

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

ADOLFO FREITAS TERRA SILVA

**ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE  
PARTÍCULAS (DTP) NO PROCESSO DE FLOCULAÇÃO DE ÁGUA COM COR  
ELEVADA**

Uberlândia – MG

2017

ADOLFO FREITAS TERRA SILVA

**ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE  
PARTÍCULAS (DTP) NO PROCESSO DE FLOCULAÇÃO DE ÁGUA COM COR  
ELEVADA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito para obtenção de  
título de Bacharel em Engenharia Ambiental  
pela Universidade Federal de Uberlândia

Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

Uberlândia – MG

2017

ADOLFO FREITAS TERRA SILVA

**ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE  
PARTÍCULAS (DTP) NO PROCESSO DE FLOCULAÇÃO DE ÁGUA COM COR  
ELEVADA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito para obtenção de  
título de Bacharel em Engenharia Ambiental  
pela Universidade Federal de Uberlândia

APROVADO em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2017.

Carlos Eugênio Pereira – Docente FECIV

UFU

Iridalques Fernandes de Paula – Docente FECIV

UFU

Prof. Dr. André Luiz de Oliveira  
FECIV-UFU  
(Orientador)

Uberlândia – MG

2017

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Equipamento de <i>Jar Test</i> utilizado nos ensaios de coagulação e floculação ..... | 10 |
| Figura 2 - Equipamento de <i>Jar Test</i> acoplado com câmera e <i>Laser Pointer</i> .....       | 12 |
| Figura 3 - Diagrama de coagulação .....                                                          | 14 |
| Figura 4 - Distribuição do tamanho de partículas (DTP) .....                                     | 15 |
| Figura 5 - Distribuição do tamanho de partículas (DTP) .....                                     | 16 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela I - Configuração da câmera acoplada ao <i>Jar Test</i> .....                | 11 |
| Tabela II - Configuração do <i>Laser Pointer</i> acoplada ao <i>Jar Test</i> ..... | 11 |

## SUMÁRIO

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                              | 8  |
| 2. MATERIAIS E MÉTODOS .....                     | 9  |
| 2.1 CONSTRUÇÃO DOS DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO ..... | 9  |
| 2.2 CAPTURA DAS IMAGENS .....                    | 11 |
| 2.3 TRATAMENTO DAS IMAGENS .....                 | 12 |
| 2.4 ANÁLISE DAS IMAGENS .....                    | 13 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                  | 13 |
| 4. CONCLUSÃO .....                               | 18 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....              | 19 |

# **Acompanhamento da evolução da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) no processo de floculação de água com cor elevada**

## ***Monitoring of the evolution of the Particle Size Distribution (DTP) in the flocculation process of high color water***

Adolfo Freitas Terra Silva<sup>1</sup>; André Luis de Oliveira<sup>2</sup>

### **RESUMO**

Este artigo apresenta a avaliação do processo de floculação por acompanhamento contínuo da formação dos flocos em um reator estático *Jar Test* através da obtenção de imagens dos flocos para estudos da Distribuição Total de Partículas (DTP) em diferentes Gradientes Médios de Velocidade de Floculação ( $G_f$ ) e Tempos de Floculação ( $T_f$ ). A água de estudo foi preparada com cor aparente de 100 uH com utilização de ácido húmico comercial da marca *Sigma-Aldrich*. O processo de floculação foi conduzido em equipamento de *Jartest* utilizando-se sulfato de alumínio como agente coagulante, e ácido sulfúrico e hidróxido de alumínio como corretores de pH. Esse trabalho foi dividido em quatro partes: construção do diagrama de coagulação, captura, tratamento e análise das imagens. Na primeira parte, com base no diagrama de coagulação com velocidade de sedimentação de 1 cm/min, selecionou-se um ponto cujo mecanismo predominante foi o de varredura, com 89% de remoção de cor aparente, dosagem de coagulante de 9,5 mg/L e pH de 6,18. Na segunda parte, capturou-se 40 imagens para diferentes  $G_f$  e  $T_f$ . Na terceira parte, utilizou-se o software livre *Image J* para tratamento das imagens para determinação das características dos flocos. Por fim, na quarta parte, trabalhou-se com os dados de DTP obtidos da fase anterior. Com o aumento do  $G_f$ , como esperado, em função do aumento das taxas de cisalhamento dos flocos, há formação de flocos de menores tamanhos; em contrapartida, a menores  $G_f$ , houve um deslocamento para o sentido de maiores flocos, neste caso, com grande concentração de flocos com tamanhos intermediários. Observou-se um equilíbrio da taxa de formação e ruptura dos flocos ao longo do tempo de floculação, podendo verificar que o patamar de estabilização foi alcançado.

**Palavras-chave:** floculação; distribuição de tamanho de partículas; imagens.

### **ABSTRACT**

This article presents an evaluation of the flocculation process by continuous follow-up of the floc formation in a static reactor *Jar Test* throughout image acquisition of flocs to study the Particle Size Distribution (PSD) using different Flocculation Speed Average Gradients ( $G_f$ ) and Flocculation Times ( $T_f$ ). The studied water was prepared with 100 uH of high apparent color by using humic acid. The flocculation process was conducted in a *Jartest* equipment using aluminum sulphate as coagulant, and sulfuric acid and aluminum hydroxide as pH correctors. This work was divided into four parts: construction of the coagulation diagram, capitation, treatment and analysis of the images. In the first part, based on a coagulation diagram with sedimentation velocity of 1 cm/min, a point was selected in which the predominant mechanism was scanning, with 89% apparent color removal, coagulant dosage of 9.5 mg/L and pH of 6.18. In the second part, 40 images were captured for different  $G_f$  and  $T_f$ . In the third part, the open source *Image J* was used for image treatments to determine the characteristics of the flocs. Lastly, in the fourth part, the DTP data obtained from the previous phase were studied. The increase of  $G_f$ , as it was expected, due to the increase of the shear rates of the flocs, there is a formation of lower size flocs; on the other hand, the decrease of  $G_f$ , there is a tendency to form larger size flocs, in this case, with great concentration of intermediate flocs. It was observed a balance of both formation and rupture rate of the flocs throughout the flocculation time, being able to verify that the stabilization plateau was reached.

**Keywords:** flocculation; particle size distribution; images.

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – Uberlândia (MG), Brasil. Email: adolfo@ufu.br.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Civil pela (USP). Professor do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – Uberlândia (MG), Brasil. Email: andreoliveirafeciv@ufu.br

# 1 INTRODUÇÃO

As características físicas, químicas e biológicas da água estão associadas a uma série de processos que ocorrem no corpo hídrico e em sua bacia de drenagem (FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE, 2014). Gauto e Rosa (2013) afirmam que de acordo com a quantidade e natureza do material presente, a existência de substâncias dissolvidas ou em suspensão provoca cor. Também afirmam que, a matéria orgânica, derivada de vegetais (húmus e taninos) em decomposição, bem como minerais de ferro e manganês, geralmente resulta em cor nas águas. Ainda afirmam que efluentes industriais provindos da mineração, papel e celulose, alimentos, e outras, normalmente também causam cor na água.

Para Franco (2009), existem várias tecnologias para se alcançar uma água própria para o consumo humano. Como o tratamento a ser empregado está ligado às propriedades da água bruta captada, cada caso requer tecnologia específica, ou mais avançada ou mais simplificada, desde filtração lenta a processos oxidativos avançados.

De uma maneira ampla, pode-se dividir os mecanismos de coagulação em quatro tipos: compressão da dupla camada, neutralização-adsorção de cargas, varredura e formação de pontes (GONÇALVES; PIOTTO; RESENDE, 1997). No mecanismo de compressão da dupla camada elétrica ocorre a desestabilização das partículas coloidais por meio da adição de íons de carga opostas, havendo crescimento das partículas em decorrência das suas colisões (PAVANELLI, 2001; METCALF; EDDY, 2003). Já no mecanismo de adsorção-neutralização de cargas ocorre a neutralização das cargas das partículas existentes na água bruta, sendo dispensável a formação de flocos sedimentáveis, para assim, desestabilizar as partículas para serem mais eficientemente retidas nos filtros (SANTOS *et al.*, 2004). No mecanismo de varredura ocorre a adição de dosagens superiores de coagulante à água se comparado ao mecanismo de adsorção-neutralização de cargas, ocasionando a formação de precipitados (DI BERNADO; DANTAS, 2005). Por fim, no mecanismo de formação de pontes ocorrem as interações entre os sítios ativos dos compostos orgânicos de cadeia longa (polímeros) e os coloides, promovendo a sua aglomeração (GONÇALVES; PIOTTO; RESENDE, 1997). Geralmente, nos processos de tratamento de água de ciclo completo mais empregados no Brasil, utiliza-se o mecanismo de varredura para formação de flocos, os quais deseja-se que sejam resistentes ao deslocamento nas etapas do processo de tratamento e apresentam boa distribuição de tamanho para sua remoção em função da tecnologia de tratamento empregada.

Para Jarvis *et al.* (2005), a resistência do floco está totalmente vinculada com sua estrutura, que é dependente do processo de formação. Durante a floculação, a agregação e a ruptura dos flocos, efeitos principais da cinética dos encontros entre partículas, definem a distribuição de tamanho. A agregação acontece a partir dos encontros de partículas desestabilizadas, no qual a agitação provoca uma maior taxa de encontros e forma flocos ou aglomerados. Na ruptura acontece a erosão dos flocos, devido as forças de cisalhamento, pronunciada com aumento da agitação e/ou do tempo de floculação.

Santos *et al.* (2004) apontam que a análise de distribuição de tamanho de partículas é utilizada no entendimento dos fenômenos que ocorrem em grande parte das etapas do tratamento, proporcionando a otimização das tecnologias, o estabelecimento de procedimentos operacionais mais eficientes, o aperfeiçoamento dos modelos matemáticos e, portanto, a geração de fluxogramas de estações de tratamento de água e esgoto mais lógicas. Cada técnica de determinação da distribuição de tamanho de partículas associa uma das propriedades destas a um valor de diâmetro, lembrando que resultados diferentes são identificados e não podem ser confrontados (LOPES, 2008).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Construção dos diagramas de coagulação

Na primeira parte deste trabalho, representado pela Figura 1, os experimentos foram conduzidos em equipamento de bancada *Jar Test*, que consiste em uma unidade de coagulação e floculação em escala laboratorial. Neste equipamento, em cada um dos seis jarros, foram adicionados 2L de água com cor aparente de 100 uH, adquirida através de uma solução concentrada de ácido húmico comercial da marca *Sigma-Aldrich*, previamente filtrada com papel de filtro quantitativo. Diferentes alíquotas de sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$ ) foram adicionadas nos 6 tubos de ensaios dosadores frontais para estabelecimento de dosagens variando de 0,25 a 15,0 mg/L. Da mesma forma, diferentes concentrações de ácido clorídrico (HCl) 0,1M, e base 0,1M, 0,5M e 1,0M (NaOH), foram colocadas nos outros 6 tubos de ensaios dosadores. Para simular a etapa de mistura rápida, o *Jar Test* era ligado em uma rotação correspondente para com um gradiente de mistura rápida ( $G_{mr}$ ) de  $600\ s^{-1}$  com a adição ou do acidificante ou alcalinizante, para obtenção do pH de coagulação desejado. Com 5 segundos de rotação, era adicionado o coagulante. Após 10 segundos da adição do coagulante (tempo estabelecido para a mistura rápida –  $T_{mr}$ ), a

rotação *Jar Test* era reduzida para uma rotação correspondente ao gradiente de floculação ( $G_f$ ) de  $20 \text{ s}^{-1}$ , para simular a seguinte etapa, a floculação. Nesse mesmo momento, era feita a coleta de amostras de todos os seis jarros para aferir o pH de coagulação das mesmas, por meio de tubos coletores localizados a 7 cm da lâmina superficial de água. O tempo de floculação ( $T_f$ ) tinha duração de 20 minutos. Após esse período, o aparelho era desligado, a fim de começar a fazer as coletas de amostras para três velocidades de sedimentação, determinadas com base nas taxas de sedimentação em decantadores, que são da ordem de 1 a 5 cm/min. Com 1 minuto e 24 segundos, eram coletadas amostras dos seis jarros, que representava o tempo de sedimentação de 5 cm/min. Com 2 minutos e 48 segundos, para 2,5 cm/min. Finalmente, com 7 minutos, para 1 cm/min. Em seguida, o parâmetro cor aparente das amostras coletadas para as diferentes taxas de sedimentação foram determinados por espectrofotometria para a construção dos diagramas de coagulação.

Os registros das leituras de pH de coagulação, dosagem de coagulante e os respectivos valores de cor aparente remanescente foram plotados em diagramas de coagulação, utilizando-se o *software Surfer 10*, utilizando o método de regressão Krigagem na interpolação dos mesmos, de modo a fornecer uma melhor estimativa dos pontos entre os intervalos de pH e dosagem de alumínio não amostrados e deste modo, traçar as curvas de mesma cor aparente remanescente. A krigagem constitui-se num método de estimação linear e local, efetuado dentro de vizinhanças estacionárias, que procura minimizar, sem viés, o erro de estimação (STURARO, 2015)



**Figura 1** - Equipamento de Jar Test utilizado nos ensaios de coagulação e floculação

## 2.2 Captura das imagens

Moreno (2014) define as etapas do processo de aquisição de imagens: adquirir (inicializar; definir o foco; capturar a imagem, otimizar a imagem adquirida); processar (podendo ser manual – medir/calcular); arquivar/armazenar e por fim exibir e analisar. Para a autora, essa fase tem o propósito de transformar uma imagem em uma representação numérica apropriada para o posterior processamento digital.

Seguindo os procedimentos estabelecidos por Moreno (2014) e, baseado em um dos melhores pontos de remoção de cor aparente obtidos no diagrama de coagulação com velocidade de sedimentação de 1 cm/min, cujo mecanismo predominante foi o de varredura, na segunda parte desse trabalho, representado pela Figura 2, foi utilizado o mesmo equipamento de bancada *Jar Test* conjugado com dois outros equipamentos. Uma câmera, cujas configurações são representadas na Tabela I:

**Tabela I** - Configuração da câmera acoplada ao *Jar Test*

|                                    |                                   |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| Marca                              | Nikon                             |
| Modelo                             | D5500                             |
| Megapixel                          | 24,2                              |
| Resolução da lente                 | 6000 x 4000                       |
| Pixel                              | 3,92 $\mu\text{m}$                |
| Abertura do obturador              | F3.5                              |
| Compensação de exposição           | +1 1/3 EV                         |
| Sensibilidade ISO                  | 12.800                            |
| Velocidade de captura do obturador | 1/3200s<br>(312,5 $\mu\text{s}$ ) |
| Frequência de disparo              | 4 qps                             |
| Zoom                               | 18x                               |

Outro equipamento foi um *Laser Pointer* que produzia um plano de luz que “cortava” o jarro em um plano perpendicular à aquisição das imagens com as configurações representadas na Tabela II:

**Tabela II** - Configuração do *Laser Pointer* acoplada ao *Jar Test*

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| Cor da luz          | verde     |
| Potência            | 98.000 mW |
| Comprimento de onda | 532 nm    |
| Espessura           | 2 mm      |

Os experimentos de tratamento de água foram realizados para os gradientes médios de velocidade de floculação ( $G_f$ ) de 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120  $s^{-1}$  nos tempos de floculação ( $T_f$ ) de 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 min. Para cada tempo de floculação eram captadas quarenta fotos durante os segundos iniciais.

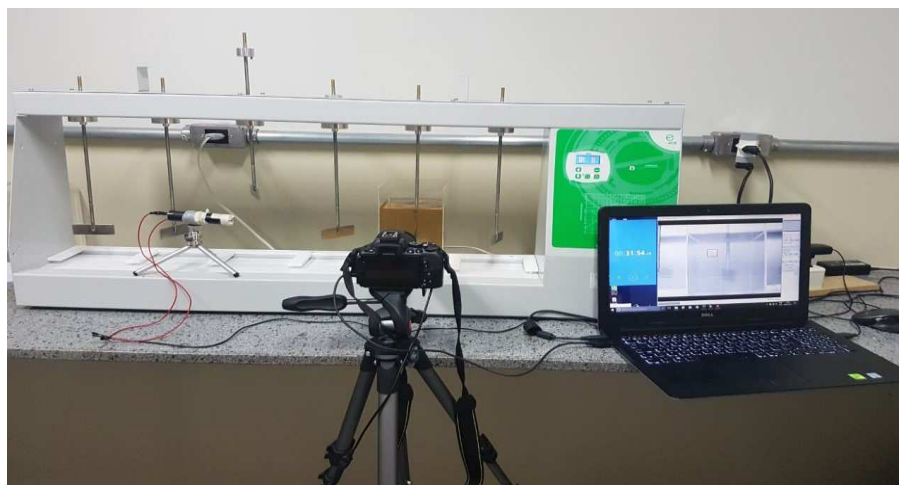


**Figura 2** - Equipamento de Jar Test acoplado com câmera e *Laser Pointer*

### 2.3 Tratamento das imagens

Segundo Moreno (2014) o processo de tratamento envolve quatro etapas: correção da imagem, binarização, segmentação e detecção de objetos, e aquisição de relevantes feições. Neste sentido, o tratamento das imagens foi realizado com auxílio de dois softwares: o *JPEG Crops*, para cortar na mesma região as imagens com flocos capturados; e o *Image J*, para avaliar a cinética de floculação com base na DTP e parâmetros morfológicos dos flocos. No *Image J*, fez-se a calibração através da imagem obtida de uma régua, em centímetros, posicionada no plano luminoso. Essa imagem foi capturada no foco definido para a captura das imagens das partículas floculentas. Através da ferramenta *Set Scale* do próprio software, foi realizado a medida deste comprimento em pixels e sua conversão, que neste caso foi para  $\mu m$ . Foi necessário transformar as imagens capturadas de 24 para 8 bits a fim de obter as imagens binárias. Em seguida, utilizou-se a ferramenta *Threshold* a fim de dividir as imagens em duas classes de pixels, "plano da frente" e "plano de fundo", utilizando o limiar de 60. Segundo Moreira (2011) a segmentação binária (limiarização) é o processo de divisão de uma imagem em sítios homogêneos baseado no critério determinado. Segundo Queiroz e Gomes (2001) há várias variantes de limiarização, específicos para cada caso em especial. O limiar de binarização precisa ser delimitado manualmente para toda imagem a ser

tratada e constitui estágio essencial no tratamento das imagens (MORUZZI; REALI, 2007). O valor do limiar de binarização delineará os objetos de fundo com os pixels mais brilhantes, que são de utilidade para a análise e obtenção das informações sugerida previamente. (JUNKER, 2006).

Após a limiarização era selecionada a função *Analyze Particles*. Diversos atributos podiam ser obtidos de cada uma das partículas (numeração, área, diâmetro máximo e diâmetro mínimo). Para cada tempo de floculação de cada gradiente, era gerada uma planilha em Excel dos parâmetros a serem analisados.

## 2.4 Análise das imagens

Os dados obtidos da etapa anterior foram organizados em ordem crescente, para cada  $G_f$  e  $T_f$ , com numeração do floco, área e diâmetro equivalente ( $d_F$ ), este último de acordo com Junker (2006), Equação 1, onde:

$$d_F = \sqrt{\frac{4 \cdot \text{área}}{\pi}} \quad (1)$$

Para cada tempo de floculação de cada gradiente foi obtido o diâmetro equivalente do floco para sua distribuição em classes de tamanho, no caso deste trabalho, 9 classes. O estabelecimento das classes foi feito considerando-se faixas de mesma amplitude entre os diâmetros mínimo e máximo das amostras.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito na primeira parte do trabalho, obteve-se as remoções de cor aparente remanescente, em porcentagem, em função do par de valores pH de coagulação e dosagem de alumínio plotados em forma de diagramas de coagulação. Conforme a Figura 3, segue o diagrama de melhor remoção, com velocidade de sedimentação de 1 cm/min. O ponto selecionado está identificado com um “X” (remoção de cor aparente de 89%, dosagem de coagulante de 9,5 mg/L e pH de 6,18).

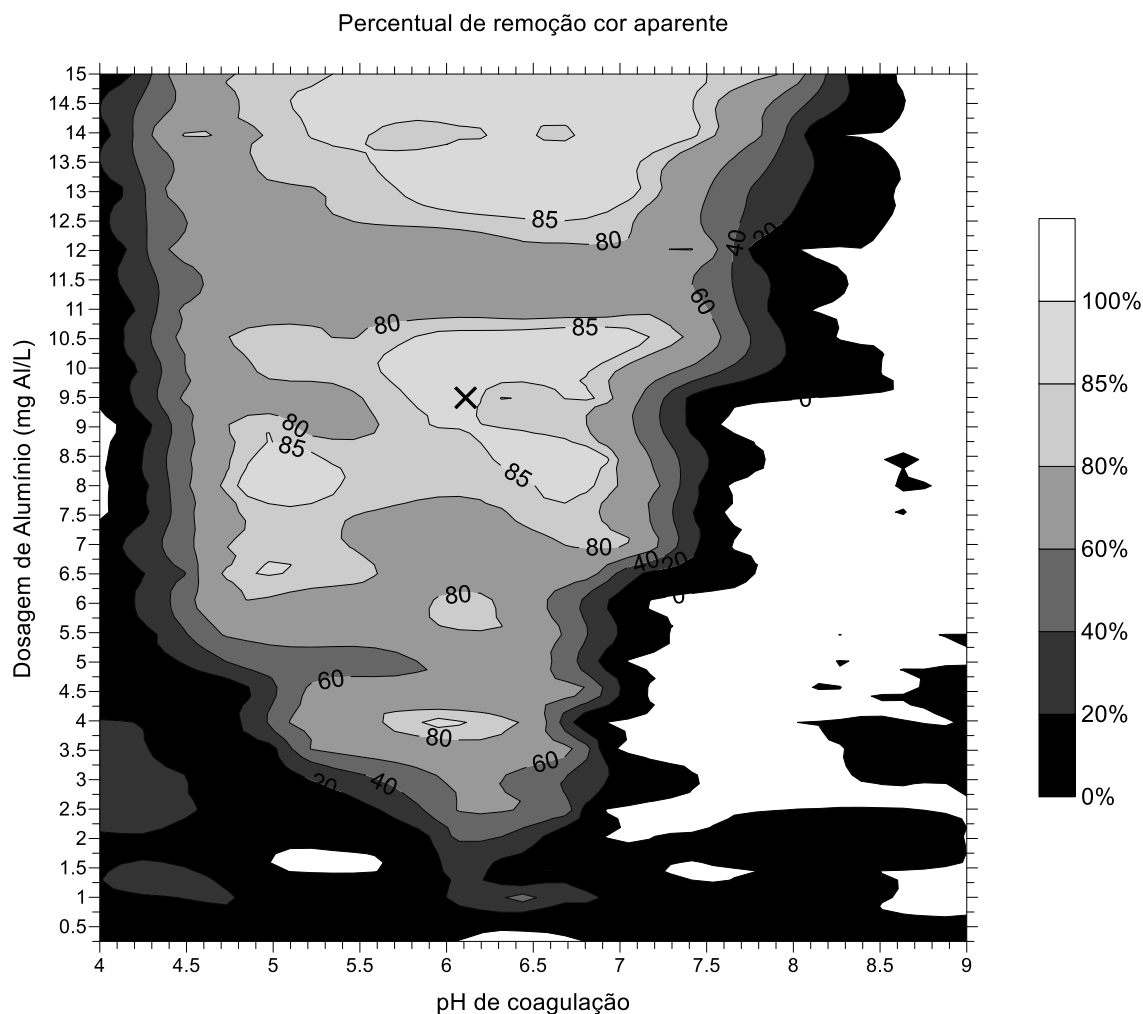


**Figura 3** - Diagrama de coagulação contendo curvas com valores de cor aparente remanescente (uH) após floculação e sedimentação ( $V_s = 1$  cm/min) em função da dosagem de alumínio e pH de coagulação - água com cor aparente de 100 uH.

Conforme descrito, os dados obtidos foram classificados em 9 classes, como apresentando nas Figuras 4 e 5. Os gráficos ilustrados nestas figuras são representações do resultado das forças cisalhantes e de agregação que atuam sobre os flocos ao longo do desenvolvimento do processo de floculação (60 minutos). As curvas de DTP foram obtidas a partir do tratamento das imagens para cada tempo de cada gradiente.

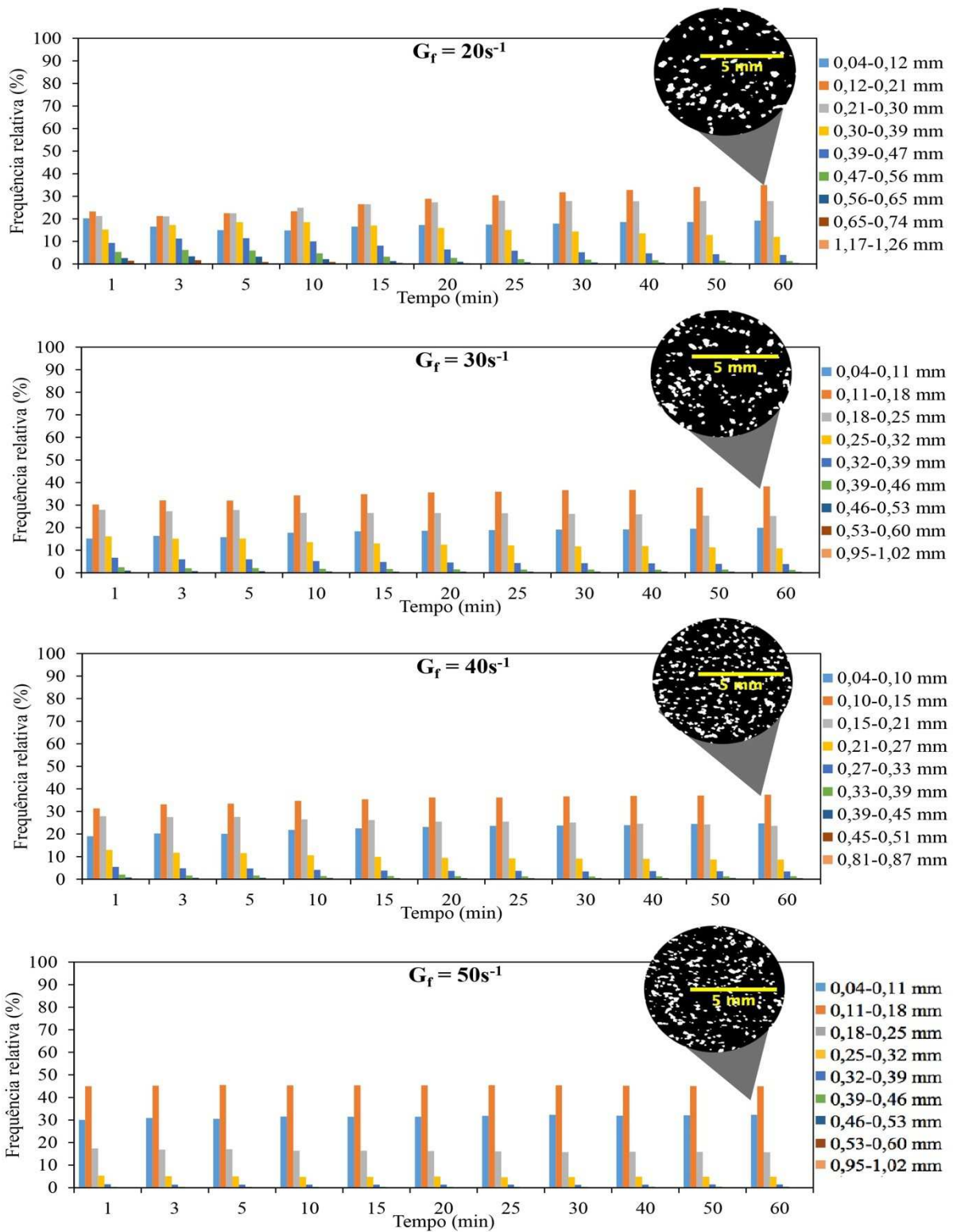


**Figura 4** - Distribuição do tamanho de partículas (DTP) para  $G_f = 20s^{-1}$ ,  $G_f = 30s^{-1}$ ,  $G_f = 40s^{-1}$ ,  $G_f = 50s^{-1}$ , em  $T_f = 1$  min,  $T_f = 3$  min,  $T_f = 5$  min,  $T_f = 10$  min,  $T_f = 15$  min,  $T_f = 20$  min,  $T_f = 25$  min,  $T_f = 30$  min,  $T_f = 40$  min,  $T_f = 50$  min e  $T_f = 60$  min, dividida em 9 classes, com imagem binarizada dos flocos formados em  $T_f = 60$  min em jarro único.

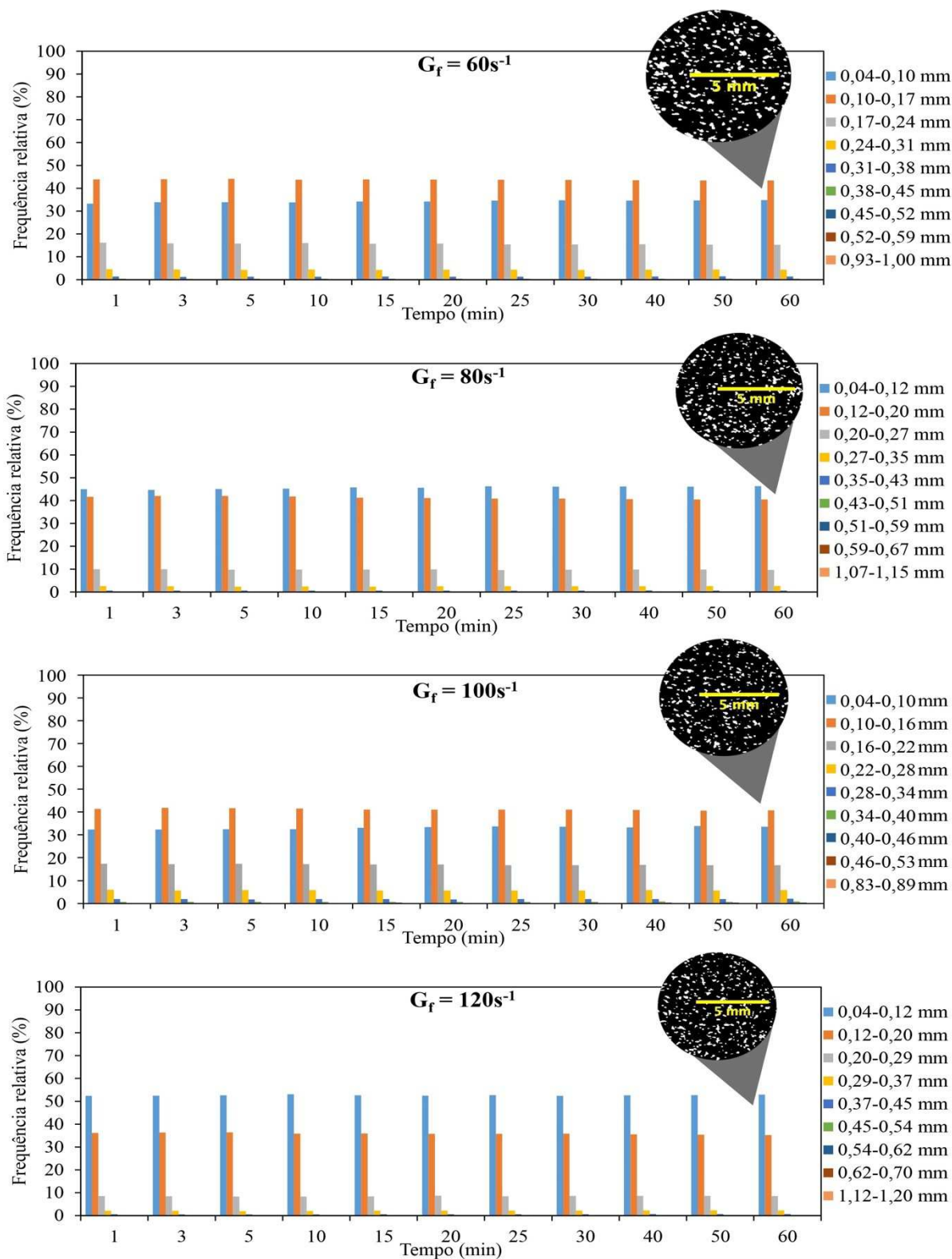


**Figura 5** - Distribuição do tamanho de partículas (DTP) para  $G_f = 60s^{-1}$ ,  $G_f = 80s^{-1}$ ,  $G_f = 100s^{-1}$ ,  $G_f = 120s^{-1}$ , em  $T_f = 1min$ ,  $T_f = 3min$ ,  $T_f = 5min$ ,  $T_f = 10min$ ,  $T_f = 15min$ ,  $T_f = 20min$ ,  $T_f = 25min$ ,  $T_f = 30min$ ,  $T_f = 40min$ ,  $T_f = 50min$  e  $T_f = 60min$ , dividida em 9 classes, com imagem binarizada dos flocos formados em  $T_f = 60min$  em jarro único.

Pode-se verificar que para todos os gradientes de velocidade, exceto para os gradientes  $G_f = 80s^{-1}$  e  $G_f = 120s^{-1}$ , a segunda classe é a que apresenta maior quantidade de partículas, que compreende flocos entre 0,10 e 0,21 mm. Entretanto, para os gradientes  $G_f = 80s^{-1}$  e  $G_f = 120s^{-1}$  é evidenciada uma concentração maior de partículas com diâmetros menores, compreendendo flocos entre 0,04 a 0,12 mm.

De uma maneira geral, observa-se três tendências. A primeira é que, para partículas sedimentáveis, quanto maior a energia de floculação, em outras palavras, quanto maior gradiente médio de velocidade, maior é a quebra das partículas floculentas, gerando flocos de pequenos tamanhos. Essa proporcionalidade entre a diminuição da presença de partículas maiores e aumento do gradiente médio velocidade é justificada por grande parte dos modelos cinéticos e colisionais, como colocado por Argaman e Kauffman (1970) e Parker *et al.* (1972). A segunda é que, para partículas não-sedimentáveis, quanto menor a energia de floculação, maior é a aglomeração das partículas floculentas, gerando flocos de maiores tamanhos. A terceira é que, quanto menor a energia de floculação, maior é achatamento da distribuição do tamanho de partículas, uma vez que há boa representação de flocos em todas as classes de tamanho. Conforme justificado por Silva (2016), os diâmetros das partículas maiores tendem a diminuir com uma maior taxa de cisalhamento.

Pelas imagens dos flocos formados para o último tempo de floculação,  $T_f = 60$  min, observa-se uma diferença notável quanto ao tamanho dos flocos para os gradientes iniciais e finais, sendo os primeiros gradientes maiores que os últimos, entretanto, observa-se uma tendência de estabilização em termos de diâmetros médios. Apesar dos últimos gradientes apresentarem classes de flocos com diâmetros maiores, eles estão presentes em pequena quantidade. Isso reforça a ideia de que quanto maior o gradiente médio de velocidade, maior a quebra das partículas. Observa-se ainda nas imagens com  $T_f = 60$  min, que quanto maior o valor de  $G_f$ , menor o tempo de estabilização da floculação.

## 4 CONCLUSÃO

Os resultados e discussões apresentados neste trabalho permitem concluir que quanto menor o gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_f$ ) maior o número de flocos formados com tamanhos intermediários e deslocados para o sentido da direita da distribuição, ou seja, para a faixa de maiores diâmetros. Por outro lado, quanto maior o  $G_f$ , maior o número de flocos formados, porém há concentração de flocos menores. Este estudo é importante, principalmente para ratificar as conclusões de Bratby (1981) e Argaman e Kaufman (1970) de que a partir de um determinado tempo de floculação há o estabelecimento de um patamar de estabilização de tamanho médio dos flocos.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARGAMAN, Y., KAUFMAN, W.J. Turbulence and flocculation. *Journal Sanitary Eng. Div.*, ASCE 96, SA 2, abr, 1970.

BOTERO, W. G. *Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola*. 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química de Araraquara, Universidade Estadual Paulista, Araraquara.

BRASIL. IBGE. *Censo Demográfico*, 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/27032002pnsb.shtm>>. Acesso em: 6 abr. 2017.

BRATBY, J. R. Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. *Journal American Water Works Association*, v. 73, n. 6, p. 318-325, 1981.

CONSTANTINO, L. T. *Ruptura e recrescimento de flocos em água com substâncias húmicas aquáticas coagulada com sulfato de alumínio e cloreto férrico*. 2008. 186 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. ed. São Carlos: RiMA, 2005.

FRANCO, E. S. *Avaliação da influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção da turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estações de tratamento de água*. 2009. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. *Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs*. Brasília (Brasil): Ministério da Saúde, 2014. Disponível em <[http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files\\_mf/manualcont\\_quali\\_agua\\_tecnicos\\_trab\\_emetas.pdf](http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manualcont_quali_agua_tecnicos_trab_emetas.pdf)>. Acessado em: 23 jul. 2017.

GAUTO, M.; ROSA, G. *Química industrial*. Porto Alegre: Bookman, 2013. 282 p.

GONÇALVES, R. F.; PIOTTO, Z. C.; RESENDE, M. B. Influência dos mecanismos de coagulação da água bruta na reciclagem de coagulantes em lodos de estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: ABES, 1997. p. 1353-1366.

JARVIS, P. et al. A review of floc strength and breakage. *Water research*, v. 39, n. 14, p. 3121-37, set. 2005.

JUNKER, B. Measurement of bubble and pellet size distributions: past and current image analysis technology. *Bioprocess Biosyst Eng*, v. 29, p. 185-206, 2006.

LOPES, G. J. R. *Avaliação da turbidez e do tamanho de partículas como parâmetros indiciadores da remoção de oocistos de Cryptosporidium SSP. nas etapas de clarificação no tratamento da água em ciclo completo*. 2008. 143 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

METCALF, EDDY. *Wastewater Engineering treatment Disposal Reuse*. 4. ed. Nova Iorque: McGraw - Hill Book, 1815p. 2003

MOREIRA, A. C. Métodos para segmentação binária para imagens em tons de cinza. *LFNATEC-Publicação Técnica do Laboratório de Física Nuclear Aplicada*, v. 15, n. 2, out. 2011.

MORENO, P. *Emprego de técnica dedicada de análise de imagem na avaliação do produto gt no desempenho da floculação*. 2014. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru.

MORUZZI, R. B; REALI, M. A. P. Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. *Eng. amb. san.*, vol. 12, n. 3, 273-283, jul/set 2007.

PAVANELLI, G. *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação da água com cor ou turbidez elevada*. 2001. 233 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2001.

QUEIROZ, J. E. R; GOMES, H. M. Introdução ao Processamento Digital de Imagens. *RITA*, v. 8, n. 1, 2001.

SANTOS et al. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. *Eng. amb. san.*, vol. 9, n. 4, 291-300, out/dez 2004.

SILVA, P. A. G. *Força e dimensão fractal para floco de caulinita coagulado com sal de alumínio aplicado ao tratamento de água para abastecimento*. 2008. 24 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

STURARO, J. R. Apostila de geoestatística básica. Rio Claro. 2015. Departamento de Geologia Aplicada – IGCE.