

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD) E
DA SEDIMENTAÇÃO E SUA RELAÇÃO COM DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE
PARTÍCULAS E FRACTAL**

Thaís de Almeida

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro (SP)

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

THAÍS DE ALMEIDA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEDIMENTAÇÃO E
SUA RELAÇÃO COM DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE
PARTÍCULAS E COM AGREGADOS DE FRACTAL

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP

2017

628.092 Almeida, Thaís de
A447a Avaliação do desempenho da sedimentação e sua relação
com distribuição do tamanho de partículas e com agregados
de fractal / Thaís de Almeida. - Rio Claro, 2017
40 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado -
Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi

1. Engenharia ambiental. 2. Tratamento de água de
abastecimento. 3. ETA. 4. Floculação. 5. DTP. I. Título.

THAÍS DE ALMEIDA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEDIMENTAÇÃO E
SUA RELAÇÃO COM DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE
PARTÍCULAS E COM AGREGADOS DE FRACTAL

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

_____ (orientador)

Rio Claro, _____ de _____ de _____.

Thaís De Almeida

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Resumo:

O presente estudo teve como objetivo investigar o desempenho da sedimentação e sua relação com as características físicas das partículas flocculentas. Para tal, foi investigada em escala de laboratório uma água preparada com ácido húmico e coagulada com Sulfato de Alumínio. O processo de floculação foi monitorado por análise de imagem digital visando determinar a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP), e seu parâmetro representativo β , bem como a morfologia de Fractal dos flocos. A correlação foi investigada usando o coeficiente de correlação Pearson (r). Os resultados demonstraram que quanto maior o parâmetro β , maior o residual remanescente ($r \geq 0,84$), e que quanto maior a média dos diâmetros da partícula, menor o residual remanescente ($r \leq -0,98$).

Palavras-chave: Distribuição do Tamanho de Partículas. DTP. Fractal. Floculação. Sedimentação.

Abstract:

The present study intended to investigate the sedimentation performance and its relation with the physical characteristics of flocculent particles. For this purpose, a water prepared with humic acid and coagulated with Aluminum Sulfate was investigated on a laboratory scale. The flocculation process was monitored by digital image analysis to determine the Particle Size Distribution (DTP), and its representative parameter β , as well as the Fractal morphology of the flakes. The correlation was investigated using the Pearson correlation coefficient (r). The results showed that the larger the β parameter, the greater the remaining residual ($r \geq 0.84$), and the larger the mean particle diameters, the smaller the remaining residual ($r \leq -0.98$).

Key words: Particle Size Distribution. (DTP). Fractal. Flocculation. Sedimentation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVO.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1 Fluxograma de Processos.....	9
3.2 Preparação da água de estudo.....	10
3.3 Ensaio de Floculação.....	10
3.4 Ensaio de Sedimentação.....	11
3.5 Fração Residual Remanescente (Frr).....	11
3.6 Monitoramento dos agregados formados durante a floculação.....	12
3.7 Determinação dos atributos de interesse.....	16
3.7.1 Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP).....	16
3.7.2 Parâmetro representativo da função contínua de distribuição de tamanho (β).....	16
3.7.3 Dimensão de Fractal (D_f).....	17
3.8 Coeficiente de correlação de Pearson (r).....	19
4. RESULTADOS.....	20
4.1 Floculação.....	20
4.2 Fração Residual Remanescente (Frr).....	21
4.3 Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP).....	24

4.4 Parâmetro representativo da função contínua de distribuição de tamanho (β).....	29
4.5 Dimensão de Fractal (D_f).....	32
4.6 Coeficiente de correlação de Pearson (r).....	35
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
6. CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

1. Introdução

A água destinada ao consumo humano deve preencher condições mínimas para que possa ser utilizada. Por esse motivo, o tratamento da água de abastecimento é de extrema importância, pois elimina impurezas e diminui as chances de veiculação de doenças relacionadas a microrganismos patogênicos que podem estar presentes. Assim, as Estações de Tratamento de Água (ETAs) se tornam cada vez mais essenciais, pois seus processos garantem água de qualidade para a população e indústrias.

O presente trabalho de formatura objetivou aumentar o entendimento acerca do assunto e melhorar a eficiência no tratamento das águas de abastecimento por meio de estudos dos aspectos da distribuição de tamanho e da morfologia da partícula, na remoção dos flocos por sedimentação gravitacional.

Para obter a remoção das partículas presentes na água é necessária a coagulação, este é um processo de tratamento de água que consiste na desestabilização química de impurezas resultante da alteração da qualidade da água. (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Após esse processo, é realizada a floculação, que promove a agregação das partículas desestabilizadas na coagulação por meio da variação espacial da velocidade, transformando partículas discretas e de pequenas dimensões em agregados maiores, conhecidos como flocos (BALTAR e OLIVEIRA, 1998; HOGG, 2000) apud (LI *et al.*, 2006).

Após essas etapas, pode ser realizada a sedimentação, ou outro método de separação sólido-líquido.

A sedimentação é uma operação física em que se utiliza a gravidade com o propósito de assentar os sólidos suspensos na água, e para ocorrer da maneira prevista é necessário que o fluido não seja exposto a grandes perturbações de movimento.

A eficiência das etapas deve ser garantida, o monitoramento é essencial na rotina de tratamento. Para monitoramento do desempenho da separação sólido-líquido são utilizados parâmetros de qualidade. Os parâmetros normalmente medidos são basicamente os parâmetros indiretos (como DBO, OD, etc.), entretanto, métodos

diretos também podem ser grandes aliados. Segundo Santos *et al.* (2004) a análise de tamanho de partículas pode auxiliar na decisão e na melhoria de tecnologias de tratamento e na adoção de técnicas operacionais apropriadas a cada situação de tratamento de água. As características dos flocos, tais como sua distribuição de tamanho e estrutura morfológica, são medições diretas das propriedades físicas dos agregados que fornecem informações adicionais para aprimoramento do desempenho das unidades de separação.

As hipóteses de forma circular e de porosidade nula, *i.e.* de estrutura compacta dos agregados, decorrentes da simplificação da avaliação direta de material particulado ainda constituem um grande desafio, visto que nos flocos predominam formas irregulares e estruturas porosas (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Nesse contexto, o estudo dessas características podem auxiliar no entendimento do comportamento da sedimentação dos agregados de Fractal, submetidos a diferentes velocidades de sedimentação (V_s) em uma ETA.

Vale mencionar que esse trabalho se insere em um grupo de pesquisa que busca entender a dinâmica da formação de agregados e sua relação com o desempenho de processos de separação sólido-líquido. Especificamente, este estudo, pretendeu avaliar o desempenho da sedimentação, e sua relação com a Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) e a dimensão bidimensional de Fractal.

2. Objetivo

Avaliar e correlacionar o desempenho da sedimentação com a Distribuição do Tamanho de Partículas e morfologia dos agregados de Fractal.

3. Material e Métodos

3.1 Fluxograma de Processos

Na Figura 1 apresenta-se um fluxograma geral dos ensaios realizados. Foram investigadas diferentes dosagens de coagulante (Al^{+3}) em valores de pH de coagulação de 5,5, combinados com diferentes valores de gradiente médio de floculação (G_f) e tempos de floculação (T_f), com registros de Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) e de Dimensão de Fractal (Df). As melhores condições definidas nas etapas anteriores foram aplicadas para separação sólido/líquido em diferentes velocidades de sedimentação (V_s). O desempenho da sedimentação foi avaliado por meio da construção das curvas de sedimentação, que relaciona fração residual remanescente (F_{rr}) com velocidade de sedimentação (V_s).

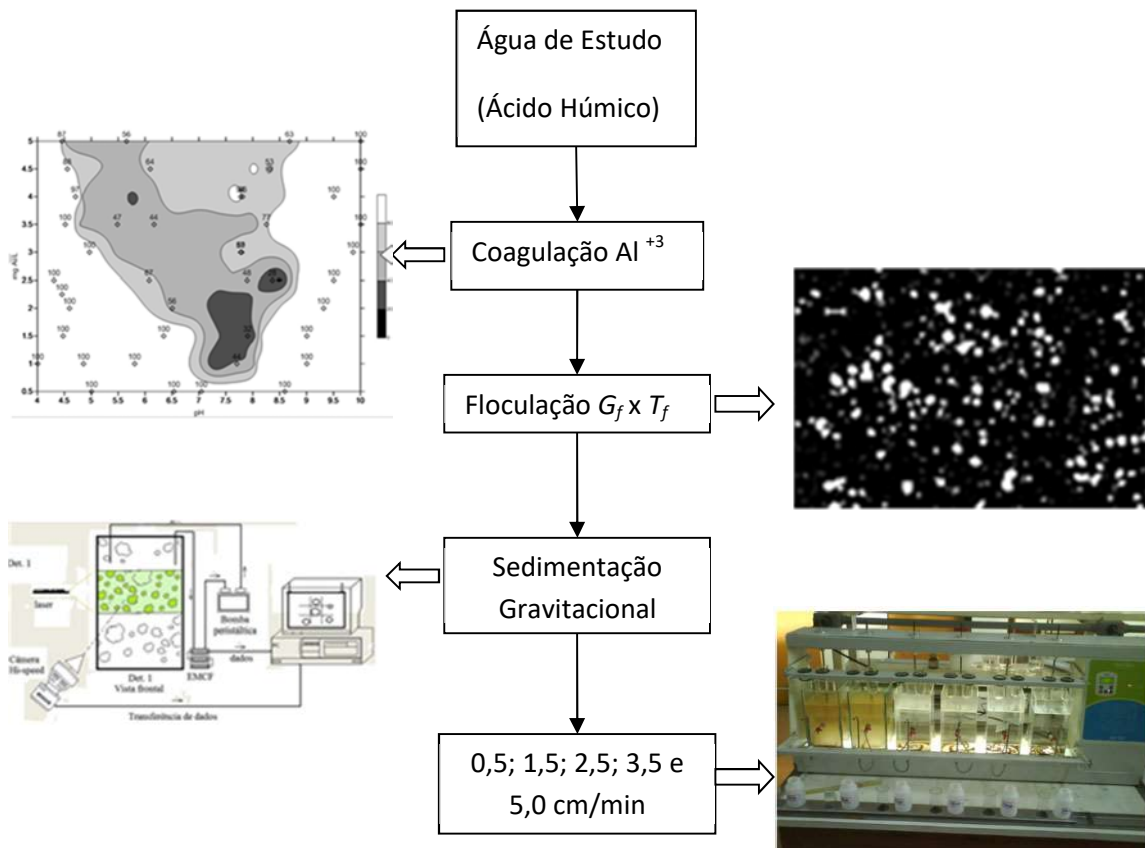


Figura 1. Fluxograma geral esquemático dos ensaios propostos.

3.2 Preparação da água de estudo

A água utilizada foi preparada com água destilada e solução de ácido húmico comercial (*Aldrich*). A solução foi preparada a partir da adição de ácido húmico na concentração de 0,62 g/L dissolvido em água e agitado por 3h. Posteriormente, a solução foi diluída na proporção 1:20 e filtrada em membrana de 0,45 μm , de modo a resultar em 50 ± 5 uC. O processo de extração da substância húmica foi de acordo com Constantino (2008).

Para a coagulação foi utilizada solução preparada a partir do sal metálico de alumínio (Al^{+3}) na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ na concentração de 20 g/L. Para o controle de pH foi utilizada solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10 g/L.

O ensaio de coagulação envolveu a investigação em diferentes dosagens de coagulante e pH de coagulação e seus resultados foram parte integrante de um trabalho do mesmo grupo de pesquisa. A partir do diagrama de coagulação/floculação obteve-se a dosagem ótima do coagulante e o respectivo pH de coagulação, sendo tais valores usados nas etapas subsequentes do trabalho.

3.3 Ensaio de Floculação

Para a separação sólido/líquido em escala de laboratório foi empregado o equipamento *Jar Test*. A dosagem de coagulante e o pH de coagulação adequados foram obtidos previamente em ensaios de determinação de dosagens do floculante e de correção do pH.

A água de estudo foi levada ao equipamento *Jar Test* onde os processos de coagulação/floculação foram realizados sob condições controladas de mistura e tempo, medidos por meio do gradiente de velocidade médio (G_f) e do tempo de floculação (T_f).

Para a coagulação, a mistura composta pela água de estudo, agente coagulante e agente alcalinizante foi agitada ao Gradiente Médio de Velocidade de Mistura Rápida (G_{mr}) de 800 s^{-1} por 10 segundos.

Os ensaios consistiram em coagulação/floculação, e submeter ao processo de sedimentação, retirando-se amostras para avaliar a cor aparente nas velocidades de sedimentação estabelecidas nesse estudo.

3.4 Ensaios de Sedimentação

Para a operação de sedimentação gravitacional, foram realizados ensaios em águas floculadas com gradientes de floculação de $Gf_1=20 \text{ s}^{-1}$, $Gf_2=40 \text{ s}^{-1}$, $Gf_3=60 \text{ s}^{-1}$ e $Gf_4=80 \text{ s}^{-1}$ e com tempos de floculação (T_f) de 5, 10, 15, 20 e 25 min, combinados um a um. As amostras foram retiradas em intervalos de tempo correspondentes as velocidades de sedimentação de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min. A Tabela 1 apresenta esses dados dos ensaios realizados.

Tabela 1. Relação de Gf e T_f , e V_s em que as amostras de cor aparente foram coletadas.

Gradiente de Floculação	Tempo de Floculação	Velocidade de Sedimentação
(Gf) de 20, 40, 60 e 80 s^{-1}	(T_f) de 5, 10, 15, 20 e 25 min	(V_s) de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min.

A variação do nível de água no jarro foi considerada para correção da velocidade em cada amostra coletada no jarro do *Jar Test*.

O desempenho da sedimentação foi avaliado por meio das medidas de fração residual remanescente de cor aparente (Frr).

3.5 Fração Residual Remanescente (Frr)

A fração residual remanescente (Frr) é a fração residual de cor aparente que restou na água de estudo após ser aplicado o processo de remoção (Equação 1). A eficiência do processo de remoção foi avaliada de acordo com a Frr , sendo definida pela Equação (2). Quanto maior a eficiência do processo de remoção, menor é a Frr na amostra.

$$Frr = \frac{C}{C_o} \quad (1)$$

$$E = (1 - Frr) \quad (2)$$

Onde: C = cor aparente residual da amostra após sedimentação na velocidade estudada (uC); C_o = cor verdadeira da água bruta (uC); E = eficiência de remoção; Frr = Fração Residual Remanescente.

A Fração Residual Remanescente de cor aparente foi usada visando avaliar indiretamente o desempenho da remoção das partículas na sedimentação. A cor aparente da água na condição inicial do ensaio foi utilizada como referência para Frr .

O valor da Frr foi medido em cada velocidade de sedimentação, para cada condição de mistura investigada. Assim, foram construídas curvas que relacionam os valores de Frr com as velocidades de sedimentação, as quais constituem curvas de sedimentação, conforme Di Bernado e Dantas (2005).

3.6 Monitoramento dos agregados formados durante a floculação

Essa etapa foi realizada em conjunto com a equipe do grupo de trabalho, cujos resultados foram compartilhados para avaliações e estudos distintos.

A aquisição e tratamento de imagens foram usadas para determinação da distribuição de tamanho de agregados e da Dimensão de Fractal. Para aquisição das imagens foi utilizada câmera *Vision Research Miro EX4* acoplada a um conjunto de lentes permitindo resolução de 840 x 680 com tamanho de pixel de 0.119 mm, conforme descrito em Oliveira *et al.* (2015). O tratamento das imagens foi realizado com auxílio do software *Image-Pro Plus*®. A iluminação foi baseada nos métodos de Gregory e Chung (1995), Moruzzi e Reali (2007), usando um plano de laser (*Green Laser Pointer*) de 20.000 mW de potência com comprimento de onda de 532

nm e com 2 mm de espessura do plano. O foco do sistema óptico de captura de imagens foi ajustado com uma lente especial para emissão de feixe de luz planar enquanto um fotodetector registrou as imagens dos flocos. O foto-detector utilizado foi a câmera fotográfica *Phantom Miro eX4*, que apresenta características como disparo contínuo, 800x600 pixels de resolução e velocidade de captura de 1260 fps. A câmera foi posicionada a aproximadamente 10 cm da cuba acrílica do *Jar Test* e ortogonalmente ao plano do laser, como mostra a Figura 2, para captar a reflexão dos raios do laser após incidirem e serem refletidos pelas partículas floculadas. A maior vantagem do emprego de método não intrusivo é que as amostras podem ser avaliadas sem risco de deformação decorrente da ruptura dos flocos.

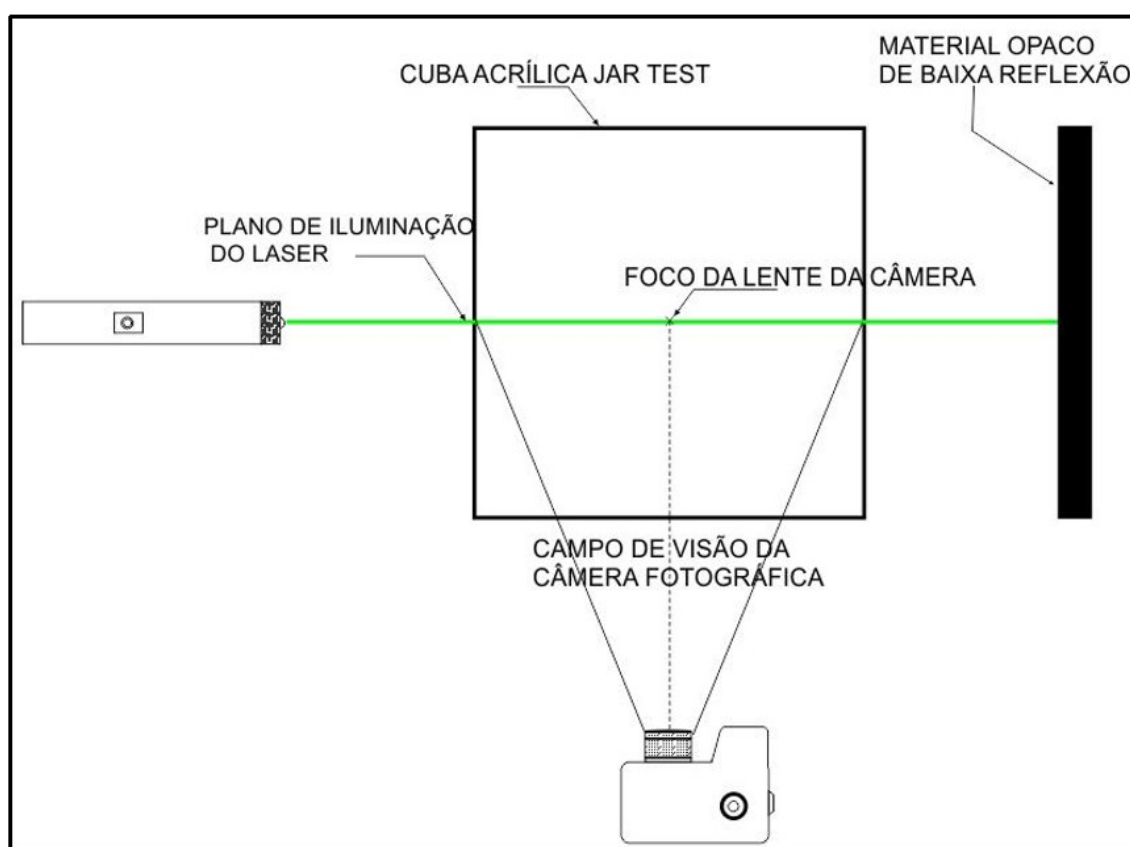


Figura 2. Arranjo experimental de bancada. FONTE: Silva (2016).

Na Figura 3 apresenta-se um esquema do aparato experimental: equipamento de bancada *Jar Test* acoplado a um sistema não intrusivo de captura de imagens.

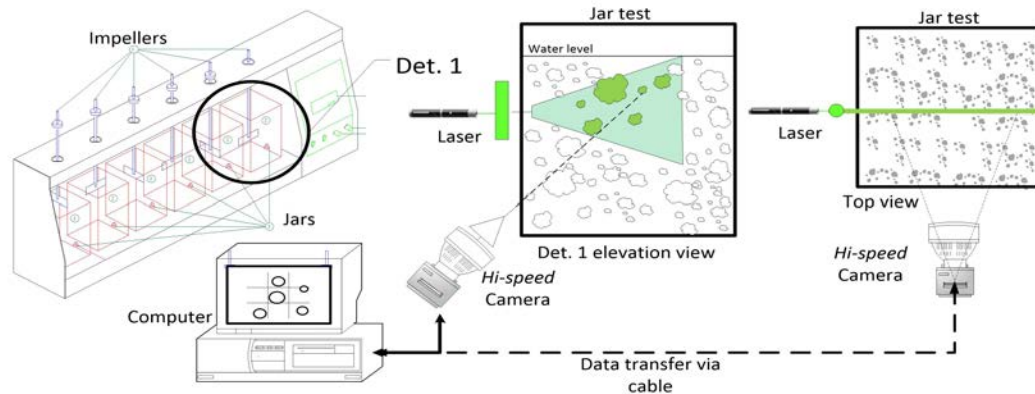


Figura 3. Esquema do arranjo experimental utilizado nos ensaios (*Jar Test*, Microcomputador, Câmera digital e Laser). Extraído de Oliveira *et al.* (2015).

Os métodos empregados nesse trabalho de conclusão são os mesmos aplicados em Moruzzi (2005) e apresentados em Moruzzi e Reali (2007) e Moruzzi e Reali (2010). Em termos gerais, os passos necessários consistem em: aquisição das imagens; tratamento digital; calibração; determinação das feições de interesse (diâmetro e área) e dos tamanhos das partículas. Posteriormente são obtidas as funções discretas de Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP), Dimensão do Fractal (Df).

A lente escolhida tem distância focal equivalente de 50mm, F-Stop igual a 2.8 e controles de íris e de zoom manuais. A câmera fotográfica é gerenciada por computador através do aplicativo *Phantom Câmera Control version 2.2 (PCC 2.2)*. Através da interface do programa mencionado, foram feitos testes em busca dos valores ótimos para os parâmetros contraste, brilho, tempo de abertura do obturador e frequência de disparo da câmera, sendo utilizados os seguintes valores: Resolução: 600x800; Tempo de exposição: 200 μ s e Frequência de disparo: 10Hz. Esses parâmetros foram baseados em Moruzzi (2014) e Oliveira *et al.*, 2015.

Para diminuir a possibilidade de erro na contagem dos flocos e determinação de seus parâmetros, o tamanho do menor floco foi considerado como sendo 10 pixels na imagem digital, ou seja, somente flocos com tamanho maior que 10 pixels foram considerados. Tal procedimento foi baseado em recomendações constantes em Moruzzi e Reali (2010).

Para o tratamento das imagens, cada imagem obtida pela câmera foi transformada em uma matriz binária. A binarização consiste em transformar a imagem que contem pixels em escala de cinza, variando de 0 (totalmente preto) a 255 (totalmente branco), em uma imagem binaria contendo pixels com valor 0 (preto) e 1 (branco). O processo de contagem enumera todos os conjuntos de pixels brancos, e a mensuração, por meio de calibração com objeto de dimensão conhecida, atribui dimensões aos flocos capturados. Na Figura 4 apresenta-se a título de exemplo uma das imagens adquiridas na sua forma bruta.

Posteriormente a binarização procedeu-se a contagem e determinação dos atributos de interesse.

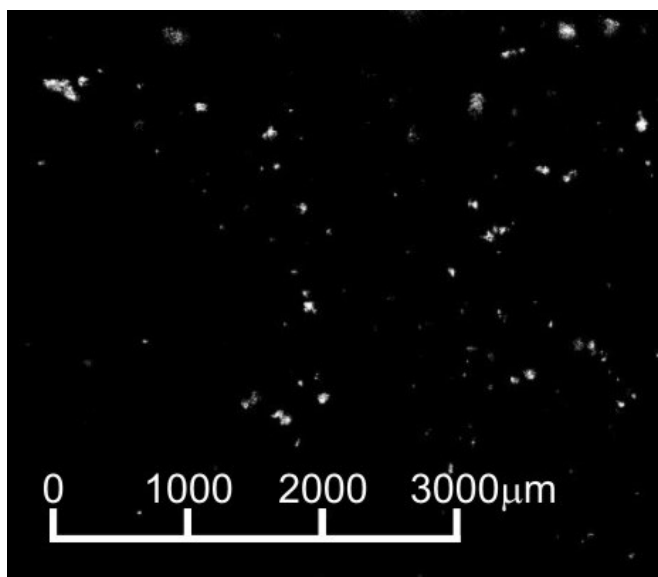


Figura 4. Imagem dos flocos em escala de cinza.

Dentro da binarização adotou-se o limiar que permitiu a segmentação e determinação dos atributos de interesse. Os procedimentos usados foram adaptados de Moruzzi e Reali (2007) e podem ser consultados para melhor entendimento.

A matriz resultante foi operada estatisticamente pelo software *Microsoft Excel 2007®* e o processamento das imagens gerou planilhas de dados de diâmetro e área das partículas. Dentre os dados relevantes a este estudo está o histograma da DTP e tabelas com dados sobre diâmetro médio, mediana, assimetria dos diâmetros, fractal e área dos flocos. Esses dados fornecem importantes informações das

características físicas dos flocos e permite obter informações do comportamento dos mesmos submetidos a diferentes condições de agitação e tempos de floculação.

3.7 Determinação dos atributos de interesse

3.7.1 Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP)

A Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP) é uma análise que permite a classificação dos agregados por faixa de tamanho, ou seja, permite obter uma caracterização geral do tamanho dos agregados formados naquela condição.

Para cada condição investigada nessa pesquisa foram gerados gráficos de DTP em intervalos discretos, a partir dos quais foi ajustada a curva contínua de distribuição para determinação do parâmetro representativo (β).

3.7.2 Parâmetro representativo da função contínua de distribuição de tamanho (β)

O parâmetro β (conforme Equação 3) pode ser utilizado para avaliar como ocorre a distribuição do tamanho de agregados pelo número total destes, ou seja, a quantidade de flocos que se enquadram como pequenos e a quantidade que se enquadram como grandes.

Segundo Lawler (1997) o valor em módulo de β pode variar de 1 a 4. Um maior valor desse parâmetro indica que há maior concentração de agregados pequenos, e um menor valor de β indica que a distribuição do tamanho de agregados é mais uniforme, que há um número considerável de agregados na forma maior.

Para se obter esse parâmetro foi utilizada a Equação 3 em tabelas no software *Microsoft Excel 2007®*, onde os flocos foram separados por faixas de tamanho, e o valor de β foi caracterizado pelo coeficiente angular da retas formadas pelos gráficos em plotagem *log-log* de $\frac{dN(d_p)}{d(d_p)}$.

A classificação discreta das partículas, por faixas de tamanho foi ajustada à forma contínua conforme equação abaixo, extraída de Amirtharajah & O'Melia (1999).

$$\frac{dN}{d(d_p)} = n^{\circ}(d_p) = A_o(d_p)^{-\beta} \quad (3)$$

Onde: dN = numero de partículas por unidade de volume do fluido na faixa correspondente a d_p até $d_p + d(d_p)$; d_p = diâmetro da partícula; $n^{\circ}(d_p)$ = função de Distribuição de Tamanho de Partículas; A_o = coeficiente relacionado a concentração total de partículas; β = coeficiente que caracteriza a distribuição de tamanho.

3.7.3 Dimensão de Fractal (D_f)

Os flocos formados no processo de floculação não seguem uma geometria euclidiana, isso porque os agregados se unem de forma desordenada e pode haver regiões dentro do floco não preenchidas por partículas (vazios). Devido esse fato, utiliza-se o conceito de Dimensão de Fractal para caracterizar a morfologia e estrutura dos flocos, pois descreve a geometria e a variação das características físicas (densidade, porosidade e velocidade de sedimentação) de maneira mais precisa que a consideração de uma esfericidade perfeita.

A Dimensão de Fractal pode ser definida em linear, plano ou tridimensional. Considerando o valor bi-dimensional da Dimensão de Fractal, pode-se descrever uma relação entre área A , uma dimensão característica de tamanho L , e a Dimensão Fractal de área D_f (Equação 4).

$$A \propto L^{D_f} \quad (4)$$

Onde: A = correspondente a soma das áreas de todas as partículas primárias contidas dentro da dimensão L ; L = dimensão de tamanho do floco.

Para a dimensão bidimensional de Fractal, o valor de Df varia entre 1 e 2, sendo o valor 2 representativo de um círculo perfeito, e uma esfera perfeita para a projeção tridimensional, ou seja, seguindo os princípios da geometria euclidiana.

O valor de Dimensão de Fractal auxilia a entender qual a feição dos flocos formados a partir de características de área e massa dos flocos, isso porque agregados compactos possuem uma Dimensão Fractal mais elevada, enquanto agregados com estruturas soltas (vazios em seu interior), possuem uma Dimensão Fractal inferior como aponta Li *et al.* (2006).

Para estudar a Dimensão de Fractal dos flocos, foram obtidos os diâmetros dos flocos em todas as condições de velocidade e agitação analisadas, através do método de captura de imagens pela câmera e programa computacional.

O diâmetro dos flocos foi utilizado como dimensão característica em relação a área para se obter a análise da forma dos flocos. A relação da área A de um objeto plano com seu diâmetro d será descrita na Equação 5.

$$A = k \cdot d^{Df} \quad (5)$$

Onde: A = correspondente a soma das áreas de todas as partículas primárias contidas dentro da dimensão d ; k = constante de ajuste; Df = Dimensão de Fractal (seu valor varia de 1 a 2); d = diâmetro do floco. Linearizando a Equação 5 obtém-se a Equação 6.

$$\ln A = \ln k + Df \cdot \ln d \quad (6)$$

A partir da Equação 6 foi possível obter o valor de Dimensão de Fractal e a feição dos flocos analisados. A Dimensão Fractal foi calculada para toda a população de flocos de cada condição estipulada no item 3.4. O valor de Df corresponde a inclinação da reta de ajuste à distribuição dos pontos do gráfico gerado pelos diâmetros e áreas dos flocos.

3.8 Coeficiente de correlação de Pearson (r)

Foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson (r) entre pares de todos atributos medidos, ou seja os atributos obtidos a partir da DTP, da morfologia e do desempenho ($Frr(Vs)$, β , Df , diâmetro médio, mediana e assimetria de todo conjunto de dados de agregados).

Foi gerada uma planilha de correlações no software *Microsoft Excel 2007®*. A correlação alta, ou seja, correlação significativa é observada nos valores acima de 0,70. Foi empregada escala de cores para classificação das correlações. A coloração vermelha indica que houve uma correlação negativa (inversamente proporcional), e a coloração verde indica que houve uma correlação positiva (diretamente proporcional) entre os dados. Esses dados serão discutidos no item 4.7.

A Equação 7 descreve o coeficiente de correlação do produto Pearson, r , utilizado para fazer as correlações.

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (7)$$

Onde: x e y = variáveis utilizadas na correlação, correspondentes as variáveis monitoradas e aos atributos da DTP e Df ; r = coeficiente de correlação de Pearson.

4. Resultados

4.1 Floculação

A partir de diagrama de coagulação/floculação obteve-se a dosagem ótima do coagulante Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$). Foi utilizado 13,5 ml de solução de Sulfato de Alumínio com concentração de 2 mg Al^{+3}/L e pH igual a 5,5, onde o mecanismo de coagulação atuante é o de varredura.

Posteriormente, foram realizados os ensaios de floculação. Nessa fase, foram determinadas a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP) e a Dimensão de Fractal (D_f) para todas as condições de Gf e Tf analisadas. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 5 uma das imagens adquiridas durante o ensaio de floculação.

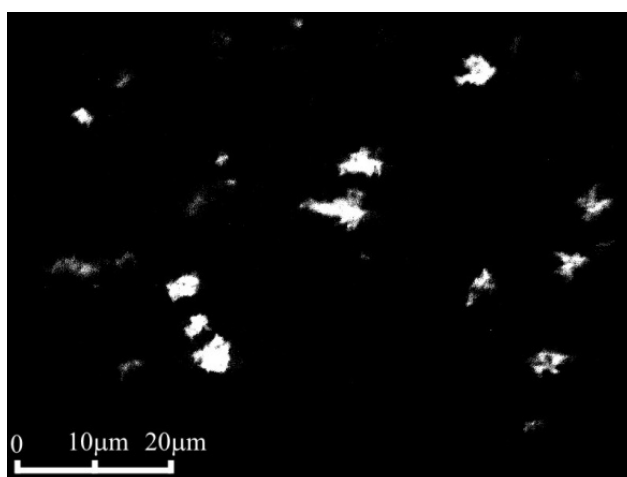


Figura 5. Imagem adquirida durante os ensaios de floculação correspondente ao Gf de 20 s^{-1} e Tf de 20 min. As formas em branco são flocos formados resultantes do processo de floculação.

A imagem demonstra agregados de morfologia desforme, tal como pressupõe os agregados de Fractal. Esses resultados serão evidenciados no item 4.5.

4.2 Fração Residual Remanescente (F_{rr})

A eficiência de separação por sedimentação foi avaliada por meio da construção das curvas de remoção, expressas em termos de fração residual remanescente (F_{rr}), para diferentes velocidades de sedimentação (V_s) associadas e diferentes gradientes médios de velocidade (Gf) e tempos de floculação (Tf).

Nota-se claramente a influência de Gf e Tf no desempenho da sedimentação, onde a posição das curvas determinam diferentes desempenhos de separação por sedimentação (Figura 6). Merece destaque o fato de que, em alguns casos, o valor de F_{rr} excedeu a unidade (1), devido a adição de coagulante na fase de coagulação e floculação ter excedido a referência de cor verdadeira da água bruta.

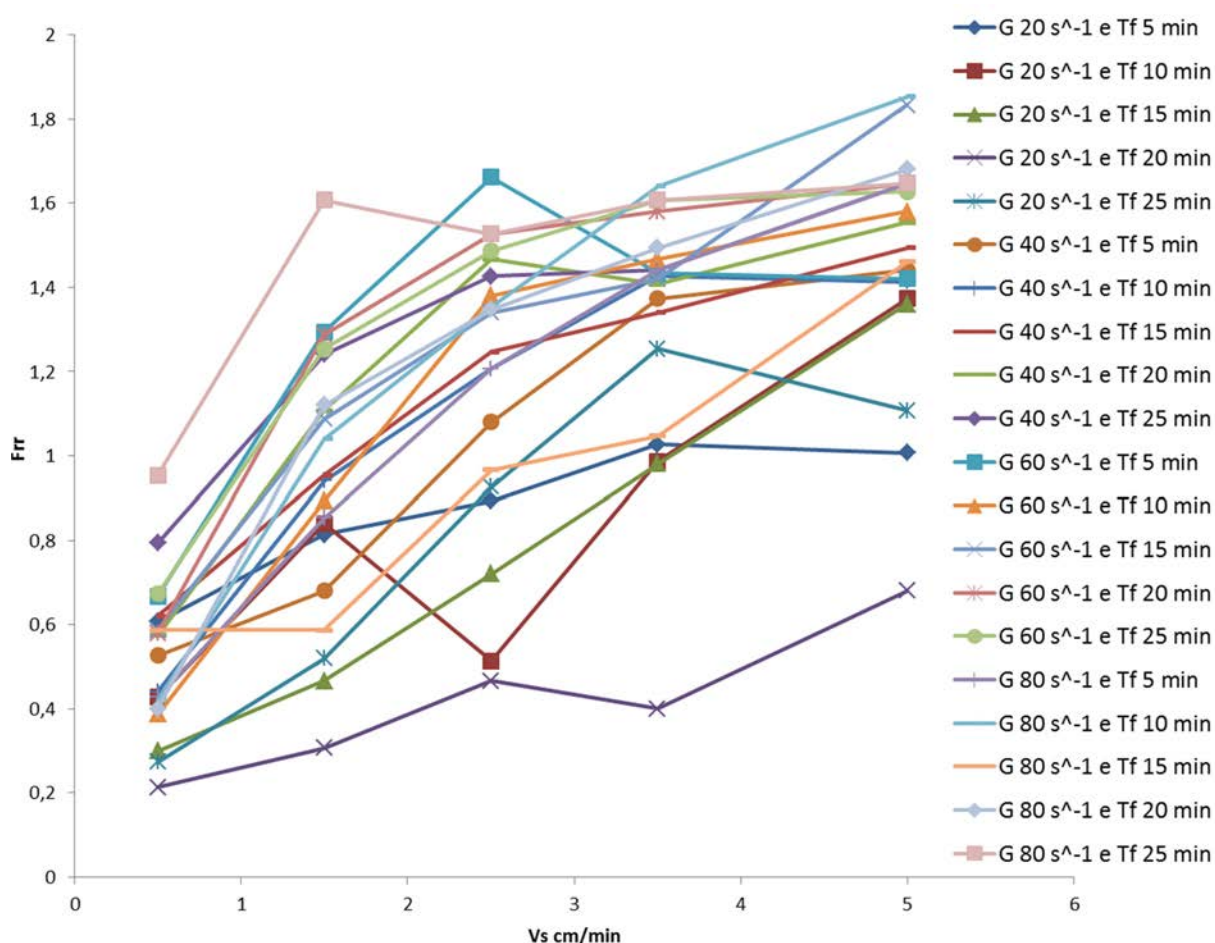


Figura 6. Gráfico de Fração Residual Remanescente de todos os gradientes estudados ($Gf 20, 40, 60$ e 80 s^{-1}) e tempos ($Tf 5, 10, 15, 20$ e 25 min).

A partir da Figura 6 é possível observar que o menor residual remanescente foi para o Gf de 20 s^{-1} e Tf de 20 min, e que nesse valor de gradiente médio de velocidade as curvas de Frr apresentaram os menores valores de residual remanescente em todos os tempos de floculação (Tf) investigados.

Para o gradiente de 20 s^{-1} obteve-se menor residual remanescente em um tempo de floculação mais longo (20 minutos). Para o Gf de 40 s^{-1} , a menor fração residual remanescente ocorreu em um tempo de floculação menor (5 minutos). Já para os gradientes de 60 s^{-1} e 80 s^{-1} , a fração residual remanescente foi obtida no tempo de floculação intermediário (10 e 15 minutos respectivamente).

Esses resultados demonstram que o gradiente de 20 s^{-1} demanda tempo de floculação maior para obter melhor desempenho de sedimentação, e que as agitações mais rápidas (gradientes de 60 s^{-1} e 80 s^{-1}) necessitam de menos tempo para obter melhor desempenho de sedimentação.

Entretanto, os menores valores de residual remanescente observados entre todos os gradientes analisados, ou seja, a melhor condição de qualidade da água, após a floculação e sedimentação, foi observada para o gradiente de 20 s^{-1} , comprovando que promover uma agitação lenta e maior tempo de floculação, é mais eficiente que agitação rápida e um tempo intermediário a reduzido de floculação.

Como o gradiente de 20 s^{-1} apresentou os melhores resultados, foram selecionadas todas as velocidades de sedimentação desse Gf e construído um gráfico para melhor analisar essa condição.

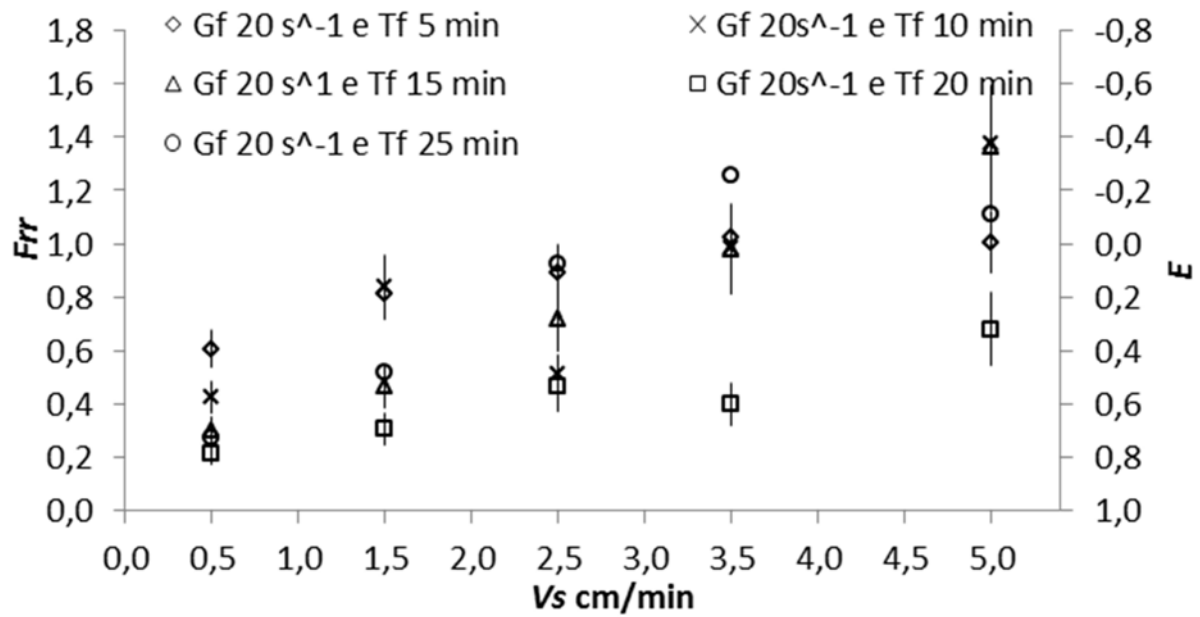


Figura 7. Gráfico de Fração Residual Remanescente para os Gf de 20 s⁻¹ e Tf de 5, 10, 15, 20 e 25 min.

Com base na Figura 7 é possível observar que para baixas velocidades de sedimentação, os pontos de Frr são muito próximos, ou seja, não há diferença significativa na eficiência de remoção de agregados para baixas velocidades. Porém a partir da Vs de 2,5 cm/min é possível perceber um descolamento dos dados, isso demonstra que para Vs maiores (no caso estudado, Vs de 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min) a velocidade de sedimentação foi fundamental na eficiência de remoção.

Segue abaixo a melhor condição de residual remanescente (Gf de 20 s⁻¹ e Tf de 20 min) representada na Figura 8.

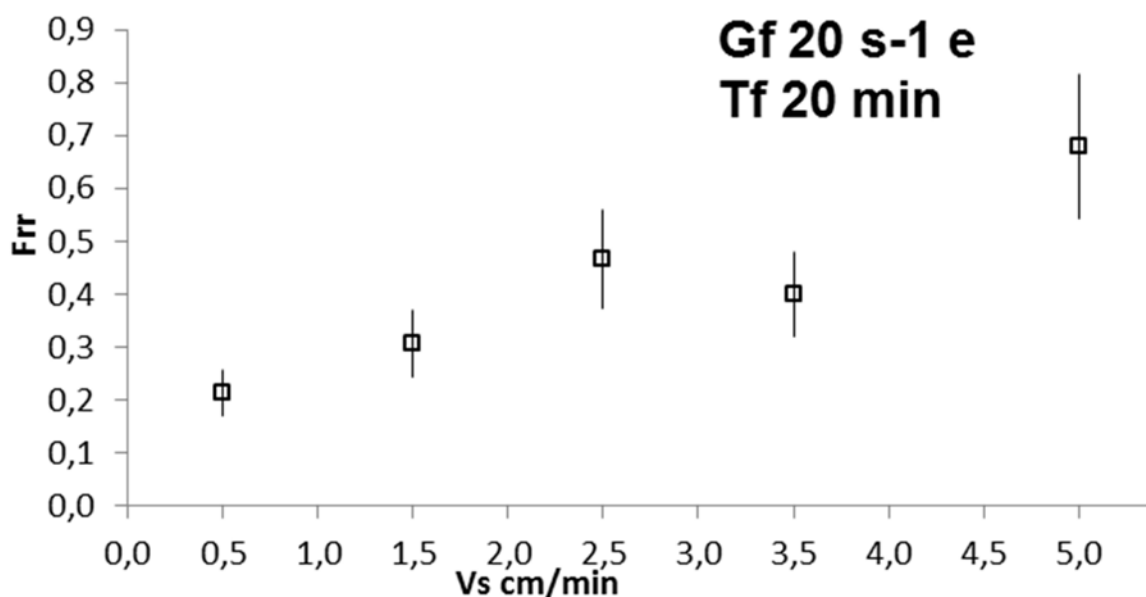


Figura 8. Gráfico de Fração Residual Remanescente gerado para o gradiente de 20 s^{-1} e Tf de 20 minutos.

Como mencionado, os menores valores de residual remanescente observados entre todos os gradientes analisados, ou seja, a melhor condição de qualidade da água, após a floculação e sedimentação, foi observada para o gradiente de 20 s^{-1} e Tf de 20 min. Para essa condição, a maior eficiência de remoção ocorreu nas velocidades de sedimentação menores ($0,5 \text{ cm/min}$ e $1,5 \text{ cm/min}$). Esse resultado será melhor explicado no item 4.4.

4.3 Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP)

A dimensão característica do floco adotada neste estudo foi o maior diâmetro do objeto. Por meio dos dados obtidos, pode-se proceder com a escolha da classificação. Frente aos dados, optou-se por 44 faixas com amplitude igual a $0,030 \text{ mm/faixa}$, sendo o limite inferior (Classe 1) igual a $0,044 \text{ mm}$, que também é o limite de resolução dos experimentos, e o maior (Classe 15) igual a $2,684 \text{ mm}$, que representa a maior dimensão obtida para um floco entre todos os ensaios. Essas classes foram fixadas para todo o estudo.

Nas Figuras de 9 a 12 são apresentadas exemplos de DTP para as melhores condições de remoção, de cada gradiente de velocidade médio estudado.

Na Figura 9 pode-se observar que aproximadamente 35 % dos flocos se encontram na primeira faixa de tamanho de diâmetro (diâmetro menor), enquanto as outras faixas de diâmetro apresentam menos de 11% dos flocos em cada faixa.

Na Figura 10 verifica-se que aproximadamente 55% dos flocos se encontram na primeira faixa de tamanho de diâmetro, enquanto as outras faixas de diâmetro apresentam menos de 15% dos flocos em cada faixa.

Na Figura 11 pode-se observar que aproximadamente 14% dos flocos se encontraram na primeira faixa de diâmetro, enquanto as outras faixas de diâmetro apresentam menos de 13% dos flocos em cada faixa.

Na Figura 12 nota-se que aproximadamente 40% dos flocos se encontram na faixa de 44 a 74 mm de diâmetro, ou seja, 40 % dos agregados se encontram na forma de pequenos agregados, enquanto as outras faixas de diâmetro apresentam menos de 23% dos flocos em cada faixa.

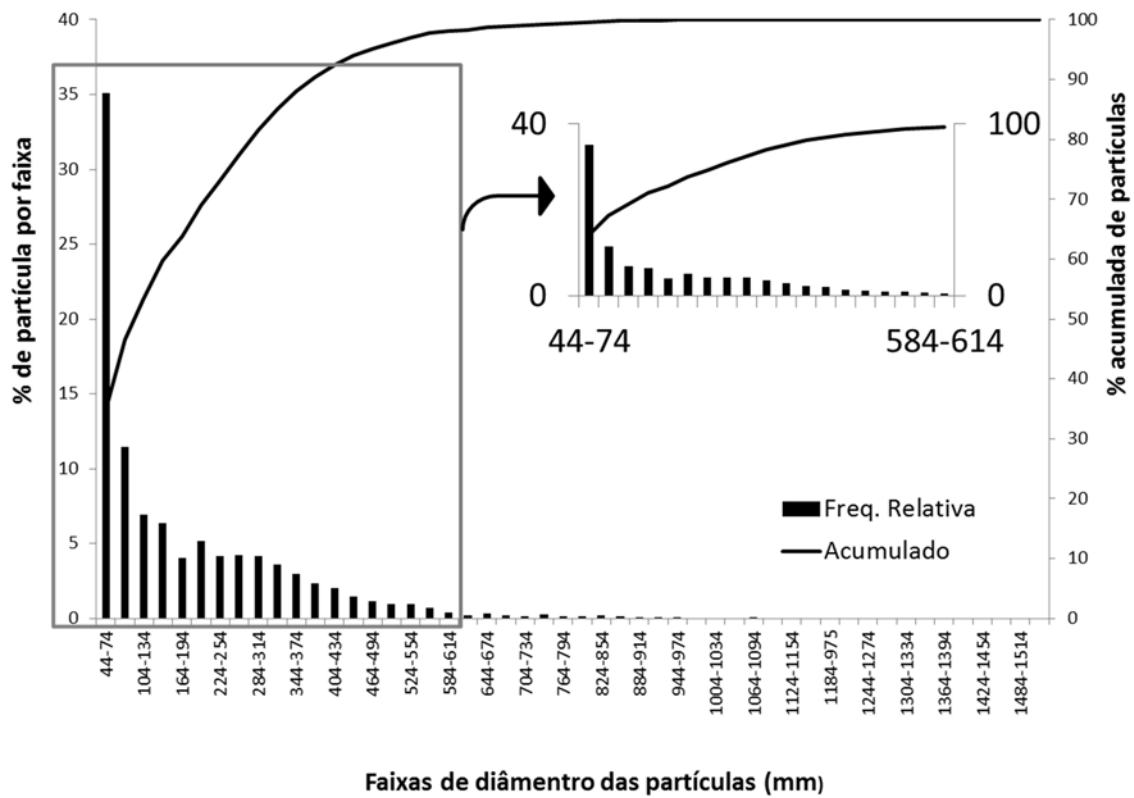


Figura 9. Distribuição do Tamanho de Partículas para Gf de 20 s^{-1} e Tf de 20 min.

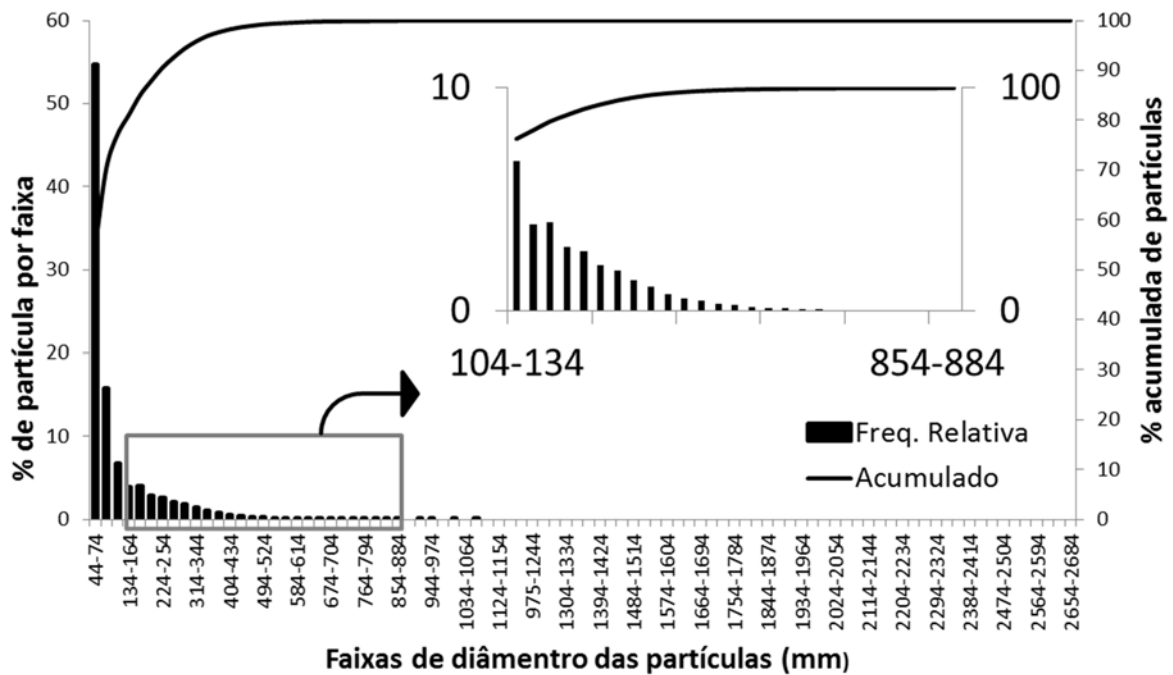


Figura 10. Distribuição do Tamanho de Partículas para Gf de 40 s^{-1} e Tf de 5 min.

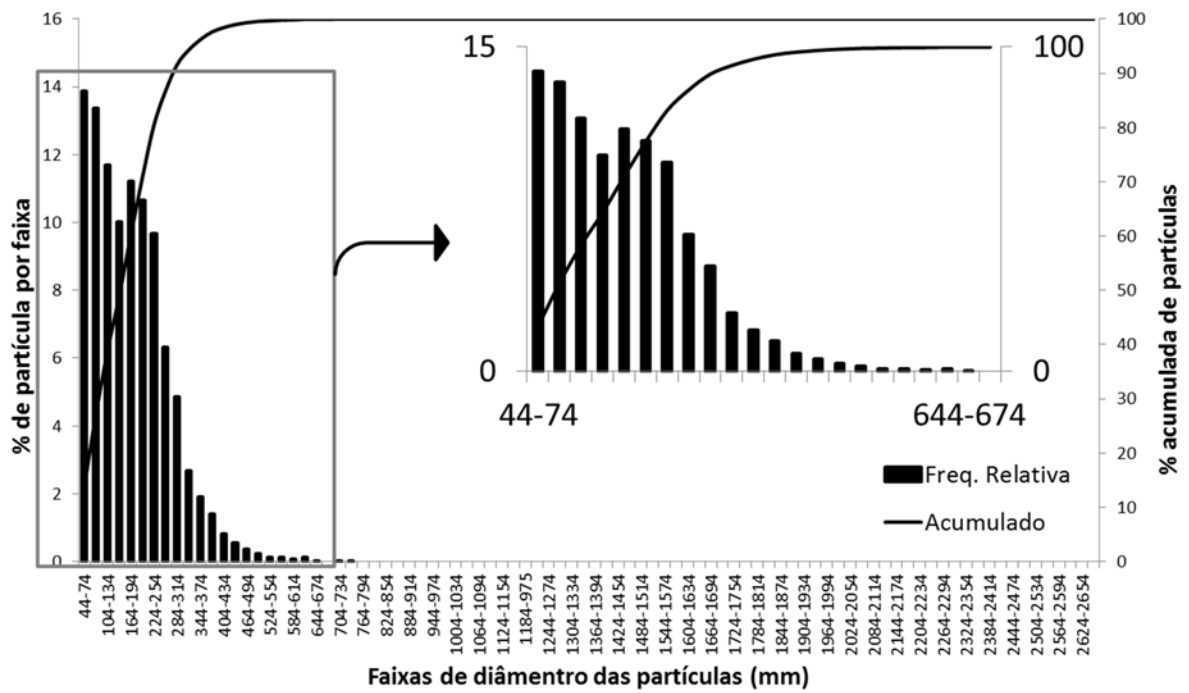


Figura 11. Distribuição do Tamanho de Partículas gerado para o Gf de 60 s^{-1} e Tf de 10 min.

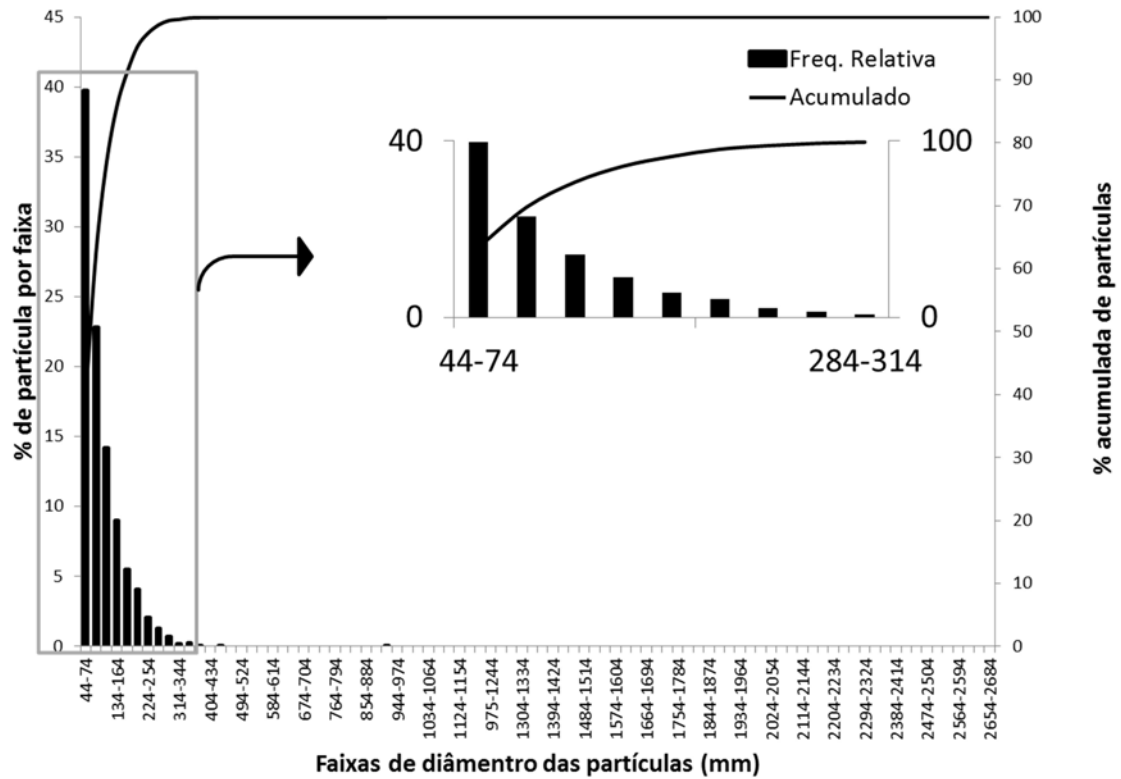


Figura 12. Distribuição do Tamanho de Partículas gerado para Gf de 80 s^{-1} e Tf de 15 min.

É possível perceber que as condições Gf de 20 s^{-1} e Tf de 20 min (Figura 9) e Gf de 40 s^{-1} e Tf de 5 min (Figura 10) possuem agregados até a faixa de $1064 - 1094\text{ }\mu\text{m}$, evidenciando que os agregados são melhores distribuídos nas classes de tamanho.

Com o aumento de gradiente há um descolamento dos flocos para as classes de menores tamanho. Para Gf de 60 s^{-1} e Tf de 10 min (Figura 11), e Gf de 80 s^{-1} e Tf de 15 min (Figura 12) os agregados se concentram nas primeiras faixas de tamanho, ou seja, essas condições possuem maior concentração de pequenos agregados. O maior diâmetro de floco registrado para Gf de 60 s^{-1} e Tf 10 min foi na faixa $734 - 764\text{ }\mu\text{m}$, e para Gf de 80 s^{-1} e Tf de 15 min, foi na faixa $914 - 944\text{ }\mu\text{m}$, reforçando a ideia de que com o aumento do gradiente médio de velocidade (aumento da energia no sistema), há um aumento do número de pequenos agregados, o que por sua vez causa o aumento do residual remanescente de cor. Isso ocorre pela maior dificuldade de remoção por sedimentação (força gravitacional) de agregados menores.

O fato de que com aumento do Gf as partículas de tamanhos maiores tendem a ter menos ocorrência já foi relatado por Silva (2016).

Segundo Argaman e Kauffman (1970) e Parker *et al.* (1972), a diminuição da ocorrência das partículas de maior tamanho é proporcional ao aumento da energia imposta ao sistema, isso devido ao fato da agitação maior proporcionar maior colisão entre os flocos, podendo levar a quebra dos mesmos.

É sabido que dois mecanismos atuam sobre a DTP, o primeiro contribui com maior interferência sobre as partículas pequenas, em que o aumento do Gf promove aumento da probabilidade de choque entre as partículas, fazendo com que a ocorrência das mesmas aumente em relação às partículas grandes. Já sobre as partículas grandes atua o segundo mecanismo, no qual o aumento de Gf promove a quebra do floco, fazendo com que a frequência relativa das maiores faixas diminua. Essa consideração é exemplificada pelos resultados demonstrados acima.

Os resultados descritos ressaltam que a DTP influencia na remoção de cor, e que a energia de agitação influencia na DTP.

4.4 Parâmetro representativo da função contínua de distribuição de tamanho (β)

O parâmetro β é representativo da função contínua de tamanho dos flocos. Quando β possui um valor alto, significa que o número de pequenos agregados é alto, em relação ao número de grandes agregados.

Na Figura 13 apresenta-se um exemplo do gráfico *log-log* gerado para obtenção do valor de β . A análise dos dados plotados permite verificar uma boa aderência da reta contínua ajustada aos dados experimentais discretos (R^2 de 0,80), indicando que a equação de distribuição de tamanho empregada tem potencial de representação de agregados durante a floculação.

Na Figura 14, foram compilados, também a título de exemplo, três resultados da distribuição de agregados ajustados por meio da função contínua de distribuição. As condições refletem a distribuição de tamanho de partículas (DTP) para valores de Gf de 20 s⁻¹ e Tf de 20 min.; Gf de 40 s⁻¹ e Tf de 5 min. e Gf de 80 s⁻¹ e Tf de 15 min. Verifica-se claramente que diferentes condições de mistura resultam em diferentes coeficientes angulares da reta ajustada. Tais coeficientes representam o expoente da função contínua de distribuição (β). Os valores indicam que quanto maior o valor em módulo de β , maior é o número de pequenos agregados na amostra. Os valores de 2,9 e 3,0 representam as maiores taxas de tensões empregadas, 40 e 80 s⁻¹, enquanto o valor de 1,9 aponta para o valor de Gf de 20 s⁻¹.

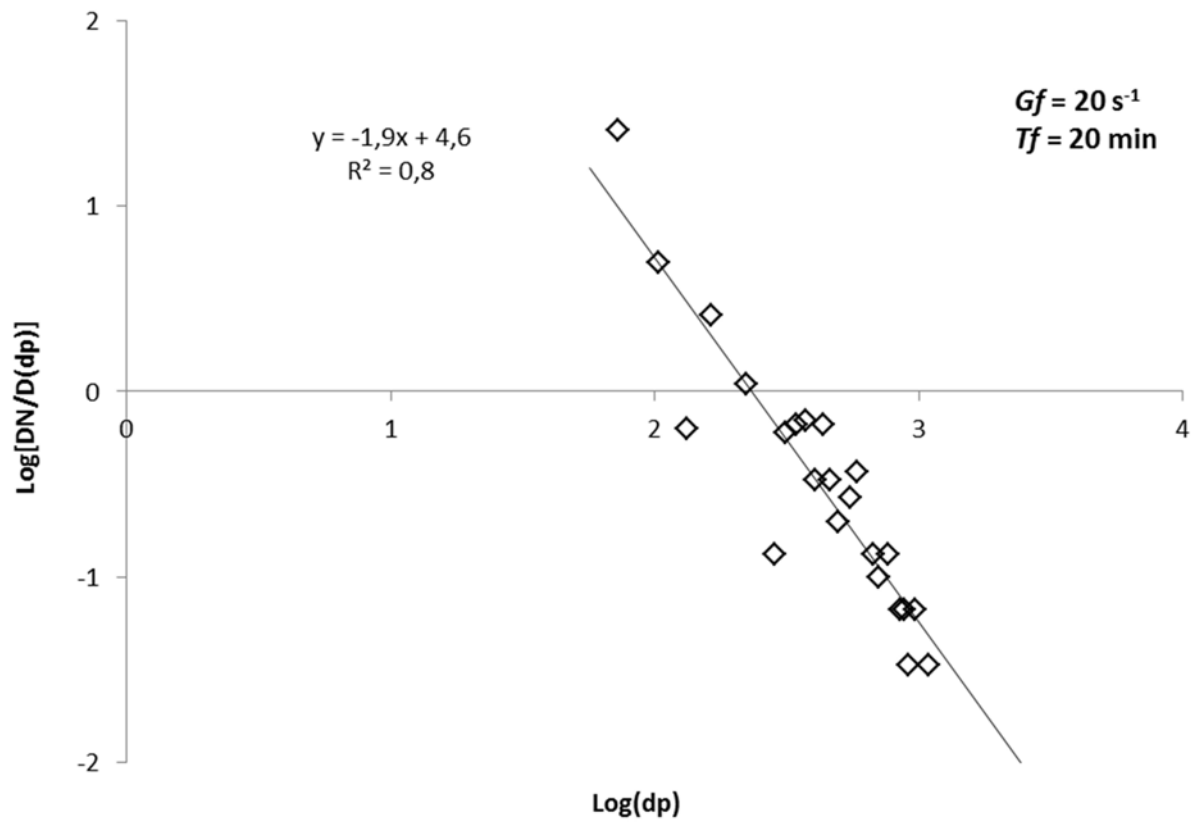


Figura 13. A inclinação da reta de ajuste aos pontos representa o valor de β da amostra. Gradiente de 20 s^{-1} e tempo de floculação de 20 minutos, com valor módulo β de 1,9.

O $\Rightarrow Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ e $Tf = 20 \text{ min}$;

$\diamond \Rightarrow Gf = 40 \text{ s}^{-1}$ e $Tf = 5 \text{ min}$;

$\Delta \Rightarrow Gf = 80 \text{ s}^{-1}$ e $Tf = 15 \text{ min}$.

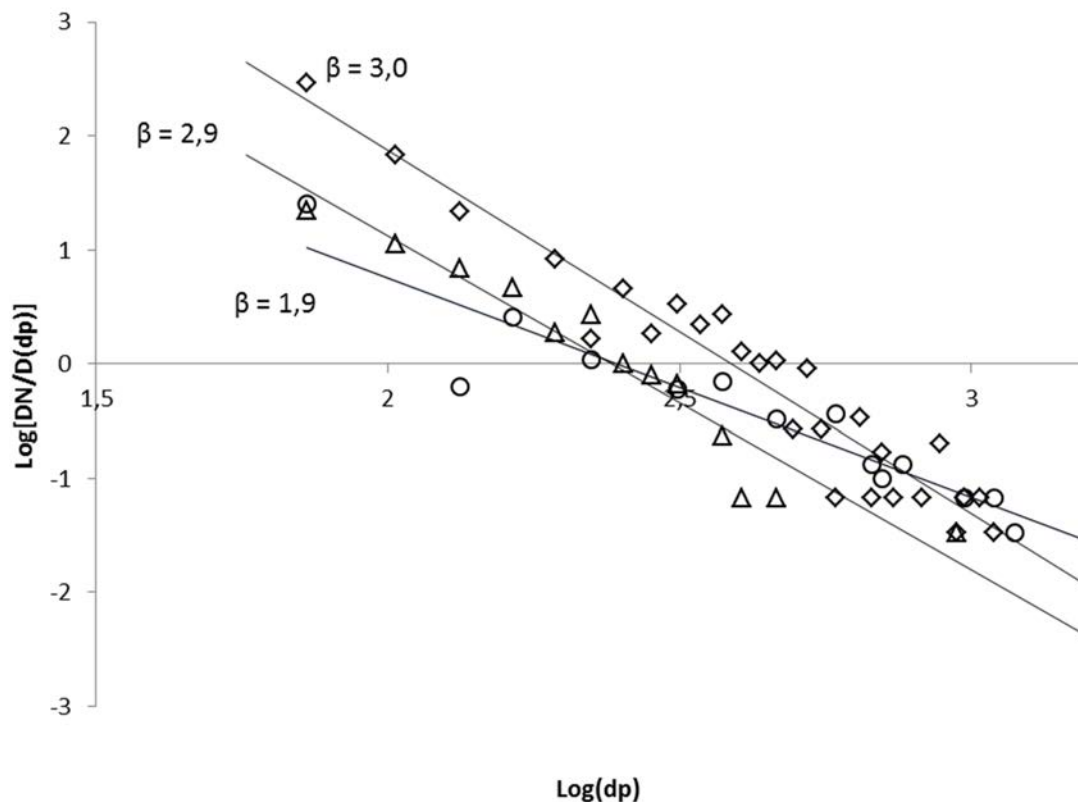


Figura 14. A inclinação da reta de ajuste aos pontos representantes dos valores do gradiente 20 s^{-1} e Tf de 20 minutos possui valor β em módulo igual a 1,9; O ajuste aos pontos representantes dos valores do gradiente 40 s^{-1} e Tf de 5 minutos possui valor β em módulo igual a 3,0; E o ajuste aos pontos representantes dos valores do gradiente 80 s^{-1} e Tf de 15 minutos possui valor β em módulo igual a 2,9.

Os valores de β para as melhores condições de ensaio foram descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de β para as condições de Gf 20 s^{-1} e Tf 20 min, Gf 40 s^{-1} e Tf 5 min, Gf 60 s^{-1} e Tf 10 min, Gf 80 s^{-1} e Tf 15 min.

Gf Tf				
Parâmetro	20 s^{-1} e 20 min	40 s^{-1} e 5 min	60 s^{-1} e 5 min	80 s^{-1} e 15 min
β	1,9	2,9	1,4	3

Por meio dos resultados da Tabela 2, pode-se afirmar que os melhores resultados de Frr apresentaram valores de β variando de 1,4 a 3. Retomando o resultado

explicito no item 4.2, para a condição de Gf 20 s^{-1} e Tf 20 min, a maior eficiência de remoção ocorreu nas velocidades de sedimentação menores (0,5 cm/min e 1,5 cm/min). Tais resultados reforçam que a remoção por sedimentação gravitacional é mais eficiente na condição de flocos maiores (menor valor de β), pois nas menores V_s os flocos maiores sedimentam mais rapidamente, promovendo menor residual remanescente.

4.5 Dimensão de Fractal (Df)

A Dimensão de Fractal foi calculada para toda a população de flocos da amostra, e obteve-se um Df para cada gradiente e cada tempo estudado. Foi selecionado um gráfico das melhores condições de remoção para cada gradiente, exemplificando Df .

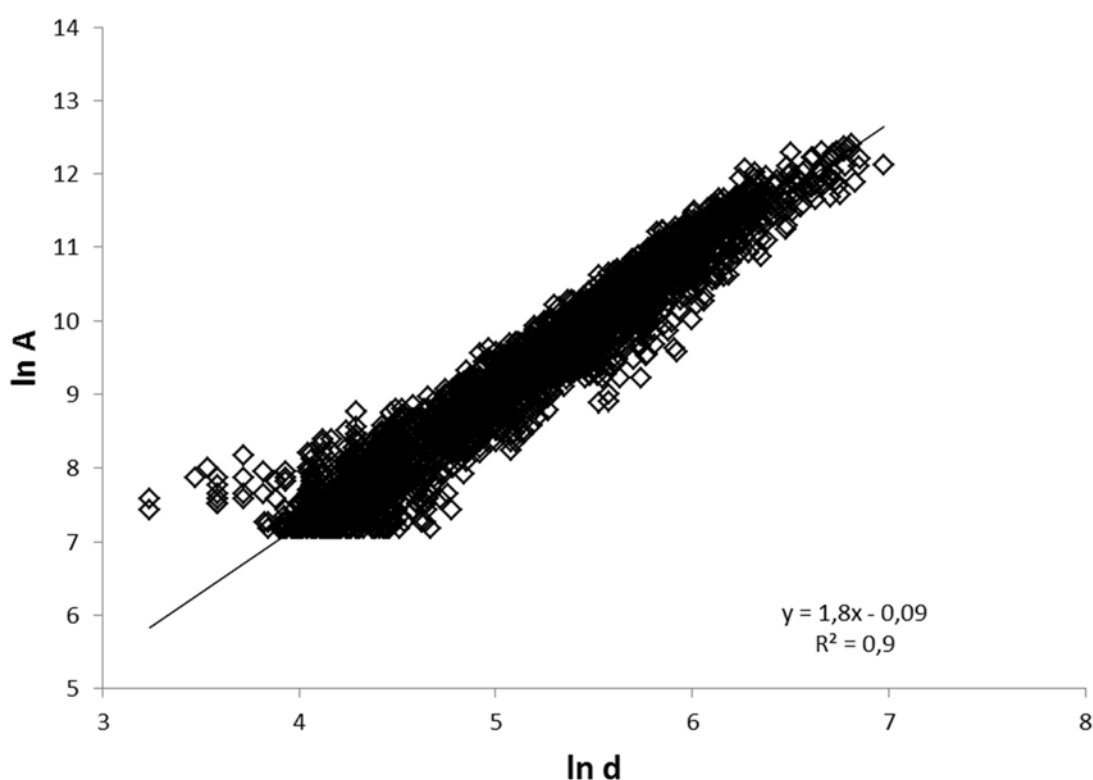


Figura 15. A inclinação da reta de ajuste aos pontos representa a Dimensão Fractal da amostra. A amostra é do gradiente de 20 s^{-1} e Tf de 20 minutos, para o processo de sedimentação.

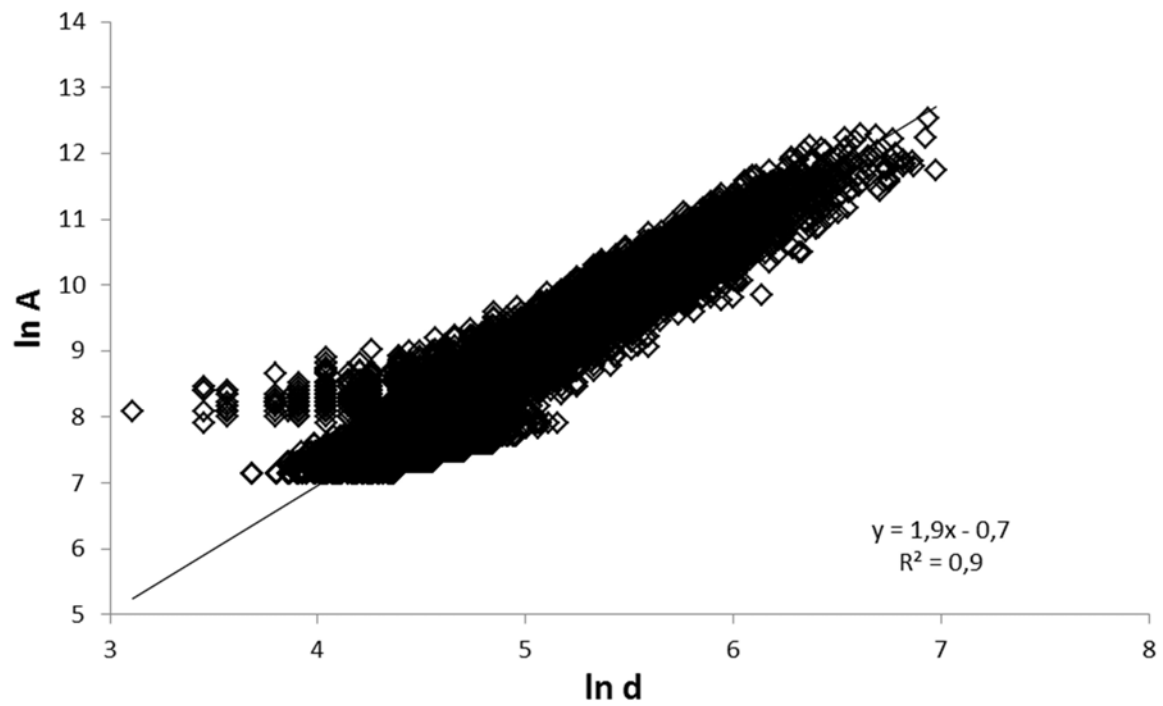


Figura 16. A inclinação da reta de ajuste aos pontos representa a Dimensão Fractal da amostra. A amostra é do gradiente de 40 s^{-1} e Tf de 5 minutos, para o processo de sedimentação.

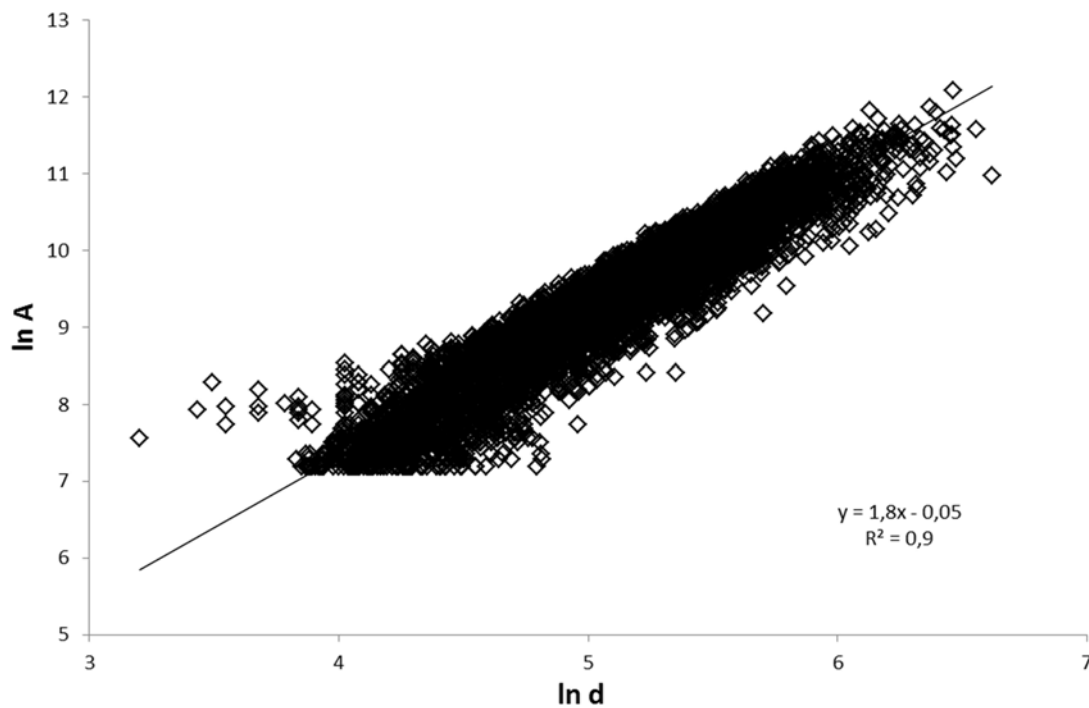


Figura 17. A inclinação da reta de ajuste aos pontos representa a Dimensão Fractal da amostra. A amostra é do gradiente de 60 s^{-1} e Tf de 10 minutos, para o processo de sedimentação.

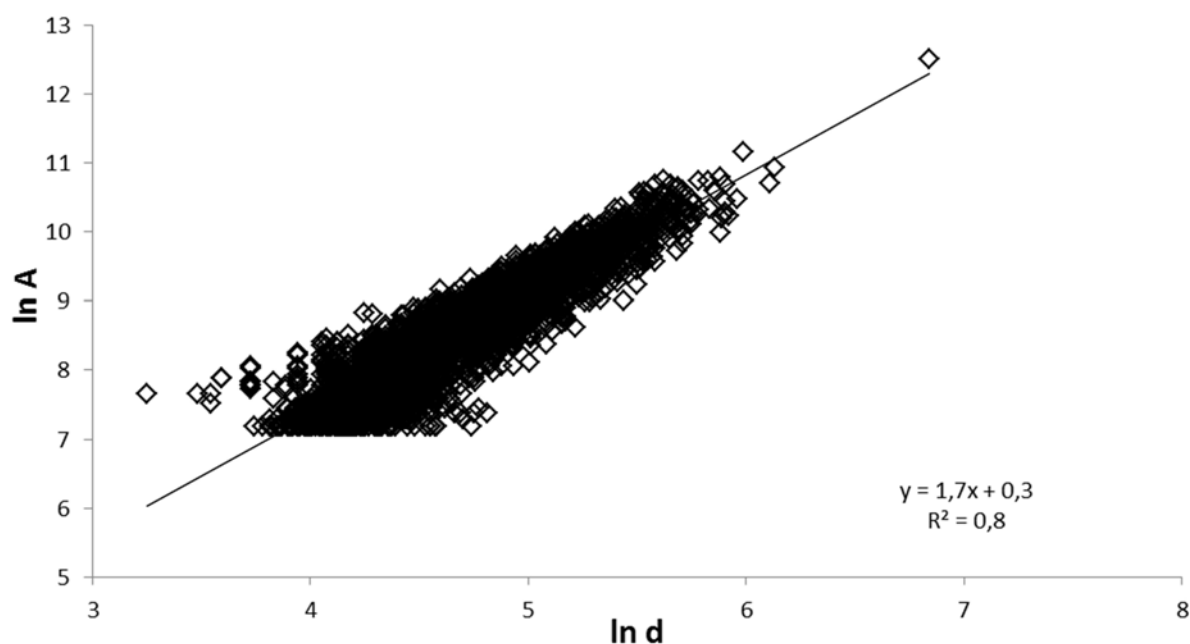


Figura 18. A inclinação da reta de ajuste aos pontos representa a Dimensão Fractal da amostra. A amostra é do gradiente de 80 s^{-1} e Tf de 15 minutos, para o processo de sedimentação.

Os resultados das Figuras 15,16,17 e 18 são resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de Df para as condições de Gf 20 s^{-1} e Tf 20 min, Gf 40 s^{-1} e Tf 5 min, Gf 60 s^{-1} e Tf 10 min, Gf 80 s^{-1} e Tf 15 min.

Gf Tf				
Parâmetro	20 s^{-1} e 20 min	40 s^{-1} e 5 min	60 s^{-1} e 5 min	80 s^{-1} e 15 min
Df	1,8	1,9	1,8	1,7

Os resultados da Tabela 3 demonstram que as melhores condições de remoção, expressas por meio dos valores de Frr , foram obtidas para valores de Df variando de 1,7 a 1,9, valores mais próximos a forma esférica (2,0).

4.6 Coeficiente de correlação de Pearson (r)

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da correlação de Pearson (r) para todos os atributos medidos durante a floculação bem como para os ensaios de separação por sedimentação em todas as velocidades investigadas.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de correlação de Pearson (r) para todas as condições investigadas nesse estudo.

	<i>b</i>	<i>dF</i>	<i>dmed.</i>	<i>dmediana</i>	<i>S</i>	<i>V1</i>	<i>V2</i>	<i>V3</i>	<i>V4</i>	<i>V5</i>
<i>b</i>	1,00									
<i>dF</i>	-0,44	1,00								
<i>dmed.</i>	-0,91	0,26	1,00							
<i>dmediana</i>	-0,94	0,12	0,94	1,00						
<i>S</i>	0,97	-0,30	-0,82	-0,94	1,00					
<i>V1</i>	0,33	0,04	-0,70	-0,48	0,17	1,00				
<i>V2</i>	0,13	0,40	-0,53	-0,37	0,03	0,93	1,00			
<i>V3</i>	0,03	0,34	-0,45	-0,25	-0,09	0,94	0,99	1,00		
<i>V4</i>	0,03	0,57	-0,43	-0,31	-0,03	0,84	0,98	0,96	1,00	
<i>V5</i>	0,85	-0,35	-0,98	-0,86	0,72	0,78	0,57	0,52	0,44	1,00

Os parâmetros analisados foram sensíveis para a menor velocidade testada (0,5 cm/min), correspondente a V5 na Tabela 4.

Com base na Tabela 4 é possível observar que:

- A *Frr* apresentou uma forte e negativa correlação com o diâmetro médio ($r \geq 0,98$) e mediana dos diâmetros ($r \geq 0,86$), indicando que quanto maior a média dos diâmetros dos agregados formados, menor é o residual remanescente de cor na amostra. Assim sendo, flocos maiores sedimentam com maior facilidade, devido a ação gravitacional, proporcionando maior remoção das impurezas e menor residual remanescente na água. Esse resultado indica que a força gravitacional exerce maior interferência sobre o arraste no processo de sedimentação de um floco de grandes dimensões, do que a força de empuxo que atua sobre ele. Obteve-se o mesmo resultado para a mediana dos diâmetros dos flocos.
- A *Frr* apresentou uma forte e positiva correlação ($r \geq 0,72$) com a função estatística assimetria, aplicada aos diâmetros dos flocos, indicando que

quanto maior o residual remanescente, maior o numero de flocos de pequeno diâmetro.

- O parâmetro β mostrou uma forte e positiva correlação ($r \geq 0,97$) com a função estatística assimetria, aplicada aos diâmetros dos flocos, indicando que a maioria dos agregados da amostra, encontravam-se em tamanho pequeno. Portanto, quanto maior o valor em módulo de β , maior a Fração Residual Remanescente, reforçando que o tamanho dos agregados tem papel fundamental na remoção por sedimentação.
- O parâmetro β mostrou uma alta e positiva correlação ($r \geq 0,84$) com o residual remanescente de cor da amostra com menor velocidade de sedimentação (0,5 cm/min), indicando que um alto valor de β (grande número de pequenos agregados) resulta em um maior residual remanescente na água.
- O parâmetro β mostrou forte e negativa correlação ($r \geq 0,94$) com o diâmetro médio das partículas e a mediana dos diâmetros, indicando que quanto maior o valor em módulo de β (maior número de agregados pequenos contidos na amostra), menor é o diâmetro médio e mediana dos diâmetros dos flocos da amostra.
- Em termos gerais, os valores de Dimensão de Fractal não mostraram correlação com nenhum dos parâmetros ou velocidades de sedimentação estudados, implicando que o Df não exerceu influencia significativa nas velocidades de sedimentação, ou diâmetro dos agregados.
- No que tange aos agregados de Fractal para a velocidade de 1,5 cm/min, verificou-se que este parâmetro tem correlação moderada com Fração Residual Remanescente, quando a sedimentação é usada para a separação sólido/líquido.

5. Considerações Finais

É cada vez mais difundido que os métodos diretos de análise das características das águas e dos flocos fornecem importantes informações para o tratamento de águas de abastecimento. Os resultados, obtidos nesse e em outros estudos com foco nas características físicas dos agregados, reforçam que as condições comumente consideradas ótimas para se conseguir uma melhor separação sólido/líquido, e por conseguinte, melhor qualidade do tratamento de água, necessitam ser revistas e aprimoradas, pois parâmetros diretos de análises, como a *DTP* e *Df* mostram como os agregados se comportam em diferentes condições de agitação e tempo de sedimentação.

Essa possibilidade de conhecimento das características morfológicas dos flocos é uma grande vantagem, pois permite verificar as condições físicas ideais para cada processo de remoção.

Os resultados desse trabalho evidenciaram que a forma dos agregados formados não influenciou significativamente no processo de remoção por sedimentação. E que a quantidade de agregadores maiores, é de muita importância para o processo de remoção de cor por sedimentação.

Neste contexto, esse estudo pode auxiliar o entendimento da influencia das características morfológicas dos flocos, visando obter a máxima qualidade de água nas ETA's.

6. Conclusões

Para a Fração Residual Remanescente pode-se concluir que:

- para se obter melhor remoção é mais eficiente uma agitação lenta ($Gf\ 20\ s^{-1}$) e tempo mais longo ($Tf\ 20\ min$);
- quanto maior a média dos diâmetros dos agregados formados, menor é o residual remanescente de cor na amostra, sendo que para $0,5\ cm/min$ r foi de $-0,98$;

Para a Distribuição do Tamanho de Partículas pode-se concluir que:

- a DTP influencia na remoção dos agregados por sedimentação;
- quanto maior a energia de agitação aplicada no sistema, menor será o número de flocos grandes formados, dificultando a remoção. Os diâmetros médio e mediana da DTP indicaram coeficiente de correlação $r \leq -0,86$;

Para o parâmetro β pode-se concluir que:

- os melhores resultados de Frr apresentaram valores de β variando de 1,4 a 3;
- quanto maior o parâmetro β , maior o residual remanescente ($r \geq 0,84$), e que quanto maior a média dos diâmetros da partícula, menor o residual remanescente ($r \leq -0,98$).

Para a de Dimensão de Fractal pode-se concluir que:

- Df não exerceu influencia significativa no processo de remoção por sedimentação, apresentando coeficiente de correlação moderado a baixo ($r \leq |0,57|$);

Referências Bibliográficas

1. AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C.R. (1999). Coagulation Processes: Destabilization, Mixing, and Flocculation. In: AWWA. Water quality and treatment – A handbook of community water supplies. (Chapter 6). McGraw-Hill, Inc., 5th ed. USA, 1233p, 1999.

2. ARGAMAN, Y., KAUFMAN, W.J. Turbulence and Flocculation. Journal Sanitary Eng. Div., ASCE 96, SA 2, Apr, 1970.

3. BALTAR, C.A.M., OLIVEIRA, J.F., Flocculation of colloidal silica with polyacrylamide and the effect of dodecylamine and aluminium chloride pre-conditioning. (1998). Miner. Eng. 11, 463–467.

4. CONSTANTINO, L. T. Ruptura e recrescimento de flocos em água com substâncias húmicas aquáticas coagulada com sulfato de alumínio e cloreto férrico. 164 p. Tese (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2008.

5. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. Métodos e técnicas de tratamento de água. Segunda Edição. São Carlos. RiMa, 2005. 792p.

6. GREGORY, J.; CHUNG, H. Continuous monitoring of floc properties in stirred suspensions. (1995). J. Water SRT – Aqua, Blackwell Science Ltd, v.44, n.3, p.125-131.

7. HOGG, R., Flocculation and dewatering. (2000). Int. J. Miner. Process. 58, 223–236.

8. LAWLER, D. F., Particle size distributions in treatment process: theory and practice. (1997). Water Science and Technology – Elsevier Science Ltd, v.36, n.4, p.15-23.

9. LI, T. et al. The strength and fractal dimension characteristics of alum–kaolin flocs. International Journal Of Mineral Processing, Beijing, Pr China, v. 82, n. 1, p.23-29, 2006.

10. Moruzzi, R. B. Avaliação do desempenho do processo de floculação usando parâmetro característico da função distribuição de tamanho de partículas: experimentação, modelagem e simulação / Rodrigo Braga Moruzzi. - Rio Claro, 2014.
11. MORUZZI, R. B. Avaliação da Influência da Distribuição de Tamanho de Partículas e do Binômio Velocidade/Tempo de Detenção na Zona de Reação no Desempenho da Flotação com Utilização de Sonda Ultrasônica e Técnica de Análise por Imagem. Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 240p, 2005.
12. 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. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, p. 273-283, 2007.
13. Moruzzi, R.B.; Reali, M.A.P. Characterization of microbubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests, Water Sci. Technol. 61(1). 253–262, 2010.
14. Oliveira, A.L.; Moreno, P.; Silva, P. A. G. da; Julio, M.D; Moruzzi, R.B. Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter, Desalination and Water Treatment, 2015.
15. PARKER, D.S., Kaufman, W.J., Jenkins, D., Floc breakup in turbulent flocculation processes.(1972). J. Sanit. Eng. Div.: Proc. Am. Soc. Civ. Eng. SA1, 79–99.
16. SANTOS, H.R. dos; PRADO, G.S do; VIDAL, C.M.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. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 9, n. 4, p. 291-300, 2004.
17. Silva, P. A. G. da. Força e dimensão fractal para floco de caulinita coagulado com sal de alumínio aplicado ao tratamento de água para abastecimento. Rio Claro. Trabalho de Formatura. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2016.