

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Força e dimensão fractal para floco de caulinita
coagulado com sal de alumínio aplicado ao tratamento
de água para abastecimento

Pedro Augusto Grava da Silva

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro (SP)

2016

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

PEDRO AUGUSTO GRAVA DA SILVA

FORÇA E DIMENSÃO FRACTAL PARA FLOCO DE
CAULINITA COAGULADO COM SAL DE ALUMÍNIO
APLICADO AO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA
ABASTECIMENTO

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

Rio Claro - SP

2016

628.092 Silva, Pedro Augusto Grava da
S586f Força e dimensão fractal para floco de caulinita coagulado com sal de
alumínio aplicado ao tratamento de água para abastecimento / Pedro
Augusto Grava da Silva. - Rio Claro, 2016
22 f. : il., figs., gráfs., tabs.

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

1. Engenharia ambiental. 2. Tratamento de água. 3. Floculação. 4.
Distribuição do tamanho de partículas. 5. Força do floco. 6. Fractal. I.
Título.

PEDRO AUGUSTO GRAVA DA SILVA

FORÇA E DIMENSÃO FRACTAL PARA FLOCO DE
CAULINITA COAGULADO COM SAL DE ALUMÍNIO
APLICADO AO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA
ABASTECIMENTO

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto
de Geociências e Ciências Exatas - Campus 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 _____.

Pedro Augusto Grava da Silva

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Resumo:

O presente estudo investigou o processo de floculação, aplicado ao Tratamento de Água, através da reprodução laboratorial do processo em reator estático *Jar Test*. A água de estudo foi preparada com água deionizada e caulinita, coagulada com Sulfato de Alumínio e neutralizada por Hidróxido de Sódio. O processo foi monitorado por análise de imagem digital com o objetivo de determinar a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP), a Força do Floco e a Dimensão Fractal (Df) para diferentes Gradientes Médios de Velocidade de Floculação (Gf) e tempos de floculação (tf). Os resultados apontam que com o crescimento de Gf há uma tendência à homogeneização dos diâmetros das partículas, por exemplo para $Gf=20s^{-1}$ o Desvio Padrão em relação a média dos diâmetros é igual 0,1944 mm e para $Gf=80s^{-1}$ obteve-se $DP=0,1031$ mm. Por outro lado, o aumento de Gf provoca a diminuição no valor da Dimensão Fractal, com Df indo de 1,67 em $Gf=20s^{-1}$ para 1,38 em $Gf=80s^{-1}$, produzindo flocos de estrutura aberta distantes de uma esfera perfeita, que por sua vez são mais resistentes às forças de cisalhamento do que os agregados com maior valor de Df.

Palavras-chave: Força do Floco. Dimensão Fractal. Distribuição do Tamanho de Partículas. DTP. Floculação. Tratamento de Água.

Abstract:

This paper looks into the flocculation process, applied in water treatment plants, through the reproduction on a laboratory scale using a Jar Test static reactor. The Water Study is done with deionized water and kaolinite. It was coagulated with Aluminum Sulfate and neutralized by Sodium Hydroxide. The process was monitored by digital image analysis aiming to determine Particle Size Distribution (DTP), Floc Strength and Fractal Dimension (Df) to different Flocculation Speed Average Gradients (Gf) and Flocculation time (tf). The results point to a trend towards standardization of the particle diameters when the Gf grows, for example, the $Gf=20s^{-1}$ Standard Deviation from the mean diameter is equal to 0.1944 mm and $Gf=80s^{-1}$ gave $SD=0.1031$ mm. However the Gf's increase causes a reduction to the Fractal Dimension value, with Df ranging from 1.67 when $Gf=20s^{-1}$ to 1.38 when $Gf=80s^{-1}$. If there is a low value for Fractal Dimension which in turn produces flocs with an open structure that are far from perfect spheres and are stronger than those with a high value.

Key words: Floc Strength. Fractal Dimension. Particle Size Distribution. Flocculation. water treatment.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVO	8
3. MÉTODO.....	8
3.1 Preparação água de estudo.....	8
3.2 Ensaio de floculação	8
3.2.1 Estabilização da DTP	9
3.3 Monitoramento.....	9
3.3.1 Resolução	10
3.3.2 Tratamento de imagens	10
3.4 Cálculo	11
3.4.1 Fractal.....	11
3.4.2 Força.....	11
4. RESULTADOS	12
4.1 Distribuição de tamanho de partículas	12
4.2 Força do Floco	16
4.3 Dimensão fractal	17
4.4 Força x Fractal	19
4.5 Tabela Síntese	20
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	20
6. CONCLUSÕES.....	21
7. REFERÊNCIAS.....	22

1. Introdução

A coagulação é um processo bem estabelecido dentro do tema tratamento de água que consiste na desestabilização química de impurezas resultante da alteração de características da água. (DI BERNARDO e DANTAS, 2005)

Na floculação por sua vez, deseja-se promover o transporte e o choque das partículas desestabilizadas na etapa de coagulação, objetivando, a transformação de partículas discretas de pequenas dimensões em agregados maiores, que são nomeados flocos (BALTAR e OLIVEIRA, 1998; HOGG, 2000) apud (LI et al., 2006).

Desta forma, a floculação constitui ponto nevrálgico no tratamento, pois a característica dos flocos formados tem estreita relação com a característica da água bruta, com os produtos químicos e com a tecnologia de empregada, e estes são determinantes na qualidade da água tratada produzida para abastecimento público (MORUZZI et al, 2015).

O conhecimento de características dos flocos como sua estrutura morfológica, tamanho, e resistência a forças de cisalhamento surge como potencial ferramenta para o aprimoramento no projeto e concepção de unidades de separação sólido/líquido empregadas no tratamento de água e esgoto.

Para caracterização da estrutura morfológica dos flocos tem sido utilizado o conceito de fractal. Isso significa que as definições tradicionais baseadas na geometria euclidiana falham para definir as dimensões dessas partículas. Uma dimensão fractal, por exemplo, a área fractal, pode ser descrita pela relação entre a área A , uma medida característica de tamanho L , e a dimensão fractal de área Df :

$$A \propto L^{Df} \quad (1)$$

O valor de Df para objetos euclidianos, é geralmente um número inteiro, mas para objetos fractais, os valores de Df são fracionários. Agregados compactos têm uma dimensão fractal mais elevada, enquanto os agregados com estruturas soltas têm uma dimensão fractal inferior como aponta Li et al. (2006).

A relação da área A de um objeto plano com seu diâmetro d será utilizada no presente estudo para análise da forma dos flocos e, baseia-se na Equação 2.

$$A = k \cdot d^{Df} \quad (2)$$

Em que k é uma constante de ajuste e o valor Df varia de 1 a 2. A equação 2 pode ser linearizada obtendo-se a Equação 3.

$$\ln A = \ln k + Df \cdot \ln d \quad (3)$$

Por outro lado, a força de um floco é dependente das ligações entre as partículas componentes do mesmo, isso inclui a quantidade e a energia dessas ligações (PARKER et al., 1972; BACHE et al., 1997), no entanto, o floco será rompido se a força de cisalhamento aplicado sobre sua superfície for maior que a força de ligação interpartículas (BOLLER e BLASER, 1998). Assim como a estrutura, a força do floco é um parâmetro operacional particularmente importante em técnicas de separação líquido/sólido para a remoção eficiente de partículas agregadas. Processos unitários em estações de tratamento de água geralmente são projetados para minimizar a quebra do floco, entretanto, na realidade muitas vezes isto não ocorre, sendo as regiões de alto cisalhamento prevalentes (MCCURDY et al., 2004).

As dimensões de um floco estão correlacionadas com sua força para uma determinada taxa de cisalhamento segundo a Equação 4, presente nos estudos de Francois (1987); Yeung and Pelton (1996); Leentvaar and Rebhun(1983) apud Li et al. (2006).

$$d = CG^{-\gamma} \quad (4)$$

Em que d , C , G e γ correspondem ao diâmetro máximo do floco (μm), constante, gradiente médio velocidade (s^{-1}) e o coeficiente de força do floco, respectivamente. Os valores de γ e C podem ser obtidos a partir de um gráfico log-log do diâmetro contra o gradiente médio de velocidade, conforme a Equação 5.

$$\ln d = \ln C - \gamma \cdot \ln G \quad (5)$$

A relação de inversa proporcionalidade indica que quanto maior o valor de γ , mais propenso o floco está a se romper sob crescente taxa de cisalhamento em agregados de menor diâmetro d e, portanto, o valor γ é considerado como um indicador de força do mesmo (JARVIS et al., 2005).

Além do método empírico de obtenção de um coeficiente de força, há o método teórico para o cálculo desta elucidado por Bache et al. (1999). A força média

aplicada por unidade de área do sistema foi definida como σ (N/m²) conforme a Equação 6.

$$\sigma = \frac{4\sqrt{3}}{3} \frac{\rho_w \varepsilon^{3/4} d}{\nu^{1/4}} \quad (6)$$

Sendo ρ_w a densidade da água (kg/m³), ε a taxa de dissipação da energia local por unidade de massa (m²/s³) e ν a viscosidade cinemática (m²/s). Pode-se com alterações insignificantes no resultado, substituir ε por $\bar{\varepsilon}$, que é calculado através da Equação 7.

$$\bar{\varepsilon} = \nu G^2 \quad (7)$$

Embora vários métodos tenham sido empregados na determinação da força de flocos e dimensão fractal separadamente, existe literatura limitada para investigar a relação entre esses dois parâmetros (LI et al., 2006). Neste sentido, o presente trabalho buscou avaliar e relacionar a força do floco e a dimensão de fractal sob diferentes condições de mistura, aplicada ao tratamento de água para abastecimento.

2. Objetivo

Neste trabalho de conclusão de curso foram estudados a morfologia e força de resistência ao cisalhamento de flocos de caulinita coagulados com sal de alumínio bem como sua correlação.

3. Método

3.1 Preparação água de estudo

A turbidez obtida a partir de solução de caulinita foi de 25 ± 2 uT, produzindo a água de estudo conforme Pádua (1994) e Yukselen & Gregory (2004). A partir de diagrama de coagulação/floculação obteve-se a dosagem ótima do coagulante Sulfato de Alumínio (Al₂(SO₄)₃.14H₂O), sendo a concentração 2mg Al⁺³/L e o pH igual a 7,5, onde o mecanismo de coagulação atuante é o de varredura. O pH foi obtido adicionando-se hidróxido de sódio (NaOH).

3.2 Ensaio de floculação

A água de estudo foi levada ao equipamento *Jar Test* onde as operações de coagulação/floculação foram realizadas sob condições padrão para a exata

conversão da rotação imposta ao eixo de agitação em Gradiente médio de velocidade das partículas em solução. Os ensaios foram conduzidos de forma denominada de Jarro Único, pois os diferentes gradientes médios de velocidades de floculação foram aplicados para uma mesma amostra.

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 (Gmr) de 800 s^{-1} por 10 segundos. O ensaio de floculação consistiu em elevar gradativamente as forças de cisalhamento do sistema, por meio do gradiente médio de velocidade. Partiu-se do gradiente de floculação $Gf_1=20 \text{ s}^{-1}$ alterando-se para $Gf_2=40 \text{ s}^{-1}$, $Gf_3=60 \text{ s}^{-1}$ e $Gf_4=80 \text{ s}^{-1}$, mantendo para cada patamar o tempo de floculação (tf) de 60 min.

3.2.1 Estabilização da DTP

O tempo de floculação do qual as amostras foram obtidas (60 min) foi suficientemente grande para que o sistema atinja o estágio estacionário (EE), situação em que ocorre estabilização em número da DTP e a estabilização morfológica, de acordo com Moruzzi (2014). A situação em que a taxa de ruptura iguala-se a taxa de recrescimento dos flocos é necessária como premissa para equações que explicam o fenômeno de floculação, como as de Argaman & Kaufman (1970) e Bratby (1981), apud Moruzzi (2014).

3.3 Monitoramento

Baseado nos métodos de Gregory e Chung (1995), Moruzzi e Reali (2007) iluminou-se uma estreita faixa da água de estudo por um plano de laser, enquanto um foto-detector se encarregava de registrar a situação do sistema em um determinado instante. Conforme Silva (2015), a fonte de iluminação utilizada foi o *Green Laser Pointer*, com comprimento de onda de 520nm e potência de 20.000 mW, adaptado com uma lente especial para a emissão de um feixe planar. 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 1, para captar a reflexão dos raios do laser após incidirem e serem refletidos pelas partículas floculadas.

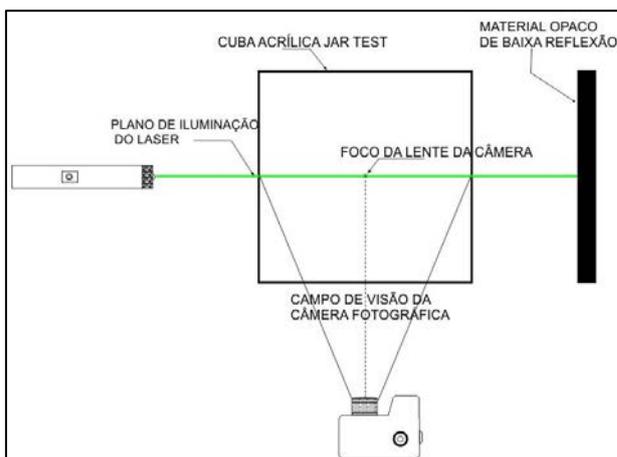


Figura 1. Arranjo experimental de bancada. FONTE: Silva (2015).

3.3.1 Resolução

Foram feitos testes para alguns modelos de lentes do fabricante *Navitar*, a fim de encontrar a melhor imagem nas condições de iluminação e posicionamento do laboratório utilizado para os ensaios. 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 foram feitos testes em busca dos valores ótimos para os parâmetros brilho, contraste, 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

O tamanho correspondente do pixel obtido foi de 0,03036 mm e $N=5,82119$, o qual se mostrou satisfatório ao dividirmos a média dos maiores diâmetros de todos os objetos capturados no experimento pelo tamanho do pixel, ou seja, na média cada floco é representado por cerca de 5 pixels na imagem digital. No cômputo global, foram analisados 103586 flocos, resultando em erro médio amostral na faixa de 0,5% para 99% de confiança.

3.3.2 Tratamento de imagens

O tratamento consistiu em transformar cada imagem obtida pela câmera, em uma matriz binária que tenha somente pixels que são considerados flocos, e pixels que assim não são considerados pelo computador de acordo com os passos descritos em Silva (2015).

O software *Image-Pro Plus 7.0* (IPP 7.0) foi escolhido para realizar os processos de binarização, contagem e mensuração. A binarização consiste em transformar a

imagem que contém pixels em escala de cinza, variando de 0 (totalmente preto) a 255 (totalmente branco), em uma imagem binária 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. A Figura 2 ilustra o processamento de uma imagem pelo software.

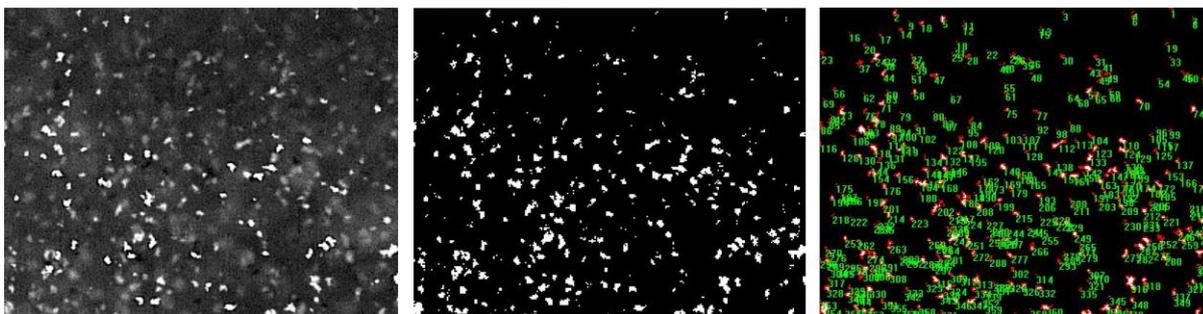


Figura 2. (a) Imagem dos flocos em escala de cinza. (b) Matriz binarizada (c) Matriz em processo de contagem e medição pelo software IPP 7.0

Dentro da binarização escolheu-se manualmente o limiar que melhor condiz com a situação real, para que não houvesse superestimação da quantidade e das dimensões dos flocos por ruídos na imagem. A matriz resultante foi operada estatisticamente pelo software *Microsoft Excel 2007* e o processamento das imagens gerou planilhas de dados sobre as partículas. Dentre os dados relevantes a este estudo está o histograma da DTP e tabelas com dados sobre altura, base, área, raio, diâmetro médio e fractal dos flocos. Conforme Silva (2015), tais dados abrem inúmeras possibilidades para trabalhos posteriores que possam trazer avanços à área de tratamento de efluentes.

3.4 Cálculo

3.4.1 *Fractal*

A dimensão fractal foi calculada globalmente para toda a população de flocos de cada condição pela Equação (3), descrita anteriormente, em que a inclinação da reta que melhor se ajusta à distribuição dos pontos representa o valor de D_f .

3.4.2 *Força*

A força do floco foi calculada tanto a partir do método empírico quanto do teórico, por meio das equações (5) e (6) respectivamente citadas na introdução.

4. Resultados

4.1 Distribuição de tamanho de partículas

A dimensão característica do floco adotada neste estudo foi o maior diâmetro do objeto. Os dados obtidos foram classificados em 15 faixas com amplitude igual a 0,09153 mm, sendo o menor limite inferior (limite inferior Classe 1) igual a 0,03036 mm que também é o limite de resolução dos experimentos, e o maior (limite Superior Classe 15) igual a 1,403332 mm, que representa a maior dimensão obtida para um floco entre todos os ensaios. Essas classes foram fixadas para todo o estudo. A tabela 1 apresenta os limites das classes de tamanho, bem como a ocorrência de partículas em cada classe para cada um dos G_f analisados.

Tabela 1. Classes de tamanho das partículas analisada e frequência relativa percentual das classes para cada valor de G_f analisado.

Classe	Limite inf (mm)	Limite sup (mm)	Frequência a relativa $G_f=20\text{ s}^{-1}$ (%)	Frequência relativa $G_f=40\text{ s}^{-1}$ (%)	Frequência relativa $G_f=60\text{ s}^{-1}$ (%)	Frequência relativa $G_f=80\text{ s}^{-1}$ (%)
1	0,0303	0,1218	35,554	26,542	27,001	27,085
2	0,1218	0,2134	18,805	27,41	32,417	34,682
3	0,2134	0,3049	12,733	22,514	26,961	26,927
4	0,3049	0,3964	10,631	13,276	10,334	8,701
5	0,3964	0,4880	6,898	5,615	2,249	1,77
6	0,4880	0,5795	6,686	2,596	0,724	0,553
7	0,5795	0,6710	4,559	1,227	0,201	0,201
8	0,6710	0,7626	2,292	0,469	0,089	0,06
9	0,7626	0,8541	0,898	0,194	0,008	0,011
10	0,8541	0,9456	0,543	0,109	0,016	0
11	0,9456	1,0372	0,165	0,025	0	0
12	1,0372	1,1287	0,071	0,021	0	0
13	1,1287	1,2203	0,047	0	0	0
14	1,2202	1,3118	0,094	0	0	0
15	1,3118	1,4033	0,024	0	0	0
TOTAL			100	100	100	100

Observa-se que a grande maioria das partículas estão concentradas nas menores faixas de tamanho, o que se atribui à natureza da partícula discreta, provenientes do sobrenadante de suspensão coloidal de caulinita, que se constituem em partículas de tamanho muito reduzido como mostra a Figura 3.

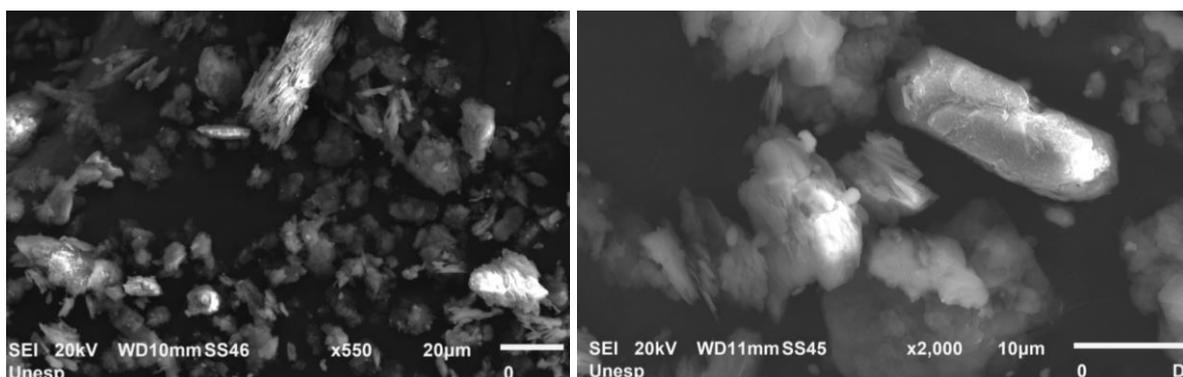


Figura 3. Imagens obtidas a partir de Microscópio Eletrônico de Varredura (Mev) de partículas primárias de caulinita sólida comercial utilizada neste estudo. (a) Ampliação 550x e escala 20 μm . (b) Ampliação 2200x e escala 10 μm .

É visível para a DTP a atuação de dois mecanismos, o primeiro atua com maior peso sobre as partículas pequenas, em que o aumento do G_f promove aumento da probabilidade de choque entre as partículas fazendo com que a ocorrência das mesmas aumente em relação às partículas grandes. Sobre as partículas grandes atua o segundo mecanismo, no qual o aumento de G_f promove a quebra do floco, fazendo com que a frequência relativa das maiores faixas diminua.

Na Figura 4, para as partículas da faixa 1, é possível observar uma queda acentuada na passagem de $G_f=20 \text{ s}^{-1}$ para $G_f=40 \text{ s}^{-1}$, seguida de uma estabilização. A hipótese aqui proposta é que com o aumento da energia do sistema as partículas tenham passado da classe 1 para a classe 2, porém, como não há contribuição (não há partículas menores que as da classe 1) esta decresce em ocorrência.

Já as faixas 2 e 3, crescem devido ao aumento da probabilidade de choques entre as partículas, causado pelo aumento da taxa de agitação de acordo com o modelo clássico de floculação ortocinética.

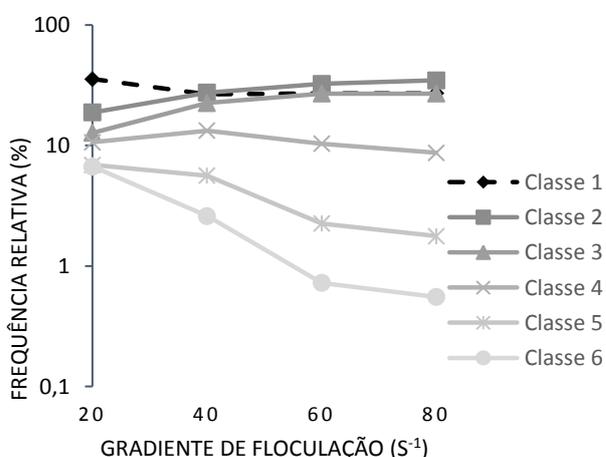


Figura 4. Variação da frequência relativa percentual contra G_f

Para as partículas das maiores faixas (faixas de 9 a 15), a tabela 1 aponta a um escalonamento causado pelo incremento de energia no sistema. Com o aumento do G_f as partículas de tamanhos maiores tendem a ter menos ocorrência, até desaparecerem do sistema. Esta tendência também é observada nas Figuras 4 e 5, em que as caudas dos histogramas classes diminuem nas maiores classes de $G_f=20 \text{ s}^{-1}$ até $G_f=80 \text{ s}^{-1}$.

A diminuição da ocorrência das maiores partículas proporcional ao aumento da energia imposta ao sistema é explicada pela maioria dos modelos cinéticos e colisionais, como os de Argaman e Kauffman (1970) e Parker et al. (1972), e de fácil compreensão quando se considera a premissa de que a taxa de cisalhamento, nesse caso expressa por G_f , promove a quebra do floco ao superar sua energia de ligação.

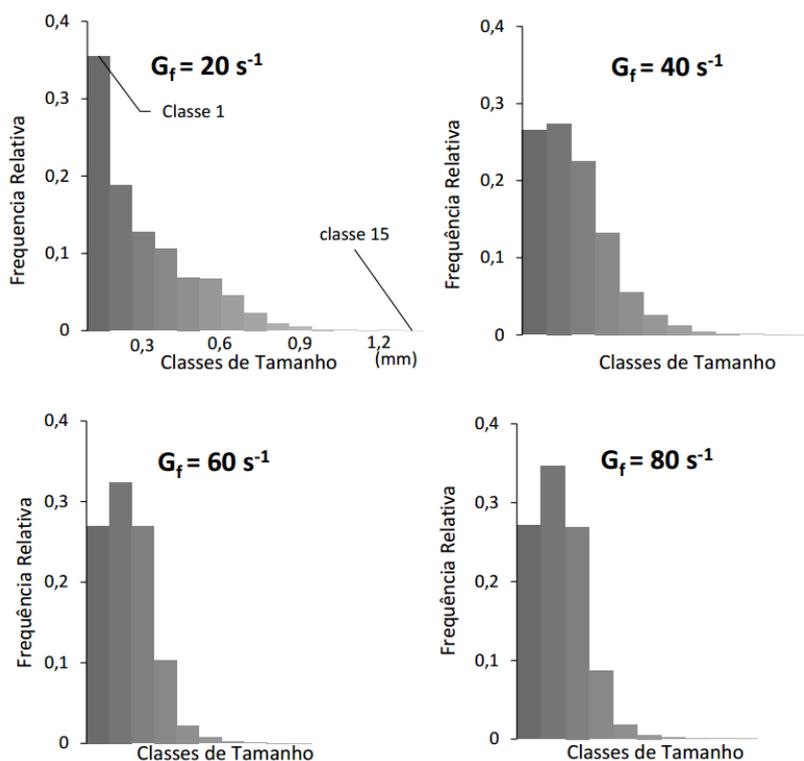


Figura 5. Histogramas de DTP para os diferentes G_f

A Figura 5 representa a distribuição das ocorrências de partículas ao longo das faixas de tamanho. Cada histograma representa uma condição de forças cisalhantes

atuantes no sistema. À esquerda de cada histograma estão as faixas dos menores diâmetros que detêm a grande maioria das partículas, à direita estão as faixas de maior diâmetro. Em $Gf=20\text{ s}^{-1}$, a máxima ocorrência situa-se entre 0,03 mm e 0,12 mm, e a partir de 40 s^{-1} a máxima se encontra entre 0,12 mm e 0,21 mm.

Ainda na Figura 5 há um claro achatamento do histograma causado pelo aumento da frequência das faixas de diâmetro reduzido (Classes 2 e 3) e diminuição das demais classes, explicados anteriormente. Isto indica que o aumento de Gf promove a homogeneização das partículas quanto ao seu diâmetro.

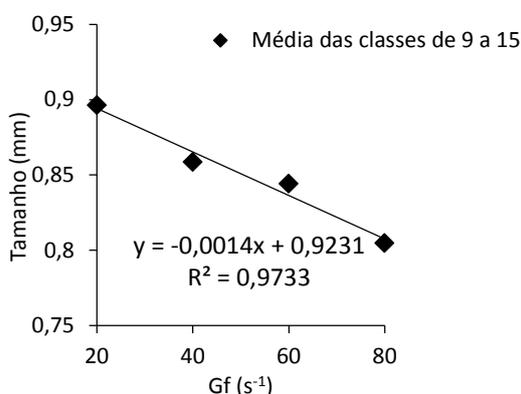


Figura 6. O gráfico incorporou as médias das classes de 9 a 15 para evidenciar o comportamento das “caudas” dos histogramas da figura 5.

A Figura 6 apresenta a redução da média das classes de maiores flocos quanto ao aumento de Gf , isto é, a média dos diâmetros entre as maiores partículas tende a diminuir com uma maior taxa de cisalhamento, o que é visível quando se compara as imagens obtidas para $Gf=20\text{ s}^{-1}$ com as obtidas para $Gf=80\text{ s}^{-1}$. Tal comparação é apresentada na Figura 7.

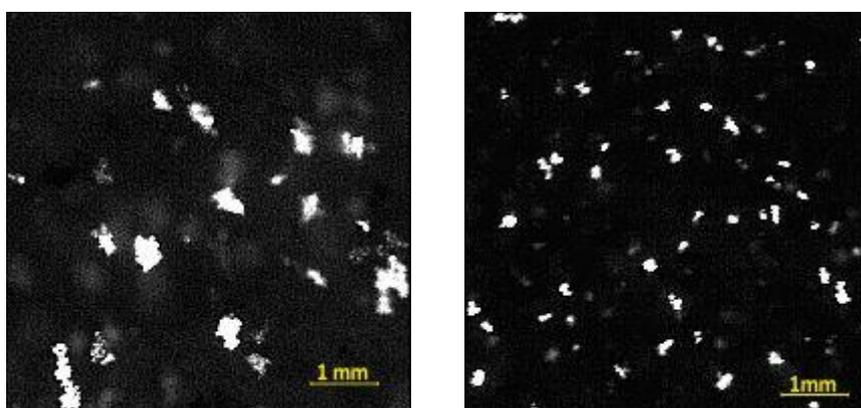


Figura 7. (a) imagem obtida para $Gf = 20\text{ s}^{-1}$ e tempo de floculação de 60 min. (b) imagem obtida para $Gf = 80\text{ s}^{-1}$ e tempo de floculação de 60 min.

4.2 Força do Floco

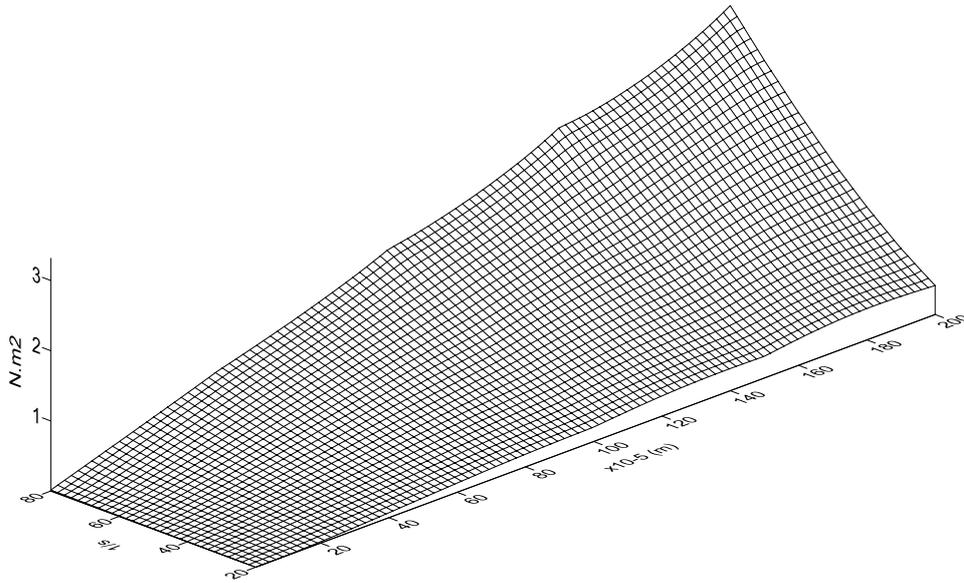


Figura 8. Variação da força (sigma) com relação a d e a Gf .

Neste trabalho a força do floco foi determinada de duas maneiras, a primeira segue o método elucidado por Bache et. Al (1999) apud Li et al. (2006). Modelo que apresenta a força do floco pela letra grega σ (sigma) com unidade (N/m^2). Esta tem comportamento não linear, e a superfície da Figura 8 representa sua variação em relação a Gf e ao diâmetro das partículas. As Figuras 9 e 10 apresentam a força do floco obtida pelo modelo contra Gf e contra as classes de tamanho respectivamente.

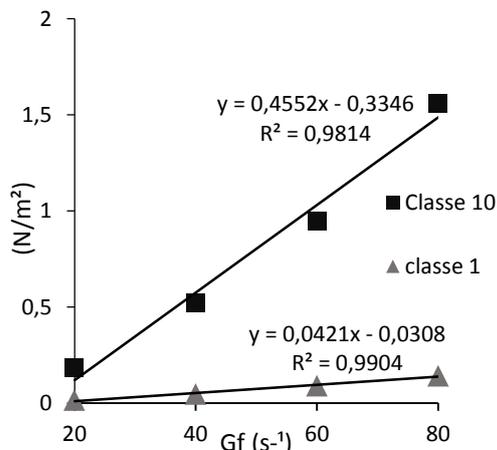


Figura 9. Gráfico da variação da força do floco (sigma) contra Gf .

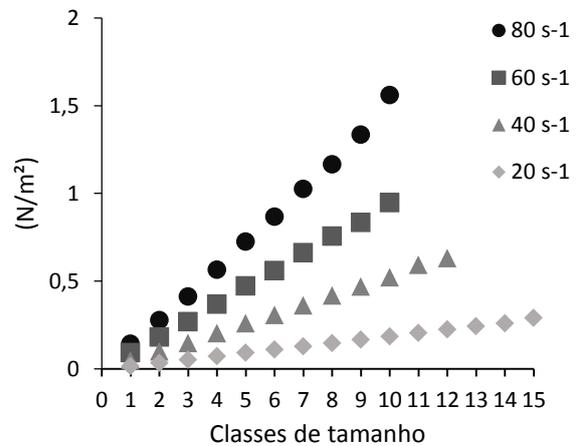


Figura 10. Gráfico da variação da força do floco contra classes de tamanho.

Na Figura 9, é possível observar que a força do floco sigma cresce junto a G_f , o que parece coerente visto que à medida que crescem as forças de ruptura, o agregado se mantém unido quando se tem uma força de ligação no mínimo igual àquelas que lhe são aplicadas. Da mesma forma, para que não ocorra ruptura, um floco maior deve ter uma força sigma de maior magnitude do que um floco menor. Flocos maiores sofrem mais sob ação de altas forças de ruptura, o que justifica a maior inclinação da reta de ajuste da Classe 10.

Não obstante, a Figura 10 deixa claro que para $G_f=20 \text{ s}^{-1}$, que resulta em baixas forças de ruptura, a influência do diâmetro na força sigma do floco é pequena.

A segunda forma é aquela em que a força é representada pelo coeficiente gama (γ) da Equação 3 que relaciona diâmetro, G_f e força. A Figura 11 apresenta o coeficiente de força γ para os dados analisados. A dimensão característica do floco utilizada para a obtenção do coeficiente foi a média ponderada das classes de 9 a 15 somadas. Isso por que nessa faixa de tamanho fica evidente a ação da taxa de cisalhamento provocando a quebra do floco, além disso, para posterior estudo de relação com a morfologia do floco, é imprescindível que se utilize as maiores classes para que a resolução das imagens não seja um fator limitante, conforme observado na Seção 3.3.1.

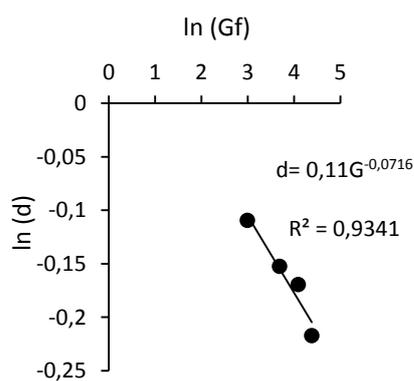


Figura 11. Gráfico que relaciona d e G_f . Para uma medida global que representasse a oscilação do diâmetro entre as classes foi utilizada a média ponderada das classes de 9 a 15.

4.3 Dimensão fractal

A dimensão fractal foi inicialmente calculada para toda população de flocos da amostra, obtendo-se um D_f para cada G_f , como pode ser observado na Figura 12.

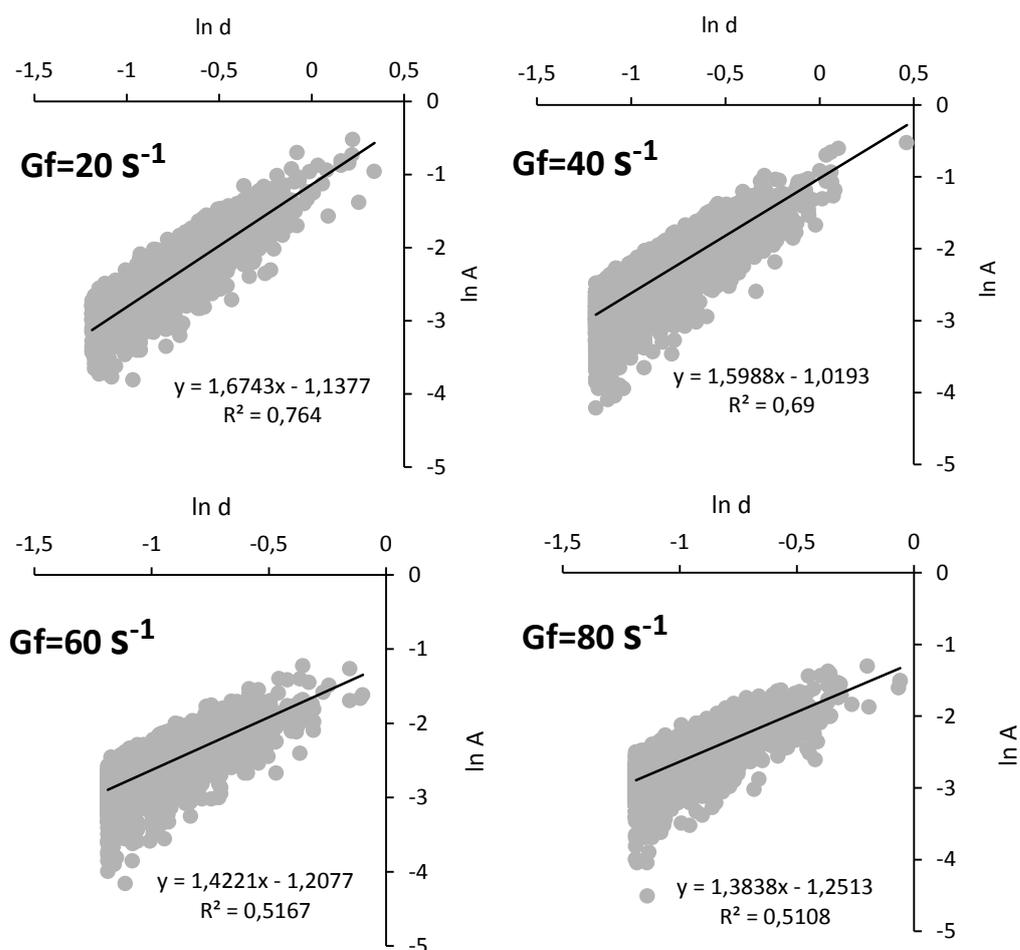


Figura 12. A inclinação da reta de ajuste a nuvem de pontos representa a dimensão fractal da amostra.

É importante notar que o valor de D_f decresce com o aumento de G_f (Figura 13), isso indica que os flocos em situação de energia mais elevada possuem morfologia mais distante de uma esfera perfeita, ao contrário do que seria intuitivo se pensar, já que alguns estudos propõem que nessas condições ocorre a lapidação do agregado, este adquire então uma forma que oferece menos resistência contra as forças de cisalhamento.

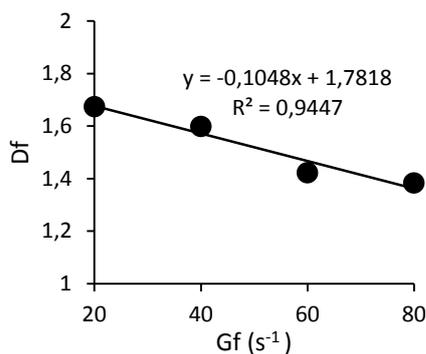


Figura 13. variação de D_f contra G_f

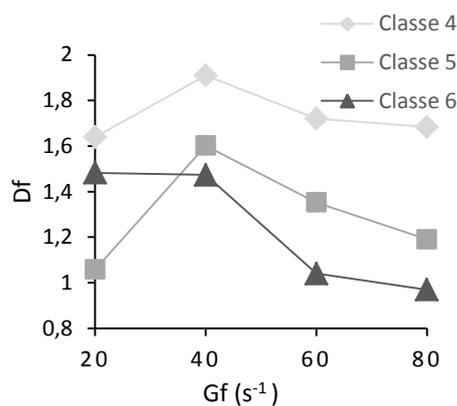


Figura 14. variação de D_f contra G_f onde o número de floco amostrado possibilitou o cálculo de D_f

A Figura 14 apresenta os valores de D_f por classes de tamanho. Observa-se também neste caso, a tendência para o decréscimo com o aumento da taxa de cisalhamento.

4.4 Força x Fractal

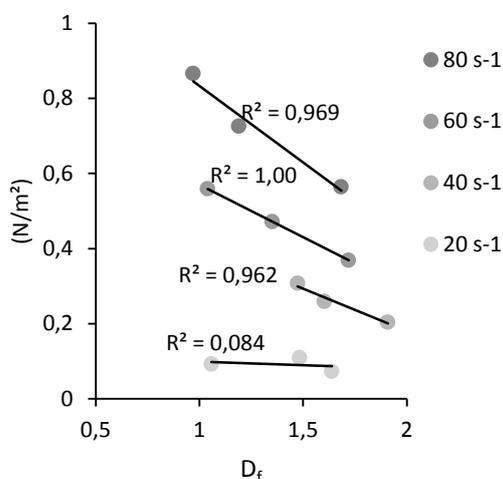


Figura 15. Variação da força (σ) contra D_f .

A Figura 15 representa a relação entre D_f e força (σ), os quais possuem influência da dimensão característica (d) e as taxas de cisalhamento (G_f). Através dela podemos observar a relação inversamente proporcional entre D_f e σ . Isso significa que para a natureza das partículas formadas, uma partícula de forma ideal esférica ($D_f=2$) não representa a maior força de ligação possível.

4.5 Tabela Síntese

A tabela a seguir apresenta os dados obtidos agrupados para melhor visualização dos resultados discutidos até aqui.

Tabela 2. DTP, força do floco e Dimensão fractal sob vários Gradientes de floculação

Gf	Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP)		Força do Floco	Df
	Média dmax	Desvio Padrão		
(s ⁻¹)	(mm)	(mm)	(N/m ²)	
20	0,1767	0,1944	0,0366	1,6743
40	0,1838	0,1438	0,1077	1,5988
60	0,1718	0,1089	0,1851	1,4221
80	0,1694	0,1031	0,2808	1,3838

5. Considerações Finais

Já é sabido que o fenômeno estudado tem desdobramentos de natureza complexa que a simples abordagem causa-consequência não gera resultados expressivos. Todavia o aprofundamento realizado neste estudo produz sóbrias evidências, como no caso da Distribuição do Tamanho de Partículas, onde os resultados apontam que, dizer que a dimensão característica aumenta ou diminui com o crescimento de Gf, pode ser muito simplificador.

Acresce-se a esta breve revisão dos resultados, o necessário prosseguimento à investigação do tema para preencher lacunas, como por exemplo, a dos resultados que diferem da bibliografia consultada.

Nesse contexto, este projeto considera importante também propor uma visão holística do fenômeno estudado, que pode trazer implicações para projeto e operação de ETAs. Tais implicações caminham em direção à revisão de características atualmente consideradas ótimas para a separação sólido/líquido, bem como incluir os parâmetros fractal e força do floco na busca pela maior eficiência de tratamento de águas. Tais parâmetros demonstraram grande influência sobre o entendimento de quão resistentes são os flocos às ações cisalhantes, geralmente submetidos em uma ETA.

6. Conclusões

Com base nos resultados desse trabalho, pode concluir que:

- DTP: Com o crescimento de G_f , há uma tendência à homogeneização dos diâmetros das partículas.
- Dimensão Fractal: a seção do estudo sobre a dimensão fractal aponta para uma relação em que maiores G_f , conduzem ao surgimento de flocos com estruturas mais abertas, distantes de uma esfera perfeita.
- Força do Floco: O coeficiente de força do floco aponta para uma relação inversamente proporcional entre o diâmetro e G_f para partículas maiores que 0,76 mm.
- Força x Fractal: Quando confrontada com a força do floco, a análise resulta que os flocos abertos têm força de ligação maior que os de forma circular.

7. Referências

1. ARGAMAN, Y., KAUFMAN, W.J. Turbulence and Flocculation. *Journal Sanitary Eng. Div., ASCE* 96, SA 2, Apr, 1970.
2. BACHE, D.H., JOHNSON, C., MCGILLIGAN, J.F., RASOOL, E. A conceptual view of floc structure in the sweep floc domain.(1997). *Water Sci. Technol.* 36, 49–56.
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. BRATBY, J.R. Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. *Jour. AWWA*, v.73, n.6, p.318-325, Jun, 1981.
5. DI BERNARDO, L.;DANTAS, A.D.B. Métodos e técnicas de tratamento de água. Segunda Edição. São Carlos. RiMa, 2005. 792p.
6. FRANCOIS, S.B., Strength of aluminum hydroxide flocs. (1987). *Water Res.* 21, 1023–1030
7. 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.
8. HOGG, R., Flocculation and dewatering. (2000). *Int. J. Miner. Process.*58, 223–236.
9. LEENTVAAR, J., REBHUN, M., Strength of ferric hydroxide flocs. (1983).*Water Res.* 17, 895–902.
10. JARVIS, P., et al., A review of floc strength and breakage. (2005). *Water Res.* 39, 3121–3137.
11. 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, 12 maio 2006
12. MCCURDY, K., CARLSON, K., GREGORY, D., Floc morphology and cyclic shearing recovery: comparison of alum and polyaluminium chloride coagulants. (2004). *Water Res.* 38,486–494.
13. MORUZZI, Rodrigo Braga, Avaliação do desempenho do processo de floculação usando parâmetro característico da função distribuição de tamanho de partículas: experimentação, modelagem e simulação, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, Brasil, 2014.Ibid.
14. MORUZZI, Rodrigo Braga; OLIVEIRA, André Luiz de; JULIO, Marcelo de. Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração. *Revista DAE*, n. 200, p. 25–36, 2015.
15. MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. (2007). Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas de fotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. *RevistaEngenhariaSanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, 12, (3), p. 273-283.
16. PÁDUA, V.L. (1994) Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de reatores estáticos. 165 p. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
17. 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.
18. SILVA, Pedro Augusto Grava da, DETERMINAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE IMAGEM DIGITAL PARA A OBTENÇÃO DE DADOS DE PARTÍCULAS EM FLOCULAÇÃO LABORATORIAL, in: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, Rio Claro, São Paulo Brasil: [s.n.], 2015, p. 1–14.
19. YUKSELEN, M. A., AND GREGORY, J. (2004) The reversibility of flocs breakage. *Int. J. 21 Miner. Process.*, 73, 251-259.
20. YEUNG, A.K., PELTON, R., Micromechanics: a new approach to studying the strength and breakup of flocs (1996). *J. Colloid Interface Sci.*184, 579–585.