

I-110 – DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS, FORÇA DO FLOCO E DIMENSÃO FRACTAL PARA DOIS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO LABORATORIAIS DISTINTOS

Pedro Augusto Grava da Silva

Engenheiro Ambiental – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Rio Claro. Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental FEB-UNESP-Bauru-SP.

André Luiz de Oliveira

Engenheiro Civil – Universidade Federal de Viçosa, Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Hidráulica e Saneamento – EESC-USP, Doutor em Engenharia Civil com ênfase em Hidráulica e Saneamento EESC-USP.

Rodrigo Braga Moruzzi⁽¹⁾

Engenheiro Civil – Universidade Federal de São Carlos - SP, Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Hidráulica e Saneamento – EESC-USP, Doutor em Engenharia Civil com ênfase em Hidráulica e Saneamento EESC-USP.

Endereço⁽¹⁾: DEPLAN-IGCE-UNESP-Rio Claro. Av. 24-A, nº1515, CEP: 13506-900, Rio Claro-SP. Brasil. Tel: +55 19 3526.9339. E-mail: rmoruzi@rc.unesp.br

RESUMO

Buscou-se neste estudo comparar os parâmetros Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP), Força do Floco e Dimensão Fractal (D_f), por meio da investigação detalhada do processo de floculação simulada em laboratório. Tais parâmetros foram calculados a partir de conjunto de flocos obtidos em dois ensaios distintos: Jarro Único e Vários Jarros. Nestes ensaios foram avaliados os flocos formados em gradientes de floculação (G_f) de 20 s^{-1} , 40 s^{-1} , 60 s^{-1} e 80 s^{-1} , com tempos de floculação de 60 minutos. No ensaio de Jarro Único o aumento do G_f foi realizado em degrau, no mesmo jarro e com a mesma amostra. No ensaio de Vários Jarros cada gradiente foi avaliado em um jarro diferente partindo-se sempre da mesma água bruta, preparada com caulinita com turbidez de $25 \pm 2 \text{ uT}$. O Ensaio de Vários Jarros produziu flocos com tamanhos mais próximos a média, porém o comportamento da DTP em função do G_f apresentou grande semelhança quando comparado com os resultados obtidos em Jarro Único. O aumento dos valores de G_f provocou o surgimento de flocos com estruturas mais abertas, distantes de uma esfera perfeita. O Ensaio de Vários Jarros produziu flocos com D_f menor, porém menos suscetíveis à influência das alterações dos valores de G_f . Os coeficientes de força do floco apontam para uma relação inversamente proporcional entre o diâmetro de referência ($d_{méd}$) e G_f para partículas maiores que $0,76 \text{ mm}$ (classes de 9 a 15) para ambos os tipos de experimento. Os resultados obtidos nos dois experimentos foram muito semelhantes, entretanto, é possível inferir que os flocos obtidos em mesmo jarro, com aumento em degrau dos gradientes de velocidade – como ocorre em situações reais observadas em sistemas de tratamento de água – conduzem a curvas de distribuição de tamanho com menores dispersão.

PALAVRAS-CHAVE: Floculação, Distribuição de Tamanho de Partículas, Dimensão Fractal.

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 (BALTAR e OLIVEIRA, 1998; HOGG, 2000) *apud* (LI *et al.*, 2006) para posterior remoção. 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 empregada, e estes são determinantes na qualidade da água tratada produzida no processo (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.

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 D_f .

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

O valor de D_f para objetos euclidianos, é um número inteiro, mas para objetos fractais, os valores de D_f 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.

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

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

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

Já a força de um floco é dependente das ligações entre as partículas componentes do mesmo e da energia de ligação (PARKER *et al.*, 1972; BACHE *et al.*, 1997), ou seja, o floco formado irá romper se a força de cisalhamento aplicado sobre sua superfície for maior que a força de ligação interpartículas. Assim como sua 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, muitas vezes isto não ocorre em situações reais, sendo prevalentes as regiões de alto cisalhamento nos processos de tratamento (MCCURDY *et al.*, 2004), como em cortinas de distribuição de água floculada.

Os diâmetros e força dos flocos podem ser relacionados, para uma determinada taxa de cisalhamento, conforme Equação 4, presente nos estudos de Francois (1987); Yeung e Pelton (1996); Leentvaar e Rebhun (1983).

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

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 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 seu cálculo, como descrito por Bache *et al.* (1999). A força média aplicada por unidade de área do sistema, definida como σ (N/m^2), é dada 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/m^3), ε a taxa de dissipação da energia local por unidade de massa (m^2/s^3) e ν a viscosidade cinemática (m^2/s). Pode-se com alterações insignificantes no resultado, substituir ε por $\bar{\varepsilon}$, que é calculado através da Equação 7.

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

A partir destas considerações, 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.

METODOLOGIA

Preparação água de estudo

A água de estudo foi obtida a partir de solução de caulinita com turbidez de 25 ± 2 uT, conforme Pádua (1994) e Yukselen & Gregory (2004). A partir de diagrama de coagulação/floculação obteve-se a dosagem ótima do coagulante Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), sendo a concentração $2\text{mg Al}^{+3}/\text{L}$ e o pH igual a 7,5, onde o mecanismo de coagulação atuante foi o de varredura.

Ensaio de floculação

Para os experimentos foi utilizado equipamento de bancada *Jar Test* no qual foram simuladas as operações de coagulação e floculação sob condições padrão estabelecidas previamente. Os ensaios foram conduzidos alterando-se o gradiente de velocidade de floculação, observando-se as alterações nas características dos flocos em função desta alteração, de duas maneiras distintas: 1 – avaliação das características dos flocos com aumento do gradiente de floculação em um mesmo jarro (*jarro único*), ou seja, mesma amostra e, 2 – avaliação das características dos flocos formados em diferentes gradientes de floculação e em jarros diferentes (*vários jarros*), ou seja, amostras diferentes. Para os dois experimentos foram utilizados os mesmos valores de G_f . O gradiente médio de velocidade de mistura rápida (G_{mr}) foi de 800 s^{-1} por 10 segundos. Os ensaios são mais bem detalhados na sequência.

Jarro Único

O ensaio de floculação consistiu em elevar gradativamente as forças de cisalhamento do sistema em um mesmo jarro, ou seja em uma mesma amostra da água de estudo. Partiu-se do gradiente de floculação $G_{f1} = 20 \text{ s}^{-1}$ alterando-se para $G_{f2} = 40 \text{ s}^{-1}$, $G_{f3} = 60 \text{ s}^{-1}$ e $G_{f4} = 80 \text{ s}^{-1}$ mantendo-se para cada gradiente o tempo de floculação de 60 min, suficiente para o estabelecimento do patamar de estabilização. Neste ensaio os flocos formados em um determinado G_f foram expostos a um G_f maior.

Vários Jarros

O ensaio de floculação consistiu em utilizar-se um G_f constante do início ao fim do experimento, ou seja, para cada G_f avaliado foi utilizada uma alíquota diferente da água de estudo. O tempo de floculação para cada ensaio também foi fixado em 60 minutos e os G_f iguais aos experimentos com *Jarro Único*, ou seja, 20 s^{-1} , 40 s^{-1} , 60 s^{-1} e 80 s^{-1} . O objetivo principal foi comparar as características dos flocos, formados em um mesmo G_f , entretanto, com G_f aumentado gradativamente (a cada 60 minutos para uma mesma amostra) e com G_f fixo (por 60 minutos e amostras diferentes).

Estabilização da DTP

O tempo de floculação considerado nos ensaios – $T_f = 60 \text{ min}$ – é suficiente para que o sistema atinja o estágio estacionário (EE), situação em que ocorre estabilização da Distribuição do Tamanho de Partículas (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).

Monitoramento

Baseado nos métodos de Gregory e Chung (1995), Moruzzi e Reali (2007) estabeleceram um plano de luz para captação, por meio de câmera digital, de imagens de flocos produzidos no processo de floculação. Neste trabalho, conforme Silva (2015) e baseado nos trabalhos de Moruzzi e Reali (2007), foi utilizada a fonte de iluminação *Green Laser Pointer*, com comprimento de onda de 520 nm 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, 800 x 600 pixels de resolução e velocidade de captura de 1260 *fps*. Para captura das imagens dos flocos, 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.

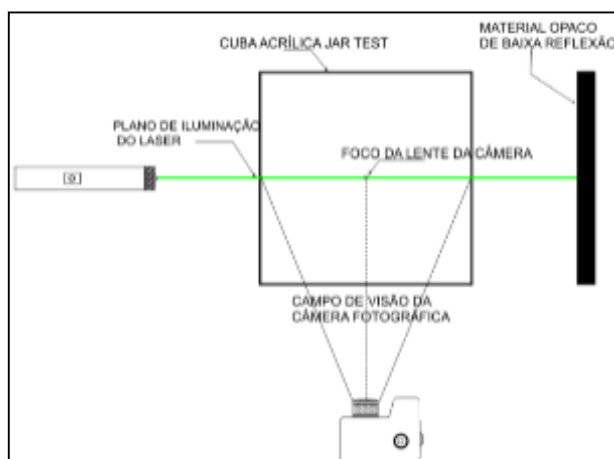


Figura 1 - Arranjo experimental de bancada. Fonte: Silva (2015)

Resolução

Preliminarmente, foram realizados testes para alguns modelos de lentes do fabricante *Navitar*, a fim de encontrar a melhor imagem nas condições de iluminação e posicionamento para os ensaios. A lente escolhida tem distância focal equivalente de 50 mm, *F-Stop* igual a 2.8 e controles de íris e de zoom manuais. A câmera fotográfica era 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: 600 x 800; Tempo de exposição: 200 μ s e Frequência de disparo: 10Hz.

O tamanho correspondente do pixel obtido foi de 0,03036 mm e $N = 5,82$, o qual se mostrou satisfatório ao se dividir a média dos maiores diâmetros de todos os objetos capturados no experimento pelo tamanho do pixel, ou seja, na média cada floco foi 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.

Tratamento de imagens

O tratamento consistiu em transformar cada imagem obtida pela câmera, em uma matriz binária com apenas pixels considerados flocos de acordo com os passos descritos em Silva (2015). Os processos de binarização, contagem e mensuração dos flocos foram realizados com o software *Image-Pro Plus 7.0* (IPP 7.0). A binarização consiste em transformar a imagem 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.

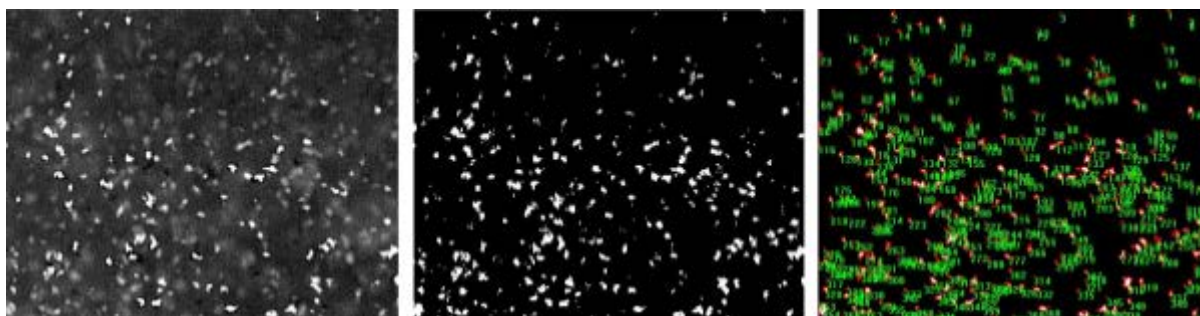


Figura 2 - (a) Imagem dos flocos em escala de cinza. (b) Matriz binarizada (c) Matriz em processo de contagem e medição pelo software IPP 7.0

Dentro da binarização escolheu-se manualmente o limiar que melhor condizia com a situação real, para que não houvesse superestimação da quantidade e das dimensões dos flocos por ruídos na imagem. A matriz resultante era operada estatisticamente pelo software *Microsoft Excel 2007* e o processamento das imagens gerava planilhas de dados sobre as partículas. Dentre os dados relevantes a este estudo relaciona-se 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 podem trazer avanços à área de tratamento de água.

Cálculos

Fractal

A dimensão fractal foi calculada globalmente para toda a população de flocos de cada condição de ensaio (diferentes G_f) 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 .

Força do floco

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

RESULTADOS

Distribuição de tamanho de partículas

A dimensão característica do floco adotada neste estudo para cálculo dos parâmetros abordados foi o diâmetro máximo do floco. 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, considerando-se todos os ensaios. 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 para o ensaio de *Jarro Único*, enquanto a Tabela 2 apresenta tais resultados para o ensaio de *Vários Jarros*.

Tabela 1. Classes de tamanho das partículas analisadas e frequência relativa percentual das classes para cada G_f para o ensaio de *Jarro Único*

Classe	d_{\min} (mm)	d_{\max} (mm)	Frequência relativa (%)			
			$G_f = 20 \text{ s}^{-1}$	$G_f = 40 \text{ s}^{-1}$	$G_f = 60 \text{ s}^{-1}$	$G_f = 80 \text{ s}^{-1}$
1	0,0303	0,1218	35,554	26,542	27,001	27,085
2	0,1218	0,2134	18,805	27,410	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	1,770
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	0,060
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

Tabela 2. Classes de tamanho das partículas analisadas e frequência relativa percentual das classes para cada G_f para o ensaio de *Vários Jarros*

Classe	d_{\min} (mm)	d_{\max} (mm)	Frequência relativa (%)			
			$G_f = 20 \text{ s}^{-1}$	$G_f = 40 \text{ s}^{-1}$	$G_f = 60 \text{ s}^{-1}$	$G_f = 80 \text{ s}^{-1}$
1	0,0303	0,1218	37,583	30,134	43,524	37,142
2	0,1218	0,2134	22,295	38,818	45,379	49,773
3	0,2134	0,3049	16,274	20,718	9,752	11,307
4	0,3049	0,3964	10,792	6,529	1,075	1,348
5	0,3964	0,4880	6,536	2,505	0,223	0,332
6	0,4880	0,5795	3,217	0,804	0,041	0,075
7	0,5795	0,6710	1,664	0,328	0,004	0,017
8	0,6710	0,7626	0,880	0,106	0,002	0,005
9	0,7626	0,8541	0,322	0,032	0	0
10	0,8541	0,9456	0,216	0,019	0	0
11	0,9456	1,0372	0,125	0,003	0	0
12	1,0372	1,1287	0,048	0,003	0	0
13	1,1287	1,2203	0,024	0	0	0
14	1,2202	1,3118	0,010	0	0	0
15	1,3118	1,4033	0,014	0	0	0
TOTAL			100	100	100	100

Observa-se que a grande maioria das partículas está concentrada nas menores faixas de tamanho para ambos experimentos, o que pode ser explicado pelo estabelecimento do Estado Estacionário (EE). É possível inferir que sobre a *DTP* prevalecem dois mecanismos, um atua com maior peso sobre as partículas pequenas, em que o aumento do G_f promove aumento da probabilidade de choque fazendo com que a ocorrência das mesmas diminua e outro sobre as partículas grandes no qual o aumento de G_f favorece a quebra do floco, fazendo com que a frequência relativa das maiores faixas diminua.

Na Figura 4 é possível observar uma queda acentuada do número de partículas da faixa 1 na passagem de $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ para $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$, seguida de uma estabilização. De fato, o aumento da energia do sistema promove maior ocorrência de choques e consequente aglutinação das partículas transladando a curva de *DTP* para as faixas 2 e 3, principalmente, o que corrobora com o modelo clássico de floculação ortocinética. O comportamento da *DTP* para ambos os ensaios (Figuras 4a e 4b) é semelhante, indicando que a alteração de patamar de G_f para uma mesma amostra assemelha-se ao patamar observado ao se iniciar um novo experimento para cada G_f .

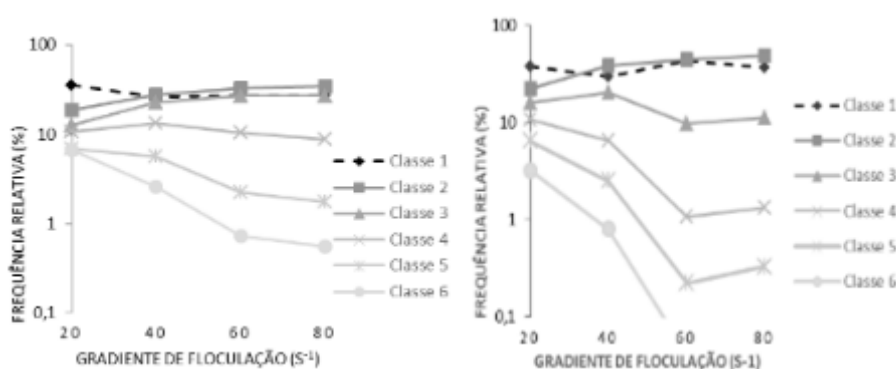


Figura 4 - Variação da frequência relativa percentual contra G_f para as 6 primeiras faixas de tamanho. (a) Ensaio tipo Jarro Único (b) Ensaio Tipo Vários Jarros.

Para as partículas das maiores faixas (faixas de 9 a 15) há uma tendência de escalonamento causado pelo incremento de energia no sistema. Com o aumento do G_f as partículas de tamanhos maiores tendem a apresentar menor ocorrência no sistema. 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 (energia dissipada), nesse caso expressa por G_f , promove a quebra do floco ao superar sua energia de ligação.

As Figuras 5 e 6 representam a distribuição das ocorrências de partículas ao longo das faixas de tamanho. Cada histograma representa uma condição de forças cisalhantes atuantes no sistema. As faixas da esquerda detêm a grande maioria das partículas, que são de menor diâmetro, e à direita, estão as faixas de maior diâmetro.

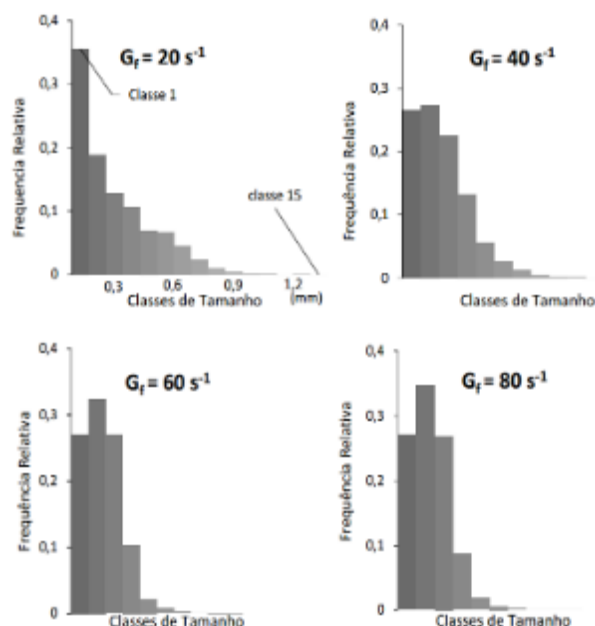


Figura 5. Histogramas de DTP para os diferentes G_f , Ensaio tipo Jarro Único.

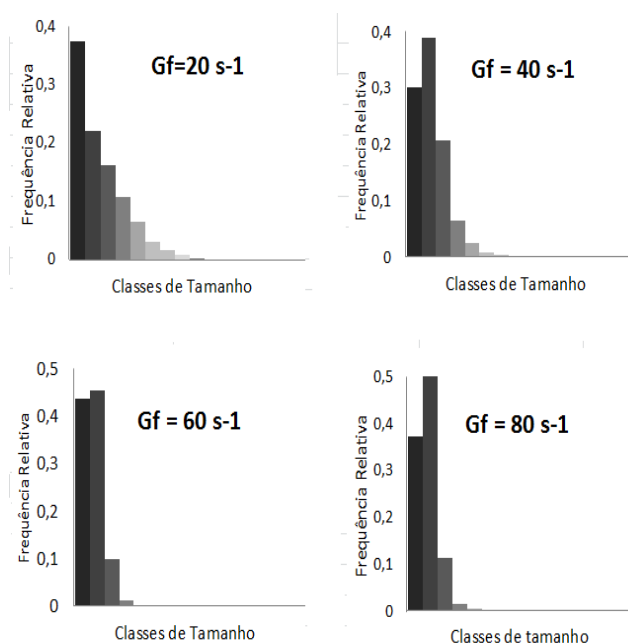


Figura 6. Histogramas de DTP para os diferentes G_f , Ensaio tipo Vários Jarros.

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 inidica que o aumento de G_f promove a homogeneização das partículas quanto ao seu diâmetro.

A Figura 7 apresenta uma visível redução dos diâmetros das classes de maiores flocos em função do aumento de G_f , isto é, a média dos diâmetros entre as maiores partículas tende a diminuir com o aumento da taxa de cisalhamento, evidente quando comparadas as imagens obtidas com $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ e as obtidas com $G_f = 80 \text{ s}^{-1}$.

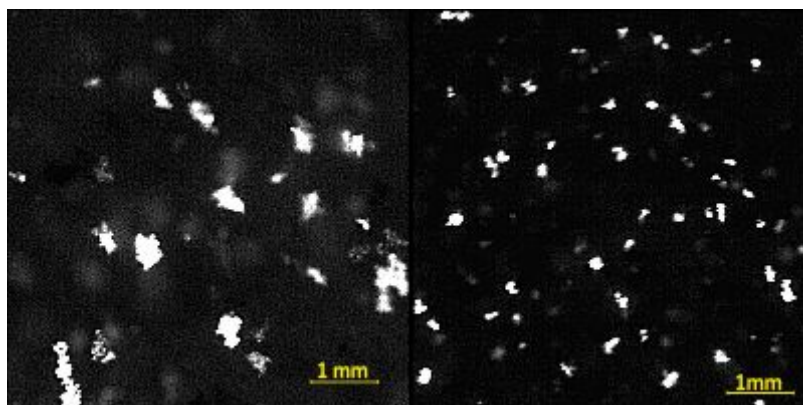


Figura 7. (a) imagem obtida para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ e tempo de floculação de 60 min. (b) imagem obtida para $G_f = 80 \text{ s}^{-1}$ e tempo de floculação de 60 min. As duas imagens são provenientes do ensaio tipo Jarro Único.

Força do Floco

Neste trabalho a força do floco foi determinada de duas maneiras. A primeira seguiu o método descrito por Bache *et al.* (1999), conforme ilustram as Figuras 9 e 10 que apresentam a força do floco em função do G_f e em função das classes de tamanho, respectivamente.

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, os agregados se mantêm unidos contanto que se tenha 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.

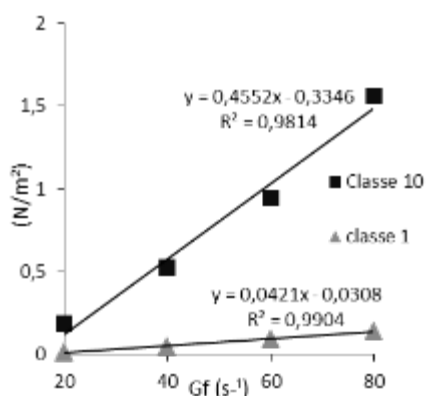


Figura 9. Gráfico da variação da força do floco (sigma) contra G_f para ensaio tipo Jarro Único

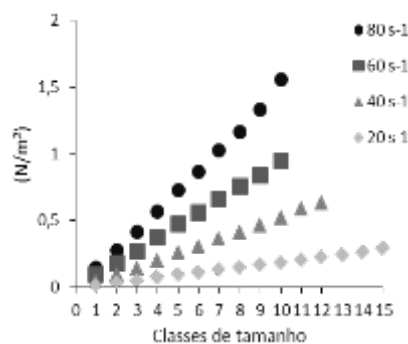


Figura 10. Gráfico da variação da força do floco contra classes de tamanho para ensaio tipo Jarro Único

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 do floco é pequena. Sendo assim é de se esperar que mesmo um floco que tenha sido obtido de outra forma guarde a relação diretamente proporcional entre o gradiente aplicado ao sistema e a força de ligação necessária para esse floco existir. É o que mostra a Figura 11.

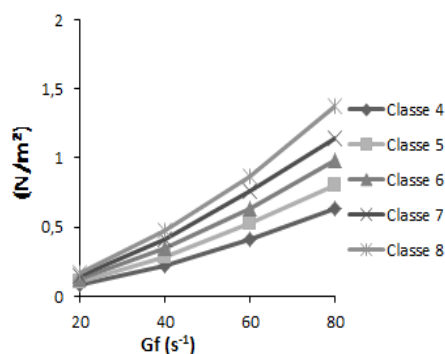


Figura 11. Gráfico da variação da força do floco (sigma) contra G_f para ensaio tipo Varios Jarros

A segunda forma é aquela em que a força é representada pelo coeficiente gama (γ) (Equação 3) que relaciona diâmetro, G_f e força. A Figura 12 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. Nesta 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 anteriormente.

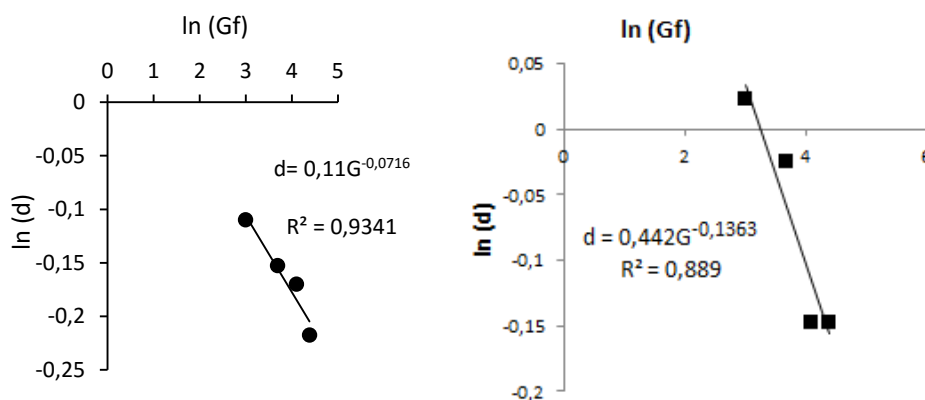


Figura 12. Gráfico que relaciona d e G_f . Para uma medida global que representasse a oscilação do diâmetro entre as classes foi utilizada a média ponderada das classes de 9 a 15. (a) Resultados para ensaio tipo Jarro Único. (b) Resultados para ensaio de Vários Jarros.

Dimensão fractal

A dimensão fractal foi inicialmente calculada para toda população de flocos da amostra, obtendo-se um D_f representativo da população de flocos para cada G_f , como pode ser observado nas Figura 13 e 14. Nestas figuras a inclinação da reta de ajuste representa a dimensão fractal da amostra.

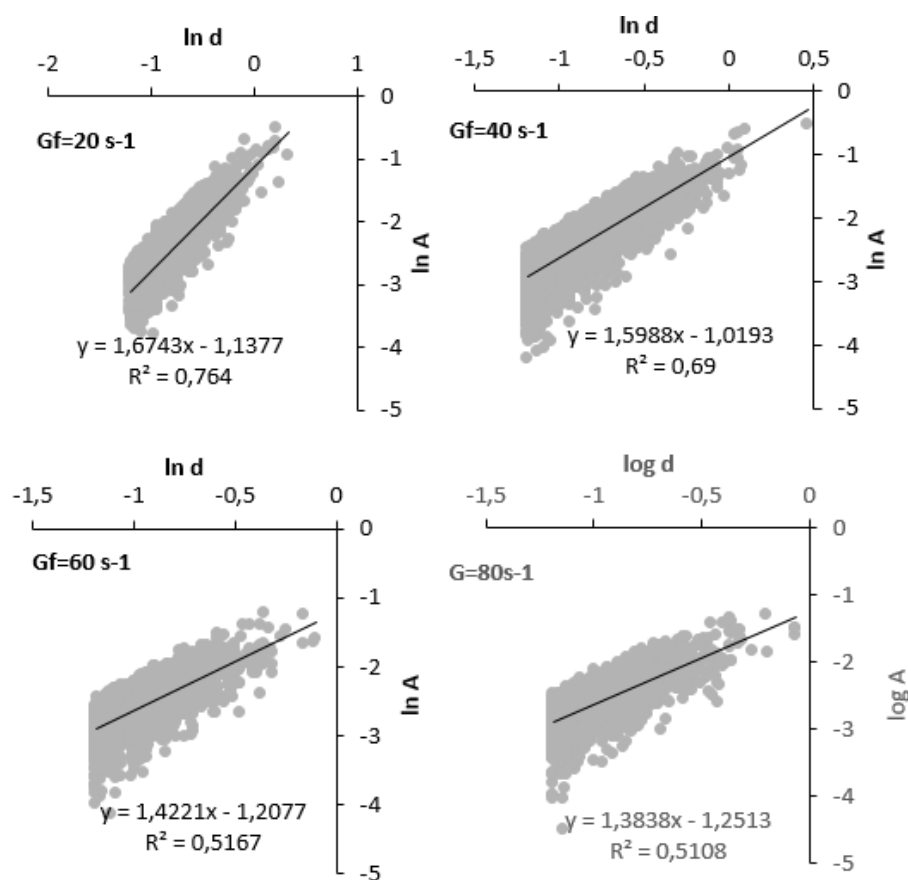


Figura 13. Determinação do valor de D_f para os ensaios de *Jarro Único*

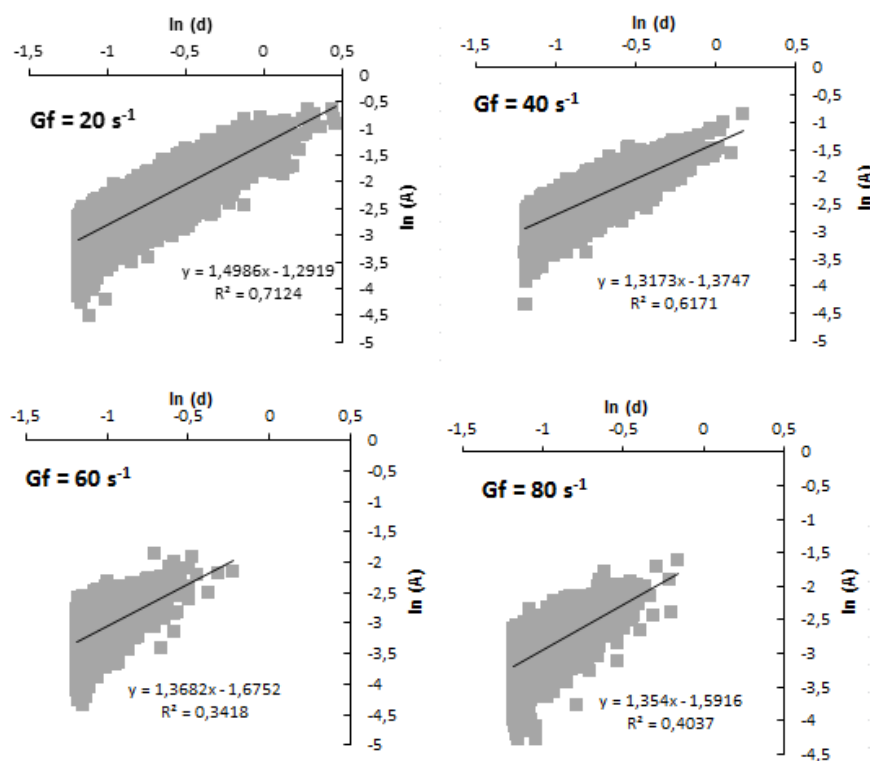


Figura 14. Determinação do valor de D_f para os ensaios de *Vários Jarros*

É importante notar que o valor de D_f decresce com o aumento de G_f (Figura 15), 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, que adquire então uma forma que oferece menos resistência contra as forças de cisalhamento.

No caso do ensaio tipo *Vários Jarros* a relação negativa entre G_f e D_f é menos evidente; é provável que a estrutura morfológica do floco esteja mais ligada ao grau de ordenamento do sistema e das dinâmicas de quebra/recrescimento e capacidade de refloculação do floco do que às forças cisalhantes aplicadas. Neste sentido, o ensaio do tipo *Vários Jarros* mostrou-se mais ordenado apresentando uma DTP menos dispersa o que levou a flocos com estruturas mais abertas (menores valores de D_f) porém mais estáveis frente às tensões de cisalhamento.

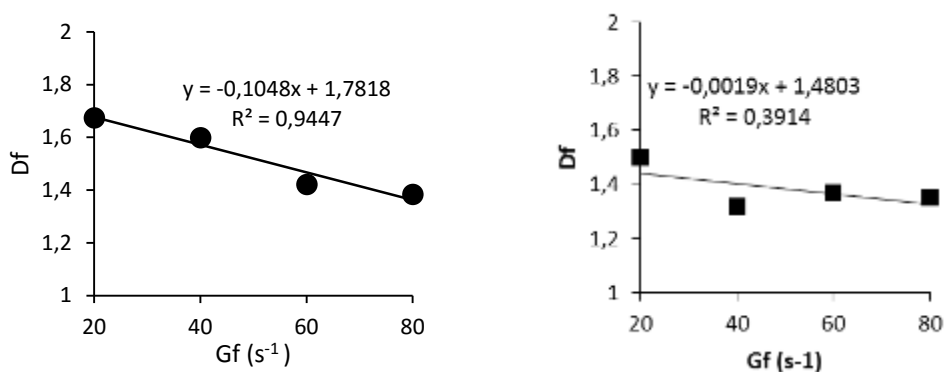


Figura 13.variação de D_f em função de G_f (a) Resultados para ensaio tipo Jarro Único, (b) Resultados para ensaio Vários Jarros.

A Tabela 2 apresenta os dados agrupados para melhor visualização dos resultados.

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

G_f	Média d_{max}		Desvio Padrão		Força do Floco		D_f	
(s ⁻¹)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(N/m ²)	(N/m ²)		
20	0,1767	0,1868	0,1944	0,1818	0,0366	0,0377	1,6743	1,4986
40	0,1838	0,1534	0,1438	0,1257	0,1077	0,0737	1,5988	1,3173
60	0,1718	0,1391	0,1089	0,0776	0,1851	0,0835	1,4221	1,3682
80	0,1694	0,1497	0,1031	0,0800	0,2808	0,1327	1,3838	1,354

As colunas à esquerda de cada item referem-se ao ensaio tipo Jarro Único, enquanto os da direita ao do tipo Vários Jarros.

CONCLUSÕES

Com o aumento dos valores de G_f há uma tendência à homogeneização dos diâmetros das partículas. O Ensaio de *Vários Jarros* produziu flocos com tamanhos mais próximos a média, porém o comportamento da *DTP* em função do G_f apresentou grande semelhança quando comparado com os resultados obtidos em *Jarro Único*.

O aumento dos valores de G_f provocou o surgimento de flocos com estruturas mais abertas, distantes de uma esfera perfeita. O Ensaio de *Vários Jarros* produziu flocos com D_f menor, porém menos suscetíveis à influência das alterações dos valores de G_f .

Os coeficientes de força do floco apontam para uma relação inversamente proporcional entre o diâmetro de referência ($d_{méd}$) e G_f para partículas maiores que 0,76 mm (classes de 9 a 15) para ambos os tipos de experimento.

Os resultados obtidos nos dois experimentos foram muito semelhantes, entretanto, é possível inferir que os flocos obtidos em mesmo jarro, com aumento em degrau dos gradientes de velocidade – como ocorre em situações reais observadas em sistemas de tratamento de água – conduzem a curvas de distribuição de tamanho mais achatadas. De fato, com o aumento da taxa de cisalhamento no jarro, alguns flocos formados previamente mantêm sua morfologia, em função das estruturas de suas ligações, e outros se dividem em flocos menores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, 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, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; De JULIO, M. 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 flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. Revista Engenharia Sanitária 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, P. A. G.. 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.