



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

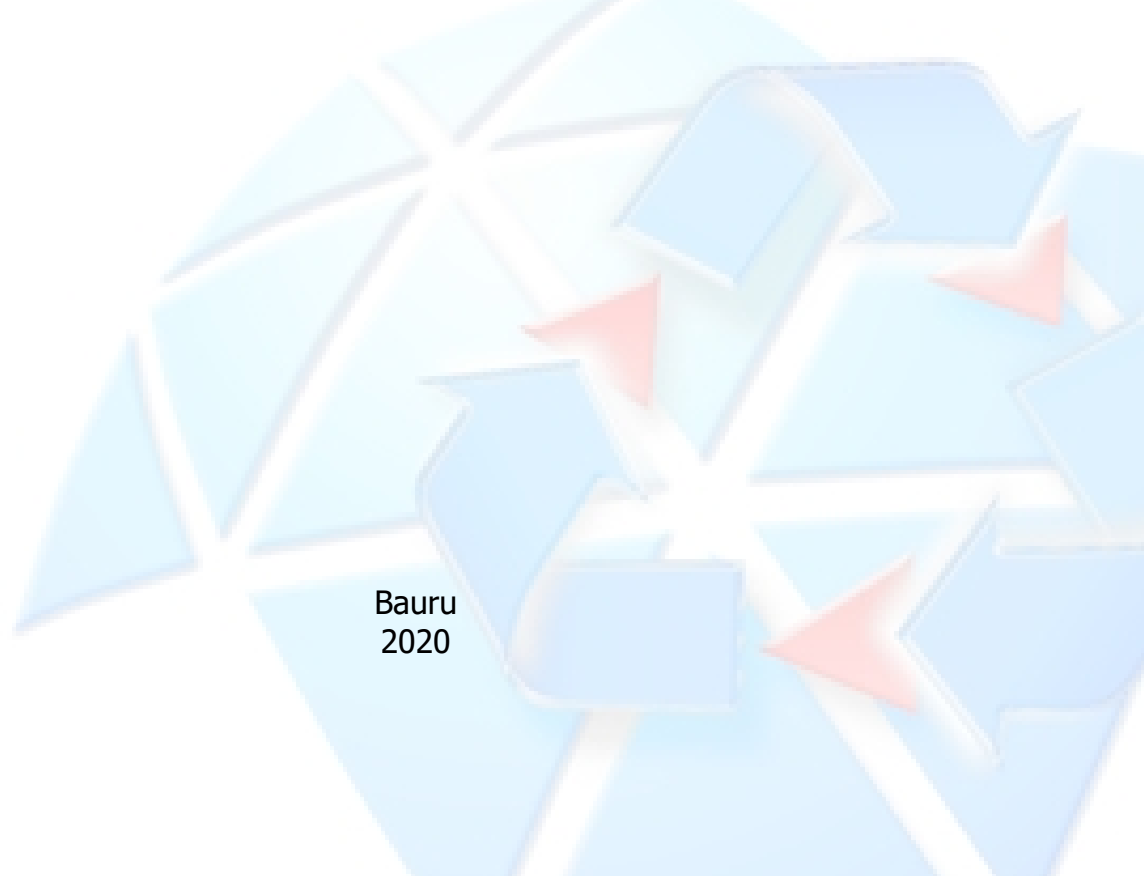
unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

JOICE GONÇALVES PAULI

**INFLUÊNCIA DA AÇÃO COMBINADA DO MOVIMENTO INERCIAL
E DA SEDIMENTAÇÃO DIFERENCIAL NO TAMANHO DOS
AGREGADOS NA FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO**



Bauru
2020

JOICE GONÇALVES PAULI

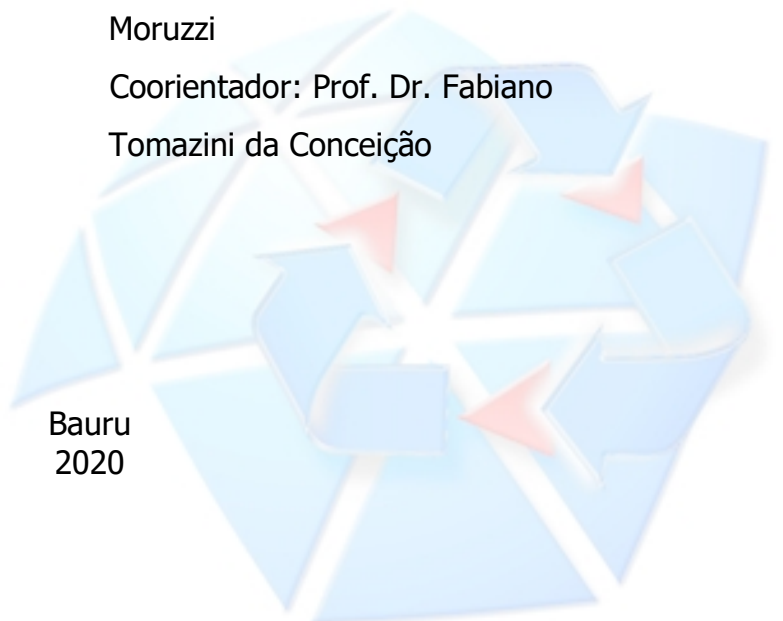
**INFLUÊNCIA DA AÇÃO COMBINADA DO MOVIMENTO INERCIAL
E DA SEDIMENTAÇÃO DIFERENCIAL NO TAMANHO DOS
AGREGADOS NA FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga
Moruzzi

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano
Tomazini da Conceição

Bauru
2020



Pauli, Joice Gonçalves.

Influência da ação combinada do movimento inercial e da sedimentação diferencial no tamanho dos agregados na floculação e sedimentação / Joice Gonçalves Pauli, 2020

70 f. : il.

Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020

1. Análise por imagem. 2. Agregado. 3. Gradiente médio de velocidade. 4. Distribuição de tamanho de partículas. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JOICE GONÇALVES PAULI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de setembro do ano de 2020, às 13:00 horas, no(a) Via Sistema de videoconferência e outras ferramentas de comunicação a distância, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI - Orientador(a) do(a) Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento - DEPLAN / Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) de Rio Claro – UNESP, Profª Drª ANGELA DI BERNARDO DANTAS do(a) Departamento de Tecnologia Ambiental / Universidade de Ribeirão Preto, Profª. Drª. LIANE YURI KONDO NAKADA do(a) Área de Meio Ambiente / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de JOICE GONÇALVES PAULI, intitulada **INFLUÊNCIA DA AÇÃO COMBINADA DO MOVIMENTO INERCIAL E DA SEDIMENTAÇÃO DIFERENCIAL NO TAMANHO DOS AGREGADOS**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: ___
APROVADO____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI

Profª Drª ANGELA DI BERNARDO DANTAS P/

Profª. Drª. LIANE YURI KONDO NAKADA P/

OBS. Defesa realizada via Google Meet

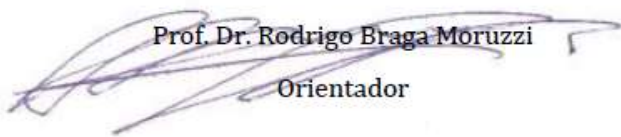
PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
JOICE GONÇALVES PAULI

DE: "INFLUÊNCIA DA AÇÃO COMBINADA DO MOVIMENTO INERCIAL E DA SEDIMENTAÇÃO
DIFERENCIAL NO TAMANHO DOS AGREGADOS"

PARA: "INFLUÊNCIA DA AÇÃO COMBINADA DO MOVIMENTO INERCIAL E DA SEDIMENTAÇÃO
DIFERENCIAL NO TAMANHO DOS AGREGADOS NA FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO"

Bauru, 23 de outubro de 2020.


Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Orientador

*À Deus em primeiro lugar,
à minha família, que sempre incentivou meus estudos,
em especial ao meu pai Felipe que sempre foi um espelho com relação à dedicação aos
estudos, aos meus filhos que fizeram de mim uma pessoa melhor e ao meu marido Bruno
que sempre me apoia incondicionalmente em todos os meus projetos.*

AGRADECIMENTOS

Sou grata ao meu orientador, o Professor Doutor Rodrigo Braga Moruzzi, por toda a orientação e pelos ensinamentos transmitidos ao longo desses anos, por ser um exemplo de perseverança e organização, pela enorme paciência e confiança demonstradas em todas as nossas conversas, e pela indispensável contribuição á este projeto.

Aos funcionários do DEPLAN, à toda comunidade UNESP Campus Rio Claro, por todo o suporte fornecido para que fosse possível a realização deste trabalho, e em especial à Carol por toda a ajuda oferecida no laboratório e gentileza demonstrada durante os ensaios realizados.

Aos colegas do grupo de estudo Pedro Augusto Grava, Luiza Ostini Goehler e Kazuki Sonobe, pela troca de experiências, toda a ajuda e tempo juntos em laboratório.

Ao LATARE e a Unesp Rio Claro pela oportunidade a mim concedida, e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste projeto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, sem a qual não seria possível a realização deste projeto.

À minha mãe Katia, melhor mãe e avó de todo o mundo, minha irmã e melhor amiga Patricia que sempre me ofereceu apoio emocional e conselhos preciosos, meu marido Bruno companheiro na vida, e aos meus filhos Murilo e Miguel que são o motivo pelo qual eu nunca desisti.

Resumo

Durante a floculação mecanizada, o gradiente médio de velocidade (G_f) pode ser controlado de modo a formar agregados compatíveis com as unidades de separação sólido/líquido nas estações de tratamento de água, conferindo flexibilidade operacional ao sistema. Os ensaios de bancada auxiliam na definição da melhor condição de coagulação e floculação, permitindo inclusive o controle da agitação (floculação ortocinética) e do tempo de detenção hidráulica. Todavia, não são conhecidos todos os efeitos secundários da formação dos agregados decorrentes do transporte inercial e da sedimentação diferencial.

O presente trabalho buscou monitorar a influência combinada desses dois efeitos na formação dos agregados, por meio de técnica não intrusiva de captura de imagem associada a técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*). Foi possível verificar que o movimento inercial apresenta uma predominância na influência da formação dos agregados do momento em que é cessada a agitação mecânica (G_f de 20s^{-1}) até $5,5 \pm 0,5$ minutos, a partir do qual os agregados passam a ser modificados predominantemente pela sedimentação diferencial. Por meio da análise dos agregados foram observados dois momentos de crescimento no comprimento dos agregados, o primeiro momento ocorreu entre os dois primeiros minutos e o segundo momento ocorreu durante os minutos quatro e seis de sedimentação, quando ocorre a provável transição entre mecanismos investigados.

Palavras-chave: análise por imagem. agregado. gradiente médio de velocidade. distribuição de tamanho de partículas. PIV.

Abstract

The velocity gradient can be controlled for aggregates formation during flocculation, so that aggregates can be subsequently removed in solid/liquid separation units. The batch assays help in finding the optimal coagulation and flocculation conditions, making possible to change gradient velocities and hydraulic detention time. Nevertheless, the secondary effects as result of inertial and differential sedimentation transport over aggregates are not known. Therefore, this paper aims to present the combined effect of inertial transport over aggregates, using nonintrusive image technique and particle image velocimetry (PIV). The inertial transport plays an important role in the beginning, just after paddles are turned off. After this, differential sedimentation acts to modify aggregates. Two distinct moments were observed, from when aggregates size have been modified after flocculation. The first one occurs up to the first two minutes, and the other between four and six minutes, when the transition between mechanisms is likely to happen.

Keywords: image analysis. aggregate. gradient of velocity. particle size distribution. PIV.

Índice de Figuras

Figura 1: Principais tecnologias utilizadas no tratamento de água potável atuais.....	6
Figura 2: Representação da dupla camada difusa.....	7
Figura 3: Processo de coagulação.....	10
Figura 4: Cadeias poliméricas ligadas às partículas formando “pontes”	11
Figura 5: Agregados com diferentes velocidades de sedimentação se sobrepondo.....	13
Figura 6: Floculador do tipo Chicana horizontal (a) e floculador do tipo Chicana vertical (b).....	14
Figura 7: Floculador mecanizado de paletas horizontais (a) e floculador mecanizado de turbina (b).....	15
Figura 8: Cascata de energia descrita por Kolmogorov em 1941.....	17
Figura 9: Dispositivo de aplicação simultânea do equipamento Jarteste.....	24
Figura 10: Esquema simplificado de montagem do aparato experimental utilizado.....	25
Figura 11: Fluxograma de ensaios.....	26
Figura 12: Imagem do sistema PIV durante uma análise.....	26
Figura 13: Foto capturada durante um ensaio no momento 1 minuto após a floculação.....	27
Figura 14: Local de captura das imagens no interior do jarro de teste.....	27
Figura 15: Momento de captura da imagem de calibração.....	28
Figura 16: Calibração de distância no menu <i>Set Scale</i> do programa ImageJ.....	29
Figura 17: Ferramenta <i>Threshold</i> no programa ImageJ	30
Figura 18: Imagem do momento 0 minutos de um ensaio em três etapas diferentes do tratamento.....	30
Figura 19: Caixa <i>Add Image...</i> no programa ImageJ.....	32
Figura 20: Medida de ângulo através do programa ImageJ.....	33
Figura 21: Movimentação de um agregado da posição n ^o 1 para a posição n ^o 2 dentro do campo de captura das imagens.....	34
Figura 22: Medição da distância entre a posição inicial e final do agregado.....	36
Figura 23: Gráfico de ângulos de deslocamento dos agregados de em função do tempo de análise.....	43
Figura 24: Gráfico de variação entre as forças verticais e horizontais através do tempo....	44

Figura 25: Gráfico tipo diagrama de caixa da variação dos comprimentos máximos dos agregados em função do tempo de sedimentação do sistema.....	46
---	----

Índice de Tabelas

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos flocladores de paletas horizontais, de turbinas verticais e hidráulicos.....	16
Tabela 2: Trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa de floclação/sedimentação.....	18
Tabela 3: Diâmetros mínimos, máximos e médios para cada classe dados em μm	37
Tabela 4: Valores iniciais e finais de turbidez e pH.....	40
Tabela 5: Número de agregados analisados por intervalo de captura.....	41
Tabela 6: Valores médios de θ (ângulo de deslocamento dos agregados com a horizontal) vetores correspondentes a direção e ao sentido do deslocamento no intervalo de tempo correspondente as medições, a $\text{tg}(\theta)$, D_e , mediana do tamanho máximo dos agregados, parâmetros β e $\log A$ do NC para os tempos de amostragem.....	45

Sumário

RESUMO	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	V
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA	5
3.1.1 <i>Coagulação</i>	6
3.1.2 <i>Floculação</i>	11
3.1.3 <i>Floculadores</i>	13
3.1.4 <i>Cascata de energia</i>	17
3.2 GRUPO DE TRABALHO COM ANÁLISE DE AGREGADOS POR IMAGEM	17
3.3 TÉCNICA DE ANÁLISE PIV (<i>PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY</i>).....	19
4 MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1 MATERIAIS EMPREGADOS.....	22
4.1.1 <i>Produtos Químicos</i>	22
4.1.2 <i>Equipamentos</i>	22
4.2 ÁGUA DE ESTUDO	23
4.3 ENSAIO EM REATOR ESTÁTICO	23
4.4 ANÁLISE DE IMAGEM PIV (<i>PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY</i>)	24
4.5 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS	28
4.5.1 <i>Calibração</i>	28
4.5.2 <i>Binarização</i>	29
4.5.3 <i>Medições dos agregados</i>	31
4.5.4 <i>Medição dos ângulos dos agregados</i>	31
4.5.5 <i>Medição da velocidade dos agregados</i>	35
4.5.6 <i>Análise estatística descritiva</i>	37
4.5.7 <i>Definição do parâmetro característico β</i>	39
4.5.8 <i>Concentração dos grandes agregados (NC)</i>	40
4.5.9 <i>Predominância entre forças resultantes verticais e horizontais</i>	41
4.5.10 <i>Dissipação de energia</i>	41

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	TRAJETÓRIAS DOS AGREGADOS	42
5.2	PARÂMETRO B PARA ANÁLISE DA DTP	45
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	49
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos mais intensamente utilizados pelo homem, sendo então fundamental para a existência e a manutenção da vida na terra e, para isso, deve estar presente no ambiente em quantidade e qualidade apropriadas.

Segundo Mota (2008) com o crescimento populacional, acompanhado do desenvolvimento industrial e da intensificação de outras atividades humanas, resultando numa maior utilização dos recursos hídricos, o fator qualidade passou a ser importante. Isso porque quase todos os usos que o homem faz da água resultam na produção de resíduos, os quais são novamente incorporados aos recursos hídricos, causando a sua poluição.

Para que a água possa ser considerada potável, ou seja, própria para consumo humano, os parâmetros de qualidade devem obedecer a vários requisitos pré-estabelecidos de qualidade física, química e biológica. Como as águas naturais normalmente não se enquadram nesses parâmetros há então a necessidade de um tratamento da água antes do abastecimento.

No Brasil, os padrões de potabilidade da água são estabelecidos pela Portaria nº5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde. Nessa portaria foram estabelecidos limites de tolerância para várias substâncias, logo, o sistema de tratamento de água para essa finalidade deve ser o mais eficiente possível para que a água final esteja dentro dos padrões exigidos pelo Ministério da Saúde para que não ofereça riscos à saúde.

Nesse sentido existe uma necessidade de se ter um processo eficaz de tratamento de água, e isso é feito através das estações de tratamento de água (ETA), que são plantas projetadas especificamente para atender as necessidades de uso da água a ser tratada por aquela estação.

Um sistema de tratamento de água convencional, ou ciclo completo, é composto pelas etapas de: coagulação, floculação, decantação e filtração (Di Bernardo e Dantas, 2005) e (Bratby, 1980).

A coagulação consiste na desestabilização das partículas presentes na água bruta através da adição do agente coagulante. Floculação é o resultado da agregação de partículas menores (primárias ou microflocos) previamente desestabilizadas por espécies hidrolisadas, ou precipitados amorfos, por meio da adição de coagulantes. O agregado formado pode então ser removido pela sedimentação, flotação e/ou filtração (Crittenden *et al*, 2012). Logo, o tamanho dos flocos formados durante a coagulação e floculação é um fator que influencia diretamente na performance das unidades de separação sólido/líquido.

O movimento induzido pela dissipação de energia na massa líquida é a principal força motriz que possibilita o encontro entre as partículas desestabilizadas (floculação ortocinética), predominantes em sistemas com agitação mecânica e hidráulica. Os agregados formados são estruturas de geometria complexa também denominados flocos (Li e Logan, 1997 e He *et al*, 2012) e sofrem efeito simultâneo da agregação e ruptura até alcançar o equilíbrio dinâmico, onde não há mais evolução no tamanho, embora a forma dos agregados esteja em constante mutação (Moruzzi *et al*, 2017).

Entretanto, a agitação controlada não é o único fator responsável pela formação dos agregados, havendo mecanismos de transporte não controlados ou indiretos, entre eles o movimento inercial do fluido e a sedimentação diferencial. No laboratório esses mecanismos são combinados e ocorrem quando há o desligamento das pás do Jarreste.

O movimento inercial que age sobre os agregados com a ação de forças inerciais como a centrífuga e a Coriolis, transporta os agregados por trajetórias horizontais em torno do eixo da pá do agitador. Quando a agitação é cessada, o sistema busca nova configuração de equilíbrio, transferindo a energia residual de movimento das pás até a completa dissipação por calor. A partir desse momento, prevalece no sistema a ação decorrente da força gravitacional, que age distintamente nos agregados de diferentes tamanhos. Da ação diferencial, resulta o mecanismo de transporte por sedimentação diferencial, responsável pelo encontro de flocos situados no mesmo campo de choque, o cilindro de colisão. Nessa região espacial, flocos com diferentes velocidades podem se encontrar, devido suas velocidades terminais distintas.

A energia cinética transmitida à água através da ação física (misturador) confere impulso a grandes segmentos de água, criando grandes turbilhões que se movem em uma direção consistente com a força motriz (Crittenden *et al*, 2012), no caso de câmaras

mecanizadas esse movimento ocorre de forma circular em torno do agitador da câmara (rotação).

À medida que esses turbilhões se movimentam, sua energia é imediatamente transferida para turbilhões menores através das forças inerciais (Crittenden *et al*, 2012), segundo Di Bernardo e Dantas (2005), essa cascata de energia destrói as características dos grandes turbilhões, permanecendo os turbilhões menores, conforme essa energia é dissipada dos grandes turbilhões para os turbilhões menores.

Quando a agitação é cessada o sistema busca nova configuração de equilíbrio, transferindo a energia residual de movimento das pás até a completa dissipação. A partir desse momento, prevalece no sistema a ação decorrente da força gravitacional que age distintamente nos agregados de diferentes tamanhos. Da ação diferencial, resulta o mecanismo de transporte por sedimentação diferencial, responsável pelo encontro de flocos situados no mesmo campo de choque, o cilindro de colisão. Nessa região espacial, flocos com diferentes velocidades podem se encontrar, devido suas velocidades terminais distintas.

Segundo Crittenden *et al*, (2012), pela equação de Stokes a velocidade de sedimentação de partículas com densidades semelhantes é proporcional ao quadrado do seu tamanho. Assim, flocos com tamanhos maiores, e maiores velocidades de sedimentação, acabam colidindo com partículas com menores velocidades de sedimentação, podendo formar agregados com maiores velocidades de sedimentação (Crittenden *et al*, 2012; Di Bernardo e Dantas, 2005; Marion, 1965).

O movimento inercial e a sedimentação diferencial, são mecanismos de transporte que agem simultaneamente sobre a formação dos agregados após o desligamento das pás, com influência variada no tempo. Até onde é de conhecimento, não há nenhum trabalho que busca avaliar o efeito desses mecanismos indiretos e seus efeitos nos flocos formados após a floculação. Portanto, um maior entendimento acerca dos fenômenos envolvidos durante o processo de sedimentação, se mostra fundamental para a otimização de atividades como a elaboração de projetos e operação de unidades de sedimentação das ETAs.

Neste sentido, este trabalho buscou avaliar o efeito combinado do movimento inercial e da sedimentação diferencial no transporte dos agregados após a floculação.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral estudar e avaliar o efeito combinado do movimento inercial e da sedimentação diferencial no tamanho dos agregados após a floculação, além de:

- Definir o momento em que há uma mudança entre a predominância do movimento inercial da massa líquida e da sedimentação diferencial sobre o transporte dos agregados;
- Investigar o momento durante o processo de sedimentação que cada um desses mecanismos é mais predominante e a influência desses mecanismos no tamanho final desses agregados.
- Avaliar a evolução no número de agregados de grande tamanho por unidade de concentração de flocos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão abordados os fundamentos teóricos que envolvem o processo de tratamento de água, com ênfase em mecanismos de coagulação, floculação, sedimentação e algumas considerações sobre técnicas de análise por imagem.

3.1 Processo de Tratamento de Água

São variados os métodos de tratamento de água existentes atualmente, de forma geral eles podem ser separados em dois grupos: os métodos de tratamento de água baseados em coagulação química e os métodos de tratamento de água sem a coagulação química. Na Figura 3, adaptada de Di Bernardo e Dantas (2005), está um fluxograma com as principais tecnologias utilizadas no tratamento de água potável atuais.

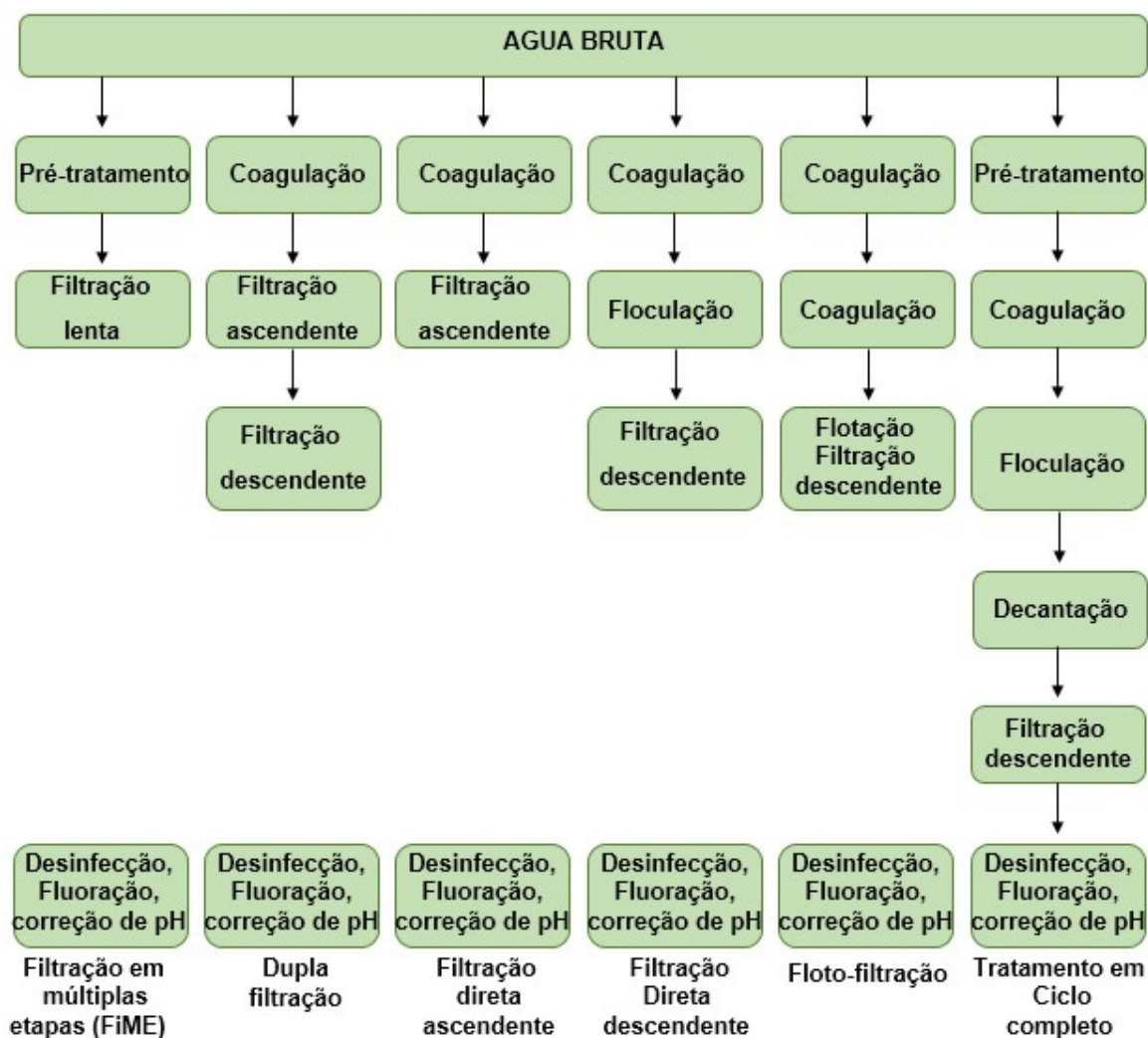


Figura 1: Principais tecnologias utilizadas no tratamento de água potável atuais.

3.1.1 Coagulação

Segundo Crittenden *et al*, (2012) o processo de coagulação envolve a adição de um coagulante químico, ou coagulantes, com a finalidade de condicionamento da matéria suspensa, coloidal e dissolvida por processamento subsequente por floculação ou criar condições que permitam a subsequente remoção do material particulado e dissolvido.

Três mecanismos estão envolvidos durante a coagulação química, esses mecanismos são: a desestabilização do material particulado coloidal, a adsorção e/ou reação da matéria orgânica dissolvida e a criação de partículas floculentas (agregados).

3.1.1.1 Dupla camada elétrica

O material particulado coloidal e dissolvido em suspensão (impurezas) apresenta caráter aniônico, ou seja, são carregados negativamente, o que confere a esse material estabilidade no meio, graças às forças de repulsão eletrostáticas que as repelem entre si, impedindo assim a formação de agregados maiores que possam sedimentar por gravidade. Segundo Crittenden *et al*, (2012) em águas naturais, partículas carregadas negativamente acumulam contraíons positivos na superfície da partícula e próximos a ela para satisfazer a eletroneutralidade. Desse modo, uma camada de cátions se ligará firmemente à superfície de uma partícula carregada negativamente para formar uma camada de adsorção fixa. Esta camada de cátions adsorvidos, ligada à superfície das partículas (através de forças eletrostática e de adsorção) tem cerca de 5 Å de espessura, e é conhecida como camada de Stern, que propôs o modelo ilustrado na Figura 2 (adaptado de Crittenden *et al*, 2012). Além da camada de Stern, uma carga líquida negativa e campo elétrico estão presentes, o que acaba atraindo um excesso de cátions e repelindo ânions (nenhum dos quais está em uma posição fixa).

Esses cátions e ânions se movem sob a influência da difusão (causada por colisões com moléculas de solvente). Essa “camada difusa” se estende para a solução até que toda a carga seja neutralizada, e o potencial elétrico seja eliminado.

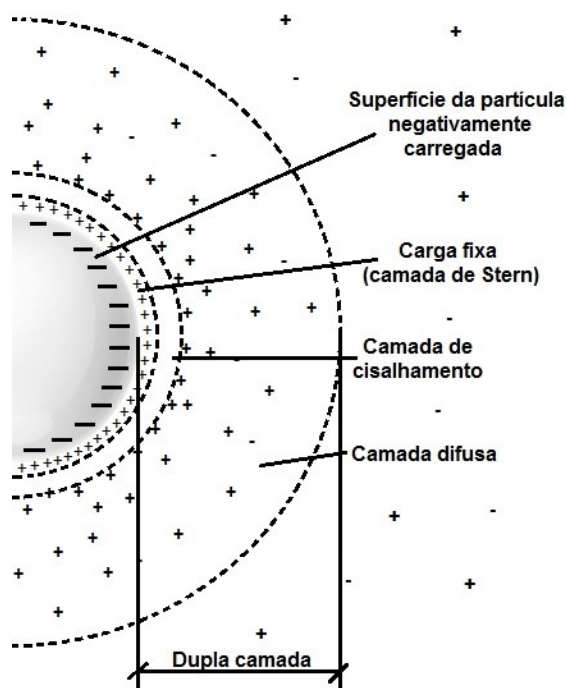


Figura 2: Representação da dupla camada difusa.

A espessura da camada difusa pode ser calculada usando a seguinte equação (Gouy, 1910):

$$k^{-1} = 10^{10} \left(\frac{(2)(1000) e^2 N_A I}{\epsilon \epsilon_0 k T} \right)^{-1/2} \quad (1)$$

Em que,

k^{-1} = espessura da dupla camada elétrica dada em Å;

10^{10} = conversão de comprimento em Å/m;

1000 = conversão de volume em L/m³;

e = carga de elétrons, 1.60219×10^{-19} C;

N_A = constante de Avogadro, 6.02205×10^{23} /mol;

I = força iônica, $\frac{1}{2} \sum z^2 / M$, mol/L;

ϵ = permissividade em relação ao vácuo (ϵ para a água é 78,54, sem unidade);

ϵ_0 = permissividade no vácuo, 8.854188×10^{-12} C² / J · m;

k = constant de Boltzmann, 1.38066×10^{-23} J/K;

T = temperatura absoluta, K (273 + °C).

Com o objetivo de reduzir a repulsão eletrostática das partículas e a espessura da dupla camada elétrica, e com isso promover a agregação das partículas presentes no sistema, são adicionados os coagulantes químicos. De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), os coagulantes químicos mais utilizados atualmente em sistemas de tratamento de água são os sais de alumínio e ferro (ex: Sulfato de Alumínio, Sulfato Férrico, Cloreto Férrico, Hidroxicloreto de Alumínio).

Para que essa desestabilização aconteça de forma mais eficaz possível, o ponto onde o coagulante, ou coagulantes, é adicionado é muito importante, essa etapa é chamada de mistura rápida. De acordo com Bratby, (1980) a importância da eficiência de uma mistura rápida eficaz é evidente, devido ao tempo considerado necessário para a desestabilização: o tempo para complexos mononucleares, como $AlOH^{2+}$ e $FeOH^{2+}$, se formarem é da ordem 10^{-10} s. Os complexos polinucleares exigem de 10^{-2} a 1s para se formar. O tempo necessário para a adsorção dessas espécies em partículas é da ordem 10^{-10} s. O tempo necessário para se ajustar a estrutura da dupla camada é da ordem de 10^{-8} s e para uma colisão browniana (difusão) da ordem 10^{-7} a 10^{-3} s. Levando-se esses dados em

consideração o ponto de dosagem dos coagulantes deve ser um ponto com uma elevada turbulência.

Quando essas condições necessárias para a coagulação são satisfeitas quatro mecanismos agem (separadamente ou em conjunto) no meio para que a coagulação seja possível, esses mecanismos são: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização de cargas, adsorção e formação de pontes e varredura.

3.1.1.2 Compressão da camada difusa

A compressão da camada difusa é explicada através da teoria DLVO criada por Derjaguin, Landau, Verwey e Overbeek. Pavanelli, G. 2001 explica que segundo a teoria DLVO a estabilidade de uma suspensão coloidal pode ser descrita pela interação total resultante das contribuições das interações atrativas (força de van der Waals) e repulsivas, assim, para se ter uma suspensão estável é necessário que as forças de interações repulsivas superem as forças de van der Waals, que é o caso das partículas presentes na água bruta. Com a adição de coagulantes químicos sob intensa agitação ocorre um achatamento da camada difusa das partículas fazendo com que as forças de van der Waals superem as forças de repulsão eletrostáticas, permitindo então que as partículas possam se aproximar o suficiente para formar agregados, mais conhecidos como flocos.

3.1.1.3 Adsorção e neutralização de cargas e varredura

Á partir do momento em que o coagulante é inserido no sistema (como por exemplo sais de ferro e alumínio), acontece a desestabilização das cargas superficiais dos colóides presentes no sistema, em seguida ocorre a adsorção e neutralização de cargas ou a varredura. Segundo Bratby, (1980) esse processo envolve uma sequência de eventos:

1. Remoção da molécula (coagulante) da solução;
2. Remoção do solvente da superfície do sólido (partícula a ser removida);
3. Ligação da molécula a superfície do sólido.

O coagulante adicionado ao meio forma espécies solúveis hidrolisadas, que desestabilizam as cargas eletrostáticas superficiais das partículas. As moléculas (ou íons) de coagulante se ligam a superfície da partícula, neutralizando assim as cargas

eletrostáticas das partículas, possibilitando o encontro entre as partículas para a formação de agregados maiores.

A molécula, ou íon, pode se atar a superfície do sólido através de ligações químicas iônicas, covalentes, ligações de hidrogênio ou dipolares.

Di Bernardo, (2000), explica que as principais diferenças entre o mecanismo de adsorção e neutralização de carga e o de compressão da camada difusa são:

1. As partículas coloidais são desestabilizadas com dosagens menores de coagulantes necessárias para a compressão da camada difusa;
2. Uma relação estequiométrica é observada entre a razão da concentração de colóides e a quantidade necessária de espécies desestabilizantes por adsorção;
3. A reversão da carga superficial dos colóides é possível mediante dosagem excessiva de espécies adsorvíveis.

O mecanismo de varredura ocorre quando há a dosagem excessiva de coagulantes, que formam precipitados insolúveis de hidróxidos metálicos onde as partículas presentes são envolvidas. Esse tipo de mecanismo geralmente é capaz de produzir flocos maiores, como observado na Figura 3 (adaptado de Di Bernardo e Dantas, 2005).

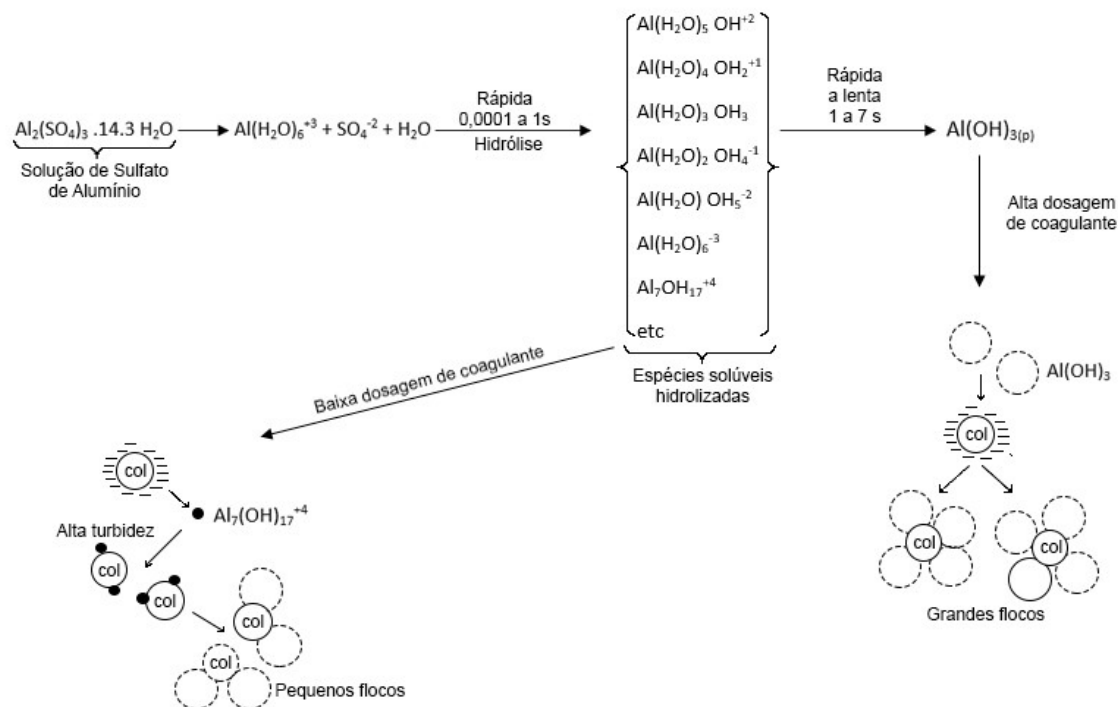


Figura 3: Processo de coagulação.

3.1.1.4 Adsorção e formação de pontes

Os mecanismos de adsorção e formação de pontes ocorre quando é adicionado polímero como coagulante. Segundo Crittenden *et al*, (2012), as cadeias poliméricas adsorvem a superfície das partículas em um ou mais sítios ao longo da cadeia polimérica como resultado de: interações de Coulomb (carga-carga), interações dipolo, ligações de hidrogênio e forças de atração de van der Waals.

As cadeias poliméricas estendidas em solução podem adsorver várias partículas em seus sítios disponíveis, formando assim as “pontes” entre partículas (Figura 4, adaptado de Crittenden *et al*, 2012).

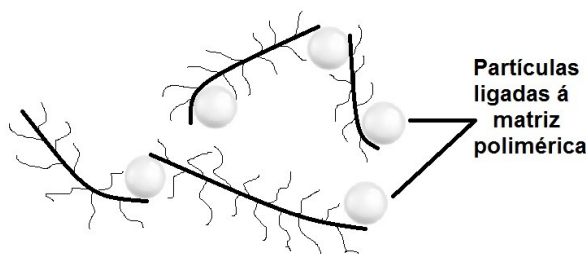


Figura 4: Cadeias poliméricas ligadas às partículas formando “pontes”.

3.1.2 Floculação

A etapa de floculação é a etapa posterior à coagulação, este processo consiste em promover a agregação das partículas que foram quimicamente desestabilizadas através da coagulação. A floculação é usada para criar agregados maiores, que possam ser removidos mais rapidamente através de outros processos como: a sedimentação gravitacional ou a filtração (Crittenden *et al*, 2012). A criação desses agregados maiores ocorre através de uma agitação lenta, utilizada para promover o encontro entre os agregados e possibilitar o agrupamento dos agregados, dando origem a agregados cada vez maiores.

O processo de floculação ocorre pela ação de três mecanismos: a floculação pericínética, a floculação ortocínética e a sedimentação diferencial.

3.1.2.1 Floculação Pericinética

A floculação pericinética é o mecanismo de agregação onde partículas pequenas (menores do que 0,1 μm) tornam-se agregados maiores graças ao movimento Browniano, conforme o processo de floculação avança os agregados vão se tornando cada vez maiores, até que se atinja um patamar estável. Depois de um curto período (cerca de 1 segundo) flocos com tamanhos variando de 1 a 10 μm são formados (ARGAMAN e KAUFMAN, 1970).

Smolochowski, (1916 e 1917), desenvolveu um modelo para a floculação pericinética onde a frequência de colisões foi obtida a partir do fluxo difusional das partículas em direção a uma única partícula estacionária. Smolochowski assumiu que as partículas são difundidas em direção à partícula estacionária em uma direção radial. A equação de Smolochowski é apresentada a seguir.

$$I_{ij} = 4\pi D_{ij} R_{ij} n_i n_j \quad (2)$$

Em que,

I_{ij} = o número de contatos por unidade de tempo entre partículas de raio R_i e R_j ;

D_{ij} = o coeficiente de difusão mútua das partículas i e j (aproximadamente $D_i + D_j$);

R_{ij} = raio de interação das duas partículas, isto é, a distância entre os centros de duas partículas ($R_i + R_j$);

n_i, n_j = número de concentração das respectivas partículas i e j .

3.1.2.2 Floculação Ortocinética

Segundo Crittenden *et al*, (2012) a floculação ortocinética é o principal mecanismo de floculação em tratamento de água, para partículas maiores do que 1 μm . Floculação ortocinética é também conhecida como mistura lenta, onde a agitação da água é promovida através de agitação mecânica a baixos gradientes de velocidade. Além da formação de grandes agregados, a floculação ortocinética promove colisões entre os agregados, que devido à força de cisalhamento, pode causar a ruptura e quebra de alguns flocos. Para Bratby, (1980), o principal parâmetro a governar a taxa de floculação ortocinética é o gradiente de velocidade aplicado, e o grau ou extensão da floculação ortocinética, que

depende do gradiente de velocidade aplicado e do tempo de floculação. Esses dois parâmetros além de influenciar a taxa e extensão de agregação de partículas na floculação ortocinética, também influencia a taxa e extensão de separação, quebra e ruptura desses agregados.

3.1.2.3 Sedimentação diferencial

Através da floculação, agregados de partículas com diferentes tamanhos e diferentes densidades são formados, o que resulta em agregados com diferentes velocidades de sedimentação. A sedimentação diferencial ocorre quando agregados com diferentes velocidades de sedimentação se sobrepõem durante a sedimentação, dando origem a agregados ainda maiores.

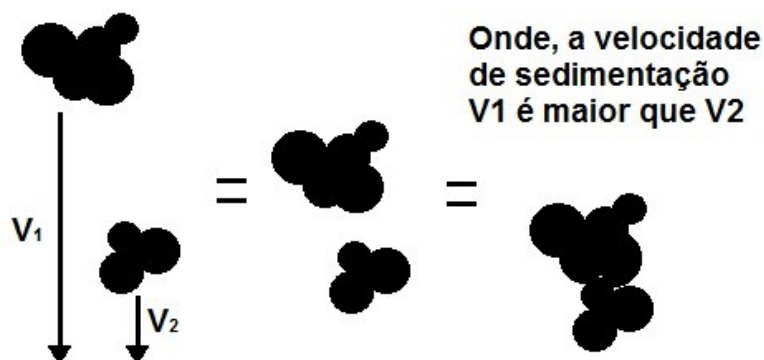


Figura 5: Agregados com diferentes velocidades de sedimentação se sobrepondo.

3.1.3 Floculadores

Outro fator que exerce grande influência no tamanho e forma dos agregados são os floculadores, Ducoste e Clark (1998) observaram que tanto o tamanho dos tanques de floculação, como o tipo de pás utilizadas na floculação influenciam diretamente na distribuição de tamanho de partículas durante a floculação.

Atualmente existem diversos modelos de floculadores hidráulicos e mecanizados, e a escolha do tipo de floculador a ser utilizado deve considerar aspectos como: a qualidade da água a ser tratada e o custo-benefício para a instalação e manutenção dos floculadores na ETA.

Dentre os diversos modelos de flocladores hidráulicos disponíveis atualmente, podemos destacar os flocladores tipo Chicana verticais e horizontais (Figura 6 adaptada de Crittenden *et al*, (2012)) devido à sua grande utilização.

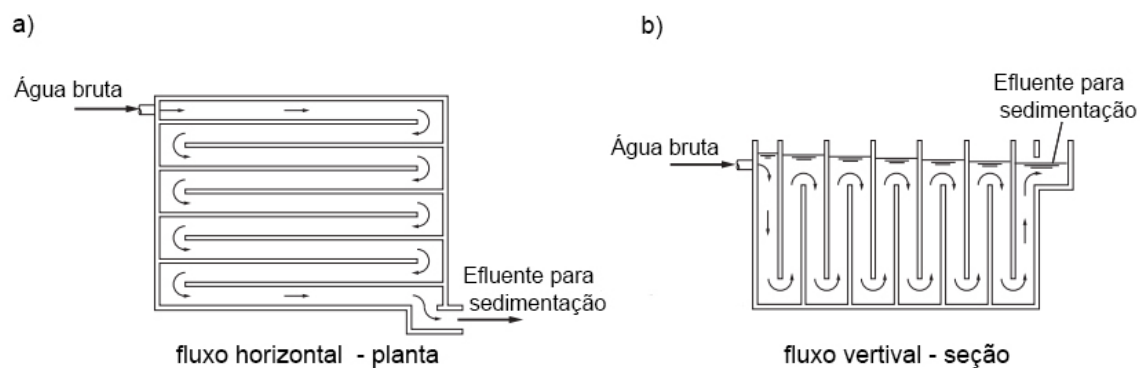


Figura 6: Floclador do tipo Chicana horizontal (a) e floclador do tipo Chicana vertical (b).

No floclador tipo Chicana, tanto no vertical como no horizontal, a intensidade da agitação resulta da resistência hidráulica ao escoamento. Uma vantagem no uso desse tipo de floclador é que não há a necessidade de energia elétrica para a sua operação.

Dos flocladores mecanizados podemos destacar dois tipos que são mais amplamente utilizados: os flocladores que utilizam paletas (vertical e horizontal), e os que utilizam hélices (ou turbinas) (Figura 7 adaptada de Crittenden *et al*, (2012)).

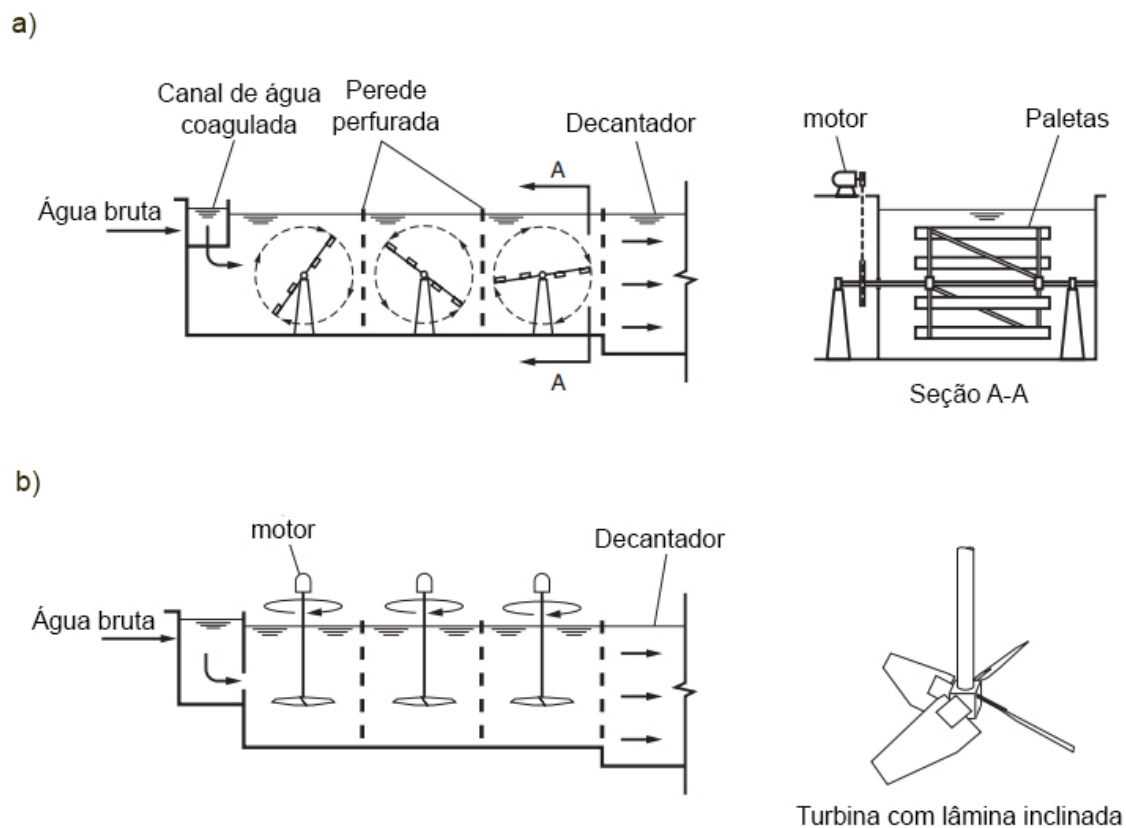


Figura 7: Floculador mecanizado de paletas horizontais (a) e floculador mecanizado de turbina (b).

Nos floculadores mecanizados um motor elétrico é utilizado para mover as pás (misturadores) que movimentam a massa líquida de forma constante no interior da câmara de floculação, nesses floculadores a intensidade da agitação resulta da energia inserida pelas pás no meio líquido, essa agitação pode ser controlada através do controle da rotação do motor que movimenta as pás. Uma vantagem desses floculadores é a flexibilidade operacional, através da possibilidade de controle do gradiente de velocidade inserido.

A Tabela 1 (adaptada de Crittenden *et al*, (2012)), compara os floculadores de paletas horizontais, floculadores de turbinas verticais e os hidráulicos quanto as vantagens e desvantagens de cada tipo.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos flocladores de paletas horizontais, de turbinas verticais e hidráulicos.

	Paletas horizontais	Turbinas verticais	Hidráulicos
Vantagens	Geralmente produz flocos grandes	Flocladores podem ser substituídos sem desativação do tanque	Simples e efetivo
	Confiável	Confiável	Manutenção fácil e de baixo custo
	Um eixo para vários misturadores	Grande flexibilidade operacional	Sem partes móveis
	Fácil operação	Fácil operação	Pode produzir flocos bem grandes
Desvantagens	Compartimentação mais difícil	Difícil de especificar Impulsores adequados e engrenagens confiáveis em processos de licitação competitiva	Pouca flexibilidade operacional
	Substituição e manutenção requerem a desativação do tanque	Quebra do eixo em inicialização por causa do alto torque inicial	

3.1.4 Cascata de energia

Em um regime turbulento as forças inercias do sistema possibilitam a transferência de energia dos maiores para os menores turbilhões, estes dissipados pelos efeitos da viscosidade em forma de calor (Di Bernardo e Dantas, 2005), esse processo é conhecido por "cascata de energia" e foi descrito por Kolmogorov em 1941, a Figura 6 (adaptado de Crittenden *et al*, 2012) apresenta uma representação dessa “cascata de energia”.

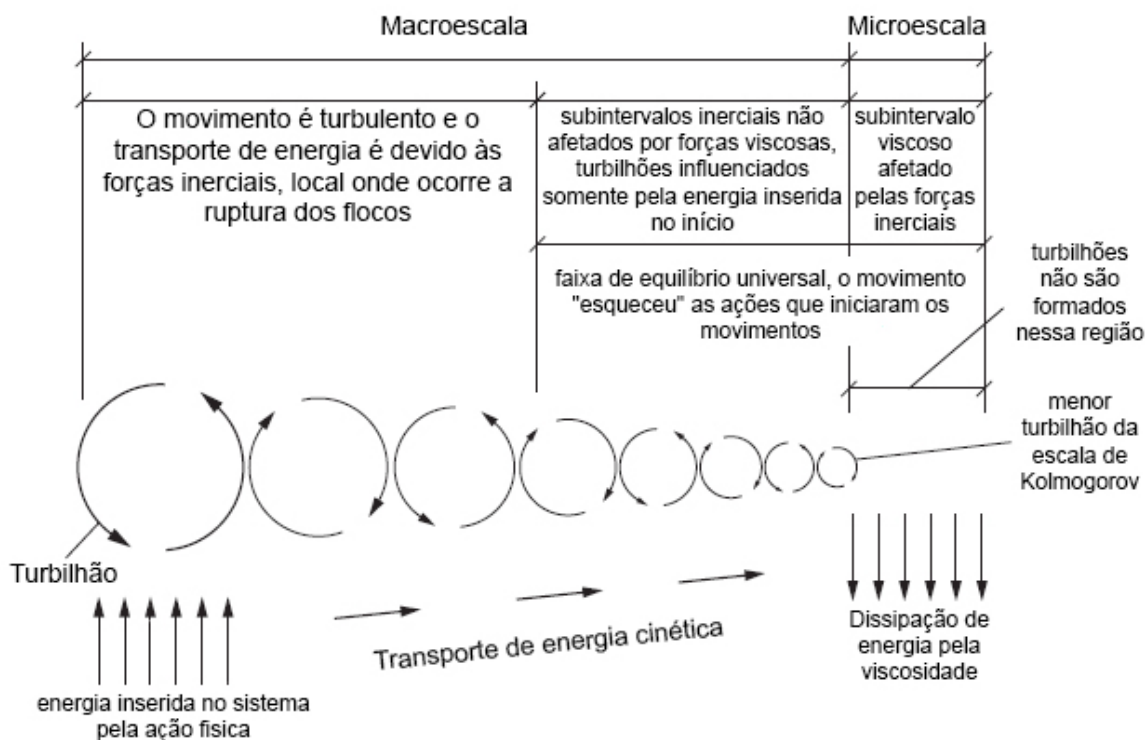


Figura 8: Cascata de energia descrita por Kolmogorov em 1941.

3.2 Grupo de trabalho com análise de agregados por imagem

Esta dissertação se apresenta inserida em um grupo de pesquisas que utiliza a técnica de análise por imagens para a observação dos agregados. Na Tabela 2 que foi (adaptada de Silva 2017) estão organizados em ordem cronológica os trabalhos que foram precursores desta dissertação.

Tabela 2: Trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa de floculação/sedimentação.

Ano	Autores	Linha de pesquisa	Trabalhos publicados
2000 - 2005	Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi	Pesquisa em nível de Doutorado para o estudo de partículas e de microbolhas usando análise de imagem digital em estação de tratamento em escala piloto.	MORUZZI et al, (2004); MORUZZI, R. B. (2004); MORUZZI E REALI (2007); MORUZZI E REALI (2010).
2013 - 2016	Ma. Pamela Moreno	Pesquisa em nível de mestrado sobre aplicação da lama vermelha no tratamento de água e emprego de técnica dedicada de análise de imagem no desempenho da floculação.	MORENO, MORUZZI E CONCEIÇÃO (2013); MORENO (2015); MORENO et al, (2015); MORENO et al, (2016).
2014 - 2015	Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi	Pesquisa em nível de Livre-docência para a avaliação do desempenho do processo de floculação usando parâmetro característico da função DTP.	MORUZZI, OLIVEIRA E DE JULIO (2015).
2014 - 2015	Prof. Dr. André Luiz de Oliveira	Pesquisa em nível de Pós-doutorado no estudo de partículas floculentas e monitoramento contínuo da floculação.	OLIVEIRA et al, (2014); OLIVEIRA et al, (2015a); OLIVEIRA et al, (2015b); OLIVEIRA et al, (2015c).
2014 - 2019	Prof. Dr. Livia Savioli Manetta	Pesquisa em nível de mestrado sobre modelagem matemática aplicada a floculação para o ajuste de condições operacionais em ETAs e em nível de doutorado para a obtenção de coeficiente cinético de agregação.	MANETTA (2014); MORUZZI, MANETTA E OLIVEIRA (2017); MANETTA (2019).
2015 - 2017	Prof. Dr. Marcelo de Júlio, Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi, Prof. Dr. John Gregory, Prof. Luiza Cintra Campos	Projeto de pesquisa em parceria Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), University College of London (UCL) e UNESP outorgado e financiado pelo edital FAPESP/SABESP visando à implementação de sistema de monitoramento contínuo de partículas floculentas em Estações de Tratamento que empregam coagulação e floculação.	MORUZZI et al, (2017a).
2015 - 2020	Me. Pedro Augusto Grava da Silva	Pesquisa em nível de iniciação científica referente ao aprimoramento das técnicas de obtenção e tratamento de imagem digital, pesquisa em nível de mestrado sobre a resistência, refloculação e geometria não euclidiana visando o tratamento de água de abastecimento e pesquisa em nível de doutorado sobre a velocidade de sedimentação de agregados e avaliação do tamanho adimensional, da dimensão fractal 3D e do número de Reynolds.	SILVA et al, (2015); SILVA (2016); SILVA, OLIVEIRA E MORUZZI (2016); SILVA E MORUZZI (2017); MORUZZI E SILVA (2018); MORUZZI et al, (2019); MORUZZI et al, (2020a); MORUZZI et al, (2020b).
2016 - 2017	Juliana Carvalhinho Büll	Pesquisa em nível de iniciação científica referente à investigação de parâmetro da floculação por meio de monitoramento contínuo da floculação por dispersão de luz.	BULL, SILVA E MORUZZI (2016); BULL (2017).

2017	Prof.Dr. Rodrigo Braga Moruzzi, Prof. Dr. André Luiz de Oliveira, Prof. Dr. Fabiano Tomazzini da Conceição, Prof. Dr. John Gregory, Prof. Luiza Cintra Campos	Projeto de pesquisa em parceria University College of London (UCL) e UNESP outorgado e financiado pelo edital FAPESP visando investigar a dimensão fractal de grandes agregados sob diferentes condições de floculação.	MORUZZI et al, (2017a)
2017 – 2020	Ma.Thais de Almeida	Pesquisa em nível de iniciação científica da investigação da eficiência de separação sólido líquido em tratamento de águas de abastecimento monitorado por análise de imagem e dispersão de luz, seguido de pesquisa em nível de mestrado sobre a evolução dos agregados de fractal durante a floculação, pesquisa em nível de mestrado sobre a análise de componentes principais aplicada a avaliação de atributos dos agregados na separação sólido/líquido.	ALMEIDA (2017); MORUZZI, OLIVEIRA E ALMEIDA (2018); ALMEIDA (2020).
2019	Luíza Ostini Goehler, Karina Chung	Pesquisa em nível de iniciação científica sobre o desempenho do amido de milho comercial como auxiliar de floculação e sobre a força e o recrescimento de agregados usando dispersão fotométrica e filtro Savitzky-Golay.	MANETA et al, (2019).
2020	Prof.Dr. Rodrigo Braga Moruzzi, Prof. Dr. André Luiz de Oliveira	Projeto de pesquisa outorgado e financiado pela FAPESP e CNPq para o desenvolvimento e aplicação de sistema de monitoramento contínuo de tamanho de flocos visando otimização da coagulação/floculação e filtração.	MORUZZI E OLIVEIRA (2020); MENDES et al, (2020).

Os trabalhos precursores apresentados na Tabela 2 foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa, possibilitando o uso de métodos e técnicas analíticas pré-estabelecidos e comprovadamente eficazes para alcançar os objetivos deste presente trabalho.

3.3 Técnica de análise PIV (*Particle Image Velocimetry*)

Segundo Logan, (1999), existem várias técnicas que podem ser utilizadas para se medir tamanhos de partículas, porém poucas técnicas são capazes de medir simultaneamente tamanhos de partículas e a concentração de partículas. A técnica de análise PIV (*Particle Image Velocimetry*) possui essa característica de permitir a análise

simultânea de tamanhos de partículas e concentração de partículas, e no caso do presente trabalho, rastrear as trajetórias das partículas.

A técnica de análise PIV consiste em um sistema não-intrusivo de análise que utiliza uma câmera *High-Speed* com o auxílio de um *laser* para obter imagens dos agregados. As imagens geradas são posteriormente tratadas através de um programa computacional para se obter parâmetros de interesse, como tamanhos de partículas, concentração e trajetórias.

De acordo com Logan, (1999), as técnicas de análise por imagem são bem simples, pois as partículas são diretamente visualizadas por uma câmera ligada a um sistema de análise de imagem. Essa imagem é convertida através de um programa computacional á uma imagem binária (branco e preto ou 0 e 1), e o número de pixels por partícula presente na imagem é calculado pelo sistema.

Essa técnica, graças à sua grande versatilidade, está sendo amplamente utilizada para a análise de agregados, assim como para análises de floculação e sedimentação, Ducoste e Clark (1998) utilizaram a técnica de análise por imagem para comparar os flocos quanto ao tamanho, formados em diferentes tamanhos de tanques de floculação e com diferentes tipos de misturadores. Os autores concluíram que tanto o modelo de misturador como o tamanho do tanque influenciam no tamanho dos flocos gerados.

Moruzzi e Reali (2007) utilizaram a técnica para a determinação de tamanho de microbolhas de ar em sistemas de tratamento de água por flotação por ar dissolvido (FAD), os autores concluíram que a técnica de análise por imagem para a distribuição de partículas constituiu uma alternativa viável, para determinação da distribuição de tamanho de microbolhas, que o sistema mostrou-se eficaz e que o método desenvolvido pode constituir ferramenta útil para estudos em outras subáreas de conhecimento.

Xiao, F. *et al.*, (2011) utilizou a técnica de análise PIV para monitorar a dinâmica de quebra e recrescimento dos flocos durante a floculação, utilizando diferentes coagulantes no processo, e observar a morfologia dos flocos formados. Os autores observaram que coagulantes de alumínio produziram flocos diferentes dos flocos produzidos através do uso de coagulantes a base de ferro, e que os flocos produzidos com o uso de coagulantes de alumínio possuem uma maior capacidade de recrescimento.

He *et al.* (2012) utilizou a técnica PIV para investigar os efeitos de baixas taxas de cisalhamento na floculação de suspensão de caulim por cloreto de polialumínio (PACl), os autores observaram que a taxa de agregação do floco aumentou com o aumento de G,

resultando em mudanças mais rápidas no tamanho e estrutura do agregado no estágio inicial de floculação.

Chakraborti e Kaur (2013) utilizaram a técnica PIV para monitorar a sedimentação de esferas de poliestireno e comparar o tempo de sedimentação predito pela equação de Stokes, os autores observaram que enquanto as partículas menores sedimentaram a uma taxa próxima a prevista pela equação de Stokes, as partículas maiores sedimentaram um pouco mais lentamente do que o previsto, e concluíram que este efeito seria devido a um aumento no coeficiente de arrasto, com número de Reynolds relativamente maiores, em comparação com o valor usado na equação de Stokes.

Moruzzi *et al.* (2020a) utilizou a técnica PIV para a análise de agregados quanto ao tamanho, forma, porosidade dos agregados e também para medir a velocidade de sedimentação dos agregados. Moruzzi *et al.* (2020a) comparou os tempos de sedimentação calculados através da equação de Stokes (considerando os agregados como esferas euclidianas de densidade correspondente) com os tempos de sedimentação experimental, e concluiu que os agregados podem sedimentar com velocidades superiores ou inferiores ao previsto através da equação de Stokes, dependendo principalmente do tamanho, forma e porosidade dos agregados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais Empregados

4.1.1 *Produtos Químicos*

Foram utilizados nesse trabalho solução preparada a partir de Sulfato de Alumínio sólido comercial ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14 \text{ a } 18 \text{ H}_2\text{O P.A}$), da marca LABSYNTH Produtos para Laboratórios Ltda e água deionizada na concentração de 46,7g/L, como coagulante químico e Hidróxido de Sódio (NaOH) na concentração de 4g/L como alcalinizante para ajuste de pH da água de estudo. Foi utilizada Caulinita comercial para o preparo da solução-mãe utilizada no preparo da água de estudo para conferir turbidez à água de estudo.

4.1.2 *Equipamentos*

Para a realização dos ensaios e medições feitas nesse trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Reator estático de bancada (Jarteste), da marca NOVA ÉTICA, com seis jarros com capacidade de 2 litros cada;
- b) Deionizador de água;
- c) pHmetro digital de bancada, com precisão de 0,01;
- d) Turbidímetro digital;
- e) Câmera fotográfica *High-Speed Phantom Miro eX4*, com resolução de 800x600 pixels e tripé como suporte para a câmera;

- f) Ponteiro *laser* utilizado como fonte de iluminação para a captura das imagens das partículas em suspensão.
- g) Balança analítica com precisão de 0,0001g;
- h) Equipamentos diversos: Galão de plástico com capacidade de 20 L para armazenamento da água de estudo, cronômetro digital, régua, suporte para o ponteiro *laser* e vidrarias variadas.

4.2 Água de estudo

A água de estudo utilizada para a realização dos ensaios foi preparada em laboratório a partir de uma solução-mãe de caulinita com base na metodologia proposta em Yukselen e Gregory (2004). Foi preparada para os ensaios uma água de estudo utilizando água deionizada obtida através de filtro de osmose reversa com Caulinita recuperada (caulinita comercial utilizada para a preparação de outras soluções-mãe, e que foi separada por filtração e seca em estufa à 40°C por 24 horas). A água de estudo foi preparada através uma solução-mãe preparada em laboratório adicionando-se 40 gramas de Caulinita recuperada a 2 litros de água deionizada. Essa solução-mãe foi colocada sob agitação em equipamento Jar teste á 600 RPM por 2 horas e em seguida ficou em repouso por mais 2 horas. Após o repouso da solução-mãe foi retirada uma alíquota de 100 mililitros do sobrenadante dessa solução-mãe. A alíquota retirada da solução-mãe foi adicionada a um galão contendo 20 litros de água deionizada, e em seguida foi feita uma homogeneização manual. Ao final desse preparo a água de estudo ficou com turbidez e pH iniciais de $24,5 \pm 1,3$ NTU e $6,37 \pm 0,20$ respectivamente.

4.3 Ensaio em reator estático

Apenas um jarro de teste do equipamento Jar teste foi utilizado por vez, o jarro foi cheio com a água de estudo (2 litros), foi retirada uma alíquota de 20 mL da água de estudo para a realização das análises de pH e turbidez iniciais da água. Em seguida, foram adicionados, com o auxílio de uma pipeta volumétrica, 20 mL de solução de Hidróxido de Sódio na concentração de 4g/L ao jarro de teste para o ajuste do pH. Foram adicionados 5 mL de solução de Sulfato de Alumínio na concentração de 46,7g/L ao dispositivo de

aplicação simultânea do próprio equipamento (Figura 9), o que permitiu que o coagulante fosse adicionado de forma rápida à água de estudo.

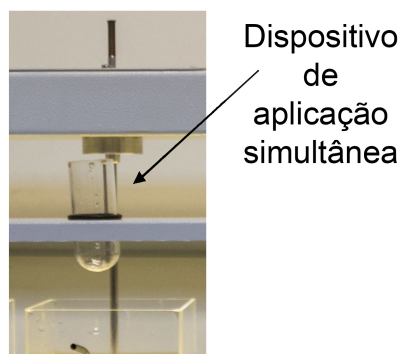


Figura 9: Dispositivo de aplicação simultânea do equipamento Jarteste.

Ao mesmo tempo em que a agitação do equipamento foi iniciada, o coagulante foi adicionado à água, em local de maior agitação dentro do jarro (próximo a pá misturadora).

Os ensaios tiveram uma duração de 30 minutos cada e foram utilizados gradientes de velocidades escalonados de 760s^{-1} por 10 segundos para a mistura rápida e 20s^{-1} por 15 minutos para a floculação, conforme resultados de estudo anteriores apresentados por Almeida (2017).

Foram realizadas retiradas alíquotas de 20 mL para análises de turbidez e pH após 15 minutos de sedimentação.

4.4 Análise de imagem PIV (*Particle Image Velocimetry*)

Para a captura das imagens analisadas nesse trabalho foi utilizada Câmera fotográfica *High-Speed Phantom Miro EX4* acoplada a um conjunto de lentes. A câmera ficou posicionada em frente ao jarro de teste do equipamento Jarteste para o monitoramento do sistema e na lateral da cuba foi posicionado o ponteiro *laser* com comprimento de onda verde de 532 nm e espessura de 2 mm, adaptado com um bastão de vidro cilíndrico para a projeção de um feixe de luz planar para a iluminação das partículas. A Figura 10 mostra o esquema simplificado de montagem do sistema PIV.

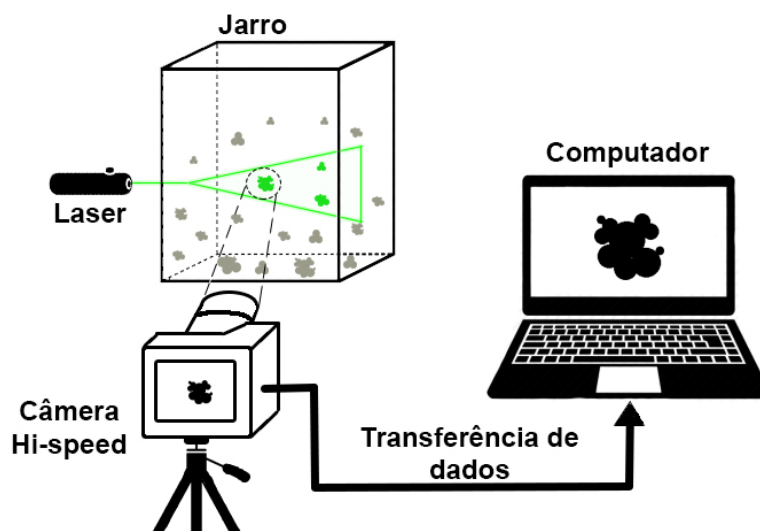


Figura 10: Esquema simplificado de montagem do aparato experimental utilizado.

A câmera foi configurada para uma resolução de 800x600 pixels, taxa de amostragem de 100 fps (frames por segundo) e tempo de exposição de 3500 μ s o que resultou em um total de 1000 imagens para cada tempo de captura, essa configuração foi necessária para permitir que as trajetórias dos agregados pudessem ser observadas ao longo da sequência de imagens. Essa técnica foi adaptada de Moruzzi e Reali (2007). Os tempos de captura utilizados nesse estudo foram de 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 minutos, após cessada a agitação mecânica. Todos ensaios foram realizados em triplicada (com o objetivo de minimização de erros, aumento da confiabilidade analítica e verificação da reprodutibilidade da técnica analítica) de acordo com fluxograma de ensaios ilustrado na Figura 11. A Figura 12 mostra uma imagem feita durante os ensaios e a Figura 13 mostra uma imagem capturada durante a realização dos ensaios.

O tempo necessário para a captura e armazenamento das imagens durante os ensaios foi relativamente alto (cerca de um minuto e meio para o armazenamento) devido ao grande volume de imagens adquiridas, por esse motivo foram realizados três ensaios com a captura de imagens nos minutos 0, 2, 4, 6, 8 e 10 de sedimentação e outros três ensaios para a captura de imagens dos minutos 1, 3, 5, 7 e 9 de sedimentação.

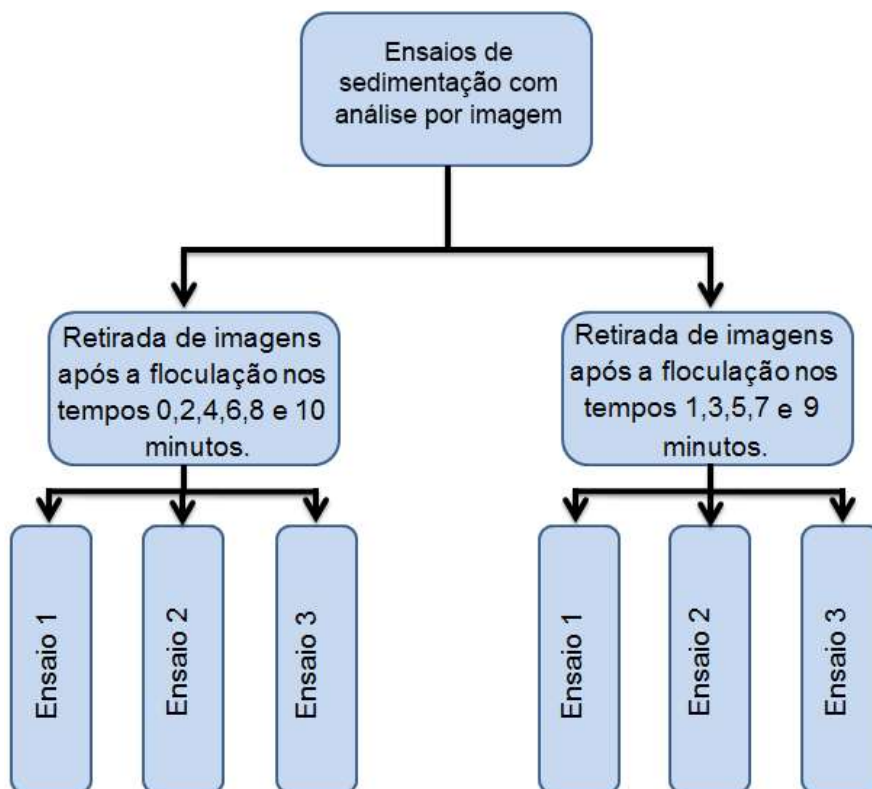


Figura 11: Fluxograma de ensaios.

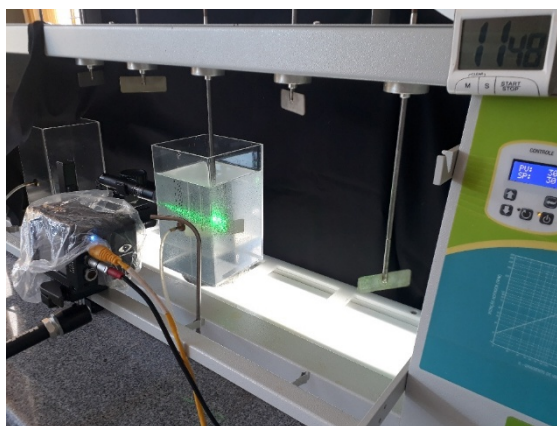


Figura 12: Imagem do sistema PIV durante uma análise.

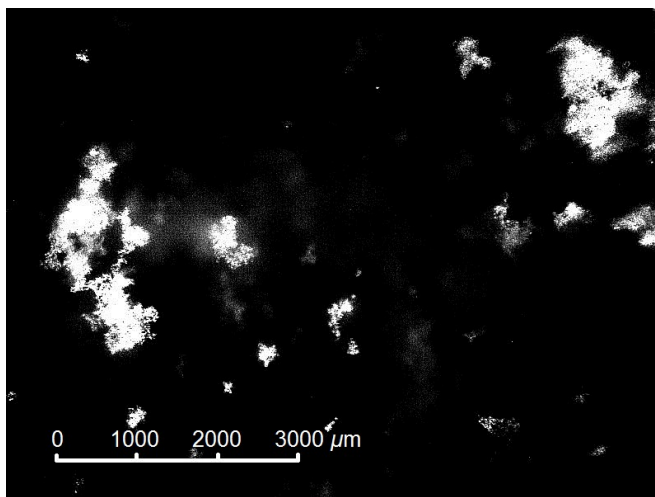


Figura 13: Foto capturada durante um ensaio no momento 1 minuto após a floculação.

O local escolhido para a captura das imagens no jarro de teste foi fixo e localizado nas coordenadas $x:10,0\text{cm}$, $y: 3,5\text{cm}$ e $z: 2,7\text{cm}$ como ilustrado na Figura 14.

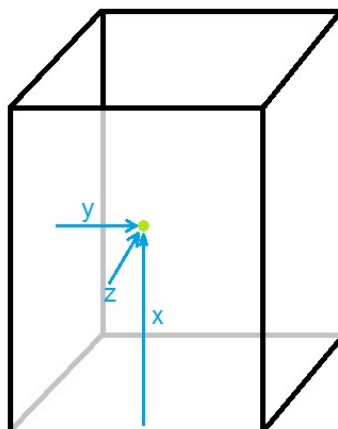


Figura 14: Local de captura das imagens no interior do jarro de teste.

Este local específico foi escolhido por ser um local bem próximo ao centro do jarro, á fim de evitar o efeito turbilhonar que devido ao movimento inercial da massa líquida, faz com que as partículas assumam trajetórias ascendentes próximo às paredes do jarro.

4.5 Processamento das imagens

O processamento das imagens adquiridas durante os ensaios foi realizado através do software ImageJ 1.51, programa computacional processador e analisador de imagens que pôde ser obtido no site do NIH (*National Institute of Health*) do governo federal dos Estados Unidos da América.

4.5.1 Calibração

Antes do processamento das imagens foi necessário fazer a calibração do sistema. Essa calibração foi realizada utilizando uma imagem obtida previamente à realização dos ensaios, onde uma imagem com uma referência de medida conhecida foi gerada, posteriormente essa medida conhecida foi adotada para as demais imagens á serem analisadas, possibilitando assim que os agregados além de contabilizados pudessem ter também dados de dimensão e tamanho. Neste trabalho foi utilizada uma régua comum para a calibração do sistema, na Figura 15 pode ser observada a captura da imagem de calibração com a régua.

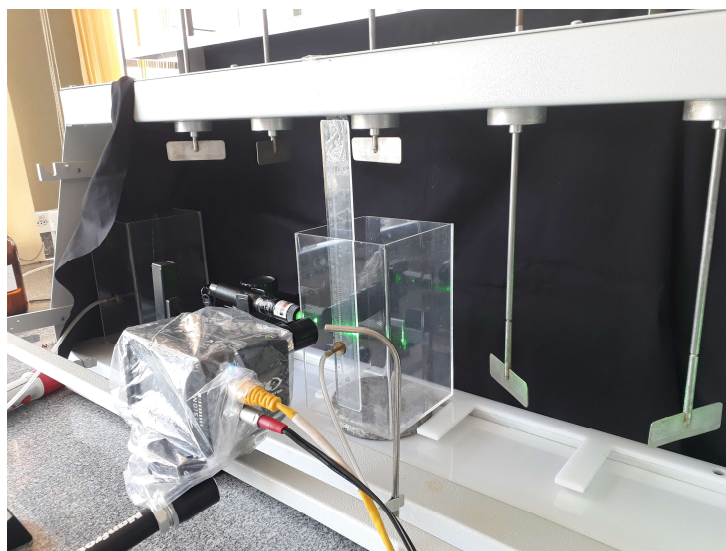


Figura 15: Momento de captura da imagem de calibração.

Com a imagem de calibração aberta no programa ImageJ, foi traçada uma linha ao longo de uma distância conhecida com a ferramenta *Straight*, então no menu *Analyse/Set*

Scale foi inserida a medida conhecida. Na Figura 16 é possível ver a calibração de medida no menu *Set Scale* do ImageJ.

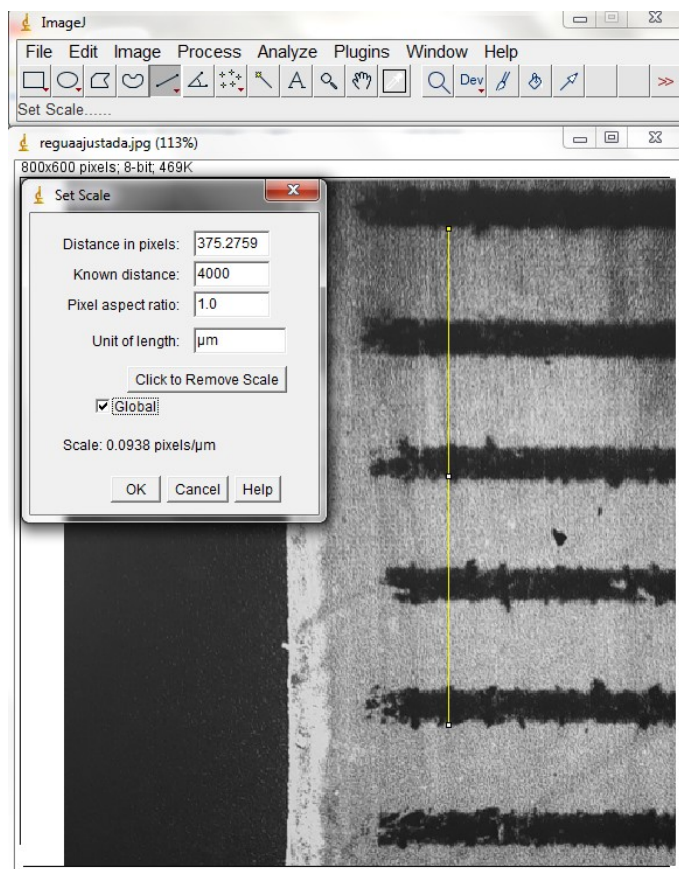


Figura 16: Calibração de distância no menu *Set Scale* do programa ImageJ.

4.5.2 **Binarização**

A etapa de binarização das imagens obtidas durante os ensaios é de suma importância no processo de tratamento de imagem, de acordo com Gatos *et al.*, (2005) a binarização da imagem (seleção de limiar), refere-se à conversão de uma imagem em escala de cinza em uma imagem binária, ou seja, somente pixels brancos e pretos. No processo de binarização cada cor recebe um número correspondente que varia de zero a 255, sendo zero igual a preto e 255 igual a branco. Para a binarização primeiramente deve-se definir um limiar, ou seja, deixar as bordas dos objetos de interesse na imagem mais definidos. No programa ImageJ essa limiarização foi feita através da ferramenta *Threshold*, encontrada no menu *Image/Adjust/Threshold*, como pode ser observado na Figura 17. Com

a opção *Dark background* selecionada, o fundo preto se torna branco e os objetos de interesse (agregados) se tornam pretos.

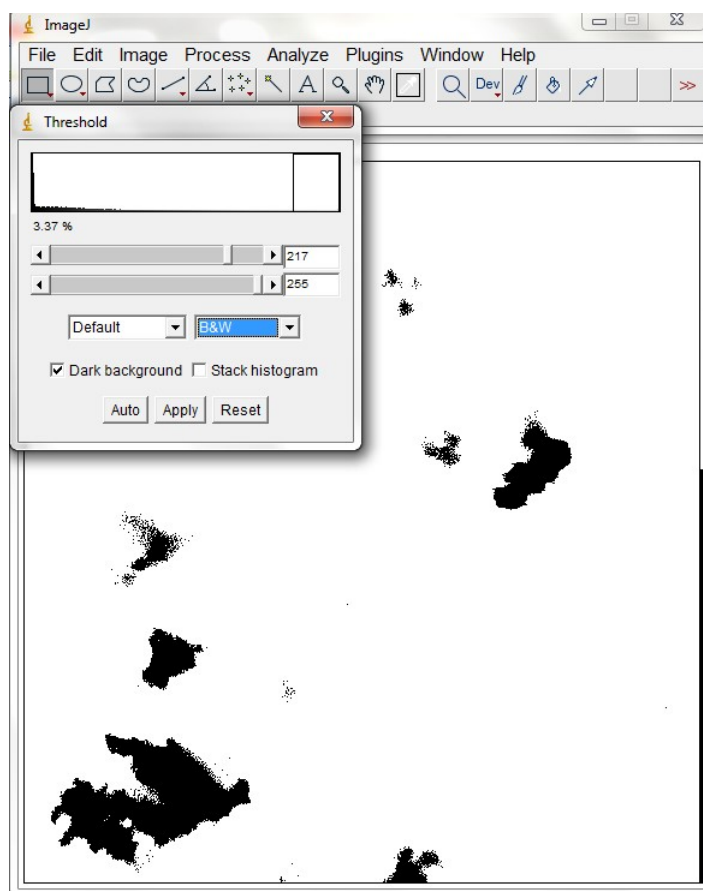


Figura 17: Ferramenta *Threshold* no programa ImageJ.

Para minimizar possíveis problemas de erro na limiarização, cada imagem teve o seu limiar definido individualmente. Após a limiarização a imagem foi binarizada, no programa imageJ a binarização foi feita no menu *Process/Binary/Close*. A Figura 18 mostra a mesma imagem na sua versão original, limiarizada e binarizada.



Figura 18: Imagem do momento 0 minutos de sedimentação a) versão original, b) limiarizada e c) binarizada.

4.5.3 **Medições dos agregados**

Após a binarização das imagens foi possível analisar os agregados quanto a contagem do número de partículas e pôde-se obter dados a respeito dos agregados, tais como: tamanho, área, perímetro, altura, largura e diâmetro máximo. Esses dados foram obtidos através do programa ImageJ selecionando os parâmetros de interesse através do menu *Analyse/Set Measurements* onde foram selecionados os seguintes parâmetros:

- a) *Area*: Área de cada partícula em μm^2 de acordo com a unidade escolhida na calibração;
- b) *Bounding Rectangle*: O menor retângulo que encerra a seleção. Usa os títulos BX, BY, Largura e Altura, onde BX e BY são as coordenadas do canto superior esquerdo do retângulo;
- c) *Perimeter*: Medida do perímetro de cada partícula dada em μm ;
- d) *Major and Minor*: eixos primário e secundário da elipse de melhor ajuste dado em μm .

Após a seleção dos parâmetros de interesse, as medições foram feitas através do menu *Analyse/Analyse Particles*, com a opção *Display results* selecionada. Foram geradas tabelas com todos os dados de interesse pré-selecionados de todas as partículas presentes nas imagens, e em seguida essas tabelas foram exportadas para o Microsoft Excel, onde os dados foram analisados.

4.5.4 **Medição dos ângulos dos agregados**

Para a análise dos ângulos de deslocamentos dos agregados, foram selecionadas visualmente duas imagens sequenciais onde apareciam o mesmo agregado, uma delas sendo a primeira imagem onde o agregado aparecia dentro da sequência de imagens, e a segunda sendo a última imagem capturada onde aquele agregado podia ser visualizado. Esse processo foi repetido em triplicata para cada tempo de captura, sendo escolhidas,

dentre as 1000 imagens por tempo de captura, um par de imagens do primeiro terço de imagens capturadas (da 1ª imagem até a 333ª), um par de imagens do segundo terço de imagens capturadas (da 334ª imagem até a 666ª) e um par de imagens do terceiro terço de imagens capturadas (da 667ª imagem até a 1000ª), isso foi necessário para que houvesse uma homogeneidade nos dados coletados e para que os valores medidos fossem bem representativos daquele minuto como um todo. Esse processo foi repetido para todos os tempos de captura analisados, e foram medidos 87 ângulos no total para os 6 ensaios realizados.

Para a medição dos ângulos das trajetórias dos agregados, foi utilizado o programa ImageJ. Primeiramente foram abertas as duas imagens pré-selecionadas dentro do programa, em seguida foi acessado o menu *Image/Overlay/Add Image...* para acessar a caixa *Add Image...*(Figura 19).

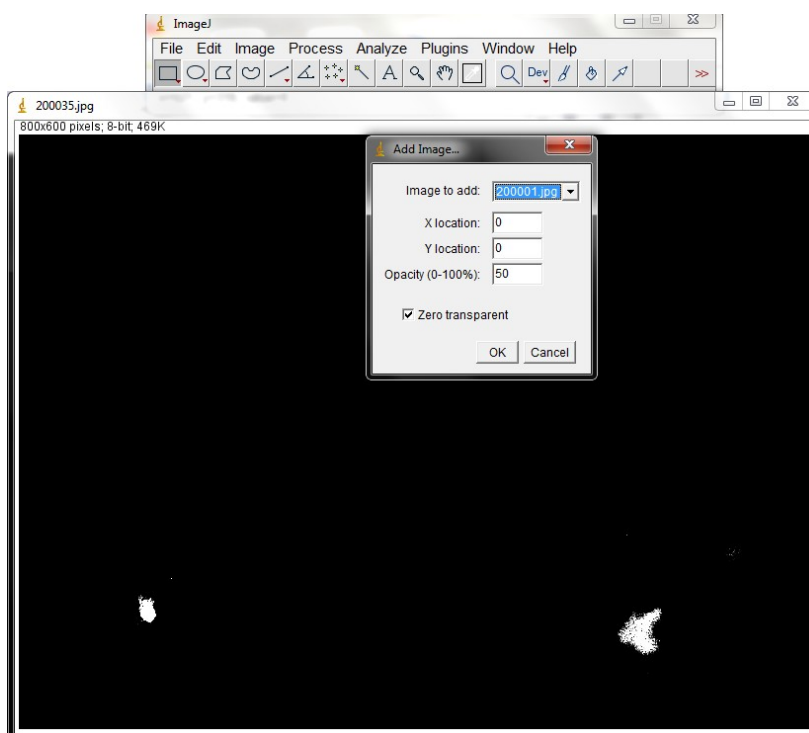


Figura 19: Caixa *Add Image...* no programa ImageJ.

Na caixa da Figura 19, a opção *Image to add* se refere a imagem que irá ser sobreposta a imagem atual, as opções *location X* e *Y* permaneceram em branco, a opção *Opacity (0-100%)* se refere a opacidade da imagem que será sobreposta, neste trabalho foi utilizada uma opacidade 50% (pois foi a opção que permitiu uma melhor visualização dos agregados presentes nas duas imagens), e a opção de *Zero transparente* foi selecionada para

a opacidade ser aplicada somente na imagem a ser sobreposta e não na imagem atual, com isto a tonalidade dos flocos final e inicial ficaram distintos, ficando mais fácil detectar qual é a imagem correspondente ao ponto inicial da trajetória do agregado e qual a imagem correspondente ao ponto final.

Após a sobreposição das imagens foram marcados manualmente, através do uso da ferramenta *Angle tool*, os centroides dos agregados da imagem final e da imagem inicial, como ilustrado na Figura 20. Após a marcação do ângulo foi realizada a leitura do ângulo formado através do menu *Analyze/ Measure*, onde foi aberta uma caixa chamada *Results* (Figura 20), onde foi exibido o ângulo medido.

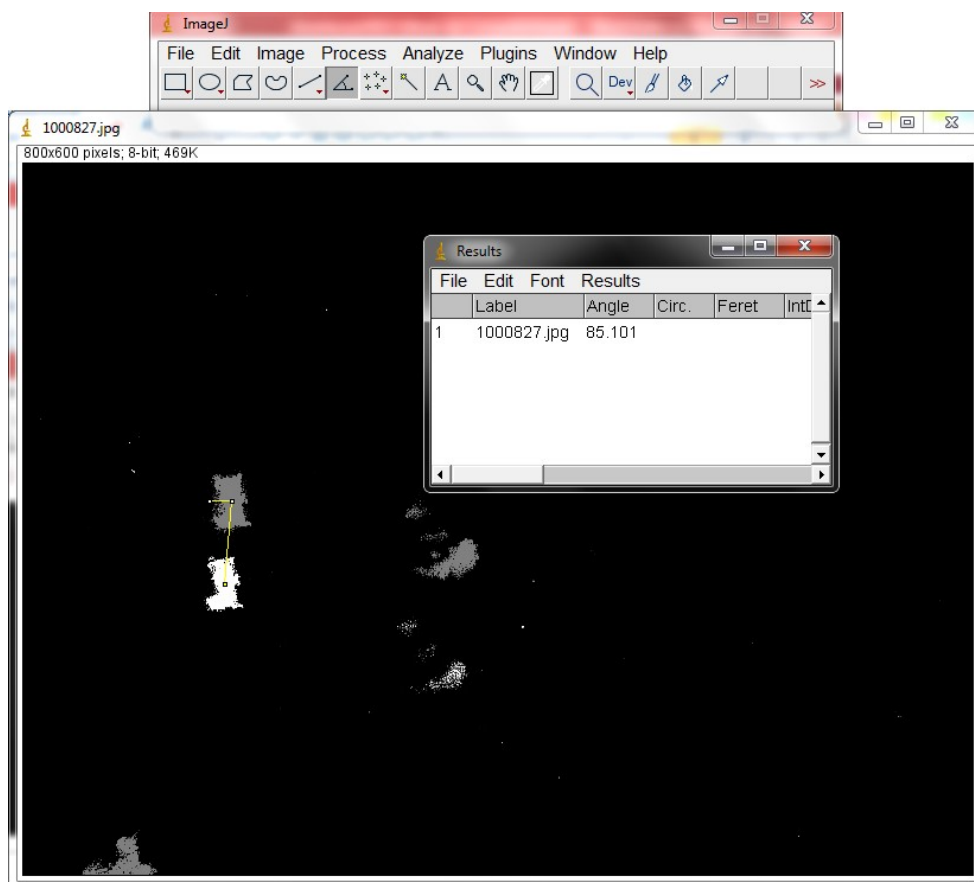


Figura 20: Medida de ângulo através do programa ImageJ.

Todos os valores encontrados de ângulos foram exportados para o programa Microsoft Excel, onde foram organizados em planilhas para posterior análise.

Para a análise das trajetórias dos agregados foram realizadas 87 medidas no total, divididas entre os intervalos de amostragem, resultando em uma média de 9 medidas para cada intervalo.

Graças aos grandes turbilhões presentes na água, criados pela ação do gradiente de velocidade inserido no sistema pelos agitadores mecânicos, a trajetória dos agregados é ditada pelo movimento inercial, o que faz com que essa trajetória seja perpendicular à direção da força motriz. Através do ponto de observação selecionado para este estudo, que ficou localizado em frente à câmara de agitação, esses agregados puderam ser observados se movendo com trajetórias horizontais causadas pelos grandes turbilhões (Figura 21).

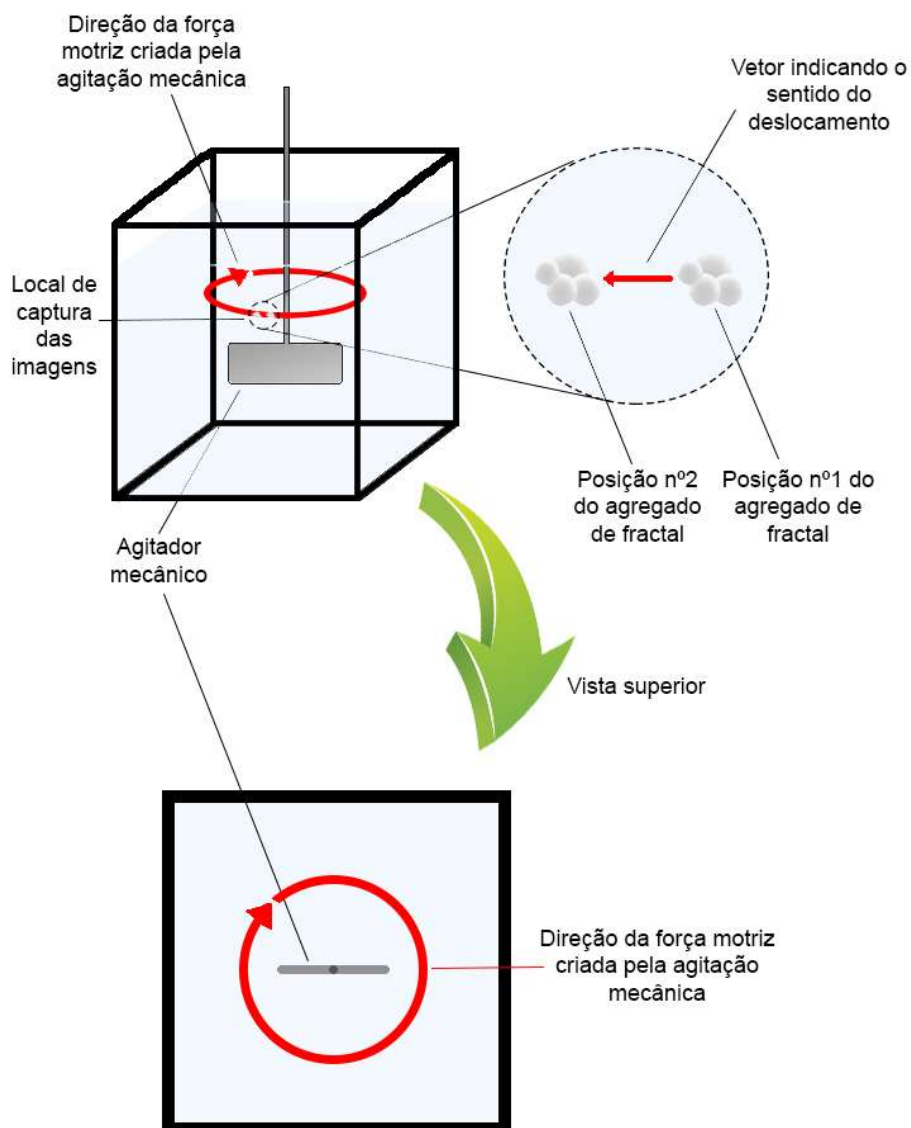


Figura 21: Movimentação de um agregado da posição n°1 para a posição n°2 dentro do campo de captura das imagens.

Como observado através da Figura 21, o movimento inercial age sobre o transporte dos agregados com a ação de forças inerciais como a centrífuga e a coriolis,

desse modo agregados sob sua influência são observados se deslocando com trajetórias horizontais. A energia introduzida inicialmente no sistema através da pá misturadora tende a ser dissipada, e com isso os ângulos de deslocamento dos agregados vão se tornando cada vez maiores, até o ponto em que as trajetórias dos agregados se tornam predominantemente verticais. Desse modo quanto maior o ângulo de deslocamento dos agregados, menor a influência do movimento inercial e conseqüentemente maior a influência da sedimentação diferencial sobre alterações dos agregados durante a sedimentação, dado que a sedimentação diferencial, que age com a ação das forças gravitacionais, irá conferir aos agregados trajetórias predominantemente verticais. Como referência para as análises, as trajetórias com ângulo de deslocamento inferiores a 45° foram consideradas trajetórias predominantemente horizontais, e as trajetórias com ângulo de deslocamento superiores a 45° foram consideradas trajetórias predominantemente verticais.

4.5.5 Medição da velocidade dos agregados

Para a determinação da velocidade dos agregados em cada intervalo de tempo amostrado, foi utilizado o programa computacional ImageJ. Foram selecionadas duas imagens sequenciais onde era possível observar o mesmo agregado, uma delas sendo a primeira imagem onde o agregado aparecia dentro da sequência de imagens, e a segunda sendo a última imagem capturada onde aquele agregado podia ser visualizado. Esse processo foi repetido em triplicata para cada tempo de captura, a escolha das imagens utilizadas foi feita do mesmo modo como descrito na seção 4.5.4 deste trabalho.

No programa ImageJ foram abertas ambas imagens pré-selecionadas, a primeira e última onde o agregado pode ser observado dentro de uma sequência de imagens, e em seguida essas imagens foram sobrepostas, como descrito na seção 4.5.4. Após a sobreposição das imagens, foram marcados manualmente, através do uso da ferramenta *Straight*, os centroides dos agregados da imagem final e da imagem inicial, como ilustrado na Figura 22.

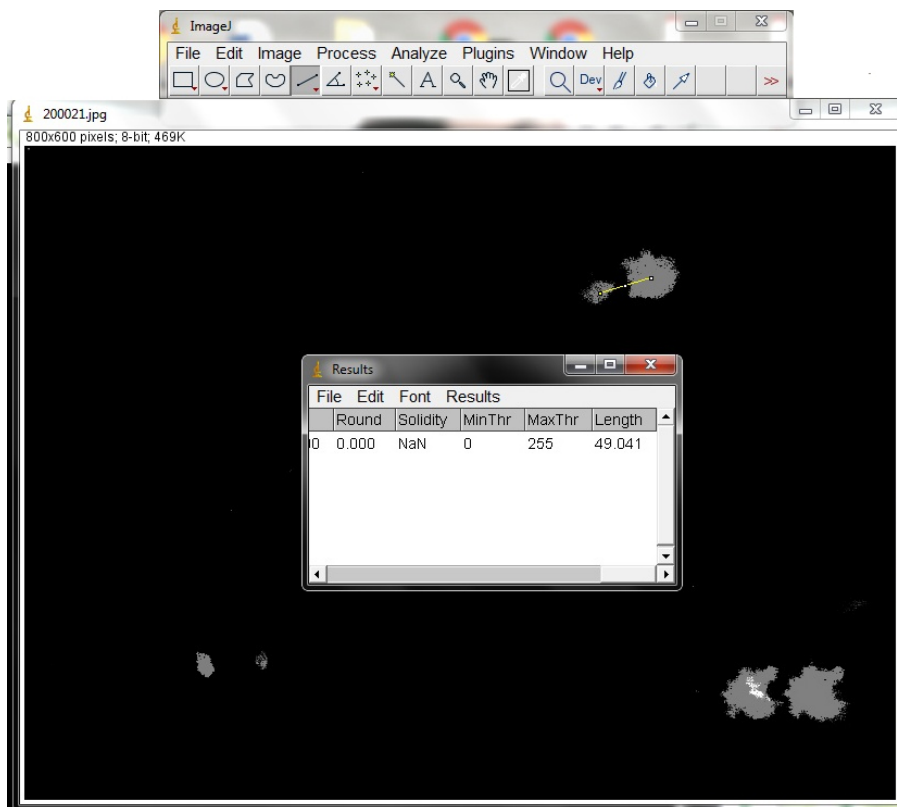


Figura 22: Medição da distância entre a posição inicial e final do agregado.

Após a marcação da distância entre a posição inicial e final do agregado, a leitura da distância medida foi realizada através do menu *Analyse/ Measure*, onde foi aberta uma caixa chamada *Results*, onde foi exibido o valor *Length*, que é o valor referente a distância percorrida pelo agregado dentro daquele intervalo pré-selecionado.

A velocidade dos agregados foi calculada através das Eq. 3 e 4:

$$\Delta t = \frac{nf}{fps} \quad (3)$$

Em que:

Δt = tempo gasto pelo agregado para o deslocamento (s);

nf = número de fotos que compõe o intervalo entre a primeira e a última imagem do floco analisado;

fps = número de fotos por segundo.

Como a câmera foi configurada para tirar imagens à uma taxa de 100 imagens por segundo, o valor utilizado de fps foi de 100.

$$V_m = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (4)$$

Em que:

V_m = velocidade média do agregado;

ΔS = distância percorrida pelo agregado (m/s).

4.5.6 Análise estatística descritiva

Após a importação dos dados coletados pelo programa ImageJ para o programa Microsoft Excel, os dados foram organizados em tabelas para a posterior construção de gráficos.

4.5.6.1 Média Geométrica

Para a construção das Tabelas 3 e 6 foi calculada a média geométrica dos dados coletados, de acordo com a Eq. 5:

$$\bar{g} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (5)$$

Em que:

\bar{g} = média geométrica de um conjunto de valores;

x_1, x_2, x_3 e x_n = valores a ser multiplicados;

n = número de elementos.

4.5.6.2 Amplitude dos Dados e das Classes

Para a separação dos agregados de em diferentes faixas, de acordo com os valores de diâmetros máximo dos agregados encontrados, primeiramente foi calculada a amplitude dos dados de acordo com a Eq. 6:

$$A_T = d_{Fm\acute{a}x} - d_{Fm\acute{i}n} \quad (6)$$

Em que:

A_T = amplitude dos dados;

$d_{Fm\acute{a}x}$ = diâmetro máximo do conjunto de dados;

$d_{Fm\acute{i}n}$ = diâmetro mínimo do conjunto de dados.

Após a determinação da amplitude dos dados foi calculada a amplitude das classes através da Eq. 7:

$$A_C = \frac{A_T}{NC} \quad (7)$$

Em que:

A_C = amplitude das classes;

NC = número de classes (faixas).

A Tabela 3 mostra a divisão de classes de acordo com os diâmetros máximos medidos.

Tabela 3: Diâmetros mínimos, máximos e médios para cada classe dados em μm .

Classes	Mínimo	Máximo	Média geométrica da classe
1	100,05	202,94	142,49
2	202,95	305,84	249,13
3	305,85	408,73	353,56
4	408,74	511,62	477,29
5	511,63	614,51	560,71
6	614,52	717,41	663,97
7	717,42	820,30	767,13
8	820,31	923,19	870,23
9	923,20	1026,08	973,28
10	1026,09	1128,98	1076,30
11	1128,99	1231,87	1179,30
12	1231,88	1334,76	1282,28
13	1334,77	1437,65	1382,25
14	1437,66	1540,55	1488,21
15	1540,56	1643,44	1591,16
16	1643,45	1746,33	1694,10
17	1746,34	1849,22	1797,04
18	1849,23	1952,12	1899,97
19	1952,13	2055,01	2002,90
20	2055,02	2157,90	2105,83

4.5.7 Definição do parâmetro característico β

O parâmetro β é um parâmetro característico que indica a distribuição de tamanhos de partículas, nesse trabalho utilizado para a avaliação da distribuição de tamanhos dos agregados.

Segundo Crittenden *et al*, (2012) a frequência de distribuição de partículas $F(d)$ pode ser expressa pelo número de concentração de partículas, dN , relacionado à mudança incremental no tamanho das partículas, $d(d_p)$:

$$F(d_p) = \frac{dN}{d(d_p)} \quad (8)$$

Em que:

$F(d_p)$ = função que define frequência de distribuição de partículas d_1, d_2, d_3 ;

dN = número de concentração de partículas relacionado à mudança incremental no diâmetro da partícula $d(d_p)$;

$d(d_p)$ = mudança incremental no diâmetro da partícula.

Crittenden *et al*, (2012) observou que em águas naturais o número de partículas aumenta com a diminuição do diâmetro das partículas, sendo assim a frequência de distribuição segue a lei de distribuição de energia segundo a Eq. 9, que também foi utilizada nesse trabalho para a obtenção do parâmetro característico β :

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A (d_p)^{-\beta} \sim \frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \quad (9)$$

Em que:

$d(d_p)$ = fração incremental dos diâmetros das partículas;

dN = número de partículas por unidade de volume do fluido na faixa correspondente a d_p até $d_p + d(d_p)$;

A = coeficiente relacionado à concentração total de partículas;

β = coeficiente que caracteriza a distribuição de tamanho de partículas.

Os parâmetros A e β da Eq. 9 definem a forma da curva de distribuição dos tamanhos das partículas, visto que A varia com o número de partículas, transladando a curva na vertical, enquanto β varia conforme a frequência de partículas em cada faixa de tamanho da distribuição, alterando a inclinação. Assim, β pode ser empregado como parâmetro característico, permitindo acompanhar a alteração da DTP (distribuição de tamanho de partícula) durante a floculação (Moruzzi e Oliveira, 2020).

4.5.8 **Concentração dos grandes agregados (NC)**

Os agregados cujo comprimento excederam 1,5 vezes o valor da amplitude dos quartis superior e inferior, acima do quartil superior foram caracterizados como “*outliers*”, conforme Bracarense (2012). Os valores *outliers* foram usados para calcular o valor de NC dado pela Eq. 10, que relaciona a quantidade de flocos de grande dimensão (N_{out}) por unidade de concentração de agregados ($\log A$).

$$NC = \frac{N_{out}}{\log A} \quad (10)$$

Em que:

N_{out} = número de outliers;

$\log A$ = log do coeficiente de densidade da Eq.9.

4.5.9 Predominância entre forças resultantes verticais e horizontais

Para a avaliação da predominância entre as forças resultantes, foi usada a Eq. 11:

$$\frac{P}{F} = \text{tg}(\theta) \quad (11)$$

Em que:

P = forças resultantes verticais;

F = forças resultantes horizontais;

θ = ângulo de deslocamento dos agregados.

4.5.10 Dissipação de energia

Para a mensuração indireta da dissipação da energia inserida no sistema através do tempo de sedimentação, foi utilizada a Eq. 12:

$$De = \frac{v_t}{v_0} \quad (12)$$

Em que:

De = coeficiente de dissipação de potência;

v_t = velocidade média de deslocamento dos agregados para cada intervalo de tempo amostrado (m/s);

v_0 = velocidade de deslocamento dos agregados no tempo 0 minutos (m/s).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Trajetórias dos agregados

Na Tabela 4 estão apresentados os valores de turbidez e pH inicial e final dos ensaios realizados, na Tabela 5 está a quantidade de flocos observados dentro de cada intervalo de captura analisado.

Tabela 4: Valores iniciais e finais de turbidez e pH.

Ensaio	pH inicial	Turbidez inicial	pH final	Turbidez final	% de redução de turbidez
1	6,50	26	8,23	3,4	87
2	6,13	23	6,93	4,7	80
3	6,39	24	6,83	1,96	92
4	6,53	26	7,93	2,1	92
5	6,04	23	6,71	2,0	91
6	6,63	25	6,55	4,9	80

Através dos valores de pH apresentados na Tabela 4, pode-se observar que os valores de pH da água de estudo ficaram dentro da faixa de 6,0 a 9,5 conforme determinação da Portaria nº5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde. A turbidez teve uma redução entre 80 e 92%, o que é uma ótima redução considerando-se que os ensaios não envolveram a etapa de filtração, e o tempo de sedimentação foi de 15 minutos. Os resultados de turbidez e pH demonstraram que os ensaios de Jarteste realizados foram efetivos para a clarificação da água de estudo utilizada.

Tabela 5: Número de agregados analisados por intervalo de captura.

Tempo de sedimentação	Número de agregados
0	109
1	121
2	33
3	47
4	25
5	22
6	15
7	25
8	18
9	17
10	10
Total →	442

Partículas com diâmetros inferiores a 100 μm não foram contabilizadas, pois eram partículas muito pequenas e foram consideradas ruído de fundo proveniente da binarização das imagens.

No gráfico apresentado na Figura 23 é possível observar o momento em que há uma mudança na trajetória dos agregados presentes no sistema de horizontal para vertical.



Figura 23: Gráfico dos ângulos de deslocamento dos agregados em função do tempo de análise.

Na Figura 23 é possível observar a evolução do ângulo de deslocamento dos agregados presentes no sistema ao longo do tempo de amostragem, após cessada a floculação. As barras do gráfico da Figura 23 representam as medidas de ângulo realizadas

e a linha vermelha em destaque no gráfico é a média móvel para 7 medidas de ângulos realizadas.

Nota-se que inicialmente os ângulos das trajetórias de deslocamento dos agregados estão com valores situados abaixo de 45° com a horizontal, o que confere aos agregados trajetórias predominantemente horizontais, isso sugere que o transporte dos agregados é predominantemente decorrente da ação inercial do movimento residual do fluido, após desligamento das pás do equipamento Jarteste. Pode-se observar que os ângulos das trajetórias dos agregados passam a ser progressivamente maiores com o tempo de análise, e por volta dos 4-6 minutos os ângulos ultrapassam os 45° . Assim, observou-se que com o passar do tempo em que é cessada a agitação mecânica, o movimento inercial da massa líquida cede a ação da sedimentação diferencial. Esse momento de transição também pode ser observado no gráfico da variação entre as forças verticais e horizontais através do tempo (Figura 24).

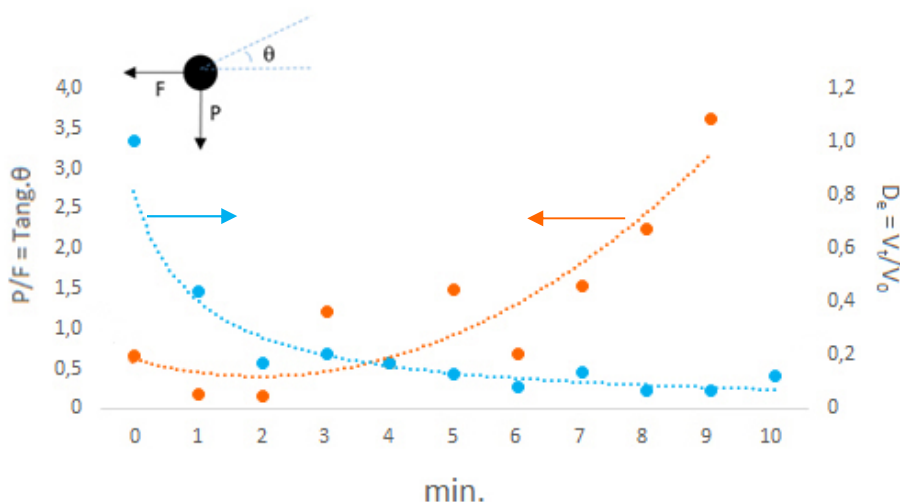


Figura 24: Gráfico de variação entre as forças verticais e horizontais através do tempo.

Na Figura 24 apresentam-se duas medições indiretas para a análise da evolução do transporte dos agregados e da dissipação de energia decorrente do movimento do fluido após desligamento das pás do Jarteste. Na primeira, avaliou-se o efeito das forças resultantes por meio da razão entre as forças verticais e horizontais remanescentes no sistema (Eq. 11). Tal avaliação, medida indiretamente pela tangente do ângulo de deslocamento dos agregados indica predominância de uma força resultante sobre a outra.

As forças resultantes sobre os agregados são igualadas quando o valor entre as forças resultantes é igual a 1 (tangente de 45°), desse ponto em diante há o predomínio da ação da força resultante vertical sobre o agregado, indicando que a partir desse momento o agregado é majoritariamente modificado pela ação da sedimentação diferencial.

Esse efeito ocorre por volta do tempo $5,5 \pm 0,5$ minutos, para o gradiente médio de velocidade de floculação de 20s^{-1} . A segunda relação, por sua vez representa o decaimento da velocidade horizontal (D_e) medida durante os ensaios a partir da velocidade horizontal inicial (v_0), logo após o desligamento das pás do Jarteste (Eq. 12). Tal decaimento resulta da dissipação da energia introduzida no sistema e indica variação da potência na mesma proporção. Observa-se pequenas variações de D_e a partir de 5 minutos. Portanto, o transporte dos agregados formados após a etapa de floculação decorre da ação do movimento inercial do fluido e da sedimentação diferenciada, em proporção que varia no tempo, de acordo com as relações apresentadas na Figura 23. O efeito dessas forças sobre o tamanho dos agregados será apresentado a seguir.

5.2 Parâmetro β para análise da DTP

Na Figura 24 é possível observar a evolução do tamanho dos agregados nos diferentes tempos amostrais após o desligamento das pás do Jarteste. As caixas representam as variações dos tamanhos dentro dos quartis e os pontos em vermelho os valores correspondentes aos *outliers*. Embora os valores da mediana oscilem sempre entre 300 e 400 μm , pode-se observar que a distribuição quartílica varia nos tempos amostrados e que os *outliers* tendem a se concentrar nos minutos iniciais. Tal constatação permite aferir sobre a variação do tamanho dos agregados após o desligamento das pás do Jarteste, indicando que há alteração durante a etapa comumente destinada a separação por sedimentação.

Ademais, espera-se que os grandes flocos presentes no momento inicial da fase de separação sejam removidos por sedimentação, e que a presença de flocos grandes nos tempos finais de amostragem tenham decorrido majoritariamente pela agregação ocorrida durante a separação, resultante do transporte inercial e da sedimentação diferencial. Tais flocos, apesar de apresentarem tamanho compatível com aqueles removidos nos tempos anteriores, foram formados *a posteriori* tendo assim menos tempo para sedimentar no jarro.

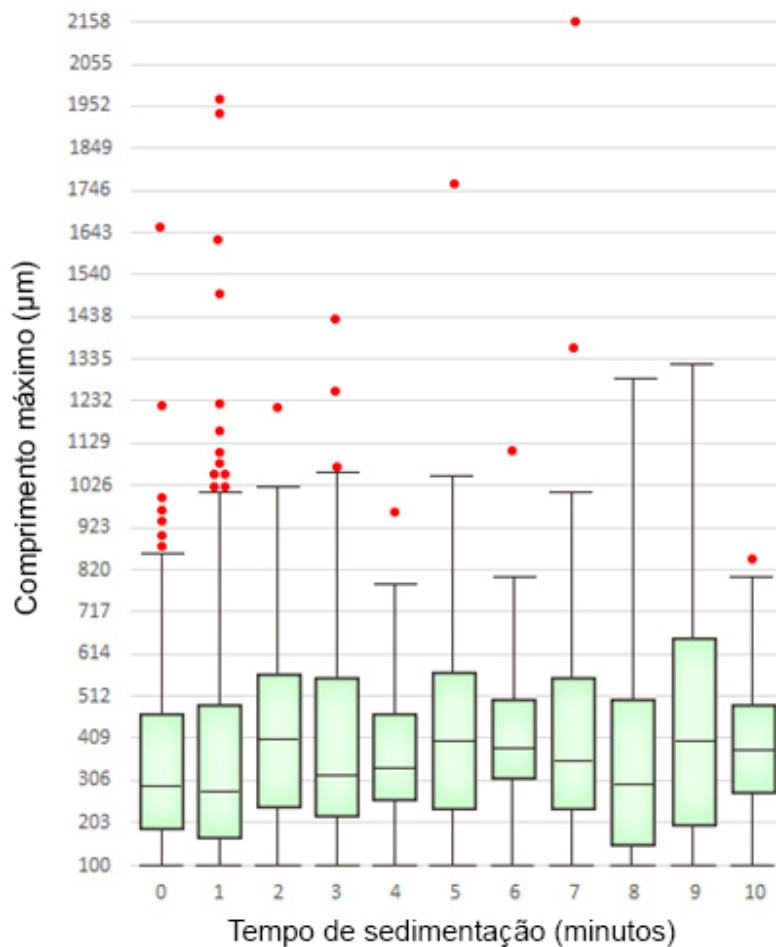













Figura 25: Diagrama de caixa da variação dos comprimentos máximos dos agregados em função do tempo de sedimentação do sistema.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados das variáveis de deslocamento e de tamanho dos agregados monitorados após floculação.

Tabela 6: Valores médios de θ (ângulo de deslocamento dos agregados com a horizontal) vetores correspondentes a direção e ao sentido do deslocamento no intervalo de tempo correspondente as medições, a $tg(\theta)$, De , mediana do tamanho máximo dos agregados, parâmetros β e $\log A$ do NC para os tempos de amostragem.

Tempo	Média θ (graus)	Vetor	$tg(\theta)$	De	Mediana dos tamanhos (μm)	β	$\log A$	NC
0	32,9		0,65	1	291	2,22	2,02	3,46
1	9,5		0,17	0,44	274	1,74	2,06	5,82
2	9,0		0,16	0,17	407	1,69	1,50	0,66
3	50,5		1,21	0,20	316	1,80	1,65	1,81
4	29,4		0,56	0,17	326	2,10	1,40	0,72
5	56,2		1,49	0,13	394	1,33	1,34	0,74
6	33,9		0,67	0,08	375	1,30	1,15	0,87
7	56,7		1,52	0,13	347	1,69	1,40	1,43
8	65,8		2,23	0,07	297	1,45	1,20	0
9	74,5		3,61	0,06	399	1,56	1,23	0
10	85,0		11,47	0,12	369	1,34	1,08	0,93

Observando-se os dados da Figura 25 e da Tabela 6 pode-se notar dois momentos em que há alteração da distribuição de tamanho dos agregados. O primeiro momento no início da amostragem, até os dois primeiros minutos, onde foi possível observar que houve redução nos valores de β , ao mesmo tempo em que houve um crescimento nos valores de mediana. Ou seja, a distribuição de tamanho foi alterada para as maiores classes de tamanho pela ação predominante marcada pela fase inercial do movimento do fluido, conforme discutido anteriormente.

Com relação aos agregados de maior comprimento, denominados de agregados *outliers*, há também um crescimento na contagem desses agregados no primeiro minuto de

sedimentação, que pode ser observado através do crescimento nos valores de NC, que passou de 3,46 para 5,82 no primeiro minuto de sedimentação. Contudo, esse valor caiu para 0,66 no segundo minuto de sedimentação, sugerindo que apesar desses agregados terem uma rápida evolução nos seus tamanhos, eles também possuem uma elevada velocidade de sedimentação.

O segundo momento marcado pelas mudanças de tamanho dos agregados ficou compreendido entre os tempos de amostragem 4 e 6 minutos. Apesar de não haver nenhuma alteração significativa no número de agregados *outliers*, é observada uma alteração nos valores de β , ao mesmo tempo em que há um crescimento nos valores de mediana. É interessante observar também que esse segundo momento marcou a mudança nas trajetórias predominantes dos agregados, conforme discutido e apresentado na Figura 20.

Portanto, foi possível identificar a alteração da DTP em dois momentos distintos, marcados predominantemente pelo movimento inercial do fluido após desligamento das pás do Jarteste e pela ação da sedimentação diferencial agindo predominantemente no segundo momento, quando grande parte da energia introduzida no sistema por meio da G_f de $20s^{-1}$ foi dissipada.

Evidentemente, os resultados aqui apresentados devem ser confirmados por meio da investigação de diferentes valores de G_f e pela avaliação direta dos turbilhões. Ainda, seus efeitos nos ensaios de Jarteste devem ser avaliados cuidadosamente. Todavia, os resultados pontam inequivocamente para alteração do tamanho dos agregados após desligamento das pás que promovem agitação durante a floculação.

Do ponto de vista operacional, a análise mais amplamente realizada nas ETAs para se fazer o ajuste de dosagem de coagulantes na água bruta é o ensaio Jarteste, onde o operador coleta uma alíquota de água bruta e testa diferentes dosagens de coagulantes. O operador seleciona a dosagem que apresenta a melhor performance possível para replicar na ETA. Contudo, não é considerado durante esse processo o crescimento dos agregados durante a sedimentação, caso esse crescimento fosse considerado, isso implicaria por exemplo em uma redução nas dosagens de coagulantes utilizados nas ETAs (variando de acordo com as características de cada ETA), o que poderia gerar uma economia na utilização desses produtos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O efeito do movimento inercial do fluido e da sedimentação diferencial sobre o tamanho dos agregados foi investigado. Pode-se constatar que o tamanho dos agregados continua a ser alterado após desligamento das pás do Jarteste com efeitos predominantemente distintos.

A presença de flocos grandes nos tempos finais de amostragem decorre majoritariamente pela agregação ocorrida durante a separação, resultante do transporte inercial e da sedimentação diferencial.

Pode-se notar dois momentos distintos em que houve alteração da distribuição de tamanho dos agregados. O primeiro momento no início da amostragem, até os dois primeiros minutos, onde foi possível observar que houve redução nos valores de β , ao mesmo tempo em que há um crescimento nos valores de mediana. Nessa fase, a distribuição de tamanho foi alterada para as maiores classes de tamanho pela ação predominantemente marcada pela fase inercial do movimento do fluido. O segundo momento marcado pelas mudanças de tamanho dos agregados ficou compreendido entre os tempos de amostragem entre 4 a 6 minutos, marcado pela mudança nas trajetórias predominantes dos agregados onde a sedimentação diferencial agiu predominantemente, quando grande parte da energia introduzida no sistema por meio do G_f de $20s^{-1}$ foi dissipada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, T. Análise de Componentes Principais Aplicada a Avaliação de Atributos de Agregados na Separação Sólido Líquido. Dissertação de Mestrado. (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Campus Rio Claro. 2020.

ALMEIDA, T. Avaliação do desempenho de sedimentação e sua relação com distribuição do tamanho de partículas (DTP) e com agregados fractal. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Campus Rio Claro. 2017.

ARGAMAN, Y. A.; KAUFMAN, W. J. Turbulence and Flocculation. J. Div. Sanit. Eng. Proc. Am. Soc. Civil Eng., 96, 223–241. 1970.

BRACARENSE, P.A. Estatística Aplicada Às Ciências Sociais. Curitiba, Brasil, IESDE, 2012, p. 288.

BRATBY, J. Coagulation and Flocculation With an Emphasis on Water and Wastewater Treatment. Croydon, Inglaterra. Uplands Press Ltda., 1980.

BÜLL, J. C. Determinação da força e crescimento do floco de águas de abastecimento. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Campus Rio Claro, 2017.

CHAKRABORTI, J.K.; KAUR, J. Noninvasive Measurement of Particle-Settling Velocity and Comparison with Stokes' Law. Journal of Environmental Engineering, vol. 140. 2013.

CRITTENDEN, J.C.; TRUSSEL, R.R.; HAND, D.W.; HOWE, K.J.; TCHOBANOGLOUS, G. Water Treatment Principles and Design, 3ª edição, John Wiley & Sons, Inc. 2012.

- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. Segunda Edição. São Carlos. RIMA, p.71, 2005.
- DI BERNARDO, A. S. Influência das condições de aplicação de polímeros catiônicos na eficiência da floculação. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- DUCOSTE, J.J.; CLARK, M.M. The Influence of Tank Size and Impeller Geometry on Turbulent Flocculation: I. Experimental. Estados Unidos. Environmental Engineering Science, vol. 15, nº 3, 215-224. 1998.
- GATOS, B.; PRATIKAKIS, I.; PERANTONIS, S.J. Adaptive degraded document image binarization. Atena, Grécia. Pattern Recognition Society. Vol. 39, p. 317 – 327. 2006.
- GOUY, G. Sur la Constitution de la Charge Electrique a la Surface, d'un Electrolyte, J. Phys. Chem., 9, 457–467. 1910.
- HE, W.; NAN, J.; LI, H.; LI, S. Characteristic Analysis on Temporal Evolution of Floc Size and Structure in Low-shear Flow. República Popular da China. Water Research, p. 509-520. 2012.
- TCHOBANOGLIOUS, G. Principles of Water Treatment. Hoboken, Estados Unidos da América. John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- LI, X.; LOGAN, B.E. Collision Frequencies of Fractal Aggregates with Small Particles by Differential Sedimentation, Tucson, Arizona. Environmental Science & Technology. Vol. 31, p. 1229 – 1236. 1997a.
- LI, X.; LOGAN, B.E. Collision Frequencies between Fractal Aggregates and Small Particles in a Turbulently Sheared Fluid, Tucson, Arizona. Environmental Science & Technology. Vol. 31, p. 1237 – 1242. 1997b.
- LI, X.; YUAN, Y. Collision Frequencies of Microbial Aggregates with Small Particles by Differential Sedimentation. Hong Kong, China. Environmental Science & Tecnology. Vol. 36, p. 387-393. 2002.

LOGAN, B.E. Environmental Transport Processes. Estados Unidos da América. John Wiley & Sons, p. 466 – 545. 1999.

MANETTA, L.S. Determinação dos gradientes de velocidade médios em sistemas de câmaras em série visando atender ao critério do menor tempo de floculação total. Dissertação de Mestrado. (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Campus Rio Claro. 2014.

MANETTA, L.S. Obtenção de Coeficiente Cinético de Agregação com Utilização de Método Direto. Tese de Doutorado. (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Campus Rio Claro. 2019.

MANETA, L.S.; CHUNG, K.; ALMEIDA, T.; GOEHLER, L.O.; MORUZZI, R.B. Interferência da Ordem e do Número de Pontos Adjacentes na Determinação da Força e do Recrescimento de Agregados Formados Durante a Floculação, Usando Dispersão Fotométrica e Filtro Savitzky-Golay. In: 30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal, 2019.

MARION, J.B. Classical Dynamics of Particles and Systems, 1ª edição. Estados Unidos da América. Academic Press. 1965.

MENDES, Y.C.; GONÇALVES, L.S.M.; DUTRA, R.H.A.; MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, A.L. Análise da floculação por meio da distribuição do tamanho de partículas. Revista DAE, v. 68, p. 12-19, 2020.

MORENO, P.; CONCEIÇÃO, F. T.; ANTUNES, M. L. P.; LOPES, M. S.; MORUZZI, R. B. Aplicação de lama vermelha como nucleador de floco. Hydro, São Paulo, v. 12, p. 46-48, 2016.

- MORENO, P.; OLIVEIRA, A. L.; SILVA, P. A. G.; DE JÚLIO, M.; MORUZZI, R. B. Investigação do Efeito do Número de Camp (NC) na Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP). In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES. v. 1, 2015a.
- MORENO, P. Emprego de técnica dedicada de análise de imagem na valiação do produto GT no desempenho da floculação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2015b.
- MORENO, P.; MORUZZI, R. B.; Conceição, F.T. Investigação da aplicação da lama vermelha 'red mud' na mistura rápida como nucleador de flocos visando sua remoção por sedimentação. In: AIDIS, 2013, Tegucigalpa, Honduras. Anais do XXVIII AIDIS, 2013.
- MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, A.L. Avaliação da sensibilidade da função de distribuição de tamanho de partícula durante a floculação. *Revista Engenharia Sanitaria e Ambiental* 25 (1), p. 1809-4457, 2020.
- 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 and Technology*, v. 82, p. 1-11, 2020a.
- MORUZZI, R.B.; CAMPOS, L.C.; SHARIFI, S.; SILVA, P.A.G.; GREGORY, J. Nonintrusive Investigation of Large Al-kaolin Fractal Aggregates with Slow Settling Velocities. *Water Research*, v. 1, p. 116287, 2020b.
- MORUZZI, R.B.; SILVA, P.G.; SHARIFI, S.; CAMPOS, L.C.; GREGORY, J. Strength Assessment of Al-Humic and Al-Kaolin Aggregates by Intrusive and Non-intrusive Methods. *Rio Claro. Separation and Purification Technology*. Vol. 207, p. 265 – 273. 2019.

- MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, A. L.; ALMEIDA, T. Fractal Aggregates Evolution During Flocculation. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 35, p. 1203-1210, 2018.
- MORUZZI, R.B; SILVA, P.A.G. Reversibility of Al-Kaolin and Al-Humic Aggregates Monitored by Stable Diameter and Size Distribution. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 35, p. 1029-1038, 2018.
- MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, A.L.; CONCEIÇÃO, F.T.; GREGORY, J.; CAMPOS, L.C. Fractal Dimension of Large Aggregates Under Diferente Flocculation Conditions. *Rio Claro. Science of the Total Environment*, vol. 609, p. 807 – 81, 2017a.
- MORUZZI, R. B.; MANETTA, L. S.; OLIVEIRA, S. C. Flocculation model applied to adjust operating conditions as flow changes. *Desalination and Water Treatment*, v. 58, p. 58-62, 2017b.
- MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, A.R.; DE JULIO, M.; DUTRA, R.H.A.; SILVA, P.A.G. Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, no.4, p. 817-824, 2016.
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; DE JULIO, M. Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração. *Revista DAE*, v. 63, p. 30-41, 2015.
- MORUZZI, R.B; REALI, M.A.P. Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. *Rio de Janeiro. Revista Engenharia Sanitária Ambiental*, v,12, no.3. 2007.
- OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G.; DE JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Avaliação da melhor distribuição de tamanho de partículas para a sedimentação mantendo-se fixo o número de Camp. Monterrey - México. XXXIV Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental - Aspirando a un ambiente sostenible. México: AIDIS. v. 1. p. 1, 2014.

OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G.; DE JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Análise da distribuição do tamanho de partículas em função do tempo de floculação. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015, Rio de Janeiro: ABES. v. 1, 2015a.

OLIVEIRA, A.L.; MORENO, P.; SILVA, P.A.G., DE 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.*, Vol. 57 (36). p. 1-12, 2015b.

OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; DE JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Avaliação de Parâmetros Representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas Presentes em Coleções Hídricas / Evaluation of Particle Size Distribution in Hydro Collections. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, p. 1084-1092, 2015c.

PAVANELLI, G. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. São Carlos. Dissertação de Mestrado. 2001.

SILVA, P.A.G. Estudo da Resistência do Floco e da Refloculação Visando o Tratamento de Águas de Abastecimento Utilizando Técnica de Monitoramento por Análise de Imagem Digital e Dispersão de Luz. Dissertação de mestrado. (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Campus Rio Claro. 2017.

SILVA, P.A.G.; MORUZZI, R. B. Reversibility of al-kaolin and al-humic aggregates monitored by stable diameter and size distribution. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Scielo, 2017.

SILVA, P.A.G. Força e dimensão fractal para floco de caulinita coagulado com sal de alumínio aplicado ao tratamento de água para abastecimento. 22 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio claro, 2016.

SMOLUCHOWSKI, M. Versuch einer Mathematischen Theorie der Koagulation Kinetik Kolloid Lösungen. Physik. Chemie, v 9, 129-168. 1917.

SMOLUCHOWSKI, M. Drei Vorträge über Diffusion, Brownsche Molekularbewegung und Koagulation von Kolloidteilchen, Physik Zeitschr, v 17, p. 585-599. 1916.

WOLLRAB, J.E. Rotational Spectra and Molecular Structure. 1ª edição. ST.Louis, Missouri. Academic Press. 1967.

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. Hong Kong, China. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v 397, p. 27-35. 2011.

YUKSELEN, M.A., GREGORY, J. The reversibility of flocs breakage. Int. J. Miner. Process., v. 73, p.251-59. 2004.