Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

37ETC-07252

Análise Experimental da Formação de Regimes Turbulentos em Ensaios de Jar Test Aplicados a Processos de Saneamento

Carlos Eduardo Rodrigues Leão
Bruno de Oliveira Lázaro
Universidade Federal de Uberlândia

Introdução e Objetivo

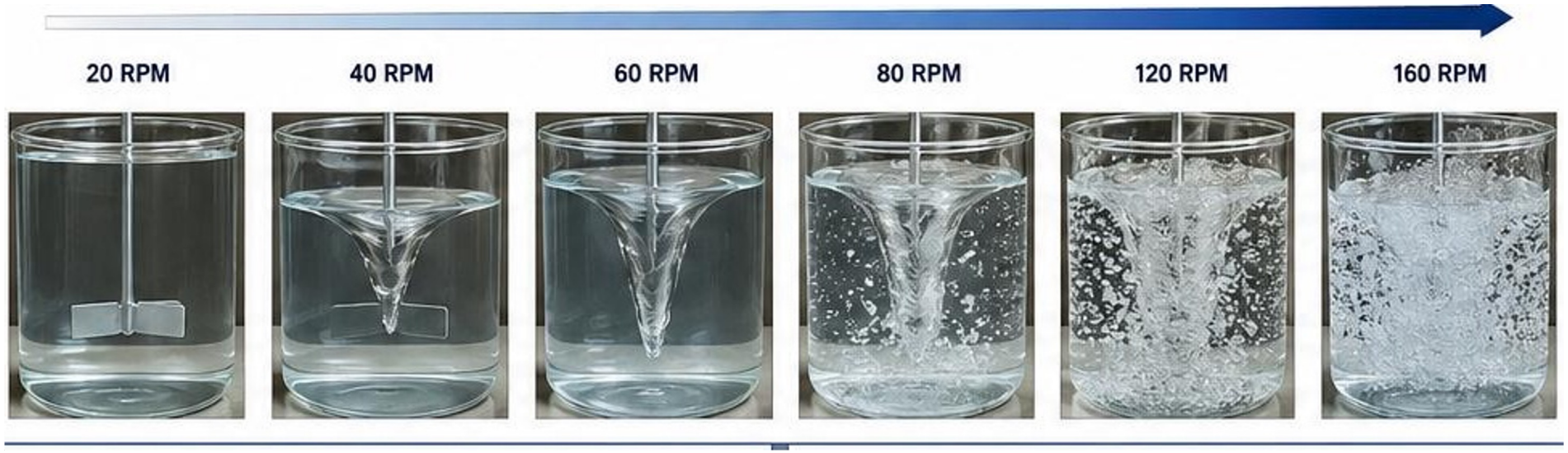
- Ao pensar em floculação, o foco recai quase sempre sobre a dose de coagulante e a concentração da solução
- **Mas a agitação mecânica — como a energia é transferida ao fluido — é um fator igualmente decisivo e frequentemente negligenciado**
- Distribuição inadequada de energia → zonas mortas e heterogeneidade hidráulica
- Jar Test: técnica tradicional de coagulação/floculação com potencial como ferramenta de análise hidrodinâmica
- **Objetivo:**
  - avaliar experimentalmente a formação de regimes turbulentos em ensaios de Jar Test, com 5 materiais distintos submetidos a rotações de 50 a 600 rpm, evidenciando o papel da hidrodinâmica para além da dosagem de coagulante

A Hidrodinâmica Além da Dosagem

- **Visão convencional: eficiência da floculação = dose de coagulante + concentração da solução**
- Mas a mesma dose pode gerar flocos muito diferentes, dependendo de como a energia de agitação é transferida ao fluido
- Gradiente de velocidade (G) e vórtices são a manifestação física dessa energia — e regem a formação, o crescimento e a ruptura dos flocos
- Rotação insuficiente → mistura incompleta; rotação excessiva → cisalhamento dos flocos já formados
- **Este trabalho isola a variável hidrodinâmica para investigar esse efeito diretamente**

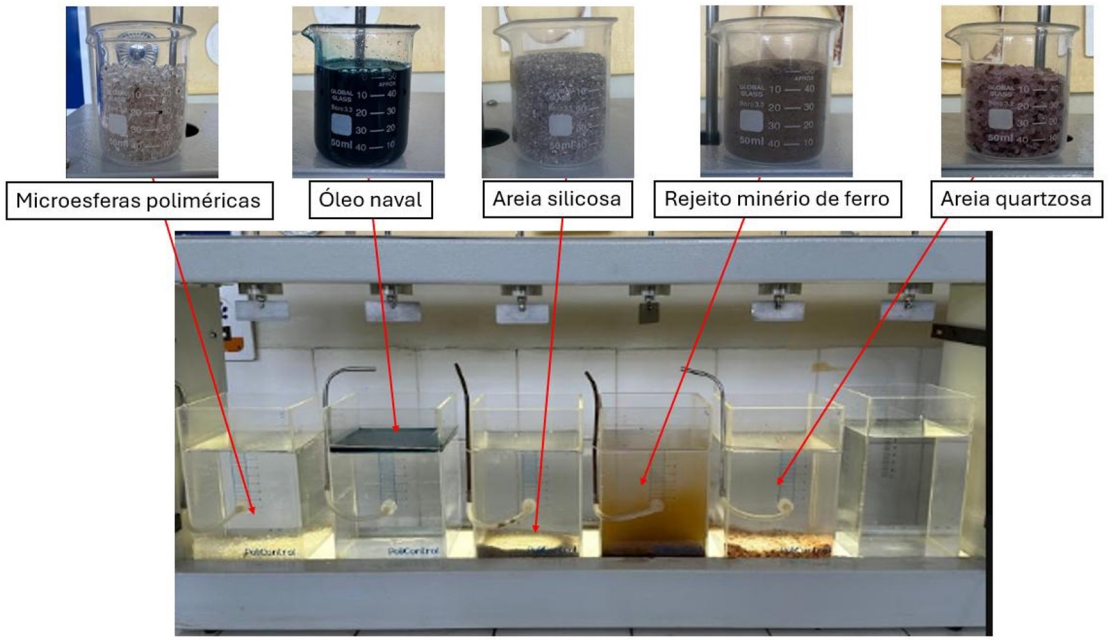
Fundamentação Teórica

- Agitação mecânica transfere energia ao fluido → recirculação e cisalhamento
- Rotação crescente: transição laminar → transicional → turbulento
- Resposta hidrodinâmica depende de densidade, viscosidade e granulometria dos materiais
- Jar Test permite observar vórtices, recirculação, suspensão e separação de fases



Materiais e Equipamento

- Equipamento: Jar Test Nova Ética, modelo Jar 218-1
  - Capacidade: 2 L por jarro
- 5 materiais avaliados + água pura (referência)
  - Areia quartzosa e areia silicosa
  - Rejeito de minério de ferro
  - Microesferas de sílica polimérica
  - Óleo lubrificante naval



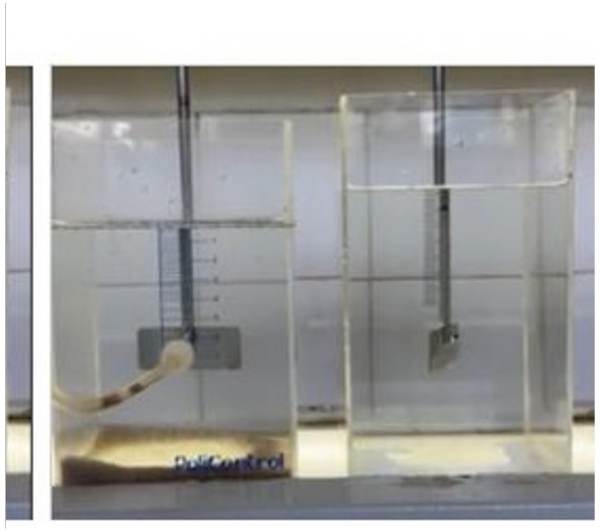
Condições Experimentais

- **Parâmetros padronizados em todos os 25 ensaios:**

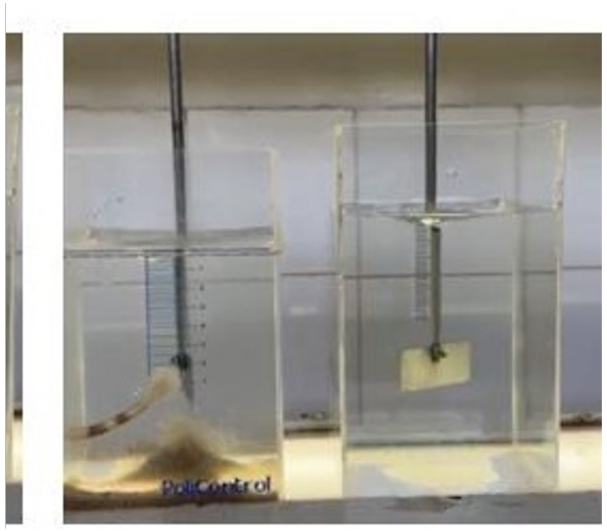
Equipamento	Jar Test Nova Ética – modelo Jar 218-1
Jarros por ensaio	2 (material sob análise + referência com água)
Volume	2 L de água + 50 mL de material
Rotações testadas	50, 100, 200, 400 e 600 rpm
Tempo de agitação / estabilização	1 minuto / 5 segundos
Total de condições	25 (5 materiais × 5 rotações, sem replicatas)

Efeito da Rotação no Escoamento

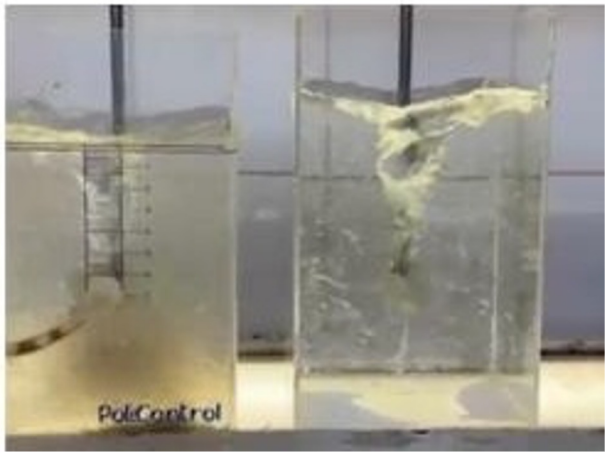
- Baixa rotação (50–100 rpm): vórtice pouco desenvolvido, sedimentação predominante
- Transição (200 rpm): recirculação e mobilização mais intensas
- Alta rotação (400–600 rpm): vórtice profundo, forte suspensão e mistura



Areia silicosa – 50 rpm



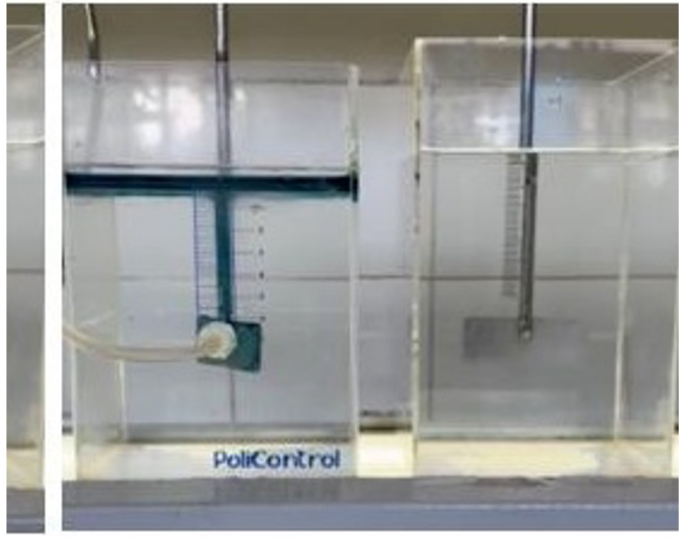
Areia silicosa – 200 rpm



Areia silicosa – 600 rpm

Resposta dos Materiais à Agitação

- Sólidos densos (areias, rejeito de ferro): maior resistência à suspensão
- Microesferas de sílica: excelente traçador visual das células de recirculação
- Óleo naval: de camada superficial estável à dispersão volumétrica intensa



Óleo naval – 50 rpm



Óleo naval – 600 rpm

Três Faixas Hidrodinâmicas e a Faixa Ideal para Floculação

- **A intensidade de agitação é o principal fator na organização do escoamento:**

Faixa hidrodinâmica	Rotação	Re (médio)	Resposta observada
Baixa intensidade	50–100 rpm	≈1.260–2.520	Vórtices pouco desenvolvidos; predomínio gravitacional; baixa suspensão
Regime de transição	200 rpm	≈5.040	Aumento da mobilização e da recirculação
Elevada intensidade	400–600 rpm	≈10.080–15.120	Vórtices profundos; predomínio inercial; alta suspensão e dispersão

Pela classificação de Reynolds (transição: 10 ≤ Re ≤ 10.000; turbulento: Re > 10.000), o sistema só atinge turbulência plena a partir de ~400 rpm. O regime de 200 rpm concentra o equilíbrio buscado na floculação — mobilização suficiente, sem romper os flocos — candidato à faixa de rpm ideal, a validar com flocos reais.

Conclusões e Recomendações

- A hidrodinâmica do processo é tão decisiva quanto a dosagem de coagulante para a eficiência da floculação
- Propriedades físicas dos materiais (densidade, viscosidade, granulometria) modulam a resposta
- Três faixas hidrodinâmicas identificadas: baixa, transição e alta intensidade
- Reforça a importância de ajustar a agitação em mistura rápida, coagulação e floculação
- **Próximos passos:**
  - Quantificar profundidade do vórtice e gradiente G
  - Integrar com modelagem CFD e processamento digital de imagens

Obrigado!

Carlos Eduardo Leão

Universidade Federal de Uberlândia
carlos.leao2207@ufu.br
(34)99280-4001

Artigo completo (PDF)

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

Coautores

Bruno de Oliveira Lázaro
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Civil - Laboratório de Hidráulica
bruno.lazaro@ufu.br