

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
MESTRADO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

ANNA PAULA NOGUEIRA SCHAFRANSKI

**AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE FLOCULAÇÃO EM ESCALA DE BANCADA
JAR TEST PARA TRATAMENTO CONVENCIONAL E COM INJEÇÃO DE MICRO
AREIA UTILIZANDO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

PONTA GROSSA

2022

ANNA PAULA NOGUEIRA SCHAFRANSKI

**AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE FLOCULAÇÃO EM ESCALA DE BANCADA
JAR TEST PARA TRATAMENTO CONVENCIONAL E COM INJEÇÃO DE MICRO
AREIA UTILIZANDO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental, Área de Concentração Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga

PONTA GROSSA

2022

S296 Schafranski, Anna Paula Nogueira
Avaliação dos processos de floculação em escala de bancada Jar Test para tratamento convencional e com injeção de micro areia utilizando processamento digital de imagens / Anna Paula Nogueira Schafranski. Ponta Grossa, 2022.
76 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga.

1. Floculação. 2. Decantação. 3. Modelagem física. 4. Micro areia. 5. Visão computacional. I. Széliga, Marcos Rogério. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. III.T.

CDD: 628.4

FOLHA DE APROVAÇÃO

11/11/2022 01:19

SEI/UEPG - 1165745 - Certificado



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO - DEFESA DE MESTRADO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
Certificado nº 05/2022 PPGESA

Título da Dissertação: “**AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE FLOCULAÇÃO EM ESCALA DE BANCADA JAR TEST PARA TRATAMENTO CONVENCIONAL E COM INJEÇÃO DE MICRO AREIA UTILIZANDO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**”.

Nome: ANNA PAULA NOGUEIRA SCHAFRANSKI

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga
Universidade Estadual de Ponta Grossa/Ponta Grossa - PR

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Ponta Grossa – PR

Prof. Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal
Universidade Estadual do Centro-Oeste/Irati - PR

Ponta Grossa 13 de outubro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Rogério Széliga, Professor(a)**, em 26/10/2022, às 14:21, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS MAGNO DE SOUSA VIDAL, Usuário Externo**, em 26/10/2022, às 17:08, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Jhon Jairo Ramirez Behainne, Usuário Externo**, em 27/10/2022, às 05:53, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **1165745** e o código CRC **40CCA742**.

22.000062751-5

1165745v6

Dedico a minha família que sempre esteve ao meu lado

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Ponta Grossa pelo acesso ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Ao Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga, pela orientação, compreensão e apoio para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Alessandro Nogueira, pelo incentivo, correções e por sempre estar disponível para colaborar com o desenvolvimento do trabalho.

À Sanepar, junto com a equipe de laboratório, por disponibilizar equipamentos para compreender e apreender, também espaço físico e técnicos para me auxiliar nos ensaios.

À minha amada mãe, Vera Lucia Martins, que sempre incentivou a pesquisa e estudos. Aos meus filhos Marcelo Emanuel Schafranski e Yasmin Schafranski razão de tudo.

Ao meu irmão e amigo Marcelo de Lucas Nogueira por ser a pessoa a me incentivar diariamente.

À Deus por nos dar desafios e permitir que sonhos se realizem.

RESUMO

A proteção e o uso adequado das fontes de água doce no planeta devem ser buscadas de forma exaustiva para a conservação da vida na terra. A industrialização acelerada e o crescimento demográfico acabam por tornar ainda mais preocupante a manutenção das reservas hídricas necessárias para garantir o desenvolvimento sustentável. Por outro lado, as empresas com tecnologia adequada podem acelerar o tratamento de água. Para se conseguir atenção dos responsáveis pela operação de sistemas de saneamento, a questão de custo e eficiência são primordiais. Esta pesquisa teve como foco a comparação, por meio de tecnologias de Visão Computacional, o processo de formação de flocos em ensaios Jar Test aplicados no embasamento do tratamento da água para o sistema convencional e para o sistema com a tecnologia Actiflo®. A Tecnologia Actiflo® implantada na estação de tratamento de água do Jardim Carvalho em Ponta Grossa, consiste em um sistema compacto, instalado ao lado de um sistema convencional, este sistema utiliza a injeção de micro areias para a formação de flocos. O processo baseia-se na sedimentação lastreada, na qual os flocos formados pela combinação sólido, coagulante e polímero são formados ao redor de grãos de micro areia, desta forma o peso dos flocos aumenta a velocidade de sedimentação. Esta pesquisa demonstra os efeitos dos processos coagulação/floculação em aplicação convencional e com injeção da areia no sistema, introduzindo o floculante em diferentes dosagens e verificando o efeito no tamanho e densidade de flocos. A verificação é por meio do processamento de imagens em um aplicativo desenvolvido no programa de pós-graduação com emprego do Matrix Laboratory – Matlab®, que utiliza uma linguagem de programação e ferramentas apropriadas ao desenvolvimento de aplicativos de natureza técnica. No ensaio convencional foi constatado uma maior envergadura e uma densidade espacial menor, atingindo 259,4% de flocos em relação a ocupação inicial. No ensaio com micro areia a densidade foi maior, porém foi obtido uma envergadura média menor, mas com maior incidência média de flocos de 3,47 flc/cm² para 6,16 flc/cm². O programa computacional atingiu com êxito os objetivos, demonstrando os flocos individualmente no jarro, e como um conjunto, podendo comparar os tratamentos, nos parâmetros de caracterização do processo de floculação.

Palavras-chave: Floculação, decantação, modelagem física, micro areia, visão computacional.

ABSTRACT

Protection and adequate use of freshwater sources on planet must be searched exhaustively for the conservation of life on earth. Accelerated industrialization and demographic growth end up making the maintenance of hydric reserves, needed to guarantee the sustainable development, even more worrying. On the other hand, organizations with suitable technologies can stimulate the development of water treatment systems. In order to get the attention of those responsible for the operation of sanitation systems, cost and efficiency issues are paramount. This research focused on the compare, through Computational Vision technologies, the flakes formation process in Jar Test experiments applied on the basis of the water treatment for the conventional system and the system with Actiflo® technology. Actiflo® technology installed in the water treatment plant in Jardim Carvalho in PontaGrossa, consists of a compact system installed next to a conventional system, this system uses the micro sand injection for flakes formation. The process is based in backed sedimentation, in which flakes structured by the combination between solid, coagulant and polymers are formed around of micro sand grains, increasing flakes weight which in turn, increase sedimentation velocity. This research demonstrates the effect of coagulation/flocculation processes on conventional application and with sand injection in the system, introducing the flocculant in different dosage and verifying the effect on flakes size and density. Verification is made through image processing in a computational program developed by the graduate program using the Matrix Laboratory – Matlab®, which uses a programming language and tools appropriate to the development of applications of technical nature. It was found in the conventional experiment a greater wingspan and a lower spatial density, reaching 259,4% of flakes in relation to the initial occupation. In the micro sand experiment, the density was greater but it was obtained a smaller average wingspan with higher average incidence of flakes of 3,47 flc/cm² to 6,16 flc/cm². The software successfully achieved its objectives, demonstrating the flocs individually in the jar and as a set, being able to compare the treatments in the parameters of characterization of the flocculation process.

Keywords: Flocculation, decantation, physical modeling, micro sand, computational vision.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Carga ao redor de uma partícula coloidal..... | 22 |
| Figura 2 | Potencial nas proximidades de uma superfície coloidal..... | 23 |
| Figura 3 | Procedimento simplificado para realização de teste de coagulação em laboratório..... | 27 |
| Figura 4 | Esquema do tratamento de água doce para produção de água potável com o sistema Actiflo..... | 28 |
| Figura 5 | . Processo de determinação das dosagens ótimas dos reagentes, equipamento Jar Test..... | 31 |
| Figura 6 | Relação entre o gradiente de velocidade e rotação do equipamento Jar Test..... | 32 |
| Figura 7 | Emissão de feixe laser para produção de plano específico de aquisição de imagens..... | 33 |
| Figura 8 | Alguns equipamentos utilizados na caracterização da água bruta..... | 37 |
| Figura 9 | Jar Test em tratamento convencional, com água bruta e PAC, iniciando formação de flocos..... | 38 |
| Figura 10 | Imagem do Jar Test em tratamento convencional..... | 39 |
| Figura 11 | Jar Test em tratamento com adição de Pac, micro areia e polímero..... | 40 |
| Figura 12 | Realização de ensaio dinâmico de fotos com laser..... | 41 |
| Figura 13 | Interface do software Floc Image..... | 43 |
| Figura 14 | Alinhamento do quadro de recorte ao grid de calibração..... | 44 |
| Figura 15 | Reprodução de tela com exemplo de resultado da etapa de calibração..... | 45 |
| Figura 16 | Reprodução de tela com exemplo de acionamento da etapa de carregamento..... | 46 |
| Figura 17 | Área de controle para o processamento de imagens..... | 46 |
| Figura 18 | Exemplo de foto original em ensaio Jar Test..... | 47 |
| Figura 19 | Imagens processadas..... | 48 |
| Figura 20 | Área de controle do processamento numérico no Floc Image..... | 49 |
| Figura 21 | Exemplo de imagem binarizada de um ensaio de desenvolvimento e o respectivo gráfico de bolhas gerado no processo numérico..... | 50 |
| Figura 22 | Evolução da densidade espacial na formação de flocos do ensaio CNV-01..... | 54 |
| Figura 23 | Formação de vórtice e intrusão de bolhas de ar no escoamento..... | 55 |
| Figura 24 | Evolução da incidência de flocos do ensaio CNV-01..... | 56 |
| Figura 25 | Evolução da envergadura de flocos do ensaio CNV- 01..... | 57 |
| Figura 26 | Frequências de envergadura de flocos do ensaio CNV-01..... | 58 |
| Figura 27 | Comparativos entre os ensaios para tratamento convencional..... | 63 |
| Figura 28 | Densidade espacial- Ensaio ACT – 03..... | 66 |
| Figura 29 | Incidência de focos - Ensaio ACT- 03..... | 67 |
| Figura 30 | Envergadura – Ensaio ACT 03..... | 68 |
| Figura 31 | Distribuição de frequência de envergaduras – Ensaio ACT-03..... | 69 |
| Figura 32 | Envergadura e densidades em ensaios Actflo®..... | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabela 1 | Classificação das águas doces em função dos usos (CONAMA Resol. n. 357 de 2005) | 19 |
| Tabela 2 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV-01..... | 57 |
| Tabela 3 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV-02..... | 59 |
| Tabela 4 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV-03..... | 60 |
| Tabela 5 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV-04..... | 60 |
| Tabela 6 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV-05..... | 61 |
| Tabela 7 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV-06..... | 62 |
| Tabela 8 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT-01..... | 63 |
| Tabela 9 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT-02..... | 64 |
| Tabela 10 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT-03..... | 68 |
| Tabela 11 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT-04..... | 70 |
| Tabela 12 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT-05..... | 71 |
| Tabela 13 | Resumo dos resultados para a amostrado 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT-06..... | 71 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | | |
|---------------------|---------------------------------|----|
| Equação 1 | Sólidos totais..... | 35 |
| Equação 2 | Tempo de detenção..... | 36 |
| Equação 3 | Velocidade de sedimentação..... | 37 |
| Equação 4 | Densidade espacial..... | 50 |
| Equação 5 | Incidência..... | 50 |
| Inequações 6 e 7 | Intervalos de frequências..... | 51 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 | JUSTIFICATIVA | 13 |
| 3 | OBJETIVOS | 14 |
| 3.1 | OBJETIVO GERAL..... | 14 |
| 3.2 | OBJETIVO ESPECÍFICO..... | 14 |
| 4 | REVISÃO DA LITERATURA | 15 |
| 4.1 | CLASSIFICAÇÃO HÍDRICA..... | 15 |
| 4.2 | TRATAMENTO DE ÁGUA..... | 16 |
| 4.2.1 | Ciclo completo | 16 |
| 4.2.2 | Importância na Formação de Flocos | 17 |
| 4.2.3 | Coagulação | 18 |
| 4.2.3.1 | Coagulantes químicos utilizados em tratamento de água..... | 20 |
| 4.2.3.2 | Coagulantes naturais utilizados em tratamento de água..... | 21 |
| 4.2.3.3 | Avaliação de coagulantes..... | 22 |
| 4.2.4 | Floculação | 24 |
| 4.3 | SISTEMA ACTFLO®..... | 25 |
| 5 | MATERIAIS E MÉTODOS | 27 |
| 5.1 | MATERIAIS..... | 27 |
| 5.2 | MÉTODOS..... | 27 |
| 5.2.1 | A modelagem em Jar Test | 27 |
| 5.2.2 | A aplicação em laboratório | 29 |
| 5.2.3 | Caracterização da água | 29 |
| 5.2.4 | Processamento digital de imagens | 29 |
| 5.3 | EXPERIMENTOS..... | 31 |
| 5.3.1 | Características da água bruta | 32 |
| 5.3.2 | Ensaio com Jar Test | 33 |
| 5.3.2.1 | Operação para testes visando tratamento convencional..... | 34 |
| 5.3.2.2 | Operação para testes visando tratamento Actiflo..... | 35 |
| 5.3.3 | Aquisição e Processamento Digital de Imagens | 36 |
| 5.3.3.1 | Sistema de aquisição de imagens..... | 37 |
| 5.3.3.2 | Processamento digital das imagens..... | 38 |
| 5.3.3.2.1 | <i>Software Floc Image V.01.2022 Apresentação da interface</i> | 39 |
| 5.3.3.2.2 | <i>Calibração do sistema para distâncias</i> | 40 |
| 5.3.3.2.3 | <i>Carregamento de imagens</i> | 41 |
| 5.3.3.2.4 | <i>Processamento de imagens</i> | 42 |
| 5.3.3.2.5 | <i>Processamento numérico</i> | 45 |
| 5.3.4 | Planilhamento | 46 |
| 5.3.4.1 | Densidade espacial – Adimensional..... | 47 |
| 5.3.4.2 | Incidência Flocos/cm ² | 47 |
| 5.3.4.3 | Envergadura mm ² | 47 |

| | | |
|---------|---|----|
| 5.3.4.4 | Distribuição de magnitudes adimensional..... | 48 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 49 |
| 6.1 | CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA BRUTA..... | 49 |
| 6.2 | ENSAIOS NA MODALIDADE DE TRATAMENTO CONVENCIONAL..... | 49 |
| 6.2.1 | Ensaio convencional CNV – 01 | 50 |
| 6.2.1.1 | Densidade espacial..... | 50 |
| 6.2.1.2 | Incidência de flocos..... | 50 |
| 6.2.1.3 | Envergaduras de flocos..... | 51 |
| 6.2.1.4 | Frequência de envergaduras..... | 52 |
| 6.2.1.5 | Resumo das caraterísticas para a faixa de consolidação de formação de flocos..... | 53 |
| 6.2.1.6 | Exemplos de imagens processadas no ensaio CNV – 01 | 54 |
| 6.2.2 | Ensaio convencional CNV – 02..... | 55 |
| 6.2.3 | Ensaio convencional CNV – 03 | 56 |
| 6.2.4 | Ensaio convencional CNV – 04 | 57 |
| 6.2.5 | Para o ensaio CNV – 05 | 58 |
| 6.2.6 | Ensaio convencional CNV – 06 | 58 |
| 6.2.7 | Comparativos entre os ensaios para tratamento convencional | 59 |
| 6.3 | ENSAIOS NA MODALIDADE DE TRATAMENTO ACTFLO®..... | 60 |
| 6.3.1 | Ensaio Actiflo® ACT – 01 | 60 |
| 6.3.2 | Ensaio Actiflo® ACT – 02..... | 60 |
| 6.3.3 | Ensaio Actiflo® ACT – 03 | 61 |
| 6.3.3.1 | Densidade espacial..... | 61 |
| 6.3.3.2 | Incidência de flocos..... | 62 |
| 6.3.3.3 | Envergaduras de flocos..... | 63 |
| 6.3.3.4 | Frequência de envergaduras..... | 64 |
| 6.3.3.5 | Resumo das caraterísticas para a faixa de consolidação de formação de flocos..... | 65 |
| 6.3.3.6 | Exemplos de imagens processadas no ensaio ACT – 03..... | 66 |
| 6.3.4 | Ensaio Actiflo® ACT – 04 | 67 |
| 6.3.5 | Ensaio Actiflo® ACT – 05 | 67 |
| 6.3.6 | Ensaio Actiflo® ACT – 06 | 68 |
| 6.3.7 | Comparativos entre os ensaios para tratamento Actiflo® | 69 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 70 |
| | REFERÊNCIAS..... | 71 |

1 INTRODUÇÃO

A Legislação Ambiental Brasileira, através de uma maior atuação dos órgãos ambientais no que se refere à fiscalização e exigências, tem proporcionado um aumento expressivo de ações de intervenção para a redução da carga de contaminantes em águas residuais, bem como alavancado o desenvolvimento de novos sistemas de tratamento que podem ser utilizados por empresas de diversos setores.

A escassez de água de boa qualidade tem conduzido busca por novas tecnologias que consigam um sistema mais rápido, eficiente, apresentando menor área de construção e menor custo.

A turbidez é uma característica da água devido a presença de partículas sólidas em suspensão (silte, argila, sílica e coloides), matéria orgânica e inorgânica finamente divididas, organismos microscópios e algas. Esses materiais podem ter origem no solo (quando não há mata ciliar), na mineração (como a retirada de areia ou a exploração de argila), nas indústrias ou no esgoto doméstico, lançados no manancial sem tratamento. Esses materiais podem se apresentar em uma ampla faixa de tamanhos. Segundo a portaria 888/2021 do Ministério da Saúde, o valor máximo permissível de turbidez na água tratada em qualquer ponto da rede de distribuição é de 5,0 NTU e, na água filtrada, de 1,0 NTU, sendo recomendado o índice menor que 0,5 NTU. A remoção ou diminuição dessa característica visa à eficiência da cloração como medida de desinfecção da água; porém, para valores idênticos de turbidez, pode haver diferença no número e tamanho das partículas, sendo que para uma maior eficiência na etapa de desinfecção é melhor que as partículas sejam menores (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Os parâmetros de floculação influenciam de modo relevante a eficiência global de remoção das impurezas contidas na água bruta, e por isso, não devem ser adotados, mas sim fixados a partir de estudos de tratabilidade em laboratório ou sem instalação piloto. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a água bruta do Rio Verde, no município de Ponta Grossa/PR, através de estudos individualizados e comparativos da floculação convencional e com injeção de areia do sistema Actiflo®. Através de diversas dosagens e simulações de operação, usando o equipamento Jar test, pode se verificar o efeito fotograficamente e analisando tamanho e densidade de flocos por meio de imagens.

Os procedimentos, dosagens e programações Jar Test aplicados nos ensaios deste trabalho foram os mesmos empregados no laboratório da ETA Jardim Carvalho – SANEPAR – Ponta Grossa – PR, proporcionando um padrão compatível com as especificações do tratamento convencional e Actiflo® o efetivados comumente na ETA.

As instalações experimentais, localizadas no Laboratório de Recursos Hídricos – Bloco E – UEPG, consistiram em bancada de ensaios Jar Test, equipamentos especializados de iluminação e aquisição de imagens, microcomputador para arquivo de imagens e com programa computacional para processamento que engloba enquadramento, tratamento e adequação de imagens, explorando as variáveis matriciais dessas imagens para condicionar e obter saídas gráficas e numéricas. O software utiliza programação Matlab® integrada com planilhamento Excel® para compor resultados.

2 JUSTIFICATIVA

A principal característica deste projeto foi a idealização de ensaios em nível de bancada e atuação em modelos físicos especialmente úteis, devido à sua alta aplicabilidade na Engenharia Sanitária, introduzindo a comparação da floculação entre a ETA convencional e a injeção de micro areias no sistema Actiflo®. Estas informações são limitadas na literatura especializada e, portanto, irão contribuir com o desenvolvimento científico e tecnológico dos sistemas Convencional e Actiflo® para o tratamento de água doce.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Analisar com auxílio da aplicação de metodologias de Visão Computacional, por meio de instalação de iluminação, aquisição de dados e do software Floc Image, para obtenção de parâmetros relacionados à formação de flocos em ensaios Jar Test aplicados ao embasamento de processos de tratamento para água de abastecimento, proporcionando dados analíticos de eficiência.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Proceder ensaios Jar Test para água bruta com diferentes dosagens de Cloreto de Polialumínio, PAC ou Sulfato de Alumínio $Al_2(SO_4)_3$, conforme metodologias dos ensaios aplicadas ao tratamento convencional de água para abastecimento e ao tratamento de água para abastecimento Actiflo®;

Instalar e operar o sistema de iluminação e aquisição de imagens do escoamento nas jarras de teste, conforme requisitos adequados à aquisição de dados para processamento digital e ao estudo individual da formação de flocos em cada elemento de teste e seus comparativos;

Estabelecer a triagem das imagens de forma a garantir representatividade de cada umas das etapas de teste e promover seu processamento digital e respostas automatizadas;

Comparar os resultados, demonstrando, individualmente, conjuntamente e comparativamente os parâmetros de caracterização do processo de floculação e definição de dosagens e sistemas que sustentem decisões de aplicação em escala real dos resultados Jar Test decorrentes da metodologia de Visão Computacional.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 CLASSIFICAÇÃO HÍDRICA

A qualidade da água é definida por sua composição química, física e bacteriológica, devendo a qualidade da água ou suas características desejáveis, atender no mínimo, os padrões exigidos para a finalidade a que será destinada.

Segundo Ritcher e Azevedo Netto (1991), para o consumo humano há necessidade de uma água pura e saudável, isto é, livre de matéria suspensa visível, cor, gosto e odor, de quaisquer organismos capazes de provocar enfermidades e de quaisquer substâncias orgânicas ou inorgânicas que possam produzir efeitos fisiológicos prejudiciais.

Dependendo das limitações de tecnologia, recursos financeiros e mananciais disponíveis, as águas que não são destinadas para a abastecimento público, regulamentado pelo padrão de potabilidade da Portaria nº 888 de 07 de maio de 2017 do Ministério da Saúde a qual define os padrões de potabilidade, podem ter qualidade inferior, conforme a finalidade a que é destinada.

Os compostos orgânicos dissolvidos ou particulados, presentes em baixa concentração, em águas de abastecimento, contribuem para o crescimento de bactérias heterotróficas que utilizam o carbono orgânico para produzir material celular ou para obter energia. Se estes compostos não são retirados durante o processo de tratamento de água, podem contribuir para acelerar a taxa de corrosão na tubulação, aumentar a incidência de doenças causadas por bactérias, comprometer a eficiência do residual para desinfecção e aumentar a formação de precursores da desinfecção (EDZWALD et al., 1985).

Além do padrão de potabilidade, do Ministério da Saúde, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, através da Resolução n. 357 de 2005, estabelece padrões para a classificação dos corpos d'água conforme os usos a que se destinam (Tabela 1) e para o lançamento de efluentes nesses corpos, a fim de evitar a alteração das características de montante do corpo receptor, e preservar os mananciais superficiais.

Tabela 1 – Classificação das águas doces em função dos usos (CONAMA, 2005).

| UTILIZAÇÃO DA ÁGUA DOCE | CLASSES | | | | |
|---------------------------------------|----------|-------|-------|------|----|
| | Especial | I | II | III | IV |
| Abastecimento Doméstico | X (e) | X (a) | X(b) | X(b) | |
| Preservação das Comunidades Aquáticas | X | | | | |
| Recreação de Contato Primário | | X | X | | |
| Proteção de Comunidades Aquáticas | | X | X | | |
| Irrigação | | X | X (c) | X(d) | |
| Aquicultura | | X | X | | |
| Lançamento de Despejos | | X | X | X | X |
| Dessedentação de Animais | | | | X | |
| Navegação | | | | | X |
| Harmonia Paisagística | | | | | X |
| Uso menos Exigentes | | | | | X |

Nota: (a) Após tratamento simples, (b) após tratamento convencional, (c) hortaliças e plantas frutíferas, (d)cultura arbóreas, cerealistas e forrageiras (e) após desinfecção.

4.2 TRATAMENTO DA ÁGUA

4.2.1 Ciclo completo

O tratamento da água compreende um sistema composto por diferentes etapas, entre as quais se deve destacar a importância da floculação, uma vez que, as etapas seguintes à coagulação e floculação (decantação/ flotação e filtração) são extremamente dependentes das características dos flocos formados.

A qualidade da água é de extrema importância para a saúde pública, pois esta intrinsecamente ligada à profilaxia de muitas doenças. Portanto, é um desafio para os operadores de Estação de Tratamento de Água (ETAs) gerenciar e melhorar os processos atuais de tratamento para garantir o abastecimento seguro de água potável para toda a população (STAAKS et al., 2011).

Portanto o tratamento envolve a retirada de alguns contaminantes, sejam biológicos, físicos ou químicos e, para tal, uma variedade de técnicas de tratamento de água foi desenvolvida no sentido de garantir que os contaminantes sejam removidos ou reduzidos nos sistemas de distribuição de água tratada.

Para determinar a qualidade da água com a tecnologia de tratamento adequada a ser empregada em cada caso, no entanto, é de fundamental importância que sejam realizados estudos de tratabilidade em escala de bancada e piloto, com o objetivo de selecionar com

segurança o tipo de tecnologia a ser aplicada e definir parâmetros operacionais e de projeto (JULIO et al., 2015; RITCHER e AZEVEDO NETTO, 1991; DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Nas Estações de tratamento de água do Brasil as tecnologias mais empregadas são de tratamento de ciclo completo, que consistem nas seguintes etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoreação e estabilização final. Segundo Daniel Bartiko e Marcelo de Júlio (2014), o tratamento de ciclo completo está presente em 63,3% dos municípios brasileiros. Ainda afirmam que este índice sobe para 80,7% naqueles com população superior a 100 mil habitantes, segundo também a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008). Logo considerando que grande parte da população brasileira reside em capitais, regiões metropolitanas e cidades de maior porte, é de se esperar que o índice da população abastecida por água tratada em ETAs de ciclo completo seja elevada.

4.2.2 Importância na Formação de Flocos

A coagulação consiste na desestabilização de partículas em suspensão presentes na água (que possuem sua superfície carregada com cargas elétricas negativas), pela adição, na maioria dos casos, de sais de ferro ou alumínio, os quais em contato com a água catalisam reações de hidrólise que, por sua vez, adsorvem nas partículas coloidais presentes na água e as desestabilizam (KIM et al., 2001). Di Bernardo e Dantas (2005) citam que a etapa de coagulação depende principalmente das características da água como pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez, temperatura, mobilidade eletroforética, força iônica, concentração de sólidos totais dissolvidos, tamanho e distribuição de tamanhos das partículas em estado coloidal e em suspensão.

Na fase de coagulação, etapa onde ocorre a adição de agentes coagulantes, que propiciam a desestabilização das impurezas para que estas possam formar agregados (flocos), que serão removidos em etapas posteriores (JULIO et al., 2015).

Fundamental é o tamanho do floco para a eficiência da etapa de decantação, uma vez que está se dá pela ação da gravidade. Conseqüentemente, um floco de massa específica e tamanhos adequados facilita sua remoção nos decantadores, tornando a decantação a principal etapa de clarificação da água. Desta forma, a floculação torna-se fundamental no intuito de otimizar sua operação, pois é a etapa responsável pela formação dos flocos (JULIO et al., 2015). Constata-se, desse modo, a importância para a qualidade da água produzida por uma ETA o

conhecimento a respeito da formação dos flocos, sua distribuição e sua concentração, possibilitando um funcionamento otimizado de todo o sistema de tratamento da água.

Na procura de um controle eficiente e confiável da qualidade da água que se produz numa ETA, podem – se automatizar inúmeros subprocessos, como medidores de vazão, dosadores de produtos químicos, lavagem dos filtros, entre outros. Nos processos de automação de dosagens de coagulante, são utilizados zetômetros, os quais possuem o objetivo de indicar a mobilidade eletroforética (migração de espécies carregadas eletricamente), ou seja, determinar o potencial zeta da solução (JULIO et al., 2005).

O potencial zeta é frequentemente medido na ETAs para indicar a estabilidade do sistema coloidal. O ponto em que ele apresenta valor igual a zero é conhecido como ponto isoelétrico (piz). O piz é factível com a desestabilização das cargas superficiais dos coloides presentes na água, sendo possíveis a aderência e adsorção (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Como fica evidente a importância da floculação em estação de tratamento de ciclo completo, diversos autores desenvolveram diferentes metodologias de monitoramento da floculação.

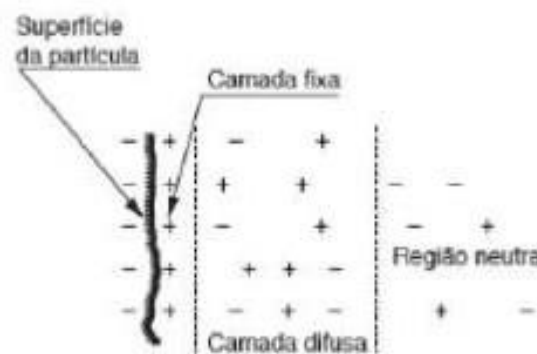
4.2.3 Coagulação

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) o processo de coagulação pode ser considerado como a atuação individual ou conjunta de quatro mecanismos diferentes: compressão da dupla camada elétrica; adsorção e neutralização de cargas; varredura (recomendada para ETA's de ciclo completo) e adsorção e formação de pontes. No mecanismo de varredura, maiores dosagens de coagulante são adicionadas à água em relação ao mecanismo de adsorção e neutralização de cargas, o que leva à formação de precipitados do tipo $Al(OH)_3$ ou $Fe(OH)_3$. Segundo Pavanelli (2001) o mecanismo de varredura vem sendo empregado em estações de tratamento em ciclo completo devido aos flocos formados serem maiores do que aqueles formados pelo mecanismo de adsorção e neutralização de cargas; conseqüentemente suas velocidades de sedimentação são maiores. Estes mecanismos podem ocorrer de acordo com o agente coagulante empregado (SANTOS, 2006).

Assim as partículas tendem a se repelir devido a forças elétricas de repulsão entre suas duplas camadas, evitando a agregação desejada no processo de coagulação. Esta é a estabilidade coloidal: a propriedade de se manter disperso em solução. Para desestabilizar um colóide, é necessário interferir nas forças de atração e repulsão que agem sobre ele. Os colóides possuem carga superficial negativa, portanto em solução, íons de carga oposta atraem-se

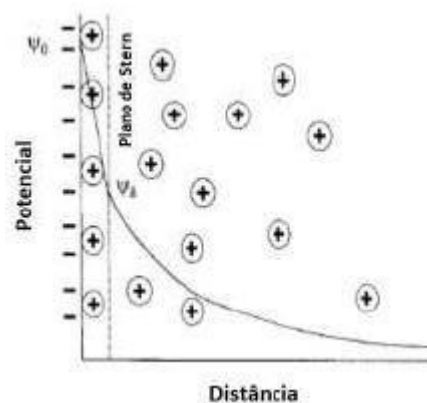
eletricamente aos colóides, gerando a camada fixa ou camada de Stern, bem aderida à superfície. Os íons de mesma carga são repelidos formando a camada difusa, uma camada com íons positivos e negativos mantida próxima a superfície devido às forças eletrostáticas. Essas duas camadas formam a dupla camada difusa, que tem predominância de cargas positivas, a fim de deixar o colóide menos negativo (CRUZ, 2017). Nas Figuras 1 e 2, respectivamente, pode ser observada a superfície coloidal e a variação de potencial ao seu redor.

Figura 1 – Carga ao redor de uma partícula coloidal



Fonte: Richter (2009).

Figura 2 – Potencial nas proximidades de uma superfície coloidal.



Fonte: Fitzpatrick e Gregory (2003).

4.2.3.1 Coagulantes químicos utilizados em tratamento de água

Os sais inorgânicos, tais como sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), cloreto férrico (FeCl_3), sulfato ferroso (FeSO_4) e policloreto de alumínio ($\text{Aln}(\text{OH})_m\text{Cl}_{3n-m}$), (LIMA, ABREU, 2018), são os coagulantes utilizados no tratamento da água. O sulfato de alumínio se destaca como o coagulante químico mais utilizado devido a sua relativa eficiência, seu baixo custo, fácil

armazenamento e transporte (ALUVINO, 2015).

Possíveis impactos ambientais são constantemente discutidos como consequências da utilização de coagulantes inorgânicos a base de alumínio e ferro. Os resíduos gerados nos processos de coagulação e floculação são ricos em hidróxidos metálicos não biodegradáveis. O lodo obtido ao final apresenta potencial ecotoxicológico e necessita de tratamento e disposição ambiental correto, pois concentra diversos componentes orgânicos e inorgânicos, configurando-se como uma fonte de poluição secundária (LIMA, et al., 2020).

Outra preocupação é o residual destes elementos na água tratada, sobretudo o alumínio. Para Driscoll e Letterman (1988), cerca de 11% de todo o alumínio presente naturalmente nas águas ou adicionado na forma de coagulante permanece como residual após o tratamento, sendo transportado pela rede de distribuição. Estudos apontam para os malefícios da exposição humana a este metal, correlacionando-o com doenças neuro degenerativas como Parkinson e Doença de Alzheimer (BANKS, et al., 2006).

Os possíveis impactos da exposição humana ao alumínio, bem como sua correlação com o residual presente na água potável e em alimentos são comumente discutidos na literatura. Encefalopatias, demência e distúrbios neurológicos são as principais manifestações fisiológicas observadas que indicam a neurotoxicidade crônica deste metal sobre o sistema nervoso. Gauthier e colaboradores (2000), concluíram haver possível relação entre o surgimento da Doença de Alzheimer e a exposição ao alumínio dissolvido na água. Rondeau e colaboradores (2008), realizaram um estudo investigativo durante 15 anos com pessoas expostas a dosagens de 0,1 mg/L de alumínio na água de abastecimento e concluíram haver relação direta com o surgimento de casos de declínio cognitivo e demência (RONDEAU et al., 2008).

Outro coagulante químico de destaque é o policloreto de alumínio, conhecido como PAC, contendo em sua estrutura cerca de 10 - 25% de Al_2O_3 , como ingrediente ativo (ALUVINO, 2015). Este coagulante polimérico sintético apresenta vantagens sobre os coagulantes inorgânicos, como a capacidade de produzir flocos em qualquer faixa de pH, mais eficientes na remoção de sólidos e menor formação de lodo (FONSECA, 2011). No entanto, seu uso deve ser controlado devido a produção de produtos clorados e outros subprodutos prejudiciais na água tratada que causam danos à saúde humana (NDABIGENGERESE; NARASIAH, 1995).

Em alguns casos, para que a coagulação aconteça é necessária a presença de um agente alcalinizante no meio reacional. Os mais utilizados são óxido de cálcio, hidróxido de cálcio ou carbonato de sódio. Podem ainda ser utilizados auxiliares de floculação, como a sílica ativada, polieletrólitos, argila e betonita, cuja finalidade é tornar o floco mais denso, facilitando a decantação (MAGACHO, 2009).

4.2.3.2 Coagulantes naturais utilizados em tratamento de água

A escolha do coagulante está relacionada com as características do lodo gerado no tratamento, que está diretamente relacionado a qualidade da água bruta e do pré-tratamento químico adotado (ALUVINO, 2015). As características físico-químicas do lodo variam conforme a composição química do coagulante, sendo que problemas relacionados a disposição deste material podem ser minimizados ajustando a etapa de coagulação, ou mesmo alterando o coagulante utilizado (SANTOS, 2007).

Portanto, o uso de coagulantes de origem natural tem aumentado significativamente, pois são biodegradáveis, não são tóxicos e poluem menos, produzindo efluentes com menores quantidades de elementos metálicos quando comparados aos coagulantes químicos (KATAYON, 2005).

Entre os principais coagulantes naturais o Tanfloc, o tanino e a quitosana são os que apresentam maior relevância. Com relação ao tanino, é um nome geral atribuído a grandes compostos de polifenol obtidos de materiais naturais, como o extrato orgânico de casca de árvore e madeira (LIMA, et al., 2020). Tanfloc é o nome de um novo coagulante à base de tanino com origem natural. Apresenta uma alta atividade coagulante, pois uma dose relativamente baixa (200 mg/L) pode remover quase toda a concentração inicial de algum contaminante (BELTRAN et al., 2011). A Quitosana, por sua vez, é não tóxica, biodegradável, não corrosiva e segura de manusear. Os efluentes gerados por ela podem ser descartados com um impacto ambiental menor do que aqueles que usam o metal comum e o polímero sintético (QASIM; MOTLEY, 2000).

Quanto aos coagulantes naturais extraídos de vegetais podem ser citados a Acácia-branca (*Moringa oleífera*), semente da árvore Nirmali (*Strychnos potatorum* Linn), Quiabo (*Atalmoschus esculentu*) e o Cactus (*Opuntia ficus-indica*, *Opuntia dillenii* e *Opuntia stricta*).

Dentro da abordagem dos coagulantes naturais obtidos de fontes vegetais, há pesquisas que se voltam para a investigação do uso de espécies de cactos, com múltiplos estudos buscando estabelecer a eficácia da planta como coagulante. Sendo as seguintes espécies as mais conhecidas e estudadas como coagulantes naturais: *Opuntia ficus-indica*, *Opuntia dillenii* e *Opuntia stricta* (KARANJA; FENGTING, 2017).

O cactus é uma planta nativa de vários países, especialmente os extremamente quentes e áridos, visto que se primeiramente, uma visão geral de seus níveis de eficácia e condições ótimas de utilização, especialmente com relação ao pH (KARANJA; FENGTING, 2017).

Alguns pesquisadores avaliaram o desempenho do cactus *Opuntia ficus-indica* como agente floculante (FEDALA, 2015). Resultando em eficiências de remoção de turbidez de 95% para *Cactus latifaria* e aproximadamente 85% para *Prosopis juliflora*. Diversas outras espécies de cactáceas foram estudadas quanto à sua ação coagulante, mostrando-se efetivas na remoção de turbidez de efluentes industriais e urbanos. *Opuntia ficus indica* (L.) Mill foi avaliada quanto à capacidade de redução de turbidez de amostras de água do mar, de rio e residuais, obtendo-se rendimentos de 94%, com dosagens de 50 mg.L⁻¹ do material (LIMA JUNIOR; ABREU, 2018).

4.2.3.3 Avaliação de coagulantes

A complexidade do processo de clarificação pode elevar fortemente as chances de realizar a sua operação de forma não econômica e ineficiente. Para conciliar bom desempenho com custo reduzido, a operação de uma unidade de tratamento deve ocorrer com seus parâmetros próximos do ótimo tanto quanto for possível (SATTEFIELD, 2005).

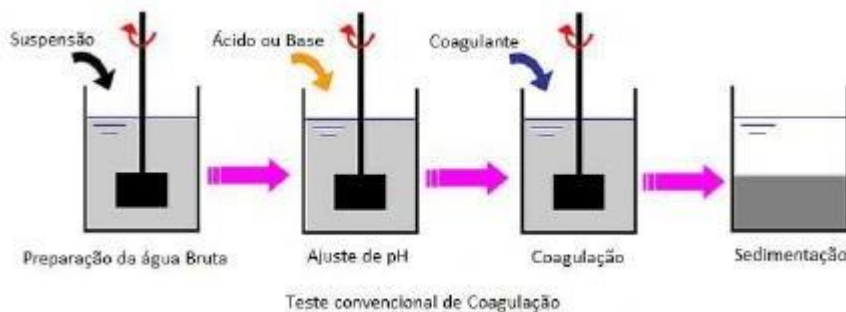
Destaca-se a importância dos coagulantes naturais para o tratamento de água e efluentes líquidos, uma vez que isso atinge fortemente os três pilares do desenvolvimento sustentável: meio ambiente, sociedade e economia. No aspecto ambiental, tal ponto relaciona-se com a questão da despoluição, mitigação de danos e impactos ambientais negativos; no quesito social, trata-se de uma melhor qualidade de vida para a população que não dispõe de saneamento básico de qualidade, sendo que o uso de coagulantes naturais, justamente por ser custeável em termos financeiros – e aqui se adentra no terceiro ponto do tripé, o econômico – possui maior grau de viabilidade econômico-financeira no que se refere ao investimento público em áreas que necessitam de tratamento de água, esgotos e efluentes com maior qualidade (LIMA, et al., 2020).

Os coagulantes são avaliados essencialmente em relação à sua performance e custo. Contudo, a elevação da condutividade residual e da produção de lodo, que estão atrelados ao aumento de remoção de matéria presente na água, tornam a tarefa nada elementar. A seleção de um coagulante é dificultada pelos resultados muito similares que diferentes compostos apresentam (ARAGONÉS-BELTRÁN et al., 2009).

Com a utilização de coagulantes químicos, os métodos tradicionais de clarificação da água que utilizam coagulantes naturais já não são praticados, exceto em países em desenvolvimento que têm acesso limitado a esses produtos químicos. Isso marcou o início de uma mudança de paradigma para a dependência de coagulantes químicos no tratamento da água turva (LIMA, et al., 2020).

Os ensaios de laboratório que permitam avaliar o desempenho de coagulantes e simular em escala de bancada as condições encontradas em escala industrial são imprescindíveis para determinar pontos ótimos de operação, dosagens adequadas de reagentes e prever ou aprimorar o efeito de uma clarificação (SATTERFIELD, 2005). Para a seleção de coagulante, o ensaio de laboratório mais indicado é o Jar Test (LIBÂNIO; PEREIRA; VORCARO, 1997), representado esquematicamente na Figura 3. Este ensaio visa simular, em bancada, as condições encontradas em um processo de clarificação, a fim de prever ou aprimorá-las.

Figura 3 – Procedimento simplificado para realização de teste de coagulação em laboratório.



Fonte: adaptado de Wang et al. (2016).

4.2.4 Floculação

Por sua vez a floculação, ocorre em tanques denominados floculadores, onde as partículas previamente desestabilizadas (na etapa da coagulação) recebem agitação lenta controlada por um tempo relativamente longo para que se aumente a probabilidade de ocorrência dos choques entre elas. O desempenho da etapa da floculação depende diretamente da eficiência do processo de coagulação acrescida de alguns parâmetros inerentes a esta fase: gradiente de velocidade médio e tempo de floculação e o tipo de geometria do equipamento utilizado. A fenomenologia da floculação baseia-se em dois mecanismos complementares: adesão e transporte (BARTIKO; JULIO, 2014). O primeiro está relacionado às cargas superficiais das partículas, que devem ser alteradas durante a coagulação para que os choques sejam efetivos. O segundo mecanismo refere-se à agitação introduzida ao meio e pode ser dividido em outros três: movimento Browniano (floculação pericínética), movimento do fluido (floculação ortocinética) e sedimentação diferencial (SANTOS et al., 2004).

Fundamental é a floculação no intuito de otimizar sua operação, porque é a etapa responsável pela formação dos flocos (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Portanto é de suma

importância para uma boa qualidade de água produzida por uma Estação de tratamento de água, o conhecimento a respeito dos flocos, sua distribuição e concentração, desta forma viabilizando um funcionamento otimizado de todo sistema.

Para se obter os parâmetros para projeto e operação de ETAs que empregam as etapas de coagulação, floculação, sedimentação e filtração são ensaios de tratabilidade de

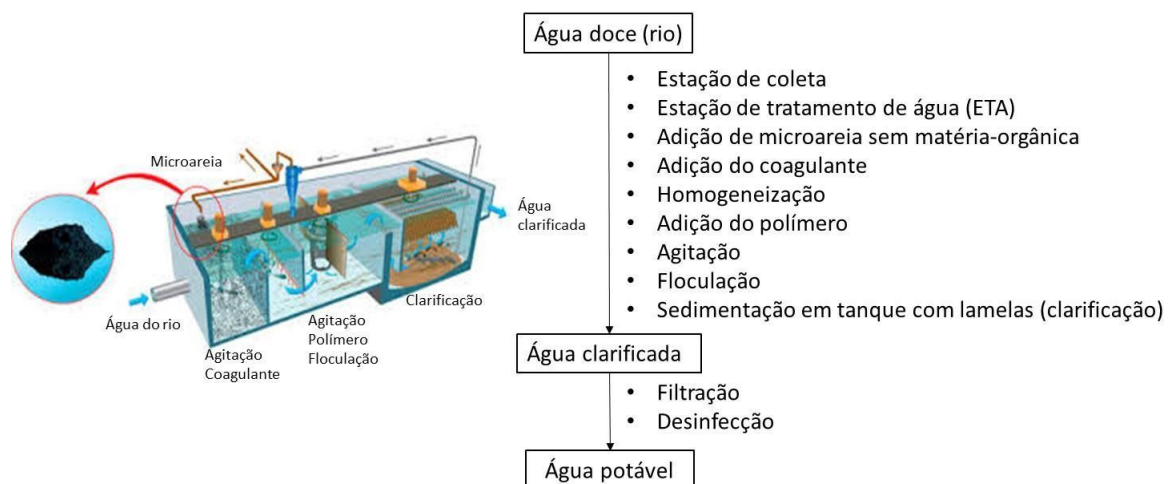
água em equipamento Jar Test. A otimização das etapas descritas anteriormente, com auxílio de ensaios em equipamento Jar Test, além de resultar em maior eficiência global da ETA, pode levar a minimização da dosagem de coagulante aplicada à água bruta.

4.3 SISTEMA ACTIFLO®

Este sistema Actiflo® (Figura 4) é um sistema ainda pouco utilizado no Brasil. Tem como característica ser compacto necessitando de uma menor área de instalação em comparação ao modelo convencional. O uso do clarificador com lamelas inclinada a 45 graus, combinado com adição de micro areias, permite uma redução significativa no tamanho da instalação.

A floculação eletromecânica combinada com a adição de micro areia, com um gradiente adequado de velocidade dos misturadores, promove a formação rápida de flocos e, conseqüentemente, de lodo.

Figura 4 – Esquema do tratamento de água doce para produção de água potável com o sistema Actiflo®.



Fonte: Technomaps (2022).

O Actiflo® consiste em dois ou três compartimentos de coagulação/floculação seguidos de um decantador lamelar. Os equipamentos nos compartimentos de floculação incluem agitadores com um padrão axial da mistura. O tanque de decantação inclui um raspador de lodo, módulos lamelares e canaletas para coleta de água. Bombas centrífugas revestidas de borracha são usadas para bombear o lodo com micro areia para hidrociclones, que lavam e recuperam a micro areia (HILSDORF, 2013).

Segundo Sergio Hildorf, gerente de aplicação e processos da Veolia Water Brasil, empresa que produz o sistema Actiflo®, este sistema tem sido usado por décadas fora do Brasil, e tem se mostrado confiável e altamente eficiente, inclusive para aplicações que são consideradas de difícil tratamento como: águas de rios sujeitas a inundações e subseqüentes mudanças bruscas de turbidez e sólidos em suspensão, causando problemas com os processos de sedimentação e processos convencionais de manto de lodo, águas com temperaturas baixas, que causam dificuldade de floculação, águas brutas com cor elevada e baixa turbidez, produzindo flocos leves de difícil decantação e água brutas sujeitas a proliferação de algas

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

A água que foi utilizada nos experimentos foi coletada no Rio Verde em Ponta Grossa (PR) e a captação de 800 L de água foi realizada próximo ao Balneário Rio Verde, no bairro Uvaranas. O transporte ocorreu com caminhão pipa e o acondicionamento foi em recipientes de polietileno previamente lavados de 50 L. O Equipamento Jar Test – Floc Control III, 10 a 600 rpm foi fabricado pela Poli Control Instrumentos de Controle Ambiental Ind. E Com. Ltda, Diadema, São Paulo, Brasil. (Figura 5). O equipamento foi utilizado para definir a dosagem ótima dos produtos químicos que foram empregados no tratamento da água convencional e com injeção de micro areia (areia quartzosa industrial, GR Extração de Areia e Transportes Rodoviários Ltda, Ponta Grossa, Paraná, Brasil) seguindo o sistema Actiflo® utilizado hoje na Estação de Tratamento de água da Sanepar.

O coagulante químico e/ou natural utilizado foi o policloreto de alumínio densidade de 1,26 e concentração de 36,62%, fornecidos para a Sanepar pela empresa Ambientaly Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda, e o polímero também pela mesma empresa. A areia, também fornecida pela Sanepar, foi minerada em cavas, logo depois lavada com água mantendo o pH de 7,0. A secagem foi feita em aquecedor com gás liquefeito de petróleo, com uma temperatura de 190°C. Em seguida foi resfriada para uma temperatura de 38 °C, segregada em peneira 20 com abertura de 0,84 mm da serie ASTM e ensacada (20 kg).

Os demais equipamentos, utensílios, vidrarias e reagentes químicos utilizados no desenvolvimento do projeto fazem parte dos Laboratórios de Pesquisa em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

5.2 MÉTODOS

5.2.1 A modelagem em Jar Test

No equipamento Jar test, o ensaio de floculação ou Jar Test, ou também chamado de teste de jarros, é o método empregado nas estações de tratamento para se determinar a dosagem ótima dos agentes químicos que proporcionarão a eficiência desejada com um menor custo econômico. Foram identificadas diversas dosagens através de simulações de operação caracterizadas pelo tempo e pela agitação necessárias, a fim de otimizar a ação da micro areia

na floculação. Foram feitos testes comparativos com o sistema convencional. Todos os parâmetros que foram avaliados foram definidos com testes prévios.

Além disso, foi verificado se a água obtida após a sedimentação apresentou redução de turbidez capaz de atender a Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde (Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007). Neste tipo de teste interessam o tempo de floculação e o gradiente de velocidade (AZEVEDONETO, 1987). O Jar Test utilizado possibilitou variar a velocidade de rotação dos agitadores de 32 rpm a 300 rpm bem como o tempo de 10 segundos a 20 minutos em função da programação desejada.

Programação de ensaios.

No tratamento convencional;

- Ensaio Jar Test com variação de concentração de PAC em 6 unidades de teste com registro e processamento de imagens em cada unidade;
- Definição da unidade de melhor eficácia, eleita visualmente e por resultados sistematizados computacionalmente;

Tratamento Actiflo®:

- Ensaio Jar Test com variação de concentração de PAC em 6 unidades de teste com registro e processamento de imagens em cada unidade;
- Definição da unidade de melhor eficácia, eleita visualmente e por resultados sistematizados computacionalmente;

Com a Figura 5 mostra-se o equipamento Jar Test em operação em um dos ensaios prévios, com agitação simultânea nas jarras, para definições preliminares.

Figura 5 – Processo de determinação das dosagens ótimas dos reagentes, equipamento Jar Test.

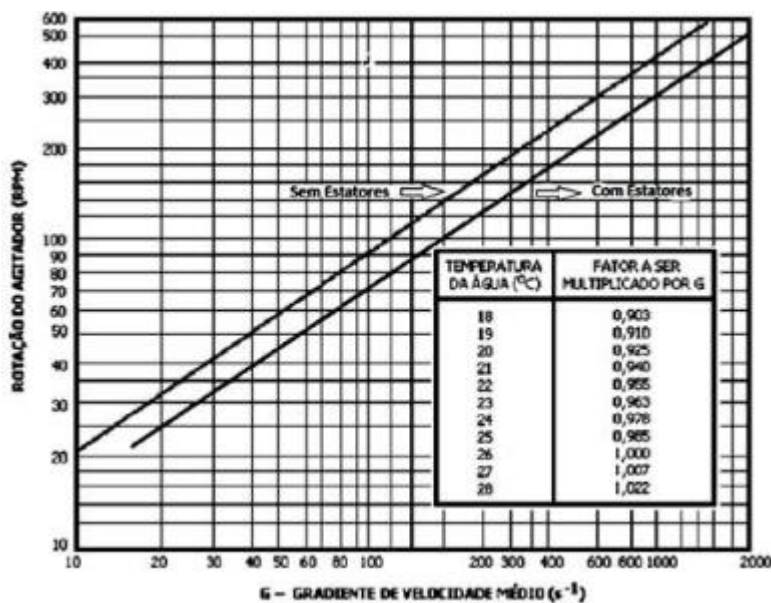


Fonte: A autora.

5.2.2. A aplicação em laboratório

Com base nas informações coletadas da unidade de tratamento de água e da previsibilidade inerente ao Jar Test, foi possível aplicar o sistema em escala de laboratório, que possibilitou reproduzir configurações do Jar Test para a correlação com a escala real relacionada a otimização do sistema de tratamento de água na Estação de Tratamento de Águada Sanepar, Ponta Grossa, (PR). Com a figura 6, mostra –se a relação entre o gradiente de velocidade e rotação para Jar test.

Figura 6 – Relação entre o gradiente de velocidade e rotação do equipamento Jar Test.



5.2.3 Caracterização da água

A água foi caracterizada com base nos parâmetros, turbidez, cor, Ph, sólidos dissolvidos totais e sólidos suspensos totais. Os frascos de captação das amostras foram de polietileno e a preservação da amostras foi realizada em temperatura ambiente. A análise do parâmetro sólidos suspensos totais foi realizada segundo os métodos da *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (GREENBERG, 2017). Para os demais parâmetros foram utilizados os equipamentos Hach HQ 440D, Hach Company, Loveland, USA e Hach 2100Q01 Test Kit, Hach Company World Headquarters, modelo CO 80539USA, Loveland, USA.

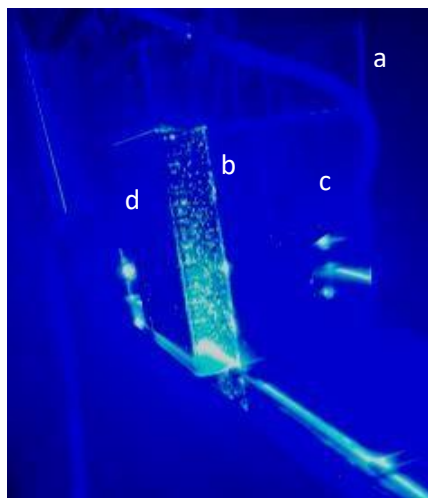
5.2.4 Processamento digital de imagens.

A instalação do sistema experimental envolveu a produção de iluminação adequada e de câmera de aquisição de imagens com potencialidades específicas.

As imagens obtidas estão em uma área escolhida na operação, identificada pela vistoria das imagens como sendo não severamente afetada por distúrbios e interposições no escoamento produção de imagens. Esta área está no plano de aquisição de imagens que é formado pela emissão de um feixe laser em linha. O uso do feixe laser é essencial na produção de imagens, pois garante o reflexo das partículas sobre a lente câmara exclusivamente de um plano, já que as partículas fora do plano, em uma profundidade posterior ou anterior ao plano de iluminação, sob uma condição de menor incidência luminosa, serão computacionalmente eliminadas. Essa aquisição de imagens se dá em um ambiente protegido, com cobertura por lona preta. Além dessa questão de aquisição em uma área específica, ressalta-se que é nesta área que se procede a calibração do sistema com uma interposição inicial de um alvo com geometria definida, que permite a conversão das unidades “pixels” da imagem para a unidade “milímetro” utilizada nos resultados numéricos.

A Figura 7 mostra o efeito de formação do plano de aquisição por meio do feixe laser com espalhamento luminoso em linha, que se expande com 90° de abertura e atinge as partículas em movimento, proporcionando uma reflexão adequada para separação dos elementos pertencentes e não pertencentes ao plano.

Figura 7 – Emissão de feixe laser para produção de plano específico de aquisição de imagens. a) Jarra de teste; b) Plano iluminado c) Fundo escuro, não refletivo; d) Frente escura, não refletiva.



Fonte: A autora.

A câmera de aquisição é especialmente configurada para aquisição em obturação rápida

e de alto contraste entre 1º plano e 2º plano, ou seja, o claro corresponde aos flocos e, o escuro, corresponde ao fundo.

A aquisição de imagens consistiu em tomada de vídeo na taxa de 60 fps (frames por segundo), para os processos individualizados em cada jarra de teste e os eleitos como mais eficientes entre os modos de operação ensaiados. As imagens obtidas, escolhendo frames de interesse de inspeção, foram processadas em software específico desenvolvido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Os requisitos deste software foram binarizar a imagem e proporcionar a identificação dos flocos na dispersão por meio de limiar de intensidade cinza após a imagem ter sido convertida para 8 bits em *grayscale*, separando flocos – 1º plano – do fundo – 2º plano; (2) corrigir possíveis interferências, ruídos, reflexos e sobreposições de imagens de forma a garantir que os flocos estejam digitalmente isolados; (3) converter unidades pixels para milímetros por meio de um alvo de calibração; (4) calcular a área e diâmetro equivalente de cada floco e classificar em faixas e frequências de ocorrências médias; (5) proporcionar dados de densidade no espaço de estudo e (6) proporcionar dados de comparação entre os frames específicos estudados sobre aspectos geométricos associados ao tempo de operação da floculação, especialmente no espaço de tempo de alcance da estabilidade e sua relativa manutenção.

Os resultados decorrentes dos elementos digitais adquiridos e processados foram suficientes para o embasamento dos parâmetros na determinação da eficiência dos processos quando comparados. Eventualmente novas funcionalidades ou suas adaptações poderão ser implantadas ou adequadas de acordo com os processos ensaiados.

5.3 EXPERIMENTOS

Visando a caracterização prévia das operações e dosagens em processos de tratamento de água para abastecimento, foram realizados testes em um equipamento Jar Test com diferentes parâmetros para a água bruta a ser tratada. Entre esses testes foi definido aquele mais bem sucedido entre as variações aplicadas em cada jarra de teste, proporcionando as condições a serem efetivadas na estação em escala real. Neste trabalho foram obtidos dados sobre os testes a partir da aquisição e processamento digital de imagens capturadas durante o intervalo de tempo de teste, proporcionando dados analíticos e gráficos para definição e comparação de resultados no intuito de eleger a configuração ideal de tratamento. Uma das premissas deste estudo também foi a comparação entre os resultados obtidos para a avaliação entre o tratamento convencional em ETA de ciclo completo e a ETA Actiflo®, a qual utiliza, além dos produtos

coagulantes e floculantes, a inserção de micro areia e polímero na água bruta para seu processo de tratamento, bem como, agitação diferenciada.

A região de estudo neste sistema, sobre a qual incidem os processos computacionais para obtenção de dados, é uma área delimitada da imagem original. Essa área de estudo foi escolhida e dimensionada de acordo com características da região, na qual pode-se perceber visualmente a ausência de perturbações externas, como reflexos, brilhos dos contornos sólidos, presenças de bolhas de ar e outros elementos estranhos que poderiam, eventualmente, comprometer a qualidade dos dados a serem obtidos.

Considera-se a incidência de flocos na área delimitada com características compatíveis com qualquer outra área que pudesse ser escolhida, sendo uma amostra classificada como ergódica, ou seja, suas propriedades dinâmicas ao longo do tempo, em termos médios, não devem diferir significativamente das propriedades dinâmicas do volume como um todo, desde que estejam sujeitas à mesma energia.

A seguir são detalhados, as características, os processos e os elementos utilizados neste estudo para operação de ensaios, caracterização da água bruta e obtenção de dados que se embasam em aquisição e processamento digital de imagens e seu software, sistematização de dados, apresentação de resultados, meios de análise e a fundamentação matemática e computacional que sustentam os parâmetros apresentados e sua contextualização no alcance dos objetivos deste estudo.

5.3.1 Características da água bruta

O teor de sólidos totais foi determinado através de método gravimétrico. Uma membrana de microfibras de vidro (0,45 μ m) foi inserida no sistema de filtração à vácuo (Bomba à vácuo, marca/modelo, fabricante, cidade, país) e foi lavada utilizando três porções de 20 mL de água destilada, as quais foram desprezadas. Em seguida a membrana foi transferida para um forno mufla (marca/modelo, fabricante, cidade, país) para ser calcinada a 550°C \pm 20°C por 15 minutos. Após resfriamento (150°C), a membrana foi transferida para um dessecador e quando atingiu a temperatura ambiente (\pm 20°C) foi pesada em balança de precisão (marca/modelo, fabricante, cidade, país) (M4, em miligrama). Através de uma pinça metálica, a membrana calcinada foi inserida novamente no sistema de filtração com vácuo. 20mL da amostra (V2) foi agitada e adicionada no sistema de filtração. Após a filtração a membrana contendo os sólidos foi transferida para uma estufa (marca/modelo, fabricante, cidade, país) a 105°C \pm 2°C até atingir massa constante (24 horas) e, após resfriamento em dessecador, a massa da membrana

foi determinada (M5, em miligrama) e então calculado pela equação (1)

$$mg \text{ de SST/L} = \frac{(M5 - M4) \times 1000}{V2 \text{ (mL)}} \quad (1)$$

Onde:

M4 = peso da membrana calcinada;

M5 = peso da membrana + resíduo sólido.

O pH, a concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT), a condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$) e a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) foram determinadas em um Ultrameter (HQ 440d, Hach) a (Figura 8A). A turbidez foi determinada em turbidímetro (2100 Q, Hach) e expresso em unidades nefelométricas (NTU) (Figura 8B). A análise de cor foi feita em um colorímetro DIGIMED DM e expressa em UC.

Figura 8 – Alguns equipamentos utilizados na caracterização da água bruta.



(A) Analisador multiparâmetros



(B) Turbidímetro

5.3.2 Ensaios com Jar Test

Os ensaios foram realizados com o FlocControl III aparelho digital com possibilidade de agitação de 10 a 600 rpm em 6 provas com sistema de filtração. O equipamento consiste em uma base sobre a qual são colocados os 6 jarros com hastes para a agitação programada.

No sistema de tratamento convencional utilizado no tratamento de água da SANEPAR na cidade de Ponta Grossa utiliza-se a programação de velocidade 1: 100 rpm durante 30 segundos; velocidade 2: 300 rpm por 10 segundos e velocidade 3: 32 rpm com tempo de 20 minutos. O experimento consiste em definir a melhor dosagem do coagulante cloreto de polialumínio (PAC), verificada por meio das imagens da floculação. Nos seis primeiros ensaios

cada jarro recebeu uma dosagem diferente de coagulante. Por fim considerando o aspecto dos flocos formados e depois análise das fotos feitas pelo programa, define-se a melhor dosagem a ser aplicada.

Para o ensaio de floculação foi necessário usar os dados da ETA para uso na equação (1) e (3), como: tempo de detenção (min); velocidade de sedimentação ou taxa de aplicação superficial dos decantadores V_s (cm/min), gradiente de velocidade aplicado nos floculadores G (s^{-1}) e sequência de adição dos produtos químicos na ETA.

Tempo de Detenção (T em minutos)

$$T = \frac{V \cdot n}{60 \cdot Q} \quad (2)$$

T = Tempo de detenção em minutos
 V = Volume da unidade de floculação (m^3)
 n = Número das unidades de floculação
 Q = Vazão Total da ETA em m^3/s

Velocidade de sedimentação (V_s) ou Taxa de Aplicação Superficial:

$$V_s = \frac{6000 \cdot Q}{A \cdot n} \quad (3)$$

V_s = Velocidade de sedimentação em cm/min
 Q = Vazão total da ETA m^3/seg
 A = Área total das unidades de decantação em m^2
 n = número de decantadores

Os tubos de dosagem com as variações estabelecidas de 2,3; 2,5; 2,7; 2,9; 3,1 e 3,3 mL transfere-se para os jarros de dois litros de maneira simultânea.

Logo após a adição inicia-se a agitação rápida. A floculação ocorre imediatamente após a agitação rápida. Ao final da agitação rápida de (1 minuto), reduz-se a velocidade para o gradiente de velocidade fornecido em projeto. O tempo da agitação lenta é obtido pela equação de tempo de detenção que nesse trabalho foram utilizados 32 minutos conforme os dados da ETA Sanepar. Na Figura 9 pode ser observado o início do ensaio convencional com água bruta, onde percebe-se a formação dos flocos.

Figura 9 – Jar test em tratamento convencional, com água bruta e PAC, iniciando formação de flocos.



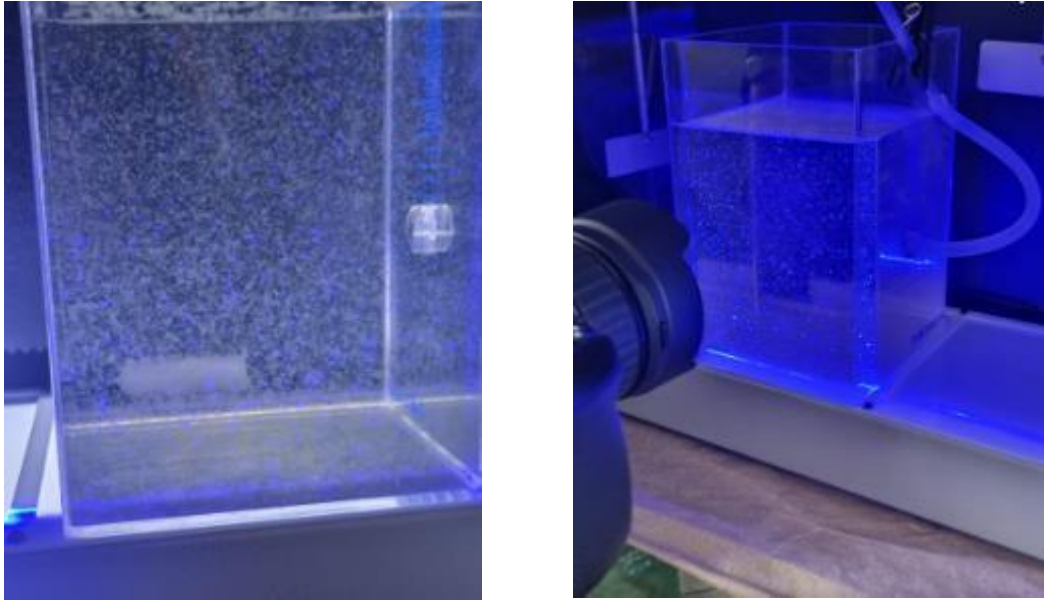
5.3.2.1 Operação para testes visando tratamento convencional

Para o tratamento convencional foram utilizados os dados de velocidade e tempo da Estação de tratamento da Sanepar Ponta Grossa. O jar test foi programado para a velocidade 1 a 100 rpm e tempo de 30 segundos, onde ocorre a agitação da água, velocidade 2 de 300 rpm e tempo de 10 segundos onde ocorre a incorporação de PAC nos jarros, e velocidade 3 de 32 minutos onde ocorre a floculação. Na Figura 9 nota-se o laser incidindo nos flocos formados.

Os resultados apresentam dados para uma análise comparativa e relativa, são sistematizados e apresentados individualmente e simultaneamente para essa análise no intuito de comparar respostas e identificar as diferenças entre cada modalidade e características testadas. Assim pode-se compreender, de forma analítica, a escolha de uma configuração por sua eficiência, pode-se compreender as diferenças entre uma modalidade e outra, pode-se perceber as causas e os efeitos.

Os ensaios realizados consistiram em 6 ensaios destinados ao tratamento convencional e 6 ensaios destinados ao tratamento Actiflo®. Para um mesmo tipo de tratamento os ensaios diferem entre si pela dosagem de PAC em cada jarra de ensaio. Para efeito comparativo, a mesma variação de dosagens foi empregada em ambos os tipos de tratamentos.

Figura 10 – Imagens do Jar test em tratamento convencional

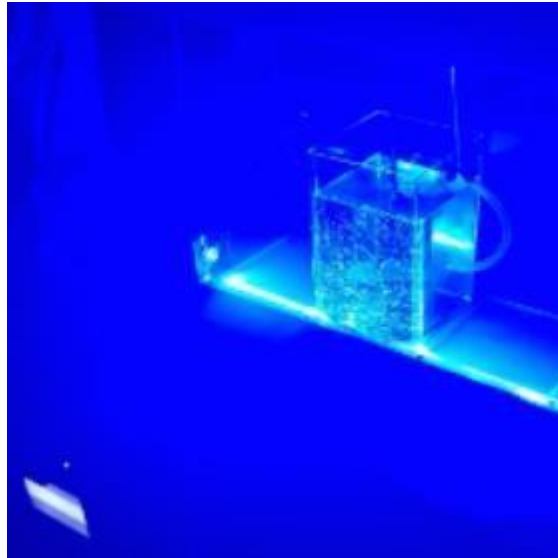


5.3.2.2 Operação para testes visando tratamento Actiflo®

Para o tratamento Actiflo® foram utilizados os dados de velocidade e tempo da Estação de tratamento da Sanepar Ponta Grossa. O Jar Test foi programado para a velocidade 1 a 250 rpm e tempo de 2 minutos, onde adiciona-se o PAC na água; velocidade 2 de 250 rpm e tempo de 2 minutos onde ocorre a incorporação da micro areia após 1 minuto de velocidade; e na velocidade 3 de 170 rpm em 6 minutos, onde após um minuto foi colocado o polímero. Para saber a quantia adequada de polímero foi utilizado a leitura do mostrador de polímero da Sanepar, onde se usa 90 mL para 550 litros. No experimento foi utilizado 0,32 mL. Após a leitura das amostras no hidrociclone, também realizadas na Sanepar, foi adotado 3,0 g/L de micro areia para cada jarro, totalizando de 6,0 gramas.

A Figura 11 contém a imagem de um ensaio individual aplicado na testagem para o tratamento Actiflo®.

Figura 11 – Jar test em tratamento Actiflo® com adição de PAC, micro areia e polímero



Fonte: A autora.

5.3.3 Aquisição e processamento digital de imagens

Sistemas de Visão Computacional utilizam imagens digitais de um fenômeno. Eles processam essas imagens com metodologias próprias e proporcionam resultados decorrentes de cenas registradas e que são tratadas especificamente para o objetivo pretendido, ocasionando a possibilidade da descrição visual, física e matemática do fenômeno registrado. Este trabalho não utiliza técnicas de Visão Computacional que operam em tempo real e proporcionam resultados nesta escala, não sendo, entretanto, impossível uma implementação em tempo real com os devidos equipamentos destinados à essa modalidade. O emprego de técnicas computacionais neste trabalho se limita a uma aquisição de imagens e seu pós- processamento. Neste contexto são apresentados, a seguir, os elementos que embasam a metodologia de Visão Computacional de pós-processamento adotada neste estudo e aplicada para o registro das etapas de teste, seus processos, materiais e formulações, além da descrição de parâmetros que embasam resultados.

5.3.3.1 Sistema de aquisição de imagens

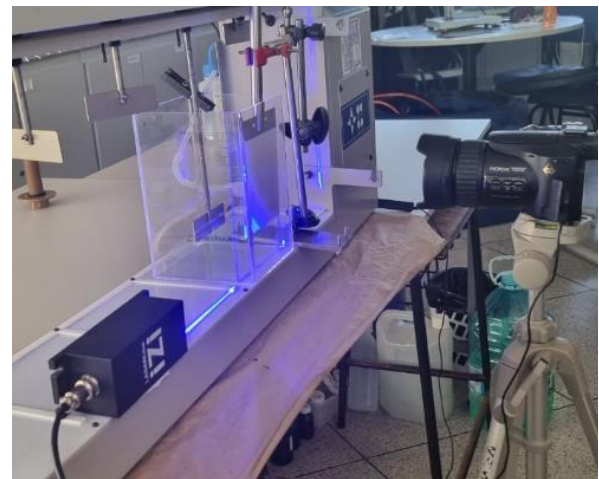
A fim de definir e limitar um plano de aquisição de imagens perpendicular ao eixo focal de aquisição, reduzir a captação de imagens de flocos no sentido de distância precedente e subsequente ao plano de aquisição segundo o eixo focal e reduzir o sombreamento e sobreposição antecedente de flocos sobre o plano de estudo, um feixe laser em lâmina rente à face frontal do jarro de teste é produzido, cujo plano de incidência coincide com o plano do alvo de calibração previamente registrado no ensaio.

A Figura 12 A e B contém fotos do sistema de aquisição de imagens produzidas segundo instalações adaptadas para essa aquisição, conforme requisitos para o processamento das imagens.

Figura 12. Realização de ensaio dinâmico de fotos com laser.



(A) Posição da câmera e do alvo de calibração, foto em jarro único com o laser desligado



(B) Foto de foto com o laser ligado em jarro único.

A aquisição de imagens é realizada por meio de uma câmera de alta definição (Cassio Exilim EX-F1) e velocidade de obturação configurada para obtenção de imagens em movimento rápido e de alto contraste com o segundo plano. A câmera Cassio utilizada nestes experimentos possui capacidade, em vídeo, para obter até 1200 frames em um segundo em baixa resolução. Em modo de instantâneos digitais de alta definição e obturação rápida, configuração adotada no sistema empregado neste trabalho, a aquisição ocorre com a obtenção de 60 frames em um segundo a cada disparo de aquisição. O frame obtido tem a resolução de 2048x1536 pixels e a intensidade de cor foi 24 bits em RGB. Vários disparos foram

efetivados em cada fase de operação em Jar Test de forma a obter registros extensos sobre a evolução do processo de floculação em Jar Test. A câmera foi apoiada em tripé e permanece em posição fixa durante todo o período de aquisição. Em um ensaio padrão, podem ser adquiridos em torno de 1000 registros, os quais foram sistematizados e qualificados, de forma, no final, a se obter cerca de 100 registros a serem processados efetivamente. Após a qualificação os arquivos em formato jpg foram movidos do cartão de memória da câmera para uma pasta específica do respectivo ensaio, em computador, que foi acessada por meio do software de processamento de imagens.

Além das imagens sucessivas obtidas do ensaio, inicialmente foi adquirida a imagem de um alvo de calibração, o qual tem a função, como um item do processamento digital, de estabelecer a escala de conversão de dimensões de pixels digitais para dimensões milimétricas.

5.3.3.2 Processamento digital das imagens

Neste item são apresentados os fundamentos empregados no Software Floc Image V.01.2022 desenvolvido em 2022 no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPG. A aplicação do software no desenvolvimento desta dissertação faz parte de uma das fases de implementação de softwares e recursos computacionais específicos que requerem etapas de exercícios e testes de usabilidade, compatibilidade, recursividade e confiabilidade em respostas requeridas e demais necessidades de manutenções e adaptações a requisitos que eventualmente possam advir do uso e aplicação. Obtenção de versões consolidadas de softwares requerem pleno exercício e revisão de código na abrangência das aplicações para as quais os softwares são desenvolvidos. Este processamento em variada gama de dados de entrada e saída, poderão ser verificados na explanação deste trabalho.

5.3.3.2.1 *Software Floc Image V.01.2022 – Apresentação da interface*

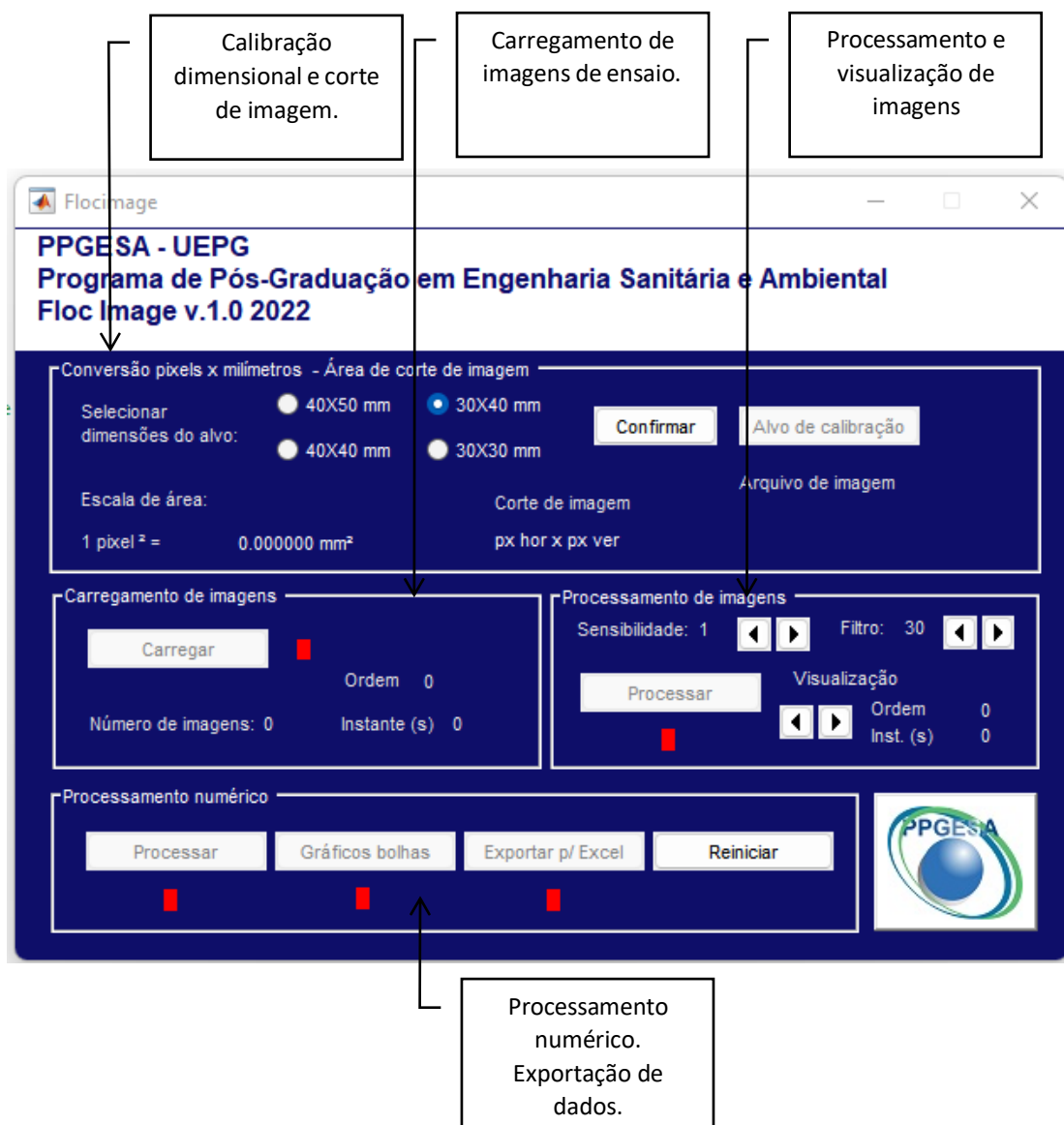
O software tem a premissa, por meio de técnicas de Visão Computacional, obter o registro da formação de flocos formados por adição de Cloreto de Polialumínio – PAC – ou Sulfato de Alumínio – $Al_2(SO_4)_3$ – em ensaio manual realizado em Jar Test. Este registro, depois de pós-processamento de imagens, conduz a resultados gráficos que podem ser comparados para análise dos efeitos das concentrações de coagulantes, demais variáveis do sistema e metodologias de tratamento.

O software Floc Image foi desenvolvido em plataforma MatLab® Mathworks Inc. e

com suporte do Toolbox Image Processing cujas rotinas foram empregadas no processamento de imagens com integração ao Microsoft Excel®.

A Figura 13 é uma reprodução da tela base da interface – *Guide User Interface* – GUI – do software para controle de procedimentos.

Figura 13 – Interface do software Floc Image.



Fonte: Autora / Orientador, 2022.

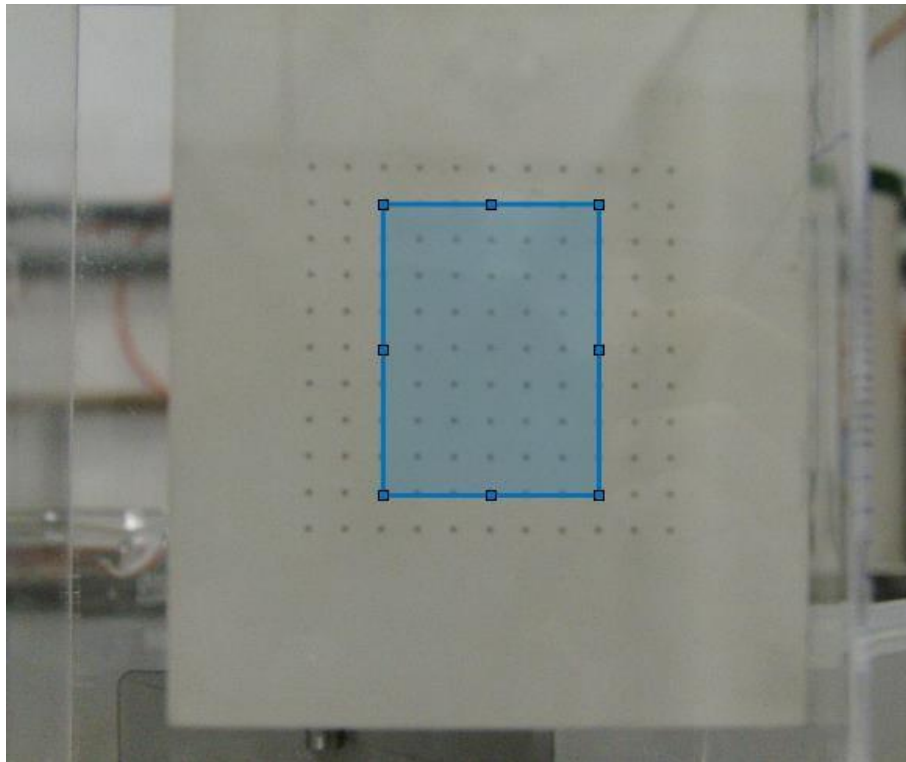
Por meio dessa interface, o usuário acessa as rotinas de processamento que correspondem a calibração do sistema para distâncias, carregamento de imagens para

processamento, visualização de imagens processadas com possibilidade de adequação de graus de sensibilidade, processamento numérico, produção de gráficos tipo bolha e exportação de dados para planilha eletrônica previamente configurada e integrada. As características destas fases do processamento se detalham nos itens a seguir dessa seção de metodologia.

5.3.3.2.2 *Calibração do sistema para distâncias*

As imagens digitais possuem características de resolução, a definição com que podem detalhar a cena registrada, de acordo com a quantidade de elementos formadores das imagens. Estes elementos são chamados de pixels e as medidas tomadas diretamente em uma imagem resultam em distâncias em pixels. Para adequar as distâncias para uma dimensão milimétrica é necessária uma referência preestabelecida. Essa referência é um alvo de calibração com dimensões conhecidas que consiste em uma malha de pontos impressos distanciados horizontal e verticalmente em 5 mm. Para obter a escala de conversão de pixels para milímetros o Floc Image abre um quadro de posicionamento que o usuário desloca sobre o grid da imagem de calibração alinhando suas arestas ao espaço em uma dimensão conhecida em milímetros, conforme pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Alinhamento do quadro de recorte ao alvo de calibração.

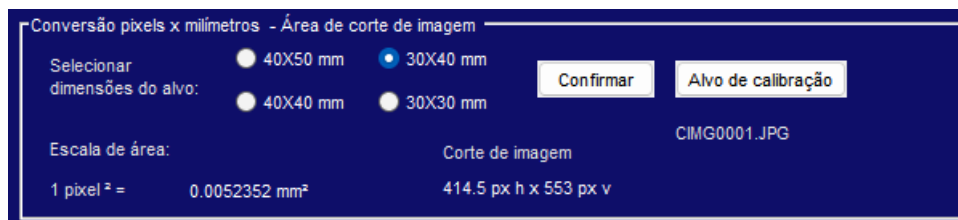


Após a confirmação do posicionamento a escala de conversão é criada e a área abrangida

pelo quadro de recorte é o espaço de processamento em todas as imagens vigentes para o ensaio.

A Figura 15 contém um exemplo de resultado desse processo de calibração e escolha de área de processamento. Neste exemplo uma imagem recortada em uma área escolhida de 30 x 40 mm tem uma escala de conversão em área de pixel^2 para milímetro^2 de 0,0052352 e em distância de pixel para milímetro de 0,0723545. As imagens a serem processadas são recortadas com dimensões de 414,5 x 553 pixels. Em termos de matrizes numéricas formadas para as imagens recortadas, essas tem 553 linhas por 415 colunas, totalizando as informações de 229495 pixels em cada uma das 3 camadas de cor da imagem.

Figura 15 – Reprodução de tela com exemplo de resultado da etapa de calibração



5.3.3.2.3 Carregamento de imagens

As imagens a serem processadas são “qualificadas” manualmente. A partir de uma extensa aquisição de imagens procede-se a uma análise visual de quais imagens são representativas do fenômeno estudado. Essas imagens devem estar distribuídas de forma aproximadamente homogênea entre as fases do processo Jar Test. Como são adquiridas até 60 imagens em um segundo após um disparo efetivado pausadamente entre as fases do processo, as imagens selecionadas são algumas amostras de cada disparo. Em torno de um total de 100 imagens selecionadas são efetivamente processadas em um ensaio padrão, sendo que cada imagem deve apresentar características de nitidez, focagem e representatividade satisfatória da cena registrada.

Após a seleção de imagens, essas são movidas para uma pasta específica do ensaio para acesso em lote pelo Software Floc Image – (MatLab/Excel 2022 v.01). Na operação de carregamento, cada imagem irá compor uma variável indexada tipo “cell array” com o conteúdo numérico referente à essa imagem. Após completar o carregamento o Floc Image apresenta, como exemplo, o que se mostra por meio da Figura 16.

Figura 16 – Reprodução de tela com exemplo de acionamento da etapa de carregamento



No carregamento de imagens também são coletados os dados de instante de criação de cada imagem, referenciando-as a uma variável indexada tipo “array” simples de 1 linha por “n” colunas. Nessa variável, “n” é o número de ordem de entrada da imagem e no valor da variável (n) registra-se o instante de criação da imagem (n) em segundos a partir da primeira imagem onde consta na variável (1) o instante 0 (zero). No exemplo da Figura 16 a última imagem carregada possui o valor 428 para a variável (103).

5.3.3.2.4 *Processamento de imagens*

Após o carregamento das imagens que ocorre em ordem cronológica de produção segue-se a etapa de processamento para adequação das informações digitais para os objetivos propostos do software Floc Image. Nessa etapa os controles na GUI acionam as rotinas de processamento mostrando os efeitos a cada imagem tratada. Após processadas as imagens podem ser acessadas pelo operador para verificar as condições, atentar para eventuais efeitos adversos, repetir a operação, se for caso, estabelecendo outras opções de sensibilidade na produção dos arquivos binários e/ou remoção de áreas espúrias ou até mesmo substituição de frames com resultados discrepantes. Com a Figura 17 mostra-se os controles disponíveis para a área de processamento de imagens.

Figura 17 – Área de controle para o processamento de imagens.



Nesta área o botão “Processar” fica apto após o carregamento e aciona as rotinas para a intervenção digital nas imagens. Após o processamento as imagens criadas podem ser visualizadas percorrendo-as em série com auxílio dos botões direcionais.

O processamento de imagens envolve as seguintes operações digitais sobre as imagens previamente recortadas:

- Conversão para escala de cinza – imagens de 8 bits: Nesta etapa os valores das matrizes da imagem original colorida são recalculados como uma média para a matriz de imagem em escala de cinza;
- Conversão para preto e branco – imagens de 1 bit: Nesta etapa a matriz da imagem em escala de cinza é binarizada a partir de um algoritmo de avaliação de circunvizinhança atrelado a um grau de sensibilidade;
- Remoção de resíduos – imagens de 1 bit: Nesta etapa pontos espúrios são eliminados bem como regiões de baixa conectividade com área inferior a um limiar, sendo valor padrão de 30 pixels, os quais podem ser alterados pelo usuário.

A Figura 18 contém uma foto com formato original exemplo de imagem típica nos ensaios. Sobre a foto está inserido um quadro indicativo da posição de recorte. A Figura 18 contém a reprodução de exemplos das 4 operações sobre as imagens.

Figura 18 – Exemplo de foto original em Ensaio Jar Test.

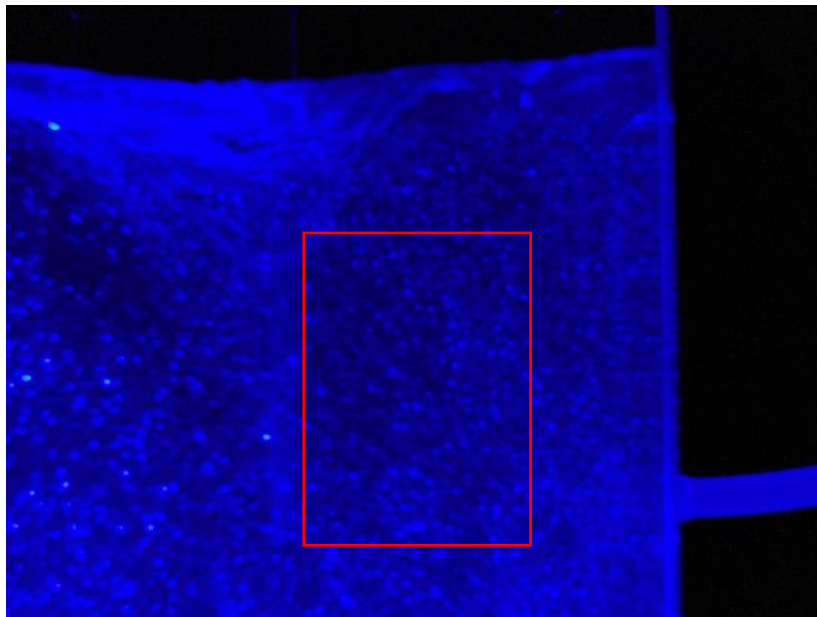
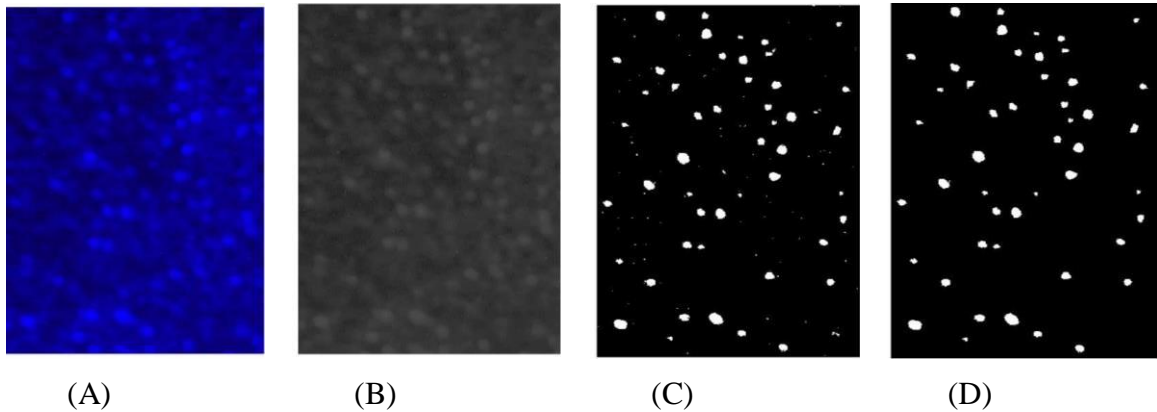


Figura 19 – Imagens processadas. A) Recorte original; B) Recorte em escala de cinza; C) Recorte em P&B; D) Recorte em P&B com remoção de resíduos.



A imagem B é necessária para a conversão da imagem nas etapas seguintes. Uma imagem em escala de cinza, com definição de 8 bits, assume valores entre 0 e 256 para cada posição em sua matriz, que é única, diferente da imagem original colorida que possui 3 matrizes e 24 bits de informação para cada pixel. A aplicação de um algoritmo que estabelece um limiar de binarização, converte a imagem em escala de cinza para uma imagem binária. As imagens C e D são binárias, a informação de cada pixel possui o valor 0 ou 1 e podem ser tratadas como matrizes lógicas, na qual cada pixel é falso (0 – preto) ou verdadeiro (1 – branco). A imagem C é produto da binarização básica, a imagem D sofre remoção de resíduos, com a eliminação de pixels verdadeiros “soltos”, sem conectividade, os quais, a priori, não seriam imagens compatíveis com flocos no plano de medição ou partículas verdadeiras a serem consideradas, e sim produtos de reflexão da luz, partículas fora do plano de medição com imagens residuárias, sombreamentos e ruídos.

Para obtenção de dados numéricos a condição lógica é explorada de forma a quantificar e localizar a porção verdadeira – valor 1 – (flocos) separando-a entre si pela conectividade destes pixels verdadeiros e separando-a, também, da porção falsa – valor 0 – que constitui o fundo da imagem.

Os meios e efeitos dessa abordagem podem ser percebidos por meio das observações constantes no item de Processamento Numérico.

5.3.3.2.5 *Processamento numérico.*

O processamento numérico tem os seguintes objetivos:

- Detectar em cada imagem os pixels verdadeiros conectados e nominá-los por meio de uma atribuição numérica de ordem, estabelecendo a contagem das regiões detectadas;
- Atribuir a cada grupo nominado de pixels conectados – região conectada – o valor da soma de pixels conectados – área da região;
- Calcular o centroide de cada região conectada;

As operações numéricas para essas tarefas e as variáveis que acumulam valores são comandadas na área de processamento numérico do Floc Image, cuja reprodução pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 – Área de controle do processamento numérico no Floc Image.



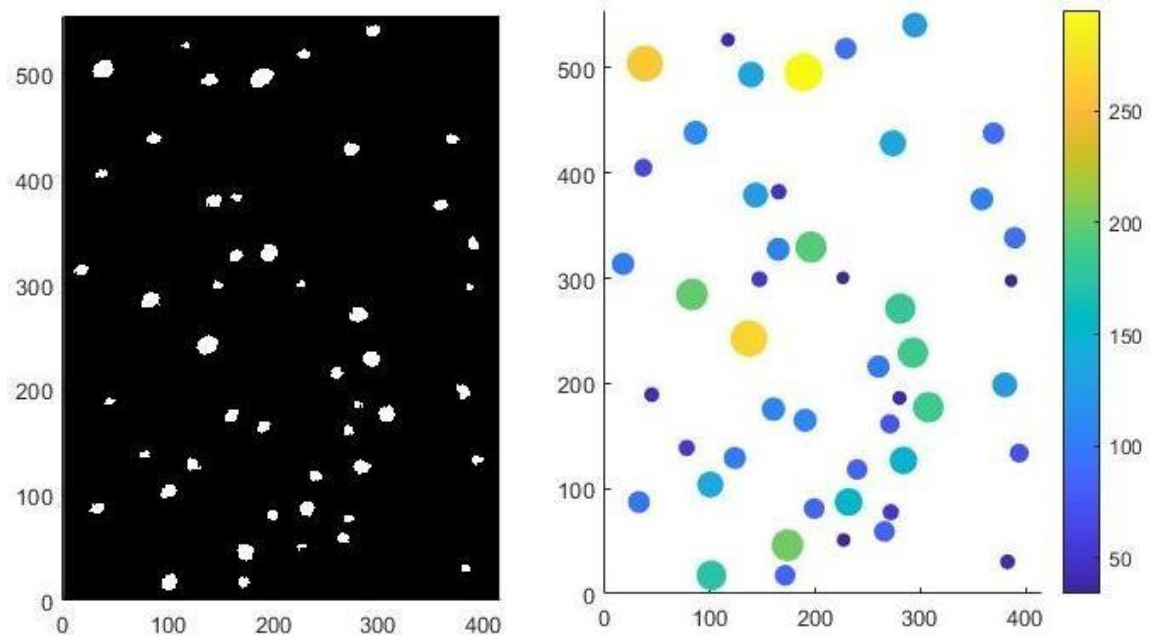
O botão Processar se torna apto após a conclusão do processamento de imagens e por meio do seu comando as rotinas de processamento numérico são acionadas, as quais produzirão as variáveis indexadas tipo “array” com os dados necessários para atingir os objetivos desse processamento.

O botão Gráficos bolhas vai produzir uma série de figuras, relacionadas às imagens de ensaios e que demonstram a capacidade do software distinguir as regiões verdadeiras das imagens (flocos) e sua magnitude (envergadura). Um exemplo de gráfico bolhas e respectiva imagem encontra-se na Figura 21.

O botão Exportar p/ Excel vai acionar as rotinas de gravação, em um arquivo excel previamente preparado e localizado na pasta raiz do Floc Image, das variáveis indexadas calculadas no processamento numérico de importância para o fornecimento de resultados.

O botão Reiniciar fecha o Floc Image, reinicializa todas as variáveis globais do programa e inicia uma nova seção.

Figura 21 – Exemplo de imagem binarizada de um ensaio de desenvolvimento e o respectivo gráfico de bolhas gerado no processamento numérico.



No exemplo da Figura 20 a imagem binarizada é de 415 x 553 pixels. O gráfico bolhas – Scatter – com marcadores circulares dimensionados conforme uma referência proporcional ao tamanho de cada floco, é construído com a informação dos centroides das regiões conectadas da imagem e suas respectivas áreas em pixels. O sentido do eixo vertical da imagem, normalmente relacionado a uma matriz e, portanto, com sentido de cima para baixo foi invertido para compatibilização visual com os eixos cartesianos do gráfico de bolhas. A escala cromática do gráfico de bolhas está diretamente relacionada com o número de pixels de cada floco, o tamanho da “bolha” é proporcional a esse número de pixels.

5.3.4 Planilhamento

Após o processamento numérico os dados obtidos são exportados para uma planilha eletrônica padronizada e integrada ao código fonte do Floc Image. Os dados exportados são o valor da escala de conversão de pixels para milímetros, a área em mm² da imagem recortada, o instante de produção de cada imagem, o número de flocos e a área em pixels de cada floco em cada imagem processada. Com esses dados organizados na planilha integrada é possível obter uma descrição do comportamento de formação de flocos e suas características em cada uma das etapas do Jar Test. Os elementos resultantes consistem em densidade espacial no

decorrer do tempo, incidência de flocos no decorrer do tempo, envergadura no decorrer do tempo e distribuição de magnitudes para uma amostra delimitada.

5.3.4.1 Densidade espacial – Adimensional

As densidades espaciais constituem informações de formação de flocos como um todo nas etapas Jar Test, conforme equação (4), demonstrando a relação com espaço que os flocos em conjunto ocupam da área investigada. As densidades espaciais são plotadas ao longo do tempo do ensaio e, assim, pode ser verificada a variação desse parâmetro especialmente para cada fase distinta do ensaio Jar Test.

O cálculo da densidade espacial \mathbf{d} é obtido pela equação 4,

$$\mathbf{d}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{A}f_i}{\mathbf{A}i_i} \quad (4)$$

onde $\mathbf{A}f$ é a área de cada floco da imagem \mathbf{i} , $\mathbf{A}i$ é a área total da imagem \mathbf{i} e \mathbf{n} é o número total de flocos da imagem.

5.3.4.2 Incidência – Flocos/cm²

A incidência é a relação entre a contagem de flocos em uma imagem e a área dessa imagem conforme mostra a equação (5). Esse parâmetro reflete a quantidade de flocos que incidem no espaço independente do seu tamanho individual.

A incidência \mathbf{I} , em flc/cm² pode ser calculada pela equação 5.

$$\mathbf{I}_i = \frac{\mathbf{n}_i}{\mathbf{A}i_i} \quad (5)$$

onde \mathbf{n} é o número de flocos na imagem \mathbf{i} e $\mathbf{A}i$ é a área da imagem em cm².

5.3.4.3 Envergadura – mm²

A envergadura corresponde ao tamanho, em mm², de cada um dos flocos identificados em cada imagem. As envergaduras máxima, média e mínima, nos intervalos de tempo, proporcionam a informação da formação de flocos em cada uma das fases operacionais em Jar Test em sequência cronológica.

5.3.4.4 Distribuição de magnitudes – adimensional.

As magnitudes são intervalos de envergaduras divididos entre a mínima e a máxima ocorridas no levantamento dessas envergaduras para uma amostra representativa das últimas imagens capturadas e que apresentam relativa estabilidade. Cada intervalo corresponde a uma faixa de 10 pixels de variação, convertidos para mm², sendo esse intervalo definido pelas inequações **6** e **7**.

$$(6) \quad \mathbf{E}_i \leq \mathbf{INT}_i < \mathbf{E}_{i+1}$$

$$(7) \quad \mathbf{E}_{n-1} \leq \mathbf{INT}_i \leq \mathbf{E}_n$$

Nessas equações \mathbf{E}_i é a envergadura em mm² em limite anterior, \mathbf{E}_{i+1} é a envergadura em limite posterior, \mathbf{INT}_i é o intervalo de variação na posição i , \mathbf{E}_{n-1} é a penúltima envergadura da série e \mathbf{E}_n é a última envergadura da série ou a envergadura máxima.

As ocorrências dentro de um intervalo de magnitude são contadas, lançadas no intervalo, e o conjunto de magnitudes são distribuídas de forma crescente, proporcionando noção do conteúdo quantitativo e qualitativo da floculação final

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA BRUTA

Para caracterização básica da água bruta utilizada nos testes foram obtidos os seguintes parâmetros:

- Turbidez: $4,23 \pm 0,17$ NTU
- Cor: $19,33 \pm 0,01$ uC
- pH: $8,52 \pm 0,02$
- Sólidos dissolvidos totais: $86,9 \pm 1,06$ mg/L
- Condutividade: $166 \pm 1,84$ CE

O Teste de turbidez detecta a presença de matéria em suspensão na água, como argila, silte, substâncias orgânicas, organismos microscópios e outras partículas. O padrão de potabilidade para turbidez é inferior a 1 unidade. A cor resulta da existência de substâncias em solução, podendo ser causadas pelo ferro ou manganês, pela decomposição da matéria orgânica da água, pelas algas ou pela introdução de esgotos. A intensidade de cor deve ser inferior a 5 unidades. O pH indica se a água é ácida (pH inferior a 7) ou alcalina (pH maior que 7), o pH depende de sua origem e características naturais, sendo recomendado a faixa de 6 a 9. Os sólidos dissolvidos é todo material que passa através do filtro. Representam a matéria em solução ou em estado coloidal. A condutividade é a capacidade da água de conduzir corrente elétrica. Este parâmetro está relacionado com a presença de íons dissolvidos na água, que são partículas carregadas eletricamente (Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007).

6.2 ENSAIOS NA MODALIDADE DE TRATAMENTO CONVENCIONAL

Nesta modalidade, com ensaios Jar Test destinados ao tratamento convencional de água para abastecimento em ciclo completo, os procedimentos se efetivaram com uma agitação inicial de 100 RPM durante 30 segundos, adição de PAC com agitação rápida de 300 RPM em 10 segundos e agitação final de 32 RPM durante 20 minutos. Durante a realização do ensaio são tomados em torno de 1000 instantâneos de imagens digitais, das quais 103 foram selecionadas em espaçamentos cronológicos suficientes para compor uma amostra que é processada para obtenção de resultados. Os resultados estão apresentados considerando toda a extensão dos ensaios, porém a análise se concentra especialmente nos últimos 30 registros de aquisição de dados processados, considerando-se, desta forma, a etapa de consolidação da

formação de flocos, e mais especificamente a sua eficiência de decantação em relação aos demais resultados da modalidade. Também, são feitas apresentações detalhadas e considerações acerca da formação dos flocos no decorrer das etapas de teste.

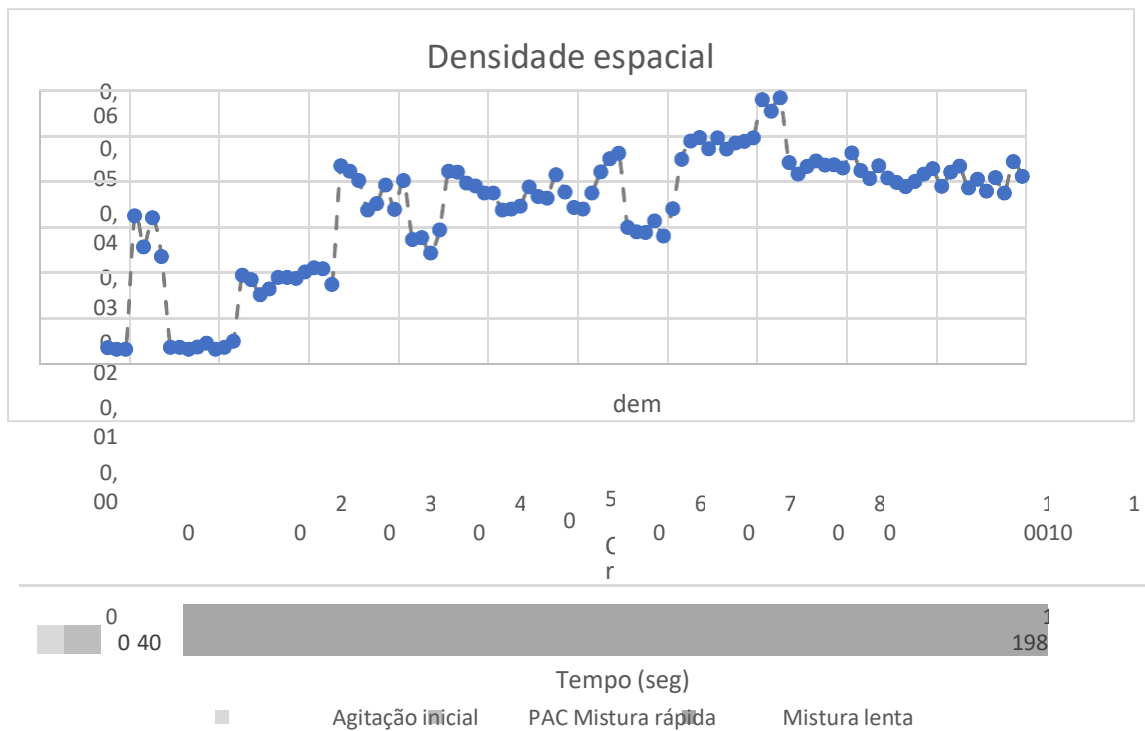
6.2.1 Ensaio convencional CNV – 01

Para o ensaio CNV – 01 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 2,3mL de uma solução total de 100 mL de 4,3 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada.

6.2.1.1 Densidade espacial

A densidade espacial proporciona a cada registro adquirido, a relação entre o espaço ocupado por flocos e o espaço da área de aquisição, expresso em adimensional decimal. O ensaio CNV – 01 apresentou a evolução da densidade espacial representada graficamente por meio da Figura 22.

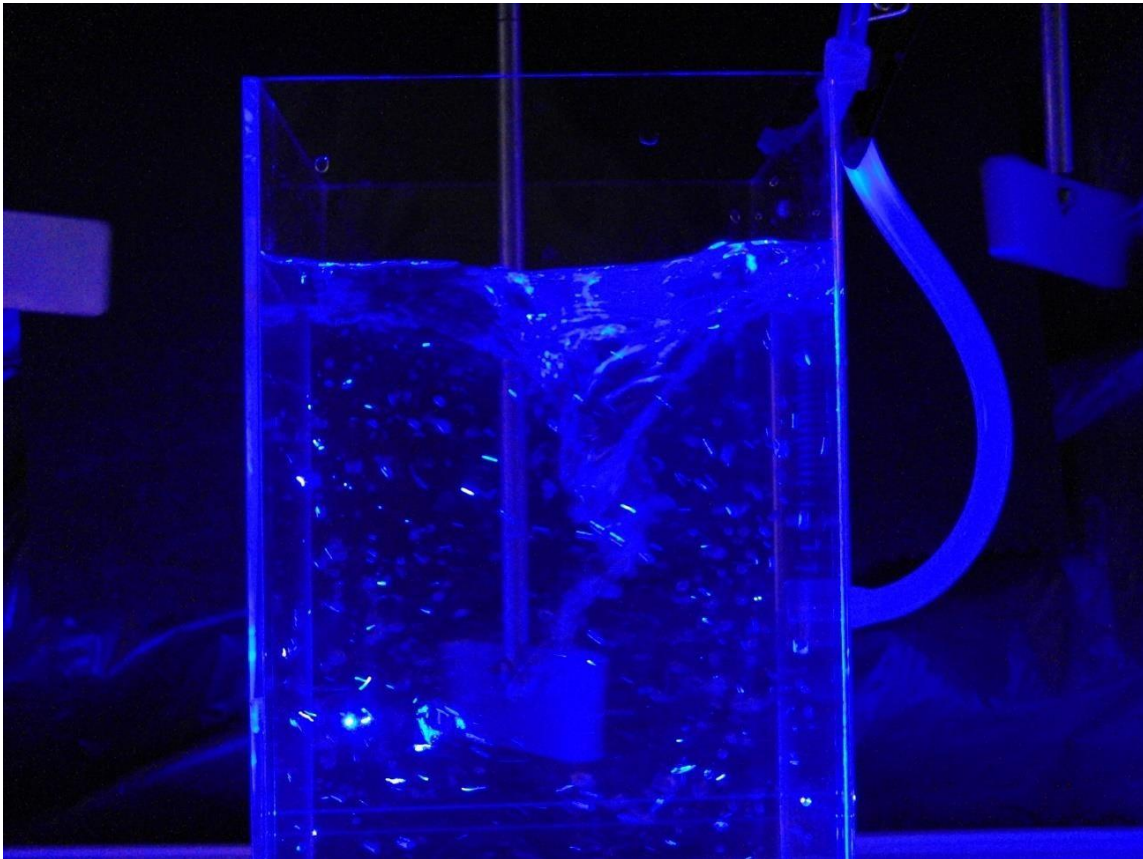
Figura 22 – Evolução da densidade espacial na formação de flocos do ensaio CNV – 01.



Devido à alta velocidade de rotação, na fase de adição de PAC e mistura rápida, a formação de vórtice no movimento proporciona a entrada de ar e a formação de bolhas que

adentram ao escoamento, as quais conduzem a imagens capturadas que ocasionam a inclusão dessas bolhas como elementos pertinentes ao objetivo do processamento. Cabe a análise da visualização destes resultados que ocorrem, neste ensaio, entre os instantes 30 e 40 segundos, ordem 4 a 7, para não incluir tais elementos como sendo flocos e sim o efeito colateral do movimento imposto. Na Figura 23 encontra-se um dos instantâneos que demonstram o fenômeno.

Figura 23 – Formação de vórtice e intrusão de bolhas de ar no escoamento.



Fonte: A autora.

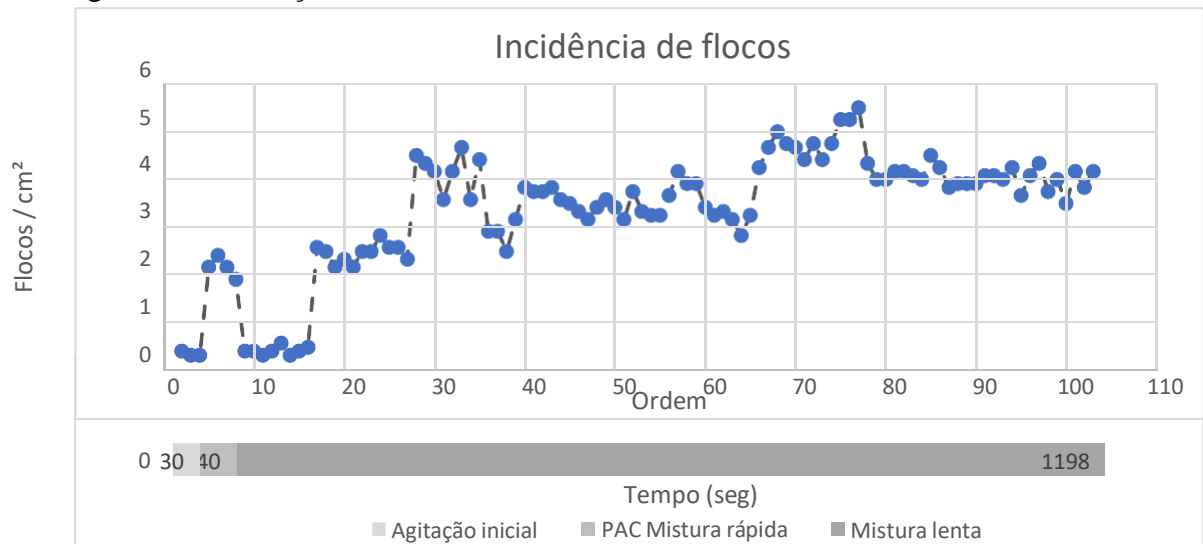
Com a percepção do início da floculação ocorrendo entre os instantes 304 e 344 segundos, ordem de 16 a 26, pôde-se obter as primeiras magnitudes da densidade espacial ocorridas com esse início de formação de flocos. Essas atingiram a média de 1,55% de ocupação do espaço, densidade 0,0155. A densidade espacial média ao final do ensaio atingiu para os últimos 30 instantâneos capturados, instantes de 1068 a 1198 segundos, ordem de 78 a 103, o percentual de 4,02% de ocupação do espaço, densidade 0,0402. Ao final dos 20 minutos de agitação houve um crescimento de 259,4% na ocupação do espaço por flocos em relação à sua ocupação inicial.

6.2.1.2 Incidência de flocos.

A incidência de flocos consiste na contagem de flocos formados em cada registro independente do seu tamanho. Para uniformizar a contagem entre os diversos ensaios a incidência de flocos leva em conta a quantidade de flocos dividida pela área da região de captura em centímetros quadrados.

No Ensaio CNV – 01 a incidência de flocos pode ser verificada no decorrer do tempo por meio do gráfico reproduzido na Figura 24.

Figura 24 – Evolução da incidência de flocos do ensaio CNV – 01.



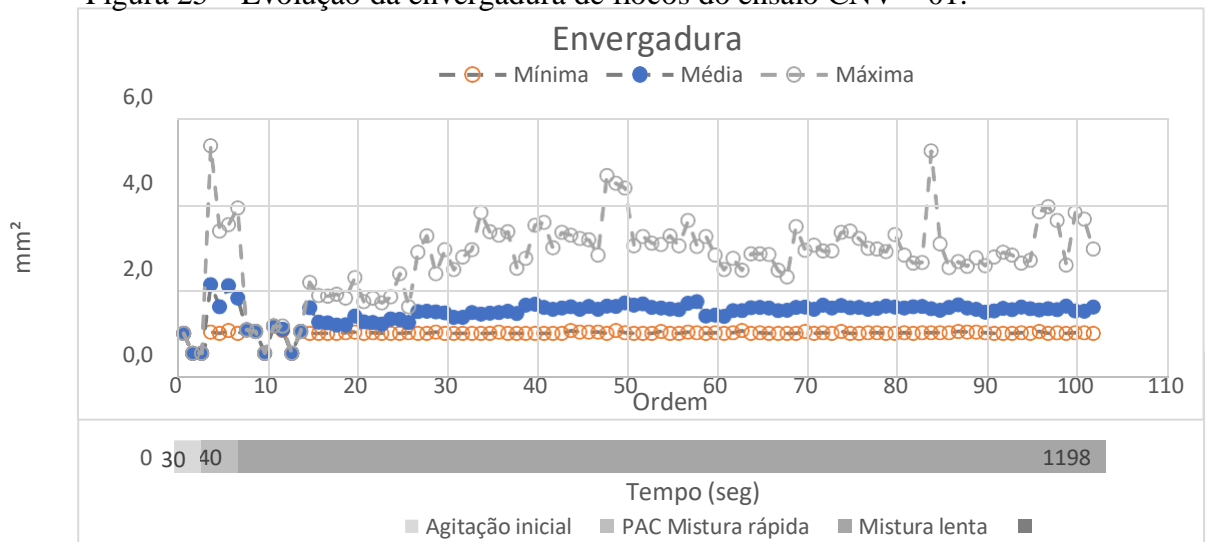
A incidência de flocos registra um quantitativo de imagens conectadas (flocos) não considerando aspectos qualitativos – tamanho. A incidência de flocos é útil para algumas análises comparativas entre ensaios e/ou etapas dos ensaios.

No ensaio CNV – 01, nos instantes iniciais da floculação a incidência de flocos atingiu uma média de 2,13 flc/cm². No final do ensaio a média atingiu 3,82 flc/cm², com um crescimento de 197,28%. Como o crescimento quantitativo foi inferior ao crescimento da densidade, conclui-se que houve crescimento qualitativo, o que pode ser verificado com a obtenção de dados qualitativos, ou seja, as envergaduras dos flocos.

6.2.1.3 Envergaduras de flocos

A envergadura, neste trabalho, se refere ao tamanho de um floco, mais especificamente sua área de projeção sobre o plano de aquisição da imagem. Cada projeção sobre esse plano representa uma área conectada em pixels, isto é, pixels que se encontram juntos formando uma região definida. Essa região tem seus pixels contados e cada região, portanto, possui uma área em pixels. Após a conversão com o fator de escala obtido no alvo de calibração tem-se, finalmente, áreas em milímetros quadrados. Nos resultados para envergaduras são mostrados os valores para a envergadura máxima, média e mínima de cada quadro de aquisição de dados. Com a Figura 25 pode-se observar a evolução das envergaduras de flocos no ensaio CNV – 01.

Figura 25 – Evolução da envergadura de flocos do ensaio CNV – 01.



Inicialmente, nas primeiras formações de flocos, entre os instantes 304 e 344 segundos, ordem de 16 a 26, a envergadura média dos flocos capturados foi de 0,728 mm^2 . Nos 30 quadros finais, instantes de 1068 a 1198 segundos, ordem de 78 a 103, a envergadura média foi de 1,046 mm^2 , representando um crescimento de 143,68%.

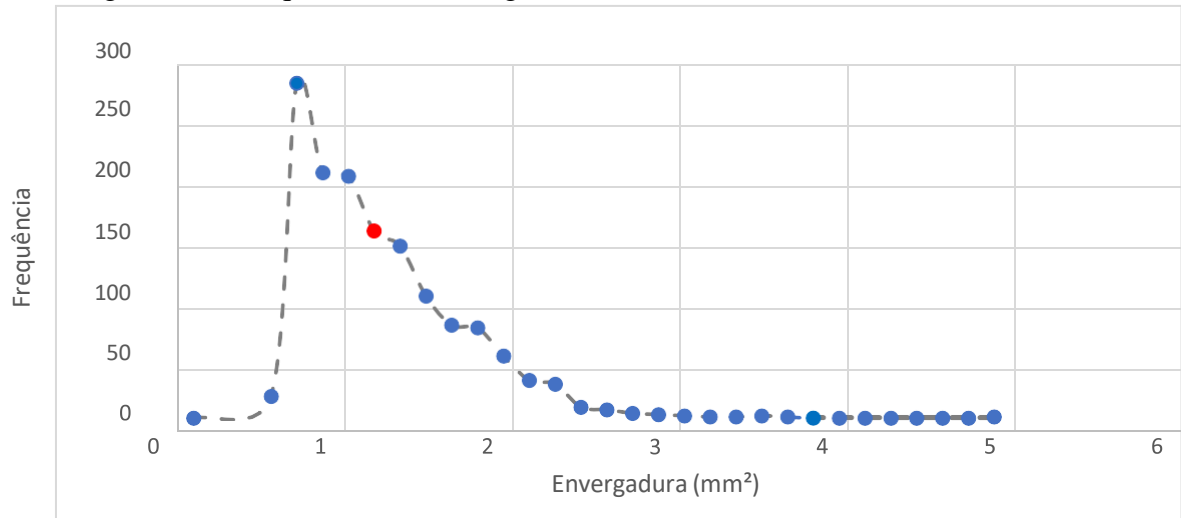
6.2.1.4 Frequência de envergaduras

Considerando a etapa em que a formação dos flocos apresenta determinada consolidação, correspondente, neste estudo, às últimas 30 aquisições de dados processados, são extraídos dados relacionados ao tamanho de cada floco que atravessou a área de aquisição. Desta forma, a distribuição das ocorrências de envergaduras delimitadas pode ser observada no

gráfico de frequências apresentado na Figura 26.

Essa aquisição de dados ocorreu em uma área total de 36.000,00 mm², entre os instantes 1002 e 1198 segundos do ensaio quando foi possível detectar a passagem de 1376 flocos através da seção de estudo.

Figura 26 – Frequências de envergaduras de flocos do ensaio CNV – 01.



O ponto destacado é próximo à média das envergaduras.

6.2.1.5 Resumo das características para a faixa de consolidação de formação de flocos

Para a faixa consolidada, com amostra dos 30 últimos instantâneos de aquisição de dados processados, as características principais são apresentadas na Tabela 2.

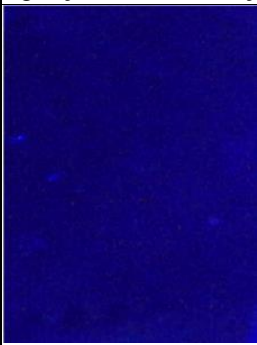
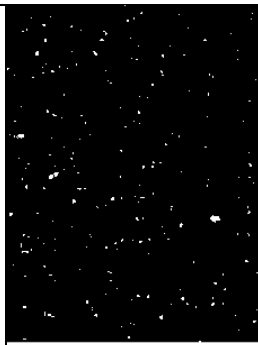

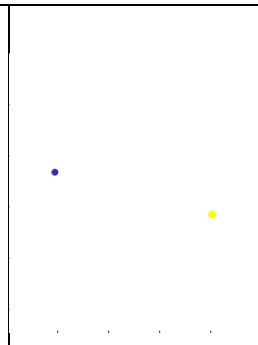
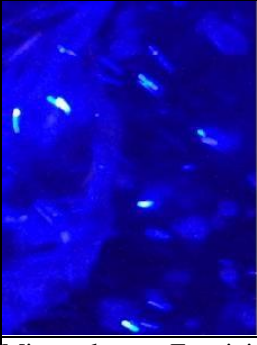
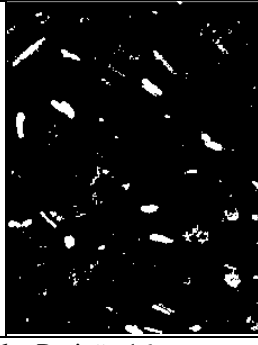
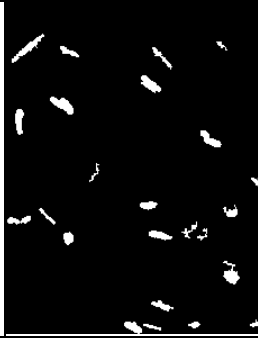
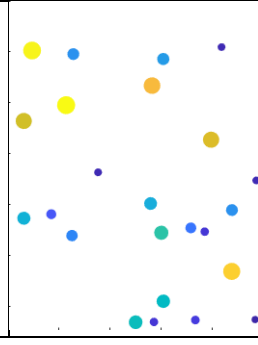
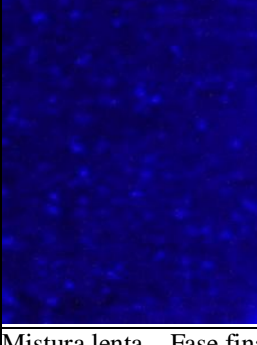
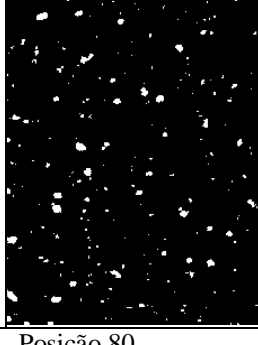

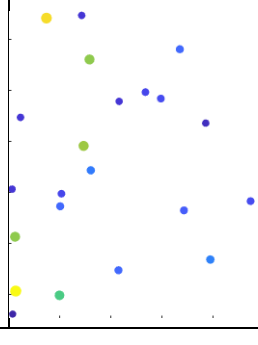
Tabela 2 – Resumo de resultados para a amostra dos 30 instantes provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV – 01.

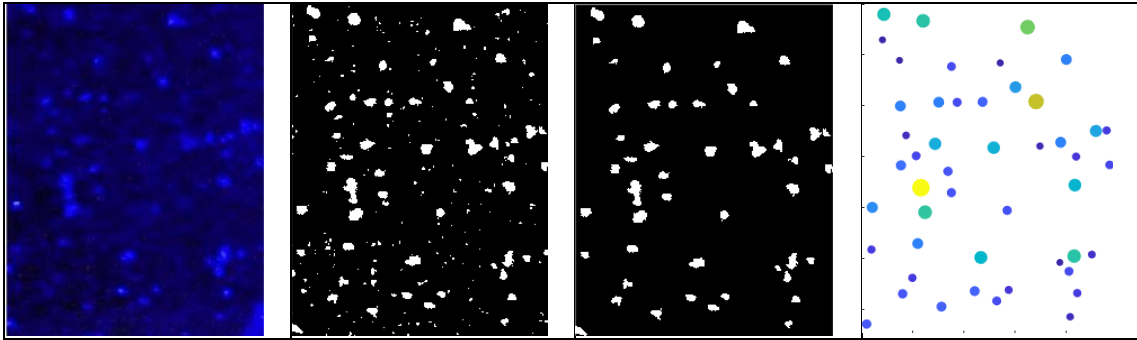
| | | |
|----------------------------------|-------------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 1002 a 1198 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 1376 | |
| Incidência média de flocos: | 3,82 | flc/cm ² |
| Densidade espacial média: | 0,0402 | |
| Envergadura mínima: | 0,462 | mm ² |
| Envergadura média: | 1,046 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 4,699 | mm ² |

6.2.1.6 Exemplos de imagens processadas no ensaio CNV – 01

O Quadro 1 contém a reprodução de algumas imagens processadas no ensaio em suas diferentes fases. Também são incluídos gráficos “scatter”, tipo bolha, com os quais foi possível perceber a capacidade de detecção de flocos do software Floc Image.

Quadro 1 – Exemplos de imagens do ensaio CNV – 01.

| Imagens: | | | |
|---|---|--|---|
| Original recortada | Binária geral | Binária consolidada | Gráfico bolhas |
| Agitação inicial – Posição 1. | | | |
|  |  |  |  |
| Mistura rápida – Posição 4 | | | |
|  |  |  |  |
| Mistura lenta – Fase inicial – Posição 16 | | | |
|  |  |  |  |
| Mistura lenta – Fase final – Posição 80 | | | |



Fonte: Software Floc Image – (MatLab/Excel 2022 v.01)

6.2.2 Ensaio convencional CNV – 02.

Para o ensaio CNV – 02 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 2,5mL de uma solução total de 100 mL de 4,30 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada.

Para a faixa consolidada, com amostra dos 30 últimos instantâneos de aquisição de dados processados, as características principais são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo de resultados para a amostra dos 30 instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV – 02.

| | | |
|----------------------------------|-------------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 1112 a 1266 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 1242 | |
| Incidência média de flocos: | 3,45 | flc/cm ² |
| Densidade espacial média: | 0,037 | |
| Envergadura mínima: | 0,462 | mm ² |
| Envergadura média: | 1,077 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 3,713 | mm ² |

Com relação ao ensaio CNV – 01 ocorreu um acréscimo de 1,046 mm² para 1,077 mm² na envergadura média dos flocos, crescimento adicional de 2,96% embora pareça uma diferença pequena aponta a formação de flocos, com o valor do PAC alterado em cada ensaio podendo-se ver as diferenças nos 6 jarros.

6.2.3 Ensaio convencional CNV – 03

Para o ensaio CNV – 03 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 2,7mL de

uma solução total de 100 mL de 4,30 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada.

Para a faixa consolidada, com amostra dos 30 últimos instantâneos de aquisição de dados processados, as características principais são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo de resultados para a amostra dos 30 instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV – 03.

| | | |
|----------------------------------|-------------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 1046 a 1268 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 1249 | |
| Incidência média de flocos: | 3,47 | flc/cm ² |
| Densidade espacial média: | 0,040 | |
| Envergadura mínima: | 0,462 | mm ² |
| Envergadura média: | 1,152 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 3,990 | mm ² |

Com relação ao ensaio CNV – 02 ocorreu um acréscimo de 1,077 mm² para 1,152 mm² na envergadura média dos flocos, crescimento adicional de 6,97%, percebe-se que ao aumentar a dosagem de PAC o ocorre o crescimento do floco

6.2.4 Ensaio convencional CNV – 04

Para o ensaio CNV – 04 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 2,9 mL de uma solução total de 100 mL de 4,30 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada.

Para a faixa consolidada, com amostra dos 30 últimos instantâneos de aquisição de dados processados, as características principais são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo de resultados para a amostra dos 30 instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV – 04.

| | | |
|----------------------------------|------------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 710 a 1118 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 1174 | |
| Incidência média de flocos: | 3,26 | flc/cm ² |

| | | |
|---------------------------|-------|-----------------|
| Densidade espacial média: | 0,033 | |
| Envergadura mínima: | 0,467 | mm ² |
| Envergadura média: | 1,018 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 3,190 | mm ² |

Com relação ao ensaio CNV – 03 ocorreu um decréscimo de 1,152 mm² para 1,018 mm², decréscimo de 11,63%.

6.2.5 Ensaio convencional CNV – 05

A dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 3,1 mL de uma solução total de 100 mL de 4,30 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada. Para a faixa consolidada, com amostra dos 30 últimos instantâneos de aquisição dedados processados, as características principais são apresentas na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo de resultados para a amostra dos 30 instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV – 05.

| | | |
|----------------------------------|-----------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 580 a 812 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 1125 | |
| Incidência média de flocos: | 3,13 | flc/cm ² |
| Densidade espacial média: | 0,032 | |
| Envergadura mínima: | 0,462 | mm ² |
| Envergadura média: | 1,022 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 3,466 | mm ² |

Com relação ao ensaio CNV – 04 ocorreu um acréscimo de 1,018 mm² para 1,022 mm², acréscimo de 0,39%, porém com decréscimo de flocos detectados de 1174 para 1125, declínio de 4,17% e densidade espacial de 0,033 para 0,032 com queda de 3,03%.

6.2.6 Ensaio convencional CNV – 06

Para o ensaio CNV – 06 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 3,3 mL de uma solução total de 100 mL de 4,30 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada. Na Tabela 7 encontram-se os principais resultados.

Tabela 7 – Resumo de resultados para a amostra dos 30 instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio CNV – 06.

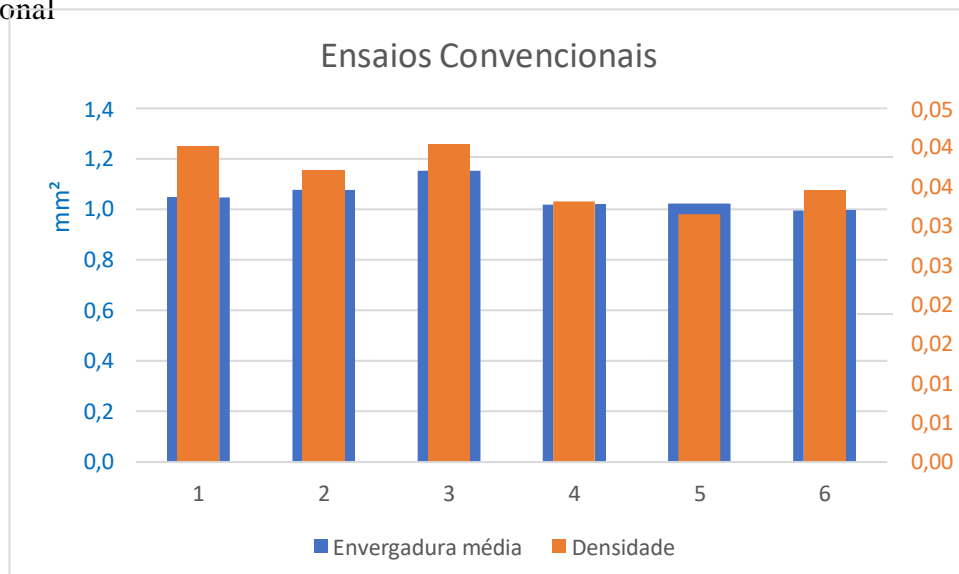
| | | |
|----------------------------------|----------------|-------------------------|
| Intervalo da amostra: | 1026 a 1238 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 1259 | |
| Incidência média de flocos: | 3,50 | flc/c m ² |
| Densidade espacial média: | 0,035 | |
| Envergadura mínima: | 0,462 | mm ² |
| Envergadura média: | 0,995 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 3,651 | mm ² |

Com relação ao ensaio CNV – 05 ocorreu um decréscimo na envergadura média de 1,022mm² para 0,995 mm², uma redução de 2,64%.

6.2.7 Comparativos entre os ensaios para tratamento convencional

A Figura 27 proporciona um comparativo entre os ensaios convencionais para efeito de distinção da eficiência de cada dosagem.

Figura 27 – Gráfico de barras para comparação entre os ensaios para tratamento convencional



A envergadura e a densidade mostram as características dos flocos em cada situação, colunas 1 a 6 respectivamente aos ensaios CNV – 01 a CNV – 06. A coluna 3, ensaio CNV – 03, Cloreto de Polialumínio a 2,7 ml, apresentou um melhor desempenho do que nos demais jarros.

6.3 ENSAIOS NA MODALIDADE DE TRATAMENTO ACTIFLO®

6.3.1 Ensaio Actiflo® ACT – 01

Para o ensaio ACT – 01 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 2,3mL de uma solução total de 100 mL de 4,3 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada, 6 g de micro areia e 0,320 mL de polímero. A Tabela 8 contém os resultados numéricos do ensaio ACT – 01.

Tabela 8 – Resumo de resultados para amostra dos 30 últimos instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT – 01.

| | | |
|----------------------------------|--------------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 254 a 478 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,0 0 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 2047 | |
| Incidência média de flocos: | 5,69 | flc/cm ² |
| Densidade espacial média: | 0,033 | |
| Envergadura mínima: | 0,347 | mm ² |
| Envergadura média: | 0,585 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 1,872 | mm ² |

6.3.2 Ensaio Actiflo® ACT – 02

Para o ensaio ACT – 02 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 2,5 mL de uma solução total de 100 mL de 4,3 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada, 6 g de micro areia e 0,320 mL de polímero. A Tabela 9 contém os resultados numéricos do ensaio ACT – 01.

Tabela 9 – Resumo de resultados para amostra dos 30 últimos instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT – 02

| | | |
|----------------------------------|--------------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 340 a 484 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000, 00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 2390 | |
| Incidência média de flocos: | 6,64 | flc/cm ² |
| Densidade espacial média: | 0,040 | |
| Envergadura mínima: | 0,347 | mm ² |
| Envergadura média: | 0,604 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 2,583 | mm ² |

No ensaio ACT – 02 com relação ao ensaio ACT – 01 ocorreu um aumento na quantidade de flocos detectados de 2047 para 2390, sendo de 16,75% maior. Aumento da incidência média de flocos e aumento da envergadura média de 0,585 para 0,604 com crescimento adicional de 3,24%.

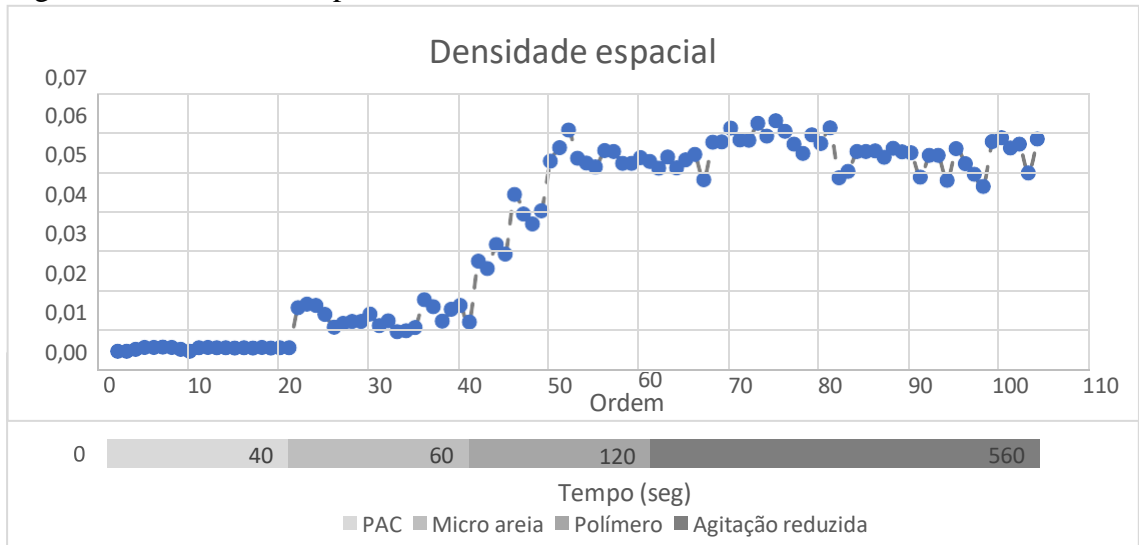
6.3.3 Ensaio Actiflo® ACT – 03

Para o ensaio ACT – 03 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 2,7 mL de uma solução total de 100 mL de 4,3 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada, 6 g de micro areia e 0,320 mL de polímero.

6.3.3.1 Densidade espacial

A Figura 28 contém a evolução da densidade espacial registrada no ensaio ACT – 03 por meio de sua representação gráfica relacionada à ordem das imagens tomadas no ensaio. Adicionalmente é inserida a respectiva barra de tempo, associando a ordem à evolução cronológica.

Figura 28 – Densidade espacial – Ensaio ACT – 03



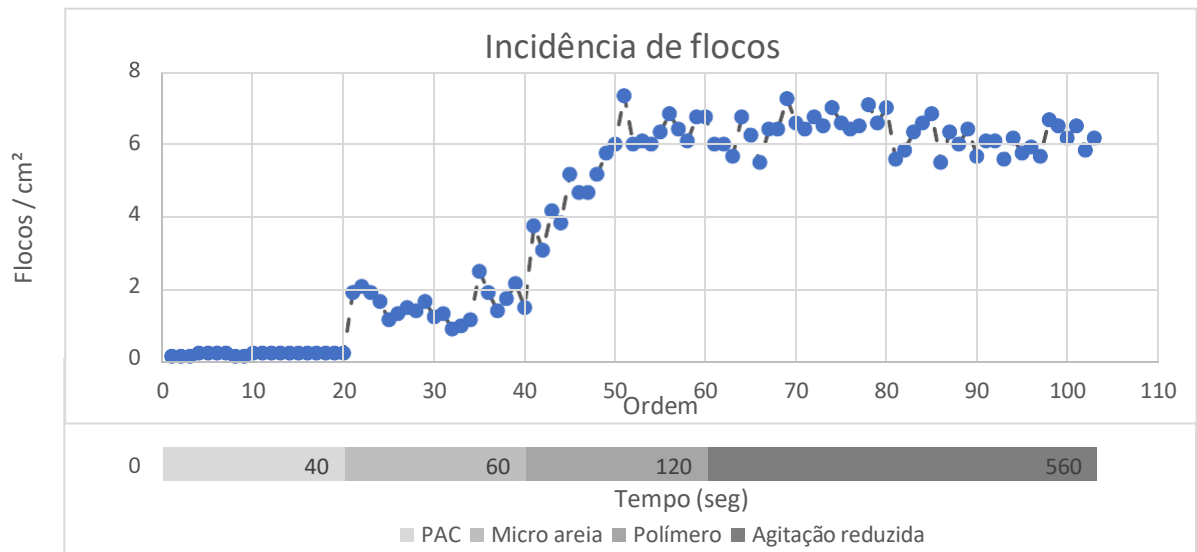
Fonte: Software Floc Image – (MatLab/Excel 2022 v.01)

Este resultado apresenta a evolução da densidade espacial com 103 registros fotográficos e duração de 560 segundos. Em sua primeira fase, mistura rápida e adição de PAC, até 40 segundos (20 registros fotográficos), não apresentou bolhas de ar, ou em algumas imagens em que essas bolhas eventualmente se apresentaram, os registros foram descartados. Nessa fase foram detectadas impurezas presentes na água bruta. A partir do instante 40 s até o instante 60 s (20 registros fotográficos), com a adição da micro areia, são detectados os grãos de areia, porém ainda, sem um crescimento claro de flocos. A partir de 60 segundos, com a adição do polímero, percebe-se o crescimento gradual dos flocos e sua disseminação no espaço com a aglutinação de materiais sólidos aos grãos de areia. De 60 até 120 segundos são mais 20 registros fotográficos. A última fase estendida do instante 120 s até o final (560 s) atua com agitação lenta e se caracteriza pela consolidação do processo de floculação. Essa fase é descrita graficamente com a utilização de 43 registros fotográficos.

6.3.3.2 Incidência de flocos

A Figura 29 contém a evolução da incidência de flocos registrada no ensaio ACT – 03 por meio de sua representação gráfica relacionada à ordem dos registros fotográficos tomados no ensaio. Adicionalmente é inserida a respectiva barra de tempo, associando a ordem à evolução cronológica.

Figura 29 – Incidência de flocos – Ensaio ACT – 03



Fonte: Software Floc Image – (MatLab/Excel 2022 v.01)

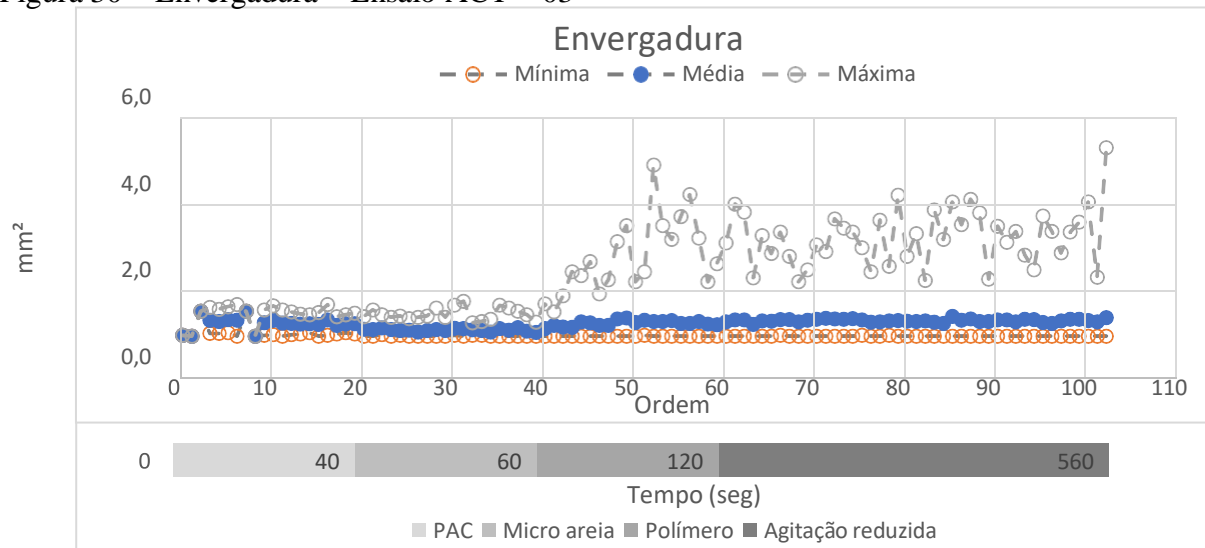
O comportamento da incidência de flocos é semelhante à densidade espacial, pois os parâmetros são calculados, o primeiro pela razão entre a quantidade de flocos e a área de estudo e o segundo pela razão entre a soma total da área desses flocos e a área de estudo.

Na faixa consolidada a incidência de flocos atingiu uma média de 6,16 floc/cm², e em relação ao tratamento convencional que atingiu uma média de 3,82 floc/cm² para o ensaio com 2,7 mL de PAC, houve um crescimento quantitativo, ocasionado pela adição da micro areia.

6.3.3.3 Envergaduras de flocos

A Figura 30 contém a evolução da envergadura de flocos registrada no ensaio ACT – 03 por meio de sua representação gráfica relacionada à ordem dos registros fotográficos tomados no ensaio. Adicionalmente é inserida a respectiva barra de tempo, associando a ordem à evolução cronológica.

Figura 30 – Envergadura – Ensaio ACT – 03



Fonte: Software Floc Image – (MatLab/Excel 2022 v.01)

As áreas dos flocos são projeções sobre uma superfície bidimensional – a fotografia – de um elemento tridimensional – o floco. Estas áreas de projeção, após a conversão pela calibração do sistema apresenta valores em milímetros quadrados.

Observa-se que logo após o instante 60, onde ocorre a adição do polímero, os flocos entram em formação em uma aparente nucleação dos grãos de areia.

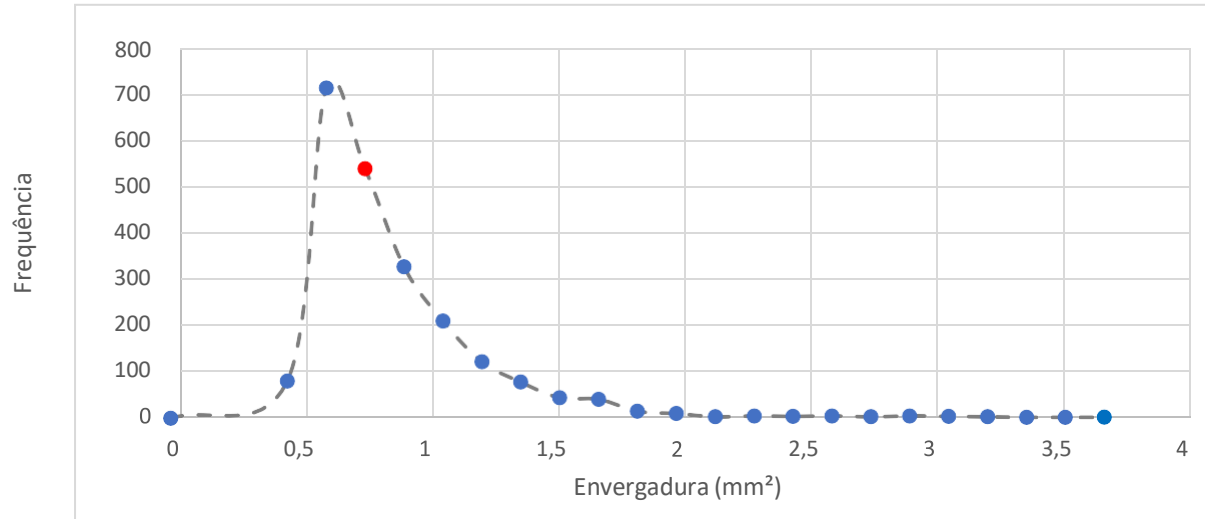
No ensaio ACT – 03, com relação ao ensaio ACT – 02, ocorreu uma redução na quantidade de flocos detectados de 2390 para 2218, de 7,19%. Aumento da envergadura média de 0,604 para 0,819 com crescimento adicional de 35,59%.

6.3.3.4 Frequência de envergaduras

A Figura 31 contém a distribuição de frequência de envergaduras de flocos registrada no ensaio ACT – 03 por meio de sua representação gráfica.

O ponto em destaque é o ponto próximo a envergadura média. No gráfico de frequência de envergaduras pode ser observado que a quantidade de flocos foi muito superior àquela encontrada no ensaio de mesma dosagem relativo ao tratamento convencional. Porém, a envergadura foi inferior, sugerindo que a micro areia conecta se às partículas de sólidos suspensos na água bruta.

Figura 31 – Distribuição de frequência de envergaduras – Ensaio ACT – 03



Fonte: Software Floc Image – (MatLab/Excel 2022 v.01)

6.3.3.5 Resumo dos resultados para o ensaio ACT – 03

Os principais resultados numéricos da faixa de operação de consolidação de flocos do ensaio ACT – 03 encontram-se na Tabela 10.

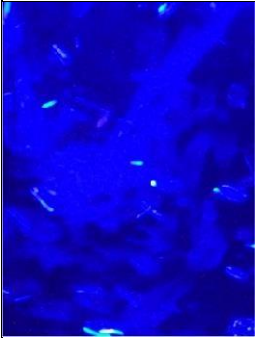


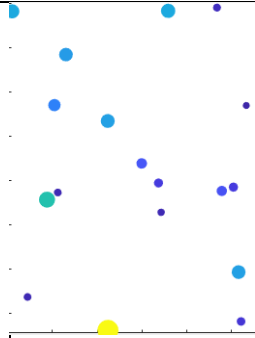
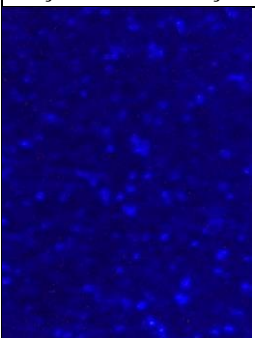
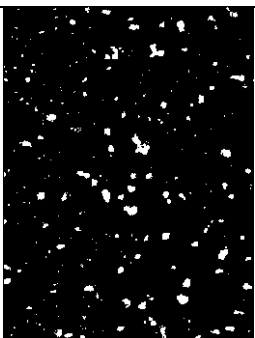
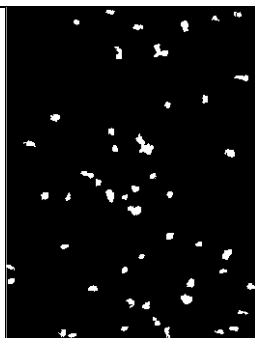
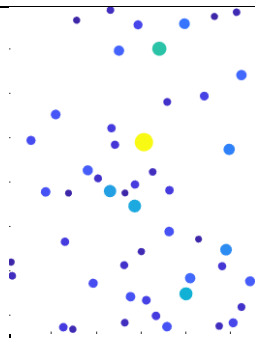
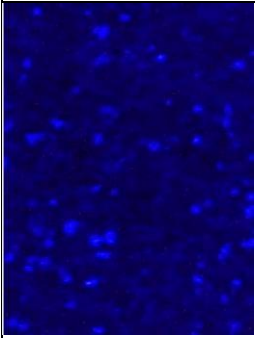
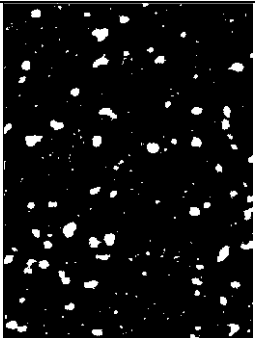

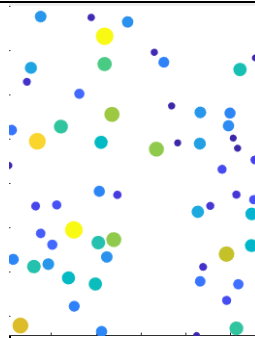
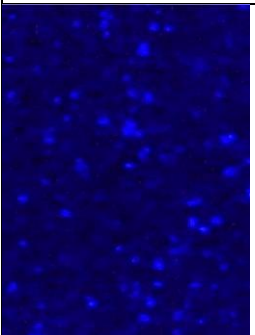
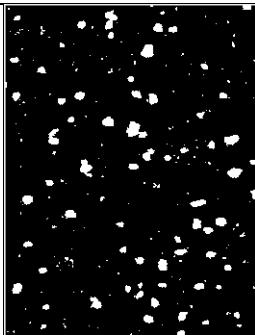
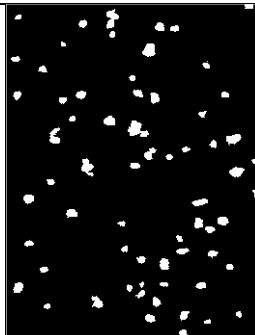
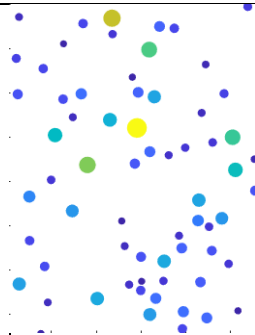
Tabela 10 – Resumo de resultados para amostra dos 30 instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT – 03

| | | |
|----------------------------------|-----------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 446 a 560 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 2218 | |
| Incidência média de flocos: | 6,16 | flc/cm ² |
| Densidade espacial média: | 0,050 | |
| Envergadura mínima: | 0,462 | mm ² |
| Envergadura média: | 0,819 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 4,791 | mm ² |

6.3.3.6 Exemplos de imagens processadas no ensaio ACT – 03

O Quadro 2 apresenta exemplos de imagens características de cada fase de operação do Ensaio ACT – 03.

Quadro 2 – Exemplos de imagens do ensaio ACT – 03.

| Imagens: | | | |
|---|---|--|---|
| Original recortada | Binária geral | Binária consolidada | Gráfico bolhas |
| Adição PAC – Mistura rápida – Posição 12 | | | |
|  |  |  |  |
| Adição areia – Posição 24 | | | |
|  |  |  |  |
| Adição polímero – Posição 49 | | | |
|  |  |  |  |
| Mistura lenta – Fase final – Posição 82 | | | |
|  |  |  |  |

Fonte: Software Floc Image – (MatLab/Excel 2022 v.01)

6.3.4 Ensaio Actiflo® ACT – 04

Para o ensaio ACT – 04 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 2,9 mL de uma solução total de 100 mL de 4,3 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada, 3 mg/L de micro areia e 0,320 mL de polímero. Com a Tabela 11 apresenta-se o resumo de resultados.

Tabela 11 – Resumo de resultados para amostra dos 30 últimos instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT - 04

| | | |
|----------------------------------|-----------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 280 a 504 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 1640 | |
| Incidência média de flocos: | 4,56 | flc/cm ² |
| Densidade espacial média: | 0,032 | |
| Envergadura mínima: | 0,462 | mm ² |
| Envergadura média: | 0,713 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 2,388 | mm ² |

Com relação ao ensaio ACT – 03 ocorreu uma redução na quantidade de flocos detectados de 2218 para 1640, sendo de 26,05%. Decrescimento da envergadura média de 0,819 para 0,713 de 12,94% e decrescimento da densidade espacial média de 0,05 para 0,032 de 36,00 %.

6.3.5 Ensaio Actiflo® ACT – 05

Para o ensaio ACT – 05 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 3,1 mL de uma solução total de 100 mL de 4,3 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada, 3 mg/L de micro areia e 0,320 mL de polímero. Com a Tabela 12 apresenta-se o resumo de resultados.

Tabela 12 – Resumo de resultados para amostra dos 30 últimos instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT - 05

| | | |
|----------------------------------|-----------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 256 a 526 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 1171 | |
| Incidência média de flocos: | 3,25 | flc/cm ² |
| Densidade espacial média: | 0,016 | |
| Envergadura | | |
| mínima: | 0,341 | mm ² |
| Envergadura média: | 0,495 | mm ² |
| Envergadura | | |
| máxima: | 1,684 | mm ² |

Com relação ao ensaio ACT – 04 ocorreu uma redução na quantidade de flocos detectados de 1640 para 1171, de 28,60%. Decrescimento da envergadura média de 0,713 para 0,495, de 30,57% e decrescimento da densidade espacial média de 0,032 para 0,016 de 50 %.

6.3.6 Ensaio Actiflo® ACT – 06

Para o ensaio ACT – 06 a dosagem aplicada em cada jarra de 2000 mL, foi de 2,9 mL de uma solução total de 100 mL de 4,3 mL de PAC previamente diluído em 95,7 mL de água deionizada, 3 mg/L de micro areia e 0,320 mL de polímero. Com a Tabela 13 apresenta-se o resumo de resultados.

Tabela 13 – Resumo de resultados para amostra dos 30 últimos instantâneos provenientes da faixa operacional consolidada do ensaio ACT - 06

| | | |
|----------------------------------|-----------|---------------------|
| Intervalo da amostra: | 422 a 428 | segundos |
| Área de captura de imagem: | 36000,00 | mm ² |
| Quantidade de flocos detectados: | 1005 | |
| Incidência média de flocos: | 2,79 | flc/cm ² |
| Densidade espacial média: | 0,018 | |
| Envergadura mínima: | 0,462 | mm ² |
| Envergadura média: | 0,646 | mm ² |
| Envergadura máxima: | 2,573 | mm ² |

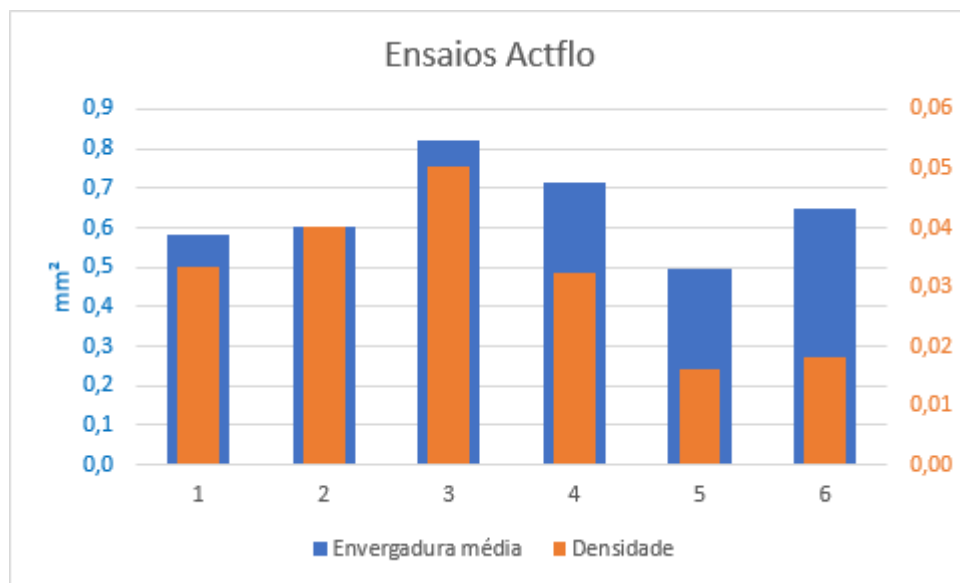
Com relação ao ensaio ACT – 05 ocorreu um crescimento de envergadura média de 0,495 mm² para 0,646 mm², 30,50%, porém ocorreu uma redução na quantidade de flocos detectados de 1171 para 1005 e redução da incidência média de flocos de 14,16 %.

6.3.7 Comparativos entre os ensaios para tratamento Actiflo®

A envergadura e a densidade mostram as características dos flocos em cada situação, colunas 1 a 6 respectivamente aos ensaios ACT – 01 a ACT – 06.

Na Figura 32 dos ensaios com tratamento Actiflo®, os resultados demonstram que acima de 2,7 mL de cloreto de polialumínio, tanto envergadura média quanto a densidade tornam a reduzir. Este processo de ponto de ideal para coagulantes, além de representar um tratamento mais correto, certamente evita desperdícios de energia e financeiros.

Figura 32 – Envergadura e densidade em ensaios Actiflo®



7 CONCLUSÕES

Ao aplicar a metodologia de Visão Computacional, para obtenção de parâmetros relacionados à formação de flocos em ensaios Jar Test consegue-se resultados analíticos de eficiência.

Foi possível notar, entre os ensaios realizados, a distinção entre parâmetros que embasam a decisão de estabelecer a aplicação da configuração de maior eficiência para uma escala real de operação.

Nota-se que nas modalidades de tratamento convencional e de tratamento Actiflo®, os resultados apresentaram, seja por coincidência ou não, a mesma dosagem de PAC para a água bruta a ser tratada, levando a crer em coerência de resultados.

Esta pesquisa possibilitou uma descrição do comportamento de formação de flocos, quanto a sua densidade espacial no decorrer do tempo, incidência de flocos, envergadura e distribuição de magnitudes. As melhores dosagens de cloreto de polialumínio com base na sua eficiência foi definida de acordo com o crescimento ou decrescimento dos flocos conforme ensaios convencionais e Actiflo®. Os valores numéricos alcançados acarretaram resultados impossíveis de se conseguir sem a análise de registros fotográficos adquiridos em intervalos de tempo impraticáveis à visão humana e o processamento conduzido pelo Floc Image e sua intrínseca modelagem computacional.

Com relação à eficiência de uma modalidade ou outra, o objetivo, a formação de flocos, é evidenciado em ambas modalidades, porém a convencional se delonga em atingir uma estabilidade mais consistente, enquanto na modalidade Actiflo®, essa consistência e inclusive maior homogeneidade de flocos é alcançada em menor tempo. Isso pode influir em consumo de energia, bem como restrições de vazões e produtividade em escala real.

Metodologias de Visão Computacional aceleram, viabilizam e proporcionam processos de entendimento que embasam pesquisas e fornecimento de dados para tomadas de decisão. Certamente poderão ser empregados outros parâmetros no desenvolvimento do Floc Image como estatísticos ou mesmo para um número maior de fotos com emprego de máquinas com capacidade de memória e processamento, até mesmo para aquisição de dados e fornecimento de resultados em tempo real.

REFERÊNCIAS

- ALUVINO, G.C.R. **Estudo da aplicação do extrato de semente de *Moringa oleifera* visando a substituição do coagulante sulfato de alumínio em uma estação de tratamento de água para abastecimento.** 2015. 48 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Industrial Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.
- AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K.M. Rapid-mix design for mechanisms of alumcoagulation. **Journal (American Water Works Association)**, p. 210-216, 1982.
- BANKS, W.A.; NIEHOFF, M.L.; DRAGO, D.; ZATTA, P. Aluminum complexing enhances amyloid β protein penetration of blood–brain barrier. **Brain Research** .v. 1116, p. 215, 2016.
- BARTIKO, D; DE JULIO, M. Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. **Revista Ambiente e Água**, v. 10, p. 71-81, 2014.
- BARTIKO, D. **Avaliação da influência de diferentes gradientes de velocidade e tempos de quebra sobre a potencialidade de recrescimento de flocos empregando umequipamento de monitoramento contínuo da floculação.** 2014. Tese de Mestrado -Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- BELTRÁN-HEREDIA, J, SANCHEZ-MARTIN, J, MARTIN-SANCHEZ, C., Remediation of dye- polluted solutions by a new tannin- based coagulant. **Industrial Engineering Chemistry Research**. v. 50, n.2, p. 686-93, 2011.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº. 2914/2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consume humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, 12 dez., 2011.
- CONAMA n. 357. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.** Data da legislação:17/03/2005 – Publicação DOU n. 053, de 18/03/2005, p.58-63.
- CRUZ, D. B. **Aplicação do índice de floculação no controle da dosagem de sulfato de alumínio na água da Estação de Tratamento de Água do DCTA** 2017. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil – Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- DANTAS, A.D.B. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2ed., São Carlos: **RiMA**, 1565 p., 2005.
- DE JULIO, M.; FIOVARANTE. D.A.; SELHORST FILHO, O.; DE JULIO, T.S.; OROSKI, F.I. Avaliação da remoção de cianobactérias e saxitoxinas da água bruta afluenta a ETA Pitangui de Ponta Grossa/PR, utilizando os diagramas de coagulação para o cloreto férrico e o reagente de Fenton. **Holos Environment**, v. 9, n. 2, p. 254-273, 2009.

- DE JULIO, M.; RIBAS, A.B.; SILVA, B.L.; CUNHA, W. C. Desenvolvimento de equipamento de monitoramento contínuo da floculação. **Revista DAE**, p. 13-23, 2015.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2ed., São Carlos: Rima, 2005.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. Tratabilidade de água e dosresíduos gerados em estações de tratamento de água. **LDiBe**, São Carlos, 2011.
- DRISCOLL, C.T.; LETTERMAN, R.D. Chemistry and fate of Al(III) in treated drinking water. **Journal of Environmental Engineering**, v.114, n.21, 1988.
- EDZWALD, J. K. **Water Quality and Treatment**. 6th Edition. New York: McGraw - Hill. 1686 p., 2011.
- FEDALA, N.; LOUNICIH, D.N.; MAMERI, N.; DROUCHE, M. Physical parameters affecting coagulation of turbid water with *Opuntia ficus-indica* cactus. **Ecological Engineering**. v. 77, p. 33-36, 2015.
- FONSECA, C.R. **Uso combinado de processos de separação visando destoxificação de hidrolisado hemicelulósico**. 2012. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2011.
- FILHO, O.S.; WIECHETECK, G.K.; FILHO, A.G.; DÖLL, M.M. Otimização de parâmetros de clarificação de água do sistema de tratamento de Ponta Grossa (PR). **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 3, n. 2, p. 35–46, 2011.
- FITZPATRICK, C.S.; GREGORY, J., Coagulation and filtration. **The handbook of water and wastewater microbiology**. Academic, London, 2003.
- GAUTHIER, E.; FORTIER, I.; COURCHESNE, F.; PEPIN, P.; MORTIMER, J.; GAUVREAU, D. Aluminum forms in drinking water and risk of Alzheimer’s disease. **Environmental Research**, v. 84, p. 234, 2000.
- GREGORY, J.; NELSON, D.W. Monitoring of aggregates in flowing suspensions. **Colloids and Surfaces**, v. 18, p.175-188, 1986.
- GREGORY, J.; ROSSI, L. Dynamic testing of water treatment coagulants. **Water Science and Technology**, v.1, n. 4, p.65-72, 2001.
- HILSDORF, S., Tratamento Terciário ActifloTM Carb: Remoção de Orgânicos Solúveis Refratários. **Pollution Engineering**, p. 46-50, 2013.
- KIM, S.; MOON, B.; LEE, H. Effects of pH and dosage on pollutant removal and floc structure during coagulation. **Micochemical Journal**, v. 68, p. 197-203, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0026-265x\(00\)00146-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0026-265x(00)00146-6).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de saneamento básico**. Rio de Janeiro, 2010. 219p. Disponível em:

http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb2008/PNSB_2008.PDF Acesso em: 1 ago, 2020.

KARANJA A.; FENGTING L.; NG'ANG'A.W. Use of cactus opuntia as a natural coagulant: water treatment in developing countries. **International Journal of Advanced Research**. v.5, n.3, p. 884-94, 2017.

LIMA JUNIOR, R.N., ABREU, F.O.M.S. Produtos naturais utilizados como coagulantes e floculantes para tratamento de águas: uma revisão sobre benefícios e potencialidades. **Revista Virtual Química** v.10, n. 3, p.709-735, 2018.

LIMA, R.P.; ALMEIDA, I.V.; VICENTINI, V.E.P. Os diferentes tipos de coagulantes para o tratamento de água: uma revisão. **Evidência Biociências, Saúde e Inovação**, v.20, n.1, p.9 - 22, jan./jun. de 2020.

MAGACHO, A.L.F. **Avaliação de técnicas de separação combinadas para a purificação de xilose visando a obtenção de bioprodutos**. 2009. 167 f. Dissertação (*Mestrado em Engenharia Química*) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria nº 518 de 25 de março de 2004.

MORUZZI, R.B.; DE OLIVEIRA, A.L.; DE JULIO, M. Equipamento de Monitoramento Contínuo da Flocculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração. **Revista DAE**, n. 200, p. 25-36, 2015.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K.S.; TALBO, B.G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, v. 29, p.703, 1995.

OUR SOLUTIONS FOR MUNICIPALITIES AND INDUSTRIES. Sistema Actiflo. França, 2022. Disponível em: [http:// www.technomaps.veoliwatertechnologies.com](http://www.technomaps.veoliwatertechnologies.com). Acesso em: 9 set, 2022.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, flocculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. 216f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

QASIM, S.R.; MOTLEY, E.M.; ZHU, G. Water Works Engineering – **Planning, Design & Operation**. Prentice Hall PTR. 2000;844p.

RONDEAU, V.; JACQMIN-GADDA, H.; COMMENGES, D.; HELMER, C.; DARTIGUES, J. F. Aluminium and silica in drinking water and the risk of Alzheimer's disease or cognitive decline: findings from 15-year follow-up of the PAQUID cohort. **American Journal of Epidemiology**, v.169, p. 489, 2008.

RICHTER, C.A.; AZEVEDO NETTO, J.M. **Tratamento de água – tecnologia atualizada**, São Paulo, p.24-28, 1991.

RICHTER, C.A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. Edgard Blucher, 2009.

SANTOS, H.R.; PRADO, G.S. do; VIDAL, C.M. de S.; MORUZZI, R.B.; CAMPOS, J.R. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.9, n.4, p. 291-300, 2004.

SANTOS, H.R. **Coagulação/precipitação de efluentes de reator anaeróbio deleito expandido e de sistema de lodo ativado precedido de reator UASB, com remoção de partículas por sedimentação ou flotação**. 2006. 330 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.