agitação de 50 rpm.



Fonte: Os autores, 2026.

Para a agitação de 50 rpm, observou-se que praticamente todos os arranjos líquido-particulado e líquido-líquido apresentaram comportamento semelhante. De forma geral, houve uma predominância de movimentos rotacionais mais organizados, baixa suspensão e deposição de partículas e vórtices pouco desenvolvidos.

Pela Figura 4, observa-se que tanto a areia silicosa quanto a quartzosa apresentaram mobilização predominantemente horizontal, sem evidências significativas de transporte ascensional das partículas ao longo da coluna líquida do reator estático. Esse comportamento pode ser atribuído à reduzida transferência de energia mecânica ao sistema, insuficiente para gerar tensões cisalhantes e velocidades verticais capazes de superar a velocidade terminal de sedimentação dos grãos.

Nessa condição operacional, o escoamento foi caracterizado principalmente pela presença de correntes de recirculação próximas ao fundo do reator, promovendo deslocamento longitudinal das partículas sem suspensão efetiva da fase sólida. Além disso, verificou-se o acúmulo progressivo de material particulado nas regiões correspondentes aos vértices da base dos jarros, fenômeno associado à formação de zonas de baixa velocidade e reduzida capacidade de transporte hidráulico.

Em sistemas agitados, essas regiões frequentemente atuam como zonas de estagnação ou recirculação secundária, favorecendo a deposição de partículas cuja força gravitacional permanece predominante em relação às forças hidrodinâmicas geradas pelo escoamento. Consequentemente, a baixa intensidade de agitação observada a 50 rpm mostrou-se insuficiente para promover suspensão homogênea dos materiais, resultando na concentração de partículas junto ao fundo do sistema e evidenciando limitações da mistura sob condições de reduzido fornecimento de energia.

Para o rejeito de minério de ferro, observou-se reduzida mobilização das partículas ao longo do ensaio, evidenciando baixa eficiência de dispersão e mistura sob a condição de 50 rpm. O comportamento observado pode ser atribuído à elevada densidade do material, bem como a baixa transferência de energia mecânica rotacional, fatores que favoreceram a rápida deposição das partículas mais grosseiras e restringiram a suspensão da fração sólida. Em contrapartida, verificou-se que a fração mais fina do material permaneceu dispersa no meio líquido, promovendo o aumento da turbidez da água e conferindo ao sistema aspecto visual característico de suspensão coloidal.

Um comportamento distinto, todavia, foi observado para o óleo lubrificante naval. Em virtude de sua menor massa específica em relação à água e da reduzida intensidade de agitação aplicada, a fase oleosa permaneceu predominantemente concentrada na região superficial do reator, sem apresentar dispersão significativa ao longo da coluna líquida. Nessas condições, a energia fornecida ao sistema mostrou-se insuficiente para promover ruptura interfacial ou formação expressiva de gotículas dispersas, preservando a separação entre as fases. Adicionalmente, observou-se leve aderência do óleo à superfície da pá do Jar Test, fenômeno associado às características viscosas do material e à interação entre a fase oleosa e os componentes sólidos do sistema de agitação.

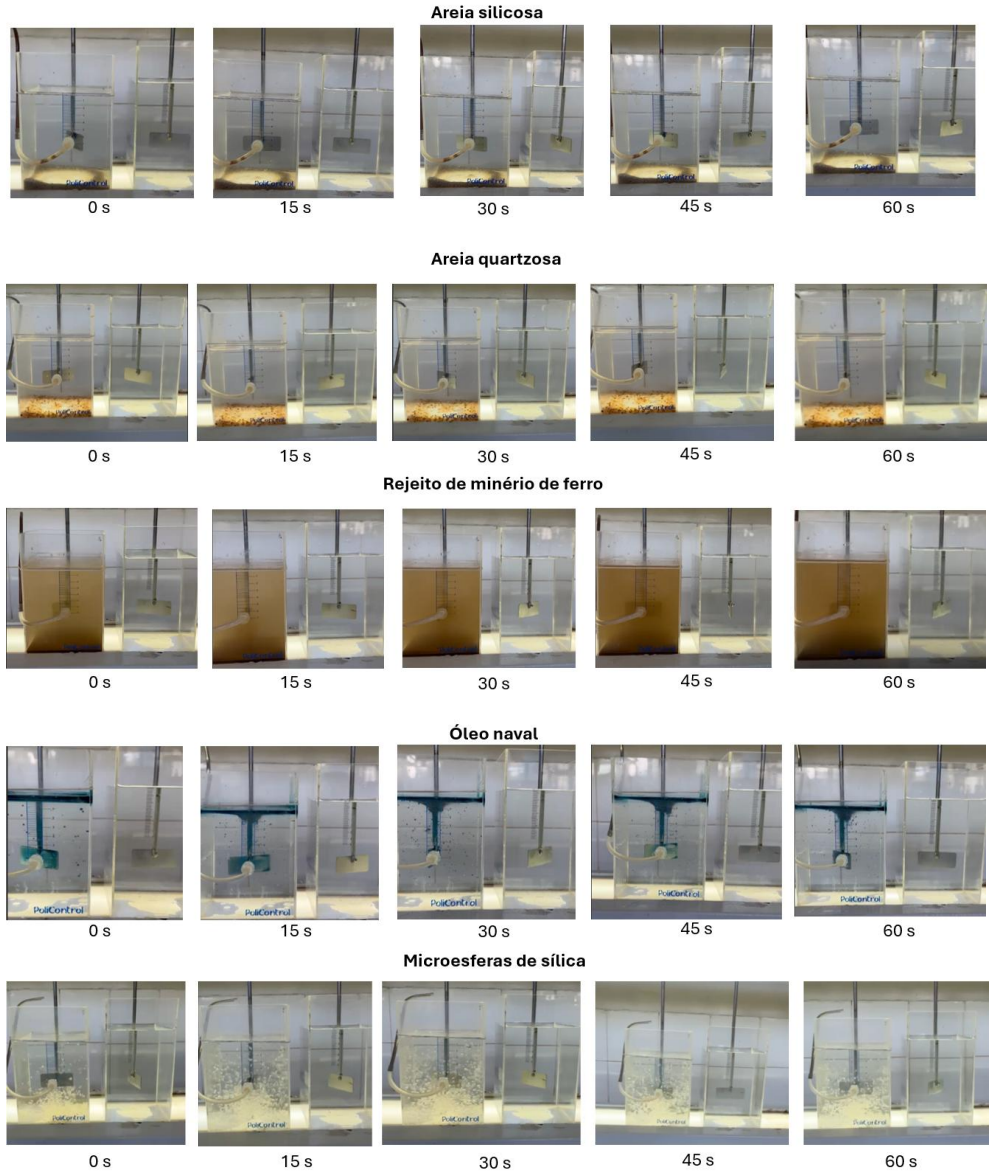
Comportamento hidrodinâmico sob agitação de 100 rpm

A Figura 5 apresenta os resultados das configurações ensaiadas para os diferentes materiais sob a agitação de 100 rpm.

A elevação da velocidade de agitação para 100 rpm promoveu modificações perceptíveis na dinâmica do escoamento em comparação aos resultados observados a 50 rpm. De maneira geral, verificou-se maior transferência de energia mecânica ao sistema, resultando em aumento da intensidade das correntes de recirculação e maior capacidade de mobilização dos materiais presentes no interior dos reatores. Embora a suspensão completa das fases sólidas ainda não tenha sido observada, os registros experimentais evidenciaram um incremento da interação entre as partículas e o escoamento induzido pela rotação das pás.

Para a areia silicosa, observou-se comportamento semelhante ao verificado na condição anterior, com predominância da deposição de partículas junto ao fundo do reator. Entretanto, tornou-se perceptível uma maior movimentação longitudinal dos grãos e uma redistribuição mais uniforme do material ao longo da base do recipiente. Esse comportamento sugere que o aumento da velocidade de agitação intensificou as tensões cisalhantes próximas ao fundo do reator, embora ainda não tenha sido suficiente para promover suspensão significativa das partículas ao longo da coluna líquida.

Figura 5 – Registros fotográficos na agitação de 100 rpm.



Fonte: Os autores, 2026.

A areia quartzosa apresentou comportamento análogo, porém com mobilização mais evidente das partículas depositadas. Os registros indicam a ocorrência de deslocamentos horizontais contínuos associados às células de recirculação geradas pela agitação, favorecendo a redistribuição do material particulado e reduzindo a formação de depósitos localizados observados em menores velocidades de rotação. Apesar disso, a ação gravitacional permaneceu predominante, limitando a ascensão dos grãos e restringindo a mistura à região inferior do sistema.

Para o rejeito de minério de ferro, verificou-se novamente forte influência da elevada densidade das partículas sobre a dinâmica do escoamento. Entretanto, diferentemente do observado a 50 rpm, foi possível identificar uma dispersão mais pronunciada da fração fina do material ao longo do volume líquido, resultando em aumento da turbidez e em uma coloração mais homogênea da massa líquida. Tal comportamento indica que o incremento da energia de agitação favoreceu a manutenção das partículas mais finas em suspensão, embora as frações mais grosseiras continuassem apresentando elevada tendência à deposição.

No ensaio com óleo lubrificante naval, observou-se o início de uma interação mais intensa entre a fase oleosa e a água. Embora a maior parte do óleo permanecesse concentrada na superfície devido à diferença de densidade entre as fases, tornou-se evidente a formação de uma região central associada ao vórtice superficial, promovendo

deformação da interface e maior aderência do óleo às proximidades da haste e da pá de agitação. Ainda assim, a energia disponível mostrou-se insuficiente para provocar dispersão significativa da fase oleosa ao longo da coluna líquida ou formação expressiva de gotículas dispersas.

As microesferas de sílica polimérica apresentaram uma das respostas mais representativas do aumento da intensidade de agitação. Em comparação aos materiais minerais, observou-se maior mobilidade ao longo da coluna líquida e melhor visualização das estruturas de recirculação formadas no interior do reator. Os registros evidenciaram a presença de trajetórias ascendentes e descendentes associadas ao escoamento induzido pela pá, permitindo identificar com maior clareza os padrões de circulação interna e as regiões de maior transporte de massa.

De modo geral, os resultados obtidos a 100 rpm evidenciam uma condição intermediária entre o regime de baixa mobilização observado a 50 rpm e os níveis mais intensos de mistura esperados para rotações superiores. Nessa condição, as forças hidrodinâmicas tornam-se mais relevantes na dinâmica do sistema, embora ainda coexistam limitações associadas à sedimentação gravitacional dos materiais mais densos e à reduzida dispersão de fases com propriedades físicas contrastantes.

Comportamento hidrodinâmico sob agitação de 200 rpm

A Figura 6 apresenta os resultados das configurações ensaiadas para os diferentes materiais sob a agitação de 200 rpm. O aumento da velocidade de agitação para 200 rpm promoveu alterações significativas no comportamento dos materiais avaliados, evidenciando uma condição hidrodinâmica mais energética e caracterizada por maior capacidade de transporte de massa no interior dos reatores.

Em comparação às rotações anteriores, observou-se intensificação dos movimentos de recirculação, ampliação da região influenciada pela ação da pá e maior interação entre as fases presentes no sistema. De maneira geral, os resultados indicam uma transição para um regime de mistura mais eficiente, no qual os efeitos da agitação passaram a competir de forma mais efetiva com os mecanismos gravitacionais responsáveis pela sedimentação e segregação dos materiais.

Para a areia silicosa, verificou-se aumento da mobilização das partículas junto ao fundo do reator, acompanhado pela formação de estruturas de circulação mais organizadas nas proximidades da pá. Embora a maior parte do material ainda permanecesse concentrada na região inferior do recipiente, observou-se redução da compactação do depósito e maior redistribuição espacial dos grãos, indicando incremento das tensões cisalhantes exercidas pelo escoamento. A presença de partículas em movimento contínuo sugere que a energia fornecida ao sistema passou a atuar de forma mais efetiva na remoção de material das zonas de deposição anteriormente observadas.

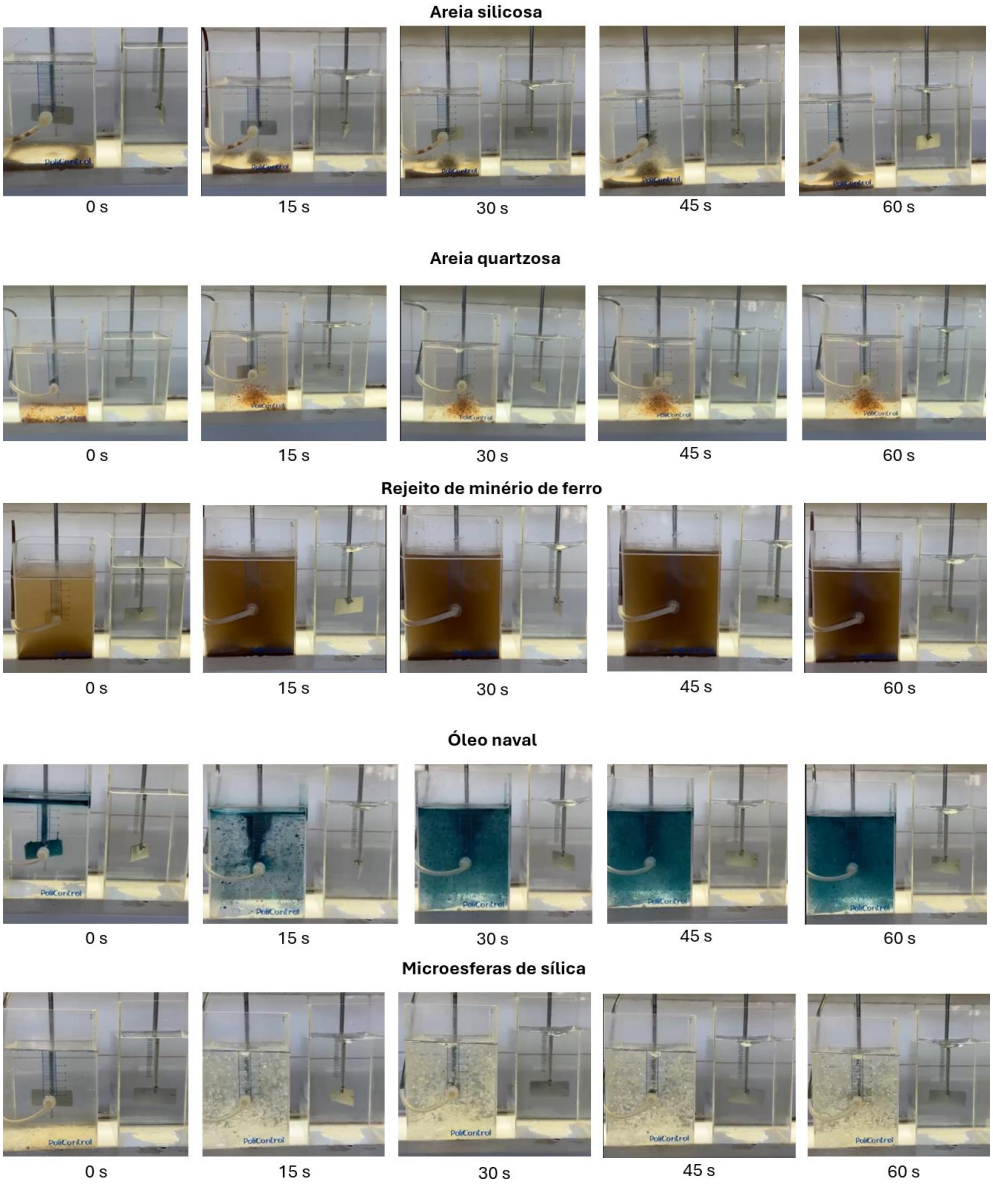
A areia quartzosa apresentou comportamento semelhante, porém com evidências mais pronunciadas de ressuspensão local. Os registros mostram a formação de uma região central de intensa movimentação particulada próxima à pá, caracterizada pela elevação temporária de partículas seguida de seu retorno ao fundo do reator. Esse comportamento evidencia a atuação simultânea das forças de arraste e da gravidade, resultando em ciclos sucessivos de suspensão e deposição. Apesar de não ter sido alcançada uma suspensão homogênea da massa sólida, a interação entre partículas e escoamento tornou-se significativamente mais intensa quando comparada às condições de menor rotação.

No caso do rejeito de minério de ferro, a elevação da velocidade de agitação favoreceu a dispersão de uma parcela ainda maior da fração fina do material ao longo da coluna líquida. Observou-se uma distribuição visualmente homogênea da coloração do meio, indicando que os mecanismos de mistura passaram a atuar de forma mais eficiente sobre as partículas de menor tamanho.

Entretanto, a elevada densidade característica do rejeito continuou limitando a suspensão das frações mais grosseiras, as quais permaneceram sujeitas a processos de deposição. Esse comportamento evidencia a forte influência das propriedades densimétricas sobre a resposta hidrodinâmica do sistema, mesmo sob condições mais energéticas de agitação.

Os efeitos da intensificação da mistura tornaram-se particularmente evidentes no ensaio com óleo lubrificante naval. Diferentemente do observado nas rotações inferiores, a fase oleosa passou a apresentar deformação interfacial mais acentuada e dispersão progressiva ao longo da coluna líquida.

Figura 6 – Registros fotográficos na agitação de 200 rpm.



Fonte: Os autores, 2026.

A formação de uma região central associada ao vórtice promoveu o arraste do óleo para camadas mais profundas do reator, favorecendo a fragmentação da fase contínua em estruturas menores e aumentando a área de contato entre óleo e água. Embora não se observe uma emulsificação completa, os registros indicam que a energia fornecida ao sistema se tornou suficiente para reduzir significativamente a segregação entre as fases.

As microesferas de sílica polimérica apresentaram o comportamento mais ilustrativo da dinâmica interna do escoamento. Os registros evidenciaram a formação de trajetórias bem definidas de ascensão e retorno das partículas, permitindo visualizar com clareza as células de circulação desenvolvidas no interior do reator.

Observou-se distribuição mais uniforme das microesferas ao longo do volume líquido, indicando que os mecanismos de transporte convectivo passaram a predominar sobre os processos de deposição. Essa condição reforça a utilidade desse material como indicador visual dos padrões hidrodinâmicos estabelecidos durante os ensaios.

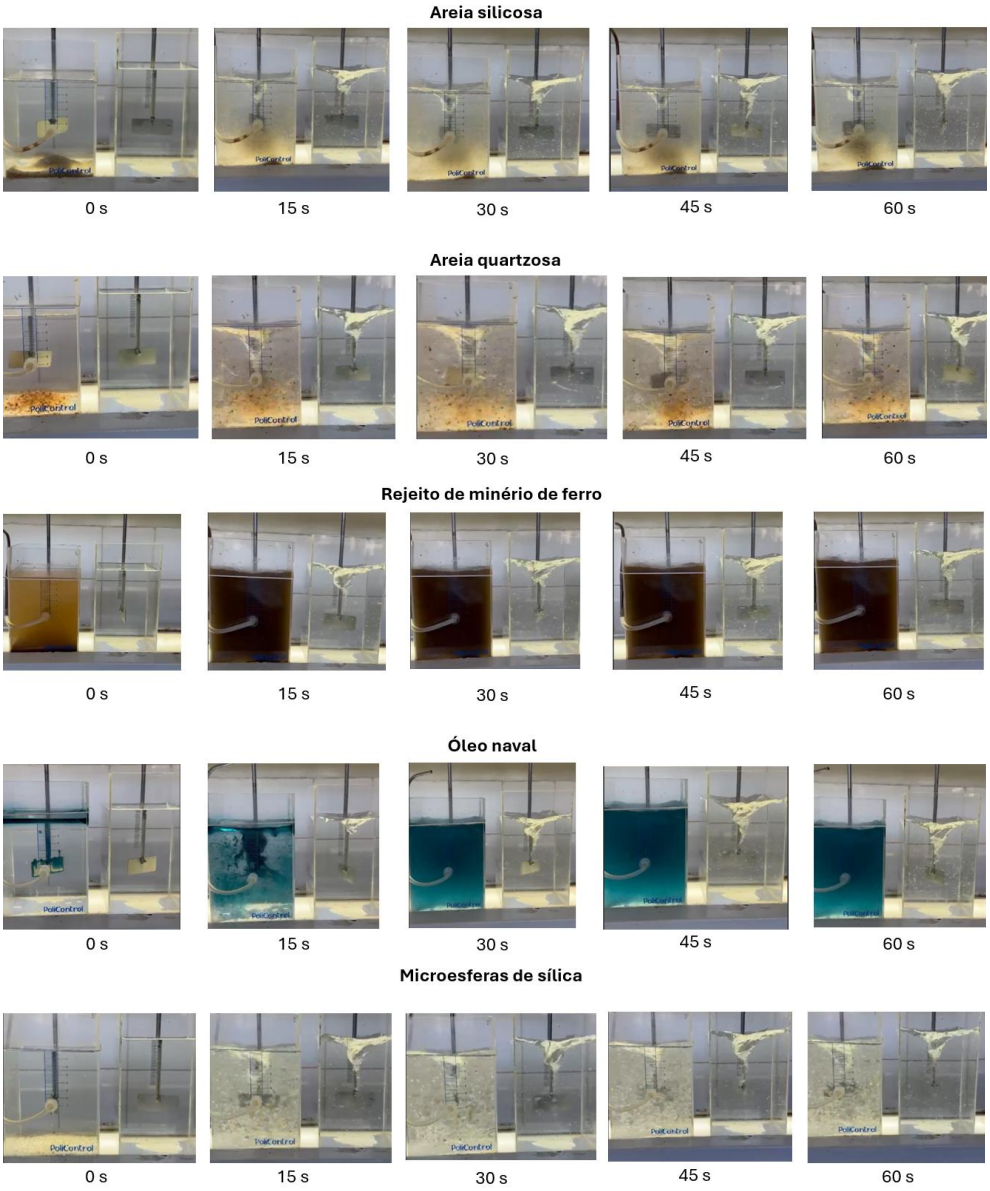
De forma geral, os resultados obtidos a 200 rpm evidenciam uma condição intermediária avançada de mistura, caracterizada por aumento expressivo da mobilização particulada, maior eficiência de dispersão e fortalecimento dos

mecanismos de recirculação interna. Em comparação às rotações de 50 e 100 rpm, verificou-se maior capacidade de transferência de energia ao sistema, refletida na intensificação do transporte vertical de materiais e na redução dos efeitos de segregação gravitacional. Esses resultados indicam que, nessa faixa operacional, a agitação mecânica passa a exercer papel dominante na organização do escoamento e na distribuição espacial das fases presentes.

Comportamento hidrodinâmico sob agitação de 400 rpm

A Figura 7 apresenta os resultados das configurações ensaiadas para os diferentes materiais sob a agitação de 400 rpm.

Figura 7 – Registros fotográficos na agitação de 400 rpm.



Fonte: Os autores, 2026.

A condição de rotação demonstrada na Figura 7 representa, sob o ponto de vista hidrodinâmico, uma mudança substancial em relação às rotações anteriormente analisadas. Os registros experimentais evidenciam o estabelecimento de um regime de mistura altamente energético, caracterizado pela formação de vórtices bem desenvolvidos, intensificação dos movimentos de recirculação e ampliação da capacidade de transporte de massa ao longo de toda a coluna líquida. Nessa condição, a influência da agitação mecânica passa a dominar o

comportamento do sistema, reduzindo significativamente os efeitos de segregação observados em menores velocidades de rotação.

Para a areia silicosa, observou-se aumento expressivo da mobilização das partículas, acompanhado pela formação de uma região central de sucção associada ao vórtice desenvolvido na superfície livre. Embora parte do material ainda permanecesse concentrada junto ao fundo do reator, verificou-se maior incorporação de partículas às correntes de recirculação, favorecendo sua redistribuição ao longo do volume líquido. A configuração observada indica que a energia transferida ao sistema se tornou suficiente para reduzir a estabilidade dos depósitos sedimentados e promover ciclos contínuos de ressuspensão e deposição.

A areia quartzosa apresentou comportamento ainda mais evidente. Os registros mostram intensa movimentação particulada nas proximidades da pá e ao longo do eixo central do reator, com sucessivas trajetórias ascendentes e descendentes associadas às estruturas de circulação estabelecidas. Em comparação às rotações de 100 e 200 rpm, observou-se aumento significativo da quantidade de partículas em suspensão, indicando que as forças hidrodinâmicas passaram a superar com maior eficiência os mecanismos gravitacionais responsáveis pela deposição dos grãos. O sistema passou a operar sob uma condição de mistura mais homogênea, com maior distribuição espacial da fase sólida.

No ensaio realizado com rejeito de minério de ferro, verificou-se a manutenção de elevada turbidez ao longo de toda a coluna líquida, evidenciando eficiente dispersão da fração fina do material. A coloração praticamente uniforme observada durante todo o período experimental sugere que os mecanismos de mistura atuaram de forma suficientemente intensa para manter grande parte das partículas finas em suspensão. Entretanto, mesmo sob elevada agitação, a influência da elevada densidade característica do rejeito continuou sendo perceptível, especialmente para partículas de maiores dimensões, que tendem a apresentar velocidades de sedimentação superiores às observadas para os demais materiais sólidos.

O comportamento do óleo lubrificante naval foi um dos mais impactados pelo aumento da rotação. Os registros evidenciam intensa deformação da interface óleo-água e significativa dispersão da fase oleosa ao longo do volume líquido. A estrutura de vórtice desenvolvida no centro do reator promoveu o arraste contínuo do óleo para regiões mais profundas, favorecendo a fragmentação da fase superficial em múltiplas porções menores distribuídas no escoamento. Esse fenômeno indica aumento substancial da área interfacial entre as fases e evidencia que a energia mecânica fornecida ao sistema passou a ser suficiente para promover um processo avançado de dispersão, aproximando o comportamento observado das condições encontradas em operações de mistura rápida aplicadas em sistemas de tratamento.

As microesferas de sílica polimérica continuaram apresentando elevado potencial para visualização do escoamento interno. Em 400 rpm, observou-se distribuição praticamente generalizada das partículas ao longo de toda a coluna líquida, permitindo identificar com clareza as trajetórias associadas aos movimentos ascendentes próximos às regiões periféricas e descendentes nas proximidades do eixo central do vórtice. A intensa mobilidade das microesferas evidencia o fortalecimento dos mecanismos convectivos de transporte de massa e confirma a presença de estruturas de circulação capazes de promover elevada homogeneização do sistema.

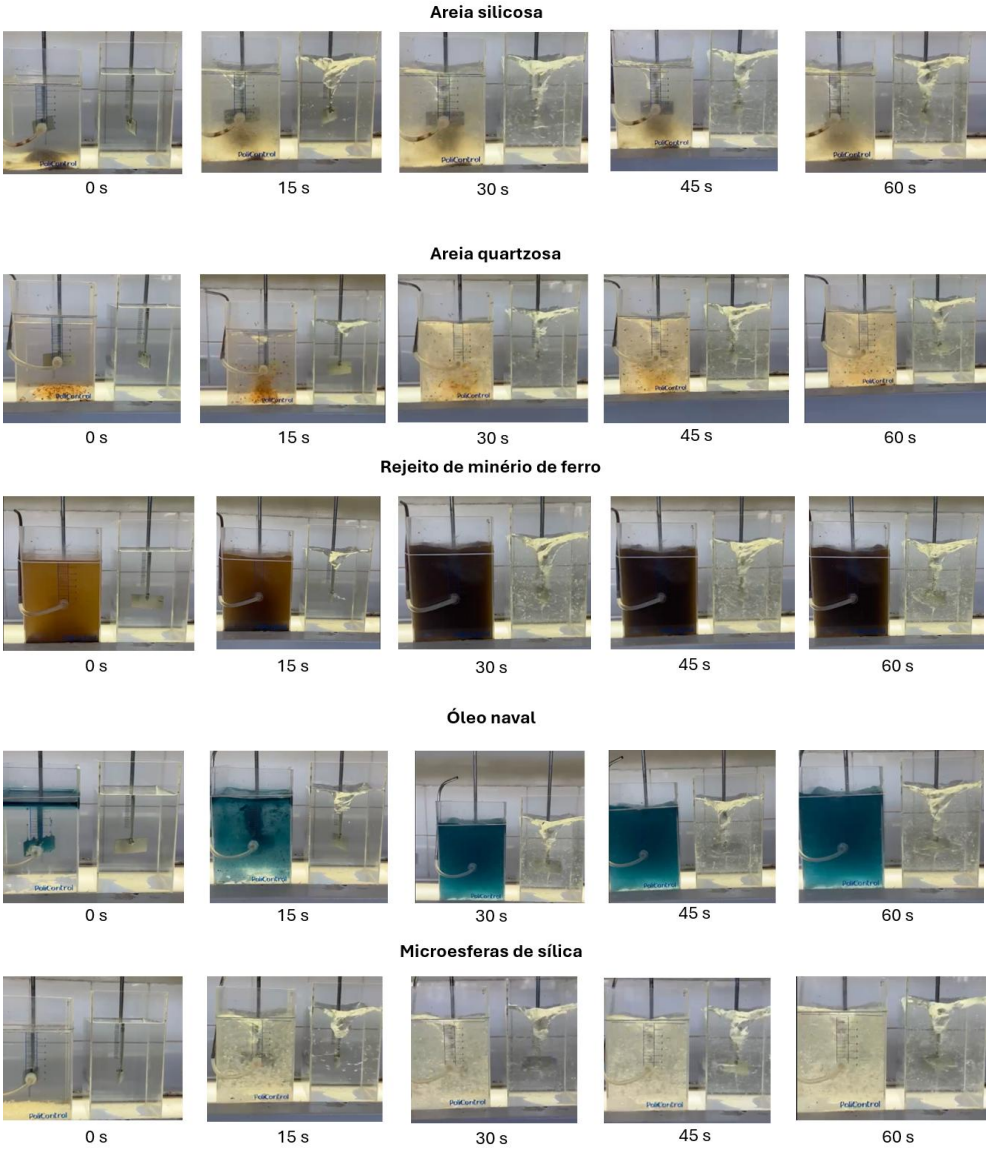
Outro aspecto relevante observado nessa condição operacional foi o expressivo desenvolvimento do vórtice superficial, perceptível tanto nos sistemas contendo materiais quanto no jarro de referência. A profundidade do cone de sucção mostrou-se significativamente superior à observada nas rotações anteriores, indicando maior conversão da energia fornecida pela pá em movimento rotacional do fluido. Esse comportamento é consistente com o aumento das velocidades tangenciais e da intensidade das correntes de recirculação, fenômenos normalmente associados à transição para condições de mistura fortemente turbulentas.

Por fim, os resultados obtidos a 400 rpm evidenciam uma condição hidrodinâmica próxima do limite superior de eficiência de mistura observado nos ensaios. A mobilização das partículas tornou-se significativamente mais intensa, a dispersão das fases foi amplificada e os mecanismos de recirculação passaram a atuar em praticamente todo o volume do reator. Sob essa condição, a energia de agitação mostrou-se capaz de minimizar grande parte dos efeitos de sedimentação e segregação observados em menores rotações, produzindo um ambiente altamente favorável aos processos de mistura, transporte de massa e interação entre fases.

Comportamento hidrodinâmico sob agitação de 600 rpm

Finalmente, a Figura 8 apresenta os resultados das configurações ensaiadas para os diferentes materiais sob a agitação de 600 rpm. Esta rotação foi considerada como sendo a máxima permitida pelo aparelho Jar Test utilizado nos ensaios.

Figura 8 – Registros fotográficos na agitação de 600 rpm.



Fonte: Os autores, 2026.

A condição experimental conduzida a 600 rpm correspondeu ao maior nível de fornecimento de energia mecânica investigado neste estudo e produziu os padrões hidrodinâmicos mais intensos observados ao longo de toda a campanha experimental. De maneira geral, verificou-se a consolidação de um regime de elevada turbulência, caracterizado pela formação de vórtices profundamente desenvolvidos, intensa circulação tridimensional do fluido e significativa ampliação dos mecanismos de transporte de massa no interior dos reatores.

Uma das características mais marcantes dessa condição foi o expressivo aprofundamento do cone de sucção associado ao vórtice superficial, observado tanto nos sistemas contendo materiais quanto no jarro de referência. Em diversos instantes do ensaio, a geometria do vórtice assumiu configuração estável e bem definida, indicando elevada conversão da energia fornecida pelas pás em movimento rotacional do fluido. Esse comportamento sugere a predominância de forças inerciais sobre os efeitos gravitacionais locais, favorecendo a redistribuição contínua das fases presentes no sistema.

Nos ensaios com areia silicosa e areia quartzosa, observou-se uma redução substancial da estratificação das partículas ao longo do experimento. Embora parte do material permanecesse concentrada na região inferior dos recipientes, tornou-se evidente a ocorrência de ciclos contínuos de ressuspensão promovidos pelas correntes ascendentes geradas pela agitação. Comparativamente às condições anteriores, a distribuição espacial dos grãos mostrou-se mais dinâmica, com menor permanência em zonas específicas de deposição e maior interação com o escoamento principal.

A resposta do rejeito de minério de ferro também foi significativamente alterada sob essa intensidade de agitação. A elevada turbidez observada ao longo de toda a coluna líquida indica que parcela expressiva das partículas finas permaneceu continuamente dispersa durante o ensaio.

Esse resultado evidencia que, mesmo para materiais de elevada densidade específica, o aumento da energia mecânica foi capaz de intensificar os mecanismos de transporte e reduzir os efeitos da sedimentação diferencial observados em menores rotações. Ainda assim, a persistência de regiões mais escuras próximas ao fundo do reator sugere que as frações mais grosseiras continuaram apresentando tendência preferencial à deposição.

O sistema contendo óleo lubrificante naval apresentou uma das transformações mais expressivas entre todos os materiais avaliados. Os registros indicam que a fase oleosa deixou de se comportar como uma camada superficial claramente definida e passou a ocupar uma parcela significativa do volume líquido, evidenciando elevado grau de dispersão.

A ação combinada do vórtice central e das estruturas de recirculação promoveu sucessivos processos de fragmentação da fase oleosa, aumentando a área interfacial disponível e reduzindo a segregação observada em condições menos energéticas. Esse comportamento demonstra a elevada capacidade da agitação em modificar a organização espacial de sistemas multifásicos submetidos a intensos gradientes de velocidade.

As microesferas de sílica polimérica proporcionaram a visualização mais clara do padrão de escoamento desenvolvido nessa condição operacional. Diferentemente das rotações inferiores, nas quais ainda era possível identificar regiões preferenciais de circulação, os registros obtidos a 600 rpm revelaram uma ocupação praticamente integral do volume do reator pelas partículas traçadoras. Tal comportamento indica elevada eficiência de mistura e forte conectividade entre as diferentes regiões do escoamento, evidenciando que os mecanismos convectivos passaram a atuar em praticamente toda a extensão do sistema.

Sob uma perspectiva global, os resultados obtidos a 600 rpm sugerem que o sistema atingiu uma condição hidrodinâmica próxima ao limite operacional imposto pelo equipamento utilizado. Nessa situação, as diferenças associadas exclusivamente à densidade ou à granulometria dos materiais tornam-se relativamente menos pronunciadas, uma vez que a elevada intensidade da agitação tende a impor um comportamento dominado pela turbulência e pelo transporte convectivo. Como consequência, observa-se aumento da homogeneização dos sistemas, intensificação da dispersão de fases e redução dos efeitos de segregação gravitacional, características diretamente relacionadas aos processos de mistura rápida empregados em diversas operações unitárias de tratamento de água e efluentes.

Análise conjunta da intensidade de agitação e do desenvolvimento de regimes hidrodinâmicos turbulentos

A análise integrada dos resultados obtidos ao longo dos ensaios evidencia que a intensidade de agitação constituiu o principal fator responsável pela organização hidrodinâmica dos sistemas avaliados. Embora as propriedades físicas dos materiais tenham exercido influência significativa sobre os mecanismos de suspensão, sedimentação, dispersão e estabilidade interfacial, observou-se que o aumento progressivo da rotação promoveu alterações sistemáticas no padrão de escoamento desenvolvido no interior dos reatores.

De modo generalizado, os resultados indicam que a resposta dos materiais esteve diretamente associada ao equilíbrio entre as forças gravitacionais, responsáveis pela deposição de partículas e segregação de fases, e as forças inerciais induzidas pela agitação mecânica, responsáveis pela suspensão de sólidos, formação de vórtices e intensificação dos mecanismos de transporte de massa. À medida que a energia fornecida ao sistema aumentou, verificou-se uma redução gradual da influência dos processos de sedimentação e um fortalecimento progressivo dos fenômenos associados à mistura turbulenta.

A interpretação integrada dos resultados permitiu identificar três faixas hidrodinâmicas distintas ao longo das condições operacionais investigadas. Essas faixas refletem diferentes níveis de predominância entre os mecanismos gravitacionais e as forças inerciais induzidas pela agitação mecânica, resultando em comportamentos característicos quanto à suspensão de partículas, dispersão de fases, desenvolvimento do vórtice e eficiência global de mistura.

As principais características observadas em cada intervalo de rotação são sintetizadas na Tabela 2, que apresenta uma classificação dos regimes hidrodinâmicos identificados experimentalmente e suas respectivas implicações sobre o comportamento dos materiais avaliados.

Tabelas 2 – Faixas hidrodinâmicas de escoamento e implicações no regime turbulento observado.

Faixa hidrodinâmica	Rotação (rpm)	Características predominantes	Resposta observada
Baixa intensidade de mistura	50–100	Vórtices pouco desenvolvidos; reduzida recirculação; predominância dos efeitos gravitacionais	Sedimentação acentuada de partículas; baixa suspensão de sólidos; manutenção da segregação entre fases; limitada dispersão do óleo
Regime de transição	200	Intensificação das correntes de circulação; aumento da mobilização particulada; ampliação do transporte convectivo	Suspensão parcial de sólidos; maior homogeneização; início da dispersão volumétrica do óleo; redução dos efeitos de segregação
Elevada intensidade de mistura	400–600	Vórtices profundos; intensa recirculação; predominância das forças inerciais; elevado transporte de massa	Suspensão significativa de partículas; dispersão avançada do óleo; maior homogeneização do sistema; redução dos efeitos gravitacionais

Fonte: Os autores, 2026.

A primeira faixa correspondeu às rotações de 50 e 100 rpm, caracterizadas por limitada capacidade de suspensão de partículas, predominância dos efeitos gravitacionais e reduzida dispersão dos materiais. Nessas condições, a energia transferida ao fluido mostrou-se insuficiente para promover mistura homogênea ao longo da coluna líquida, favorecendo a formação de depósitos no fundo dos reatores e a manutenção de interfaces relativamente estáveis entre fases de diferentes densidades. Esse comportamento foi particularmente evidente para as areias e para o rejeito de minério de ferro, materiais que apresentaram baixa mobilidade vertical e forte tendência à deposição.

A segunda faixa foi observada em 200 rpm e caracterizou-se por uma condição de transição hidrodinâmica. Nessa situação, os mecanismos de transporte induzidos pela agitação passaram a competir diretamente com os processos de sedimentação, resultando em aumento da mobilização particulada, intensificação das correntes de recirculação e maior dispersão das fases presentes no sistema. Os resultados obtidos nessa condição sugerem a existência de um limiar operacional a partir do qual a energia de agitação passa a exercer influência dominante sobre a organização espacial dos materiais. A dispersão progressiva do óleo e o aumento da suspensão das partículas evidenciaram essa mudança de comportamento.

Por sua vez, as rotações de 400 e 600 rpm configuraram uma terceira faixa hidrodinâmica, caracterizada pelo predomínio dos mecanismos turbulentos e pela elevada capacidade de mistura. Nessas condições, observou-se forte desenvolvimento do vórtice superficial, ampliação das estruturas de recirculação, aumento da suspensão de partículas e significativa redução dos efeitos de segregação gravitacional. A dispersão do óleo lubrificante, a manutenção de partículas finas em suspensão e a distribuição praticamente homogênea das microesferas de sílica ao longo da coluna líquida constituem evidências da elevada eficiência de transporte de massa alcançada nesses ensaios.

Além da influência da intensidade de agitação, os resultados demonstraram que as propriedades físicas dos materiais desempenham papel fundamental na resposta hidrodinâmica do sistema. Os materiais de maior densidade específica apresentaram maior resistência à suspensão e maior tendência à deposição, enquanto materiais de menor densidade ou menor dimensão característica responderam mais rapidamente ao aumento da energia de agitação. Essa constatação reforça a importância de considerar simultaneamente parâmetros hidráulicos e características físico-químicas dos materiais durante a concepção e operação de unidades de mistura em sistemas de saneamento.

Outro aspecto relevante refere-se ao comportamento das microesferas de sílica polimérica. Em função de sua elevada capacidade de visualização e de sua sensibilidade às estruturas de escoamento, esse material mostrou-se particularmente eficiente para identificação das zonas de recirculação, trajetórias preferenciais de transporte e regiões de elevada turbulência. Dessa forma, seu emprego contribuiu significativamente para a interpretação qualitativa dos fenômenos observados ao longo dos ensaios.

Sob a perspectiva operacional de Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), os resultados obtidos evidenciam que a intensidade de mistura deve ser cuidadosamente ajustada em função das características do material processado e dos objetivos da operação unitária. Condições de baixa energia podem resultar em mistura insuficiente e baixa mobilização de partículas, enquanto níveis excessivamente elevados podem promover elevado consumo energético e intensificação desnecessária dos gradientes de velocidade. Assim, a definição adequada dos parâmetros de agitação constitui etapa fundamental para maximização da eficiência operacional e otimização do uso de energia em processos de tratamento.

De forma geral, os resultados alcançados permitiram atingir os objetivos propostos nesta pesquisa ao demonstrar experimentalmente como diferentes materiais respondem a distintas intensidades de agitação em sistemas do tipo Jar Test. Os ensaios evidenciaram a estreita relação entre energia de mistura, propriedades físicas dos materiais e desenvolvimento dos regimes hidrodinâmicos, contribuindo para ampliar a compreensão dos fenômenos de transporte, mistura e dispersão frequentemente presentes em operações unitárias aplicadas ao saneamento ambiental.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram avaliar experimentalmente a influência da intensidade de agitação sobre o comportamento hidrodinâmico de materiais com propriedades físicas distintas em ensaios de Jar Test. A partir da análise comparativa dos registros fotográficos e videográficos, verificou-se que o aumento da rotação promoveu alterações significativas nos mecanismos de suspensão, sedimentação, dispersão de fases, recirculação interna e desenvolvimento de vórtices.

De modo geral, observou-se que a resposta dos materiais foi condicionada pelo equilíbrio entre as forças gravitacionais e a energia mecânica transferida ao sistema. Enquanto as menores rotações favoreceram a deposição de partículas e a segregação de fases, as maiores intensidades de agitação resultaram em maior homogeneização, ampliação dos mecanismos de transporte de massa e fortalecimento dos processos turbulentos.

A análise integrada dos ensaios permitiu identificar três faixas hidrodinâmicas distintas. As rotações entre 50 e 100 rpm caracterizaram-se pela predominância dos efeitos gravitacionais e limitada eficiência de mistura. A condição de 200 rpm representou uma região de transição, na qual os mecanismos de transporte induzidos pela agitação passaram a competir com os processos de sedimentação. Já as rotações de 400 e 600 rpm apresentaram predomínio dos efeitos turbulentos, maior desenvolvimento de vórtices e significativa redução da segregação dos materiais avaliados.

Os resultados também evidenciaram a influência das propriedades físicas dos materiais sobre a dinâmica do escoamento. As areias e o rejeito de minério de ferro apresentaram maior tendência à deposição, enquanto as microesferas de sílica polimérica mostraram elevada capacidade de acompanhamento das estruturas de circulação interna. O óleo lubrificante naval, por sua vez, demonstrou forte dependência da intensidade de mistura para sua dispersão na fase aquosa.

Sob a perspectiva do saneamento ambiental, os resultados reforçam a importância da adequada definição das condições de agitação em operações unitárias de mistura rápida, coagulação e floculação, uma vez que a eficiência dos processos está diretamente associada à capacidade de promover dispersão, transporte de massa e homogeneização dos sistemas tratados.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se a realização de análises quantitativas da profundidade dos vórtices formados, a determinação de parâmetros hidráulicos como número de Reynolds e gradiente médio de velocidade (G), bem como a aplicação de técnicas de processamento digital de imagens para extração automática de informações hidrodinâmicas. Adicionalmente, a integração dos resultados experimentais com modelagem CFD poderá contribuir para o aprofundamento da compreensão dos fenômenos observados e para a otimização de sistemas de mistura aplicados ao tratamento de água e efluentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, F.A.S. Influência da porosidade e massa específica na velocidade de sedimentação de agregados fractais de água com turbidez moderada. Uberlândia, 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. DOI: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3054. Acesso em: 08/06/2026.

2. ANÍCIO, S.O. Determinação de relação entre parâmetros representativos da distribuição de tamanho de partículas (DTP), dimensão fractal (Df) e o índice de floculação (IF) obtido por meio do equipamento de análise de dispersão fotométrica (PDA). Uberlândia, 2019. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2415. Acesso em: 22/02/2026.

3. BORGES, M.V.B. Avaliação da eficiência de remoção de cor em função da distribuição de tamanho dos flocos e no fator de força. Uberlândia, 2018. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1144. Acesso em: 14/05/2026.

4. CHANG, Y.; LIU, Q.J.; ZHANG, J.S. ***Flocculation control study based on fractal theory. Journal of Zhejiang University-Science***, v. 6, n. 10, p. 1038-1044, out. 2005. DOI: https://doi.org/10.1631/jzus.2005.B1038. Acesso em: 25/02/2026.

5. CHENG, W.P.; CHANG, J.N.; CHEN, P.H.; YU, R.F.; HUANG, Y.W.; HSIEH, Y.J. ***Monitoring floc formation to achieve optimal flocculation in water treatment plants. Environmental Engineering Science***, v. 27, n. 6, p. 523-530, jun. 2010. DOI: https://doi.org/10.1089/ees.2010.0065. Acesso em: 03/05/2026.

6. JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; PARSONS, S. ***Measuring floc structural characteristics. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology***, v. 4, n. 1, p. 1-18, maio 2005. DOI: https://doi.org/10.1007/s11157-005-7092-1. Acesso em: 19/03/2026.

7. JOHNSON, C.P.; LI, X.; LOGAN, B.E. ***Settling velocities of fractal aggregates. Environmental Science & Technology***, v. 30, n. 6, p. 1911-1918, maio 1996. DOI: https://doi.org/10.1021/es950604g. Acesso em: 07/04/2026.

8. MORUZZI, R.B.; BRIDGEMAN, J.; SILVA, P.A.G. ***A combined experimental and numerical approach to the assessment of floc settling velocity using fractal geometry. Water Science & Technology***, v. 81, n. 5, p. 1026-1037, abr. 2020. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2020.171. Acesso em: 30/05/2026.

9. MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, A.L.; CONCEIÇÃO, F.T.; GREGORY, J.; CAMPOS, L.C. ***Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions. Science of the Total Environment***, v. 607-608, p. 807-814, dez. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.194. Acesso em: 12/06/2026.

10. OLIVEIRA, A.L. Avaliação da morfologia e da distribuição do tamanho de partículas para pontos distintos do diagrama de coagulação/floculação. Uberlândia, 2018. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

11. OLIVEIRA, A.L.; MORENO, P.; SILVA, P.A.G.; JULIO, M.; MORUZZI, R.B. ***Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter. Desalination and Water Treatment***, v. 57, n. 36, p. 16703-16720, ago. 2016.

12. RIBEIRO, L.C. Características dos flocos formados com a utilização de Moringa oleifera como coagulante em água produzida com cor elevada. Uberlândia, 2021. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. DOI: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.420. Acesso em: 11/06/2026.

13. SILVA, L.M.A. Avaliação da eficiência de sedimentação em função da resistência, ruptura e recrescimento de flocos obtidos a partir de água com turbidez elevada. Uberlândia, 2020. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. DOI: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3311. Acesso em: 17/03/2026.

14. SPICER, P.T.; PRATSINIS, S.E. ***Coagulation and fragmentation: universal steady-state particle-size distribution. AIChE Journal,*** v. 42, n. 6, p. 1612-1620, jun. 1996. DOI: https://doi.org/10.1002/aic.690420612. Acesso em: 28/02/2026.

15. SUAVE, E.A.M. Características de agregados resultantes de floculação com tanino comercial em água sintética com cor aparente elevada. Uberlândia, 2021. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. DOI: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.473. Acesso em: 29/04/2026.

16. TANG, P.; GREENWOOD, J.; RAPER, J.A. ***A model to describe the settling behavior of fractal aggregates. Journal of Colloid and Interface Science***, v. 247, n. 1, p. 210-219, mar. 2002. DOI: https://doi.org/10.1006/jcis.2001.8028. Acesso em: 21/05/2026.

17. VAHEDI, A.; GORCZYCA, B. ***Predicting the settling velocity of flocs formed in water treatment using multiple fractal dimensions. Water Research***, v. 46, n. 13, p. 4188-4194, set. 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.031. Acesso em: 06/03/2026.

18. WU, R.M.; LEE, D.J. ***Hydrodynamic drag force exerted on a moving floc and its implication to free-settling tests. Water Research***, v. 32, n. 3, p. 760-768, mar. 1998. DOI: https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00320-5. Acesso em: 18/04/2026.

19. XIAO, F.; LAM, K.M.; LI, X.Y.; ZHONG, R.S.; ZHANG, X.H. ***PIV characterisation of flocculation dynamics and floc structure in water treatment. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects***, v. 379, n. 1-3, p. 27-35, abr. 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.053. Acesso em: 02/06/2026.

20. XIAO, F.; LAM, K.; LI, X. ***Investigation and visualization of internal flow through particle aggregates and microbial flocs using particle image velocimetry. Journal of Colloid and Interface Science***, v. 397, p. 163-168, mar. 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.01.053. Acesso em: 24/03/2026.