



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

PEDRO AUGUSTO GRAVA DA SILVA

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO FOCO E DA REFLOCULAÇÃO
VISANDO O TRATAMENTO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO
UTILIZANDO TÉCNICA DE MONITORAMENTO POR ANÁLISE DE
IMAGEM DIGITAL E DISPERSÃO DE LUZ**

Rio Claro
2017



PEDRO AUGUSTO GRAVA DA SILVA

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO FOCO E DA REFLOCULAÇÃO
VISANDO O TRATAMENTO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO
UTILIZANDO TÉCNICA DE MONITORAMENTO POR ANÁLISE DE
IMAGEM DIGITAL E DISPERSÃO DE LUZ**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro
2017



Silva, Pedro Augusto Grava da.

Estudo da resistência do floco e da refloculação visando o tratamento de águas de abastecimento utilizando técnica de monitoramento por análise de imagem digital e dispersão de luz / Pedro Augusto Grava da Silva, 2017

39 f. : il.


Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

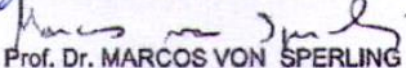
1. Tratamento de água 2. Floculação. 3. Quebra induzida. 4. Análise de imagem digital. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de PEDRO AUGUSTO GRAVA DA SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 12 dias do mês de julho do ano de 2017, às 14:00 horas, no(a) Sala de videoconferência do DEPLAN/IGCE/Rio Claro, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI - Orientador(a) do(a) DEPLAN / UNESP/Rio Claro/IGCE, Prof. Dr. ANDRE LUIZ DE OLIVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Uberlândia, Prof. Dr. MARCOS VON SPERLING do(a) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental / Universidade Federal de Minas Gerais, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de PEDRO AUGUSTO GRAVA DA SILVA, intitulada **ESTUDO DA FORÇA DO FLOCO E REFLOCULAÇÃO VISANDO O TRATAMENTO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO UTILIZANDO TÉCNICA DE MONITORAMENTO POR ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: _____ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI


Prof. Dr. ANDRE LUIZ DE OLIVEIRA


Prof. Dr. MARCOS VON SPERLING

*À minha avó Edna, minha tia Maria
Ângela e aos meus pais Fabíola e Osvaldo
pela energia entregue em suas batalhas
particulares e o amor incondicional dado a
mim, sem os quais nunca teria conseguido.*

AGRADECIMENTOS

Sou grato ao Professor Doutor Rodrigo Braga Moruzzi, pelos constantes ensinamentos de conteúdos científicos e de valores como a retidão, organização e empenho, como exemplo diário de seu trabalho nobremente desempenhado, além da indispensável contribuição para com este trabalho.

Ao Professor Doutor André Luiz de Oliveira, pela ajuda, dicas e pelas sempre bem-humoradas conversas.

À Professora Doutora Ângela Di Bernardo Dantas, pela análise minuciosa e pelas indicações construtivas de muito bom grado.

Aos colegas do grupos de estudo Mayara Sakamoto, Juliana Bull e Thaís de Almeida, pela troca de experiências e todo o tempo junto em laboratório.

Aos funcionários e corpo do docente do DEPLAN/IGCE e à toda comunidade UNESP Câmpus Rio Claro, por proporcionar um perfeito ambiente para convivência e aprendizado.

Aos meus irmãos de república, a quem faço questão de nomear: Marcos (Pinto), Roberto (Hadouken), Felipe (Pimenta), Rafael (Cica), Erik (Konha), Lucas (Patrão), Federico (Avatar), Guilherme (Gazela), Carlo (Brown), Ariel (Sereia), Caio (Pulguento), Bruno (Vira-Frango), Leonardo (McLovin), Ettore (Etanol), Eduardo (Chikungunya), Rodrigo (Alegria), William (Respingo) e Mateus (Mineiro), por me terem feito conhecer a amizade em seu sentido mais profundo, por terem sido minha segunda família.

Sou grato à oportunidade que me foi dada e a confiança depositada a mim, pelos meus familiares. À cada gota de suor derramado por vocês para que eu obtivesse meu diploma e seguisse na minha jornada, com uma base emocional e afetiva tão sólida e harmoniosa. Nossa conexão é tão forte, quase telepática, que mesmo estando longe não me sinto só, vocês estão comigo, fazendo companhia em cada detalhe.

Resumo

Esta dissertação teve como objetivos a investigação da resistência e do recrescimento de flocos, produzidos durante a floculação de água destinada ao abastecimento, e foi dividida em duas etapas. Em primeiro lugar a resistência de agregados à quebra induzida por distúrbio hidrodinâmico foi investigada por meio de três técnicas macroscópicas de medição, a saber: fator de resistência (FR), a tensão local (σ) e o coeficiente de resistência do floco (γ). Num segundo momento a capacidade de recuperação do tamanho dos agregados foi investigada. O diâmetro estável (d) e o parâmetro característico da função de distribuição de tamanho de agregados (β) foram utilizados para analisar o processo refloculação após a quebra induzida dos agregados. Para obtenção das variáveis de interesse, foi utilizado método não intrusivo de análise de imagem e equipamento baseado em dispersão de luz. As águas de estudo foram preparadas em laboratório a partir de solução de ácido húmico (água tipo 1) e suspensão de caulinita (tipo 2), e coaguladas por dosagem de sal de alumínio em região do mecanismo de varredura. A floculação ocorreu em gradientes de velocidade médios (G) entre 20 e 120 s^{-1} , e a ruptura ocorreu sob condições controladas com G_{quebra} de 800 s^{-1} por 10 segundos. Após a ruptura, a condição inicial foi reestabelecida para análise da recuperação de tamanho do agregado. Os resultados mostraram, para as duas água de estudo, uma tendência crescente para FR em resposta ao aumento de G . A mesma tendência foi observada para σ , o que pode indicar que condições elevadas de agitação produzem flocos mais resistentes. Os resultados da análise da refloculação apontaram que o agregado não recupera totalmente seu tamanho, tanto para os flocos de Al-ácido húmico como para os de Al-caulinita. Para água tipo 1, o diâmetro estável dos agregados diminuiu de 332 μm antes da quebra, para 157 μm após a recuperação, e de 233 para 132 μm na água tipo 2, utilizando G de 20 s^{-1} . O parâmetro β que exprime a distribuição de tamanho dos agregados, também apontou para uma diminuição geral do tamanho dos agregados, de forma que após a quebra a distribuição foi deslocada para as faixas de classificação de menor tamanho.

Palavras-chave: Tratamento de água. Floculação. Quebra induzida. Análise de imagem digital

Abstract

This dissertation has aimed to investigate the strength and re-growth during the flocculation of drinking water, and was divided into two steps. The first one was investigate the rupture of floc caused by shear induced forces through three macroscopic techniques, namely: strength factor (FR), the average strength per unit area at the plane of rupture (σ) and the floc strength coefficient (γ). The second one was investigate the re-growth ability of flocs. The stable diameter (d) and the characteristic parameter of the aggregate size distribution function (β) were used to analyze the re-growth process after the induced breakage of the aggregates. The method was based on a non-intrusive image analysis monitoring technique and a light scattering equipment. The study waters were prepared in laboratory from humic acid solution (water type 1) and kaolinite suspension (type 2) and coagulated by dosing aluminum salt in the region of the “sweep flocculation” mechanism. The flocculation occurred for average velocity gradients (G) from 20 to 120 s^{-1} and the breakage occurred under controlled conditions for G_{quebra} of 800 s^{-1} for 10 seconds. After breakage, the initial condition was re-established for aggregate size recovery analysis. For the two study waters the results showed an increasing trend for FR in response to the increase of G . The same trend was observed for σ which may indicate that high agitation conditions produce more resistant flocs. The reflocculation analysis results showed that the aggregate did not fully recover its size, both for the aliquots of Al-humic acid and those of Al-kaolinite. The stable diameter of the aggregates for water type 1 decreased from 332 μm before breakage, to 157 μm after recovery, and from 233 to 132 μm in water type 2, using G of 20 s^{-1} . The parameter β expressing the aggregate size distribution also pointed to a general decrease in aggregate size, so that after the breakage the distribution was shifted to the smaller size ranges.

Keywords: Water treatment. Flocculation. Breakage. Image analysis

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de variações de G com o tempo de floculação, quebra e recuperação.	13
Figura 2. Esquema simplificado para a montagem experimental.....	14
Figura 3. Flocos da água tipo 1, para G de 60 s^{-1} e tempo de floculação de 10 minutos. ...	14
Figura 4. (a) Imagem dos flocos em escala de cinza. (b) Matriz binarizada (c) Matriz em processo de contagem e medição (Silva, 2016).....	15
Figura 5. Dimensão característica (d_{max}) calculada para um agregado hipotético.....	15
Figura 6. Diagrama de coagulação para água tipo 1.....	20
Figura 7. Diagrama de coagulação para água tipo 2. Extraído de Oliveira et al. (2015a)...	20
Figura 8. Evolução temporal de FI para os diferentes G adotados. (a) água tipo 1 e (b) água tipo 2.....	21
Figura 9. Relação $\ln d$ e $\ln G$ para a fase pré-quebra. (a) água tipo 1 e (b) água tipo 2.	23
Figura 10. Relação entre FR e a tensão local σ . (a) água tipo 1 e (b) água tipo 2.....	24
Figura 11. Relação entre o fator de resistência (FR) e o diâmetro estável (d) do floco. (a) água tipo 1 e (b) água tipo 2.	24
Figura 12. Evolução temporal de d para os diferentes G adotados. (a) água tipo 1 e (b) água tipo 2.....	25
Figura 13. Valores da Razão de Recuperação (d_2/d_1) analisados em relação ao gradiente de velocidades médio (G) para as duas águas de estudo.....	27
Figura 14. Gráfico da distribuição do diâmetro estável na fase de floculação (d_1) em resposta ao gradiente de velocidades médio (G) para: (a) água tipo 1 (b) água tipo 2.....	28
Figura 15. Gráfico da distribuição do diâmetro estável na fase de recrescimento (d_2) em resposta ao gradiente de velocidades médio (G) para: (a) água tipo 1 (b) água tipo 2.....	28
Figura 16. Ajuste linear do parâmetro β para água tipo 2 para G de 40 s^{-1}	29
Figura 17. Gráfico da distribuição dos parâmetros β_1 e β_2 em resposta aos diferentes G utilizados para: (a) água tipo 1 (b) água tipo 2.....	31

Índice de Tabelas

Tabela 1. Histórico de trabalhos realizados dentro do grupo de estudo de partículas.....	8
Tabela 2. Parâmetros de qualidade da água tipo 1.	11
Tabela 3. Parâmetros de qualidade da água tipo 2.	12
Tabela 4. Diâmetro estável e resistência do floco para água tipo 1.....	22
Tabela 5. Diâmetro estável e resistência do floco para água tipo 2.....	22
Tabela 6. Diâmetro estável para água tipo 1	26
Tabela 7. Diâmetro estável para água tipo 2	26
Tabela 8. Parâmetros da <i>DTP</i> para água tipo 1	30
Tabela 9. Parâmetros da <i>DTP</i> para água tipo 2	30

Sumário

RESUMO	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	IV
SUMÁRIO.....	V
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 RESISTÊNCIA DO FLOCO	3
1.2 TÉCNICAS MACROSCÓPICAS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO FLOCO	5
1.3 QUEBRA E REFLOCULAÇÃO	6
1.4 BREVE HISTÓRICO DO GRUPO DE PESQUISA	7
2 OBJETIVOS.....	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS	11
3.1 ÁGUAS DE ESTUDO.....	11
3.2 ENSAIO DE FLOCULAÇÃO LABORATORIAL EM REATOR ESTÁTICO.....	12
3.3 MONITORAMENTO E TAMANHO DO FLOCO	13
3.3.1 <i>Análise de imagem</i>	14
3.3.2 <i>Dispersão de luz</i>	16
3.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO FLOCO	17
3.5 PARÂMETRO CARACTERÍSTICO DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS (β).....	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO	20
4.2 RESISTÊNCIA DO FLOCO	21
4.2.1 <i>Flocculation Index (FI)</i>	21
4.2.2 <i>Avaliação da resistência do floco</i>	22
4.3 RECUPERAÇÃO DO TAMANHO DO FLOCO.....	24
4.3.1 <i>Diâmetro estável do floco (d)</i>	24
4.3.2 <i>Parâmetro característico da função de distribuição de tamanho (β)</i>	29
4.3.3 <i>Considerações finais</i>	31
5 CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

Muitos processos de separação sólido-líquido pressupõem o aumento de tamanho das partículas, conduzindo a agregados ou flocos, que podem ser removidos em processos de separação sólido-líquido. O desempenho da remoção de sólidos é dependente da formação de agregados com características adequadas, compatíveis com a tecnologia de separação utilizada (Chakraborti, 2003; Yukselen e Gregory, 2004; Di Bernardo e Dantas, 2005).

Dentre as características do agregado, a resistência à quebra e a capacidade de recuperação do tamanho são cruciais para o tratamento eficiente de águas de abastecimento, uma vez que, em estações de tratamento de água (ETA) de ciclo completo, a manutenção de altas velocidades de sedimentação é desejável. A velocidade de sedimentação, por sua vez, está diretamente relacionada, entre outros, ao tamanho e densidade do agregado (Gregory, 1997). Além disso, é sabido que processos de separação para flocos reformados apresentam valores elevados de cor e turbidez remanescentes (Voltan, 2007). A ruptura dos flocos ainda está ligada a problemas em unidade baseadas na filtração, em que a baixa resistência dos agregados à variações hidrodinâmicas têm impacto devastador sobre os filtros, encurtando sua vida útil e resultando em transpasse de material particulado (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Em unidades de separação, diversos fatores podem levar a baixas eficiências de remoção e o entendimento da resistência e do recrescimento dos agregados pode minimizar este problema. Dentre os fatores que levam ao rompimento do floco estão o mau dimensionamento de passagens, dos orifícios e cortinas de distribuição de água nos decantadores, fechamento de comportas e variações abruptas de vazões nas estações (Silva e Moruzzi, 2017), os quais merecem atenção

juntamente com os fatores relativos à formação do floco que ocorre nas fases de coagulação e floculação.

A coagulação é um processo bem estabelecido dentro do tema tratamento de água e 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) facilitando, por exemplo, a sedimentação ou flotação.

Mesmo em tratamentos baseados na filtração ou microfiltração, pode ser necessário o pré-tratamento baseado na coagulação e floculação, visando à redução da colmatação de membranas, especialmente na presença de matéria orgânica dissolvida, como é o caso do Ácido Húmico (Yu *et al.*, 2010a). Neste contexto, a coagulação e a floculação continuam a ser os processos mais utilizados em ETA (Yu *et al.*, 2010a) e o Sulfato de Alumínio, por sua vez, é um sal metálico amplamente utilizado como agente coagulante nestes processos (Yu *et al.*, 2015).

Em água, coagulantes como o Sulfato de Alumínio hidrolisam rapidamente tornando-se espécies catiônicas, que se adsorvem sobre partículas carregadas negativamente, reduzindo ou invertendo a sua carga. A dosagem de coagulante e o pH de coagulação são essenciais para o bom desempenho da coagulação. Em baixas dosagens de coagulante, a neutralização de carga é um possível mecanismo de desestabilização de partículas, mas o excesso de coagulante pode levar à reversão de carga e reestabilização de partículas (Yukselen e Gregory, 2004). Em dosagens mais elevadas, a precipitação de hidróxido de metal amorfo pode desempenhar um papel muito importante (Snodgrass *et al.*, 1984), conduzindo à chamada floculação de varredura, em que as partículas ficam enredadas no precipitado. O mecanismo de varredura é intensivamente utilizado nas estações de tratamento de água em que se têm a floculação e a sedimentação antecedendo a filtração rápida (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Os flocos crescem inicialmente a uma taxa que é determinada pelas condições de mistura do sistema, pela concentração de partículas e pela eficiência de colisão. Normalmente, o gradiente de

velocidade médio (G) é usado para avaliar a intensidade da mistura em um sistema. À medida que os flocos se tornam maiores, o crescimento subsequente é restringido essencialmente por duas razões. Os flocos existentes podem ser quebrados como resultado de forças destrutivas (Matsuo e Unno, 1981) e a eficiência de colisão de partículas num campo de cisalhamento torna-se mais baixa à medida que o tamanho de partícula aumenta e sua concentração diminui (Brakalov, 1987). O equilíbrio dinâmico entre agregação e ruptura pode levar a uma distribuição de tamanho de flocos em estado estacionário, onde o tamanho limite é dependente da taxa de cisalhamento aplicada (Mühle, 1993).

A cinética de floculação pode ser descrita como a soma de dois efeitos combinados e simultâneos: agregação e ruptura. A extensão de cada efeito depende da intensidade de mistura e do tempo de residência; Entretanto, o equilíbrio dinâmico entre esses efeitos conjuntos pode levar a uma distribuição de tamanho estável dos agregados (Argaman, 1970, Yukselen e Gregory, 2004). Assim, o estado estacionário de floculação pode ser entendido como o equilíbrio entre as forças induzidas pelo cisalhamento e a força interna dos agregados. Esse equilíbrio leva os agregados a terem uma característica específica, como um tamanho representativo estável (diâmetro) e uma distribuição de tamanho determinada conforme relatado por Li *et al.* (2006), Yu *et al.* (2010b) e Yu *et al.* (2015).

1.1 Resistência do floco

Quando se aumenta a taxa de cisalhamento sobre os flocos pré-formados, pode ocorrer sua quebra em fragmentos menores de tamanho aproximadamente igual ou ainda a erosão de pequenas partículas da superfície de flocos. No fluxo turbulento, em que as forças inerciais são significativamente maiores que as viscosas, o modo de ruptura depende do tamanho do floco em relação à microescala de turbulência (Mühle, 1993). A ruptura é dependente da intensidade do cisalhamento e da resistência do floco. A resistência do floco à quebra, por sua vez, depende da natureza da interação entre as partículas e do número médio de ligações por partícula. Sabe-se que a floculação em ponte, por polímeros de cadeia longa, pode gerar flocos muito resistentes, enquanto a desestabilização de partículas por sais inorgânicos resulta em flocos bastante fracos. A resistência

do floco, parâmetro que mede essa força de reação às ações de quebra, está diretamente relacionada à sua estrutura e à formação do floco (Jarvis *et al.*, 2005).

A resistência do floco é dependente das ligações entre partículas componentes do agregado (Parker *et al.*, 1972, Bache *et al.*, 1997). Isto inclui o número e a intensidade das ligações individuais dentro do floco. Por conseguinte, um floco quebrará se a tensão aplicada na sua superfície for maior do que a resistência de ligação (Boller e Blaser, 1998; Jarvis *et al.*, 2005). Yu *et al.* (2015), mostrou que a resistência dos flocos produzidos na coagulação por varredura é quase totalmente determinada pela natureza do precipitado de hidróxido.

Existem duas abordagens fundamentais na medição da resistência do floco. Uma macroscópica, que mede a energia requerida em um sistema para quebra dos flocos e uma abordagem microscópica que mede as forças interpartículas dentro de flocos individuais (Jarvis *et al.*, 2005). Na abordagem microscópica, a resistência pode ser medida por meio da aplicação de uma tensão de cisalhamento ou uma tensão normal ao floco individualmente. Por outro lado, a macroscópica faz a avaliação direta e não intrusiva da resistência por meio da análise da dissipação de energia ou o do gradiente de velocidade (G) aplicado ao tamanho máximo ou médio do floco resultante (Yeung *et al.*, 1997; Boller e Blaser, 1998).

Este trabalho buscou investigar a resistência do floco à quebra, para duas águas de estudo, por meio de técnicas macroscópicas confiáveis e de fácil reprodutibilidade. As técnicas foram avaliadas individualmente e relacionadas entre elas, visto que seus resultados expressam respostas distintas. A relevância do estudo da resistência do floco, tanto para projeto de flocladores quanto para operação de estações de tratamento de água (ETA) deve-se ao fato de que todas as unidades subsequentes aos flocladores dependem da característica dos flocos formados e de sua manutenção.

Foi também escopo do presente trabalho identificar o efeito da natureza da partícula primária sobre a resistência dos agregados formados, tal como apontado por Yu *et al.* (2015). Para tal, foram investigadas águas de estudo distintas, com sólidos pertencentes a classes de tamanho e composições físico-químicas diferentes. O uso, separadamente, de partículas de dimensões

reduzidas da faixa de sólidos dissolvidos e também de sólidos suspensos, que conferiram respectivamente cor e turbidez às águas de estudo, teve a intenção de investigar as características de uma sem interferência da outra. Além disso, o espectro de tamanhos abrangente pôde ampliar o alcance do estudo, visto que as características observadas nas águas de estudo podem ser encontradas com facilidade em águas naturais para abastecimento.

1.2 Técnicas macroscópicas para determinação da resistência do floco

Os testes macroscópicos de resistência do floco usados nessa dissertação foram desenvolvidos a partir da relação entre a taxa de cisalhamento hidrodinâmica aplicada e o tamanho de flocos resultantes (Mikkelsen e Keiding, 2002), presente na Equação 1, em que, as dimensões do floco estão correlacionadas com sua resistência para uma determinada taxa de cisalhamento. Este equacionamento, aqui adaptado, foi proposto por Parker *et al.* (1972) e está presente nos estudos de François (1987); Yeung e Pelton (1996); Leentvaar e Rebhun (1983) e Li *et al.* (2007).

$$l = CG^{-\gamma} \quad (1)$$

Em que: l é uma dimensão conhecida do floco (μm), C é a constante multiplicativa de ajuste ($\mu\text{m/s}$), G corresponde à taxa de cisalhamento hidrodinâmico (s^{-1}), e γ é o coeficiente potência.

A relação inversa de proporcionalidade entre o diâmetro estável e o cisalhamento 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 l e, portanto, o valor γ é considerado como um indicador de resistência do mesmo (Jarvis *et al.*, 2005).

Para a obtenção de parâmetros para a determinação da resistência do floco tem sido utilizado o *Photometric Dispersion Analyser (PDA)*, equipamento que teve seus princípios previamente discutidos por Gregory & Nelson (1984) e Gregory (1985) e suas aplicações para o monitoramento da floculação descritas por Brown *et al.* (1985) e Gregory & Nelson (1986).

Resumidamente, intensidade de um estreito feixe de luz transmitida através de uma suspensão fluindo por um tubo de diâmetro conhecido é monitorado por um sensível fotodetector; que gera um sinal em uma componente estável e uma parte flutuante. O *Flocculation Index (FI)* é o quociente destas duas componentes. A componente estável é uma medida da intensidade média de luz transmitida e depende da turbidez (e, portanto, da concentração de sólidos) da suspensão. As flutuações no sinal da luz transmitida surgem de variações aleatórias oriundas da composição da amostra no feixe de luz, a qual está sendo continuamente renovada pelo fluxo.

Gregory (2003) afirma que quando se comparam diferentes flocos, o tamanho (ou o *FI*) para uma determinada taxa de cisalhamento indica a resistência do floco. Para tanto, o fator de resistência (*Strength Factor*) foi introduzido a fim de caracterizar a eficiência da formação e a capacidade de recuperação de flocos antes da quebra e após o recrescimento respectivamente, seguindo as recomendações de Yukselen & Gregory (2002). O parâmetro *Strength Factor* foi anteriormente utilizado por diversos pesquisadores, como Li *et al.* (2007); Jarvis *et al.* (2005); François (1987); para comparar a quebra e recrescimento dos flocos em diferentes sistemas e podem ser calculados por meio da Equação 2:

$$\text{Strength factor} = \frac{I_2}{I_1} 100\% \quad (2)$$

Em que: I_1 é o sinal antes de quebra, obtido a partir do índice de floculação do equipamento *PDA*; I_2 é o sinal no momento da quebra.

Valores altos do fator de resistência indicam flocos que são mais capazes de suportar cisalhamento e, portanto, devem ser considerado mais resistente do que uma suspensão com um fator mais baixo.

1.3 Quebra e Refloculação

Os agregados podem sofrer danos após a formação por aumento do cisalhamento, alterando assim suas características e afetando todo o processo de separação. Em instalações de tratamento de água,

a quebra de agregados pode ocorrer na própria câmara de floculação, devido à inadequação da mistura, ou nas passagens e entradas, isto é, canais, comportas, aberturas e orifícios. O aumento do cisalhamento causa uma ruptura de agregados para tamanhos menores em poucos segundos (Yukselen e Gregory, 2004) e sua consequência direta é a perda da condição adequada requerida para determinada eficiência de separação sólido/líquido.

A ruptura deve ser prevenida tanto quanto possível, mas é inevitável em alguns casos. A capacidade de recuperação do tamanho após quebra é chamada de refloculação, e depende do tipo de coagulante, intensidade de mistura e tempo de residência. A recuperação total do tamanho do floco pode não ocorrer, uma vez que nesta fase um novo estado estacionário é esperado. Li *et al.* (2006) relataram a natureza irreversível do processo de quebra no caso de coagulantes hidrolisantes e Yu *et al.* (2010^a) descreveram o uso de doses adicionais após a ruptura como alternativa à reformação de agregados. No entanto, Yukselen e Gregory (2004) relataram que a formação de agregados, quebra e recrescimento podem ocorrer várias vezes, mas o tamanho estável agregado é menor após cada quebra.

O uso de parâmetros indiretos para avaliar o tamanho do agregado é comum e tem sido usado para relatar estudos de refloculação (Jarvis *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2010b; Wei *et al.*, 2010 e Yu *et al.*, 2012). No entanto, o uso de técnicas de medição direta pode ser uma ferramenta útil para a avaliação da agregação e quebra (Sun *et al.*, 2005). Neste trabalho, o estudo da recuperação do tamanho dos agregados de duas águas foi conduzido sob condições controladas, de maneira direta e não intrusiva, utilizando-se um sistema de análise de imagem digital para obter o diâmetro estável e a distribuição de tamanho dos agregados.

1.4 Breve histórico do grupo de pesquisa

Esta dissertação apresenta-se como parte integrante de uma linha de pesquisa maior, que permeia o tema saneamento de forma a investigar as relações de causa e efeito das alterações e tamanho e de forma de agregados no desempenho da separação sólido-líquido. De modo geral, as pesquisas do grupo permeiam aspectos conceituais, fenomenológicos e experimentais aplicados ao estudo de tratamento de águas para abastecimento.

A Tabela 1 apresenta a cronologia dos principais trabalhos do grupo de pesquisa relacionados à temática na qual se insere essa dissertação. Os passos iniciais remontam do início dos anos 2000 e envolveram diversos pesquisadores, de todos os níveis, inclusive de instituições internacionais.

O eixo que conecta os trabalhos reside no escopo metodológico que em sua totalidade utilizam métodos não intrusivos baseados na análise de imagem digital para obtenção de parâmetros de partículas primárias e floculentas. Recentemente, foram incorporados novos ferramentais e metodologias para análise de agregados por dispersão fotométrica de luz e geometria não Euclidiana, nessa ordem.

Tabela 1. Cronologia dos trabalhos realizados dentro do grupo de estudo de partículas.

Ano	Autores	Linha de pesquisa	Trabalhos publicados
2001 - 2004	Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi	Pesquisa em nível de Doutorado para o estudo de partículas e de microbolhas usando análise de imagem digital em estação de tratamento em escala piloto.	MORUZZI et al.(2004); MORUZZI, R. B. (2004); MORUZZI E REALI (2007); MORUZZI E REALI (2010).
2012 - 2015	Prof. Dr. Marcelo de Júlio, Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi, Prof. Dr. John Gregory, Prof. Luiza Cintra Campos	Projeto de pesquisa em parceria Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), University College of London (UCL) e UNESP outorgado e financiado pelo edital FAPESP/SABESP visando à implementação de sistema de monitoramento contínuo de partículas floculentas em Estações de Tratamento que empregam coagulação e floculação.	MORUZZI et al.(2016); MORUZZI, OLIVEIRA E JÚLIO (2015).
2013 - 2014	Ma. Pamela Moreno	Pesquisa em nível de mestrado sobre aplicação da lama vermelha no tratamento de água e emprego de técnica dedicada de análise de imagem no desempenho da floculação.	MORENO, MORUZZI E CONCEIÇÃO (2013); MORENO (2015); MORENO et al. (2015); MORENO et al. (2016).
2014 - 2015	Prof. Dr. André Luiz de Oliveira	Pesquisa em nível de Pós Doutorado no estudo de partículas floculentas e monitoramento contínuo da floculação.	OLIVEIRA et al.(2014); OLIVEIRA et al.(2015a); OLIVEIRA et al. (2015b); OLIVEIRA et al. (2015c).
2013 - 2017	Pedro Augusto Grava da Silva	Pesquisa em nível de iniciação científica referente ao aprimoramento das técnicas de obtenção e tratamento de imagem digital, seguido de pesquisa em nível de mestrado sobre a resistência, refloculação e geometria não euclidiana visando o tratamento de água de abastecimento.	SILVA et al.(2015); SILVA (2016); SILVA, OLIVEIRA E MORUZZI (2016); SILVA E MORUZZI (2017);

2015 - 2017	Juliana Carvalhinho Bull	Pesquisa em nível de iniciação científica referente à investigação de parâmetro da floculação por meio de monitoramento contínuo da floculação por dispersão de luz.	BULL, SILVA E MORUZZI (2016); BULL (2017).
2016 - 2017	Thaís de Almeida	Pesquisa em nível de iniciação científica referente à investigação da eficiência de separação sólido líquido em tratamento de águas de abastecimento monitorado por análise de imagem e dispersão de luz.	ALMEIDA (2017).

Etapas prévias a esta dissertação consistiram na definição de protocolos padronizados de aquisição, semiautomação, processamento e tratamento digital, com ênfase nessa última rotina e na concepção de código fonte dedicado, sob condições controladas em reatores estáticos.

Em seguida, buscou-se validar os protocolos estabelecidos, avançando na delimitação dos erros inerentes a cada etapa de tratamento bem como na metodologia de aquisição de amostras indeformadas por meio da captura com interface ótica dedicada. As etapas posteriores visaram a aplicação dos métodos em diferentes investigações envolvendo coagulação, floculação, sedimentação e flotação por ar dissolvido.

Por fim, o presente trabalho situa-se na fronteira conceitual da pesquisa desenvolvida pelo grupo, empregando metodologia consolidada na busca de resultados e desdobramentos práticos aplicáveis à maioria das unidades tratamentos convencionais atuais. Considera-se que a contribuição desse trabalho para o tema reside no uso do ferramental, em especial na técnica de imagem e no equipamento de dispersão de luz, para medida da resistência do floco e do recrescimento por meio do monitoramento direto do tamanho de agregados.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral dessa dissertação foi estudar a resistência e o recrescimento de flocos produzidos durante etapa de floculação do tratamento de águas destinadas ao abastecimento.

Dentro deste escopo, constituem-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar resistência do floco para duas águas de estudo tendo elas como principal atributo cor verdadeira de 50 PtCo (água tipo 1) e turbidez de 25 NTU (água tipo 2), sob a ótica de três técnicas macroscópicas de medição (o fator de resistência FR , a tensão local σ e o coeficiente de resistência do floco γ);
- Investigar a refloculação e avaliar a recuperação do tamanho após a quebra agregados de duas águas de estudo;
- Avaliar a influência da natureza da partícula primária na resistência e recrescimento de agregados por análise comparativa das diferentes águas de estudo;
- Analisar comparativamente os parâmetros de tamanho dos agregados oriundas dos diferentes métodos, a saber: análise de imagem digital e dispersão de luz.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Águas de estudo

Foi preparada água com cor verdadeira igual a 50 PtCo, dissolvendo-se ácido húmico liofilizado comercial *Aldrich Chemical*, com concentração de 30 mg/L, em água deionizada obtida a partir de filtro de osmose reversa, adaptado de Constantino (2008) e Yu *et al.* (2010) a qual foi denominada neste estudo de água tipo 1. A Tabela 2 apresenta alguns parâmetros de qualidade da água de estudo tipo 1.

Tabela 2. Parâmetros de qualidade da água tipo 1.

Parâmetro	Método/Equipamento	Limites de quantificação	Unidade	Valores
Turbidez	Turbidímetro	0 - 1000	NTU	$7,1 \pm 0,8^*$
Condutividade	Conduvímetero	0 - 20.000	uS/cm a 25 °C	$33,3 \pm 1,4$
Dureza Total	Titulação volumétrica	2 - 200	mg CaCO ₃	3,0
Alcalinidade	Titulação volumétrica	20-400	mg CaCO ₃	<20,0
pH	pHmetro	0 - 14	-	$4,5 \pm 0,0$
Cor verdadeira	Espectrofotometria 455 nm	0 - 500	PtCo	$51,0 \pm 5,1$
Cor verdadeira	Espectrofotometria 465 nm	0 - 500	PtCo	$51,3 \pm 3,68$
Sólidos Totais	Espectrofotometria 810 nm	0 - 750	mg/L	$3,3 \pm 0,5$

* Desvio padrão

Foi também utilizada Suspensão de Caulinita *Fluka* para obtenção de uma segunda água, com turbidez igual a 25 NTU, seguindo a metodologia descrita por Pádua (1994) e Yukselen e Gregory (2004) a qual foi denominada de água tipo 2. A Tabela 3 apresenta alguns parâmetros de qualidade da água de estudo tipo 2.

Tabela 3. Parâmetros de qualidade da água tipo 2.

Parâmetro	Método/Equipamento	Limites de quantificação	Unidade	Valores
Turbidez	Turbidímetro	0 - 1000	NTU	24,0 ± 1*
Condutividade	Condutivímetro	0 - 20.000	uS/cm a 25 °C	44,0 ± 0,3
Dureza Total	Titulação volumétrica	2 - 200	mg CaCO ₃	2,0
Alcalinidade	Titulação volumétrica	20-400	mg CaCO ₃	<20,0
pH	pHmetro	0 - 14	-	4,2 ± 0,1
Cor verdadeira	Espectrofotometria 455 nm	0 - 500	PtCo	10,3 ± 4,1
Cor verdadeira	Espectrofotometria 465 nm	0 - 500	PtCo	11,0 ± 4,9
Sólidos Totais	Espectrofotometria 810 nm	0 - 750	mg/L	13,7 ± 0,9

* Desvio padrão

3.2 Ensaio de floculação laboratorial em reator estático

Ambas as águas de estudo foram levadas a ensaio de floculação laboratorial em reator estático *Jar Test* em que o agente coagulante foi o Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) e o pH foi ajustado por solução alcalina de Hidróxido de Sódio (NaOH) a 1 M. Para a grade de ensaios de coagulação, foi variada a concentração de coagulante entre 5 e 30 Al^{3+} mg/L em pH de 4 a 10 para a água tipo 1 e entre 0,5 a 5 Al^{3+} mg/L em pH de 4 a 10 para a água tipo 2.

Para a análise de resistência e refloculação dos agregados a Solução de Ácido Húmico foi coagulada com 30 mg Al^{3+} /l e pH igual a 4,5 e a suspensão de caulinita foi coagulada com 2 mg Al^{3+} /l e pH igual a 7,5 de acordo os diagramas de coagulação apresentados na Seção 4.1. Os diagramas foram obtidos com interpolação por *Krigagem* e os pontos ótimos foram adotados com base na menor cor ou turbidez remanescente, para as águas tipo 1 e 2 respectivamente.

Para todos os ensaios, o gradiente de mistura rápida foi igual a 800 s^{-1} durante os primeiros 10 segundos. Foram estudados valores de gradiente médio de floculação (G) de 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 s^{-1} . Durante a floculação o G foi mantido constante durante os primeiros 25 min de cada ensaio.

No instante 25 min, a agitação foi elevada a G_{quebra} de 800 s^{-1} por 10 segundos, promovendo a quebra dos agregados. Visto que a influência da intensidade da agitação na quebra induzida e do tempo de quebra e não foram objeto deste estudo, G_{quebra} foi adotado para que houvesse uma diminuição drástica do tamanho do floco, baseado em Yukselen e Gregory (2004).

Após esta etapa retornou-se ao patamar inicial de G que foi mantido até 40 min de cada ensaio. Não houve acréscimo de coagulante após a quebra. A Figura 1 representa de forma esquemática os gradientes adotados e as fases de floculação, quebra e refloculação no tempo. Cada linha contínua representa uma nova amostra.

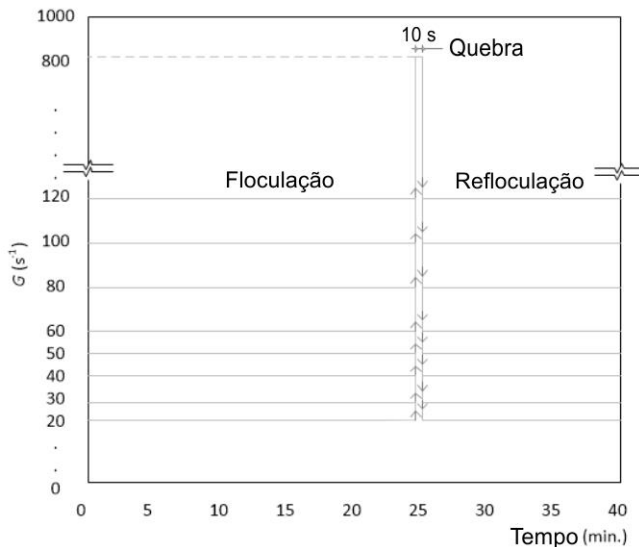


Figura 1. Esquema de variações de G com o tempo de floculação, quebra e recuperação.

3.3 Monitoramento e tamanho do floco

Um esquema simplificado do aparato experimental envolvendo *Jar Test*, equipamento de monitoramento por análise de imagem e dispersão de luz é apresentado na Figura 2. É importante notar que o *PDA 3000* foi instalado na sucção da bomba peristáltica minimizando a interferência desta no sinal obtido.

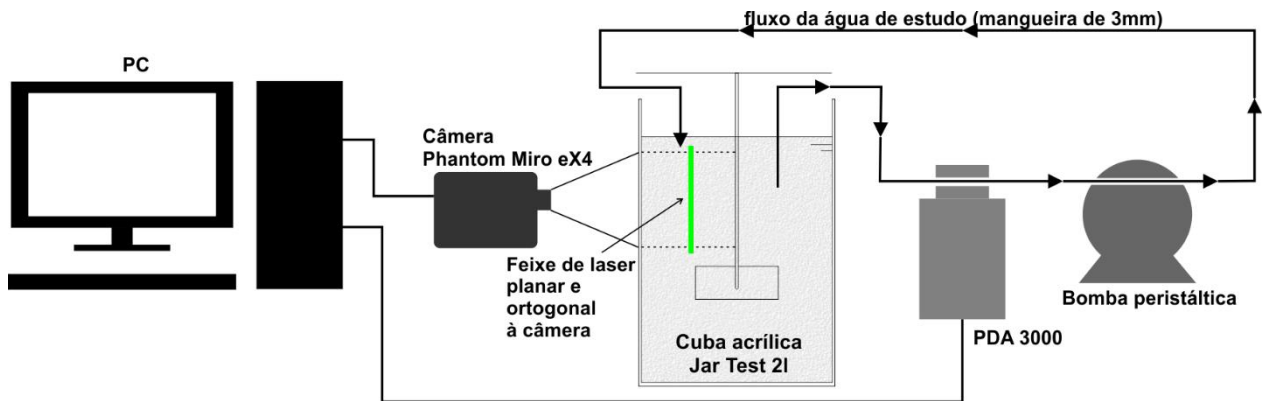


Figura 2. Esquema simplificado para a montagem experimental.

3.3.1 Análise de imagem

Foi utilizada técnica de captura e análise de imagem digital baseado em Gregory e Chung (1995), Moruzzi e Reali (2007) e Oliveira *et al.* (2015a) as águas foram iluminadas por um plano de laser de comprimento de onda de 520 nm e potência de 20.000 mW e as imagens capturadas por meio da câmera fotográfica *Phantom Miro eX4*, com resolução de 800 x 600 pixel e tamanho do pixel igual a 10 μm . Foram coletadas imagens dos agregados durante 40 min a partir do instante 0 min, com intervalos de 5 min. Para cada amostra foram coletadas 100 imagens à taxa de 10 *fps*. A Figura 3 apresenta uma imagem do universo amostral, antes do tratamento.

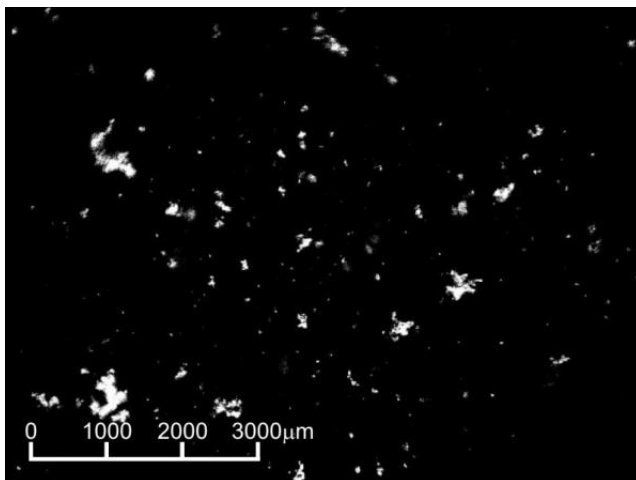


Figura 3. Flocos da água tipo 1, para G de 60 s^{-1} e tempo de floculação de 10 minutos.

O tratamento das imagens obtidas consistiu nas fases de adoção do limiar de contraste, binarização, contagem e medição dos flocos, seguindo Silva (2016). A Figura 4 apresenta um exemplo do processo de tratamento feito através do software *Image Pro plus 7.0*. Para a análise dos dados excluiu-se de todo o conjunto amostrado as partículas menores que 100 μm , por apresentar imprecisão elevada conforme Chakraborti (2003) e Moruzzi e Reali (2010).

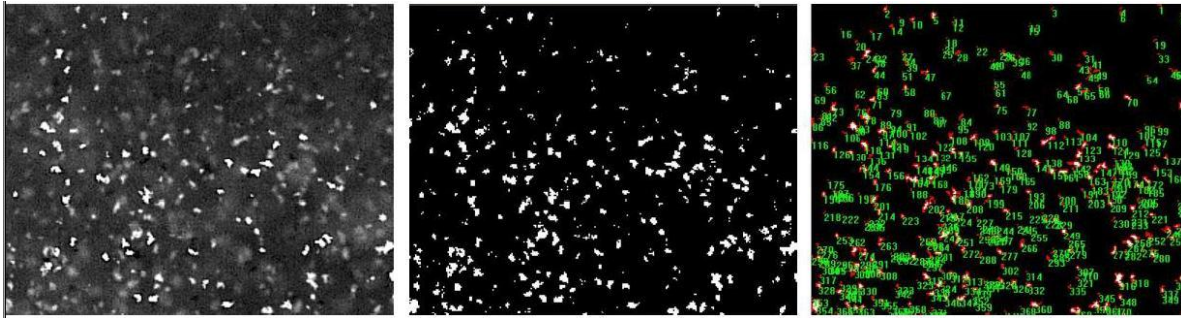


Figura 4. (a) Imagem dos flocos em escala de cinza. (b) Matriz binarizada (c) Matriz em processo de contagem e medição (Silva, 2016).

A partir da análise das imagens foi obtida a dimensão característica individual d_{max} . Este parâmetro refere-se ao comprimento da maior reta que une dois pontos da borda do floco e que passa pelo centroide do mesmo seguindo recomendações de Li et al. (2007) e Moruzzi et al. (2015). A adoção da maior dimensão do floco resulta em uma grande sensibilidade frente à alteração do tamanho do agregado se comparado à dimensões médias, que também são utilizadas em alguns estudos. Um esquema simplificado da adoção de d_{max} é apresentado na Figura 4.

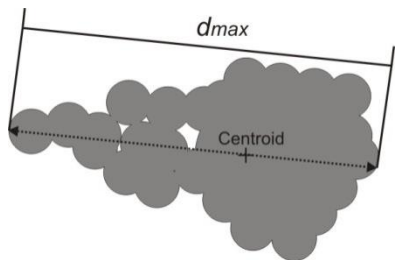


Figura 5. Dimensão característica (d_{max}) calculada para um agregado hipotético.

O diâmetro estável do floco (d), parâmetro que caracteriza a dimensão média do conjunto dos agregados no estado estacionário da floculação, foi calculado para os patamares de estabilidade da curva de evolução temporal de d_{max} . Assim, o valor de d é a média aritmética da dimensão característica d_{max} durante o período estacionário da floculação. A Equação 3 descreve o diâmetro estável do floco.

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{max} \quad (3)$$

Em que: d é o diâmetro estável do floco e d_{max} é a dimensão característica do floco.

A fim de comparar os agregados formados na floculação e no recrescimento, d foi calculado a cada amostra (para cada G adotado) como uma média aritmética nos intervalos [10 – 20] min sendo chamado de d_1 e [30 – 40] min sendo d_2 . Posteriormente, foi calculada a razão de recuperação da forma descrita pela Equação 4. Uma razão de valor igual à unidade ($d_2/d_1 = 1$) significa que a ruptura é totalmente reversível enquanto valores próximos à zero ($d_2/d_1 = 0$) significam um processo irreversível.

$$\text{Razão de Recuperação} = \frac{d_2}{d_1} \quad (4)$$

Em que: d_1 é o diâmetro estável antes da quebra induzida e d_2 é o diâmetro estável depois da quebra induzida.

3.3.2 Dispersão de luz

A análise baseada em dispersão de luz foi feita a por meio do *Flocculation Index (FI)*, sinal gerado a partir do *PDA*. Foi adotada a frequência de 1 Hz para a amostra do equipamento e o diâmetro do tubo para o fluxo da água pelo equipamento foi de 3 mm.

Foram adotados dois parâmetros que correspondem ao tamanho do floco: FI_1 e FI_2 . Para FI_1 foi adotado o máximo valor observado na fase estacionária da floculação (entre 10 e 20 min). Para FI_2 o valor adotado foi o ponto de mínimo no instante da quebra induzida (25 min). A representação esquemática da adoção destes parâmetros pode ser vista na Figura 5.

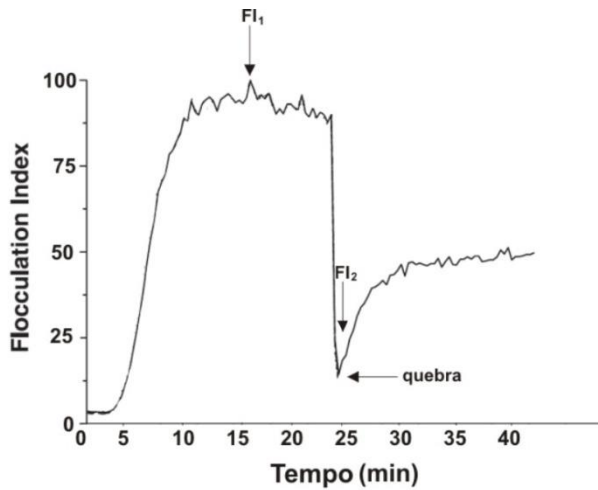


Figura 6. Representação esquemática do sinal FI , com apontamento dos valores de FI_1 , FI_2 e da quebra induzida.

3.4 Determinação da resistência do floco

A equação 5 é uma variação da relação apresentada na Equação 1 da Seção 1.2, sendo utilizado aqui, como parâmetro característico da dimensão do floco o diâmetro estável d , descrito na Seção 3.3.

$$d = CG^{-\gamma} \quad (5)$$

Em que: d corresponde ao diâmetro estável do floco (μm), C é a constante multiplicativa de ajuste ($\mu\text{m/s}$), G é o gradiente médio velocidade (s^{-1}), e γ é o coeficiente de resistência do floco.

Os valores de γ e C foram obtidos a partir de um gráfico *log-log* do diâmetro contra o gradiente médio de velocidade, conforme a Equação 6.

$$\ln d = \ln C - \gamma \ln G \quad (6)$$

A equação 7 foi obtida baseada na Equação 2, sendo, utilizado como índices das fases de floculação e crescimento respectivamente FI_1 e FI_2 , descritos na Seção 3.3.

$$FR = \frac{FI_2}{FI_1} 100\% \quad (7)$$

Em que: FI_1 é o tamanho máximo do floco da fase estável antes de quebra, obtido a partir do índice de floculação do equipamento *PDA*; FI_2 é o tamanho máximo do floco durante o período de quebra.

Além do método empírico de obtenção de parâmetros de resistência, há o método teórico para o cálculo desta, proposto por Bache *et al.* (1997). A força da ação hidrodinâmica aplicada média por unidade de área do sistema foi determinada como σ (N/m²), conforme a Equação 8.

$$\sigma = \frac{4\sqrt{3}}{3} \frac{\rho_w \bar{\mathcal{E}}^{3/4} d}{\nu^{1/4}} \quad (8)$$

Em que: ρ_w é a densidade da água (kg/m³), \mathcal{E} é a taxa de dissipação da energia local por unidade de massa (m²/s³) e ν a viscosidade cinemática (m²/s).

O parâmetro \mathcal{E} é comumente substituído por $\bar{\mathcal{E}}$, taxa média de dissipação da energia local, isto por que este último guarda relações com G , parâmetro facilmente administrável durante o experimento. A Equação 9 apresenta a fórmula de $\bar{\mathcal{E}}$.

$$\bar{\mathcal{E}} = \nu G^2 \quad (9)$$

3.5 Parâmetro característico da distribuição do tamanho de partículas (β)

Para a determinação do parâmetro característico (β) da distribuição de tamanho dos agregados, a dimensão característica individual d_{max} foi organizada em classes de [100 - 1.420 μm] em incrementos de 30 μm , obtendo-se assim a Distribuição do Tamanho de Partículas (*DTP*). A *DTP* é o histograma da frequência relativa de ocorrência dos agregados contra as classes de tamanho. Após esta etapa, a *DTP* foi ajustada à forma contínua da Equação 10 por meio de regressão não-linear usando os parâmetros A e β , conforme apresentado por Crittenden (2005).

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A(d_p)^{-\beta} \quad (10)$$

Em que: dN é o número de partículas por unidade de volume do fluido na faixa correspondente a dp até $dp + d(dp)$, A é o coeficiente relacionado à concentração total de partículas e β é o coeficiente que caracteriza a distribuição de tamanho.

O expoente β da Equação 10 representa, portanto, a inclinação da distribuição de tamanho agregado para o formato de gráfico log-log da Equação 10. Quanto maior a inclinação, maior a ocorrência de agregados pequenos para as faixas de classificação e vice-versa.

De forma semelhante a d_1 , os valores de β_1 foram calculados para o estado estacionário de floculação, isto é, utilizando a média de valores de β a partir do patamar de estabilidade da fase de floculação. Em contraste, o valor dado por β_2 é o valor conjugado de β_1 , isto é, representa a média dos valores de β a partir do patamar após a quebra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diagramas de Coagulação

A partir da realização da grade ensaios de coagulação foram obtidos os diagramas das regiões de coagulação para as duas águas de estudo. A Figura 6 apresenta o diagrama referente a água tipo 1 enquanto a Figura 7 para a água tipo 2.

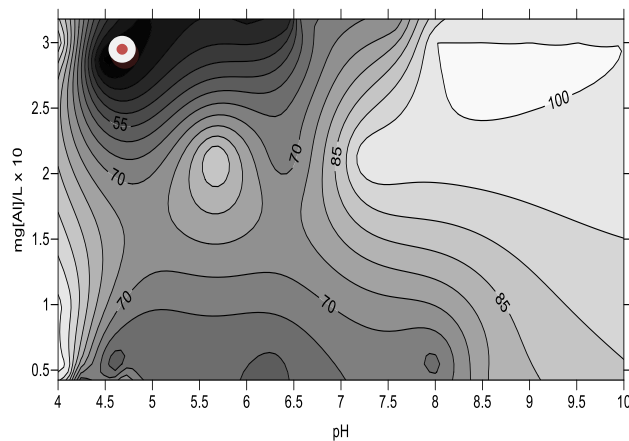


Figura 6. Diagrama de coagulação para água tipo 1.

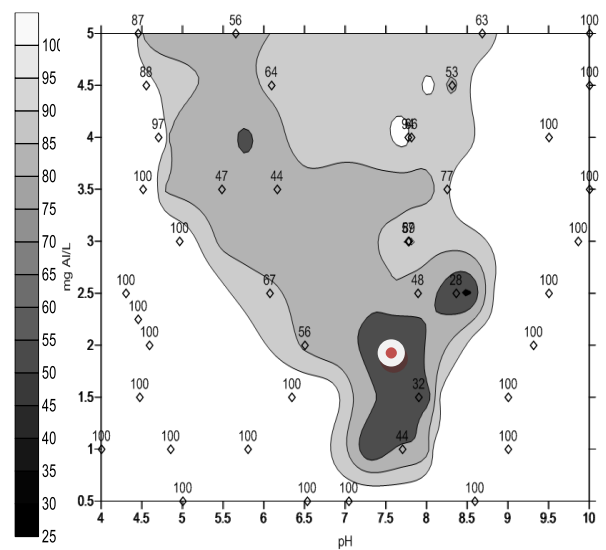


Figura 7. Diagrama de coagulação para água tipo 2. Extraído de Oliveira et al. (2015a)

Os valores ótimos de coagulação foram adotados com base nos menores valores de cor e turbidez remanescentes, para as águas 1 e 2 respectivamente. Estes valores ótimos estão descritos na Seção 3.2.

4.2 Resistência do floco

4.2.1 Flocculation Index (FI)

Após cessada a mistura rápida foi observado que para uma agitação constante, o diâmetro estável do floco tendeu à estabilidade. Após a quebra induzida o novo patamar de estabilização foi para valores sempre menores que os iniciais, como percebido por Yukselen e Gregory (2004) e por Li et al. (2007).

A Figura 8 apresenta a evolução temporal do sinal FI nos ensaios realizados. É visível que, tanto na fase de floculação (0–24 min) quanto na fase de recrescimento (25–40 min), o FI (ou o tamanho do floco) tende a um patamar de estabilização. A região de vale no instante 25 min é o ponto onde ocorre a quebra dos agregados.

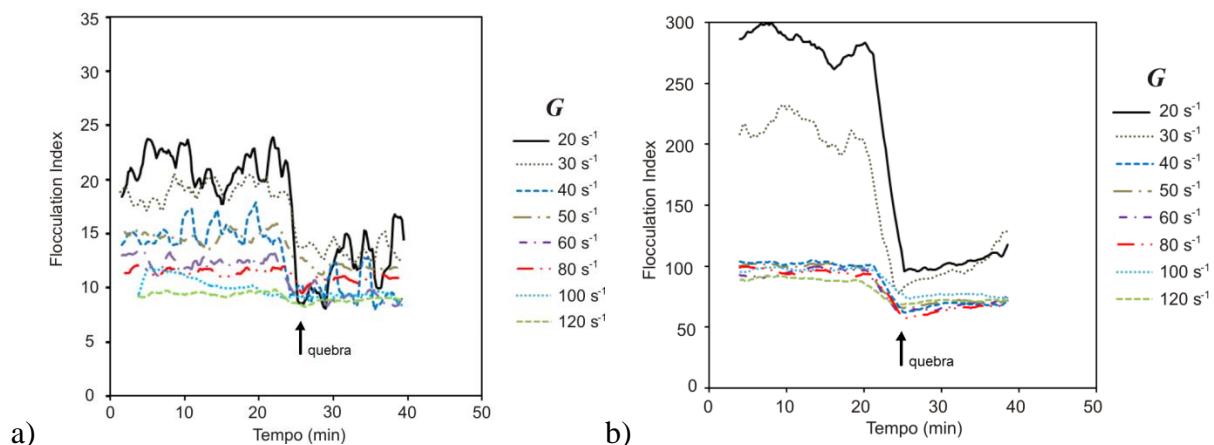


Figura 8. Evolução temporal de FI para os diferentes G adotados. (a) água tipo 1 e (b) água tipo 2.

É visível na Figura 8 que o G aplicado tem forte influência no tamanho do floco, tanto antes quanto depois da quebra, sendo que predominantemente o tamanho do floco diminui para G maiores. Sob a ótica da resistência do floco é perceptível que para gradientes mais elevados, a quebra induzida no instante 25 min provoca alterações menos drástica no tamanho, o que pode indicar flocos mais resistentes à quebra.

4.2.2 Avaliação da resistência do floco

As Tabelas 4 e 5 apresentam um comparativo entre tamanho e a resistência do floco para oito diferentes intensidades de cisalhamento. O gradiente de velocidades médio (G) e o diâmetro estável (d) juntamente com a tensão local no patamar de estabilidade da floculação (σ) e o fator de resistência (FR) são mostrados para a água tipo 1 (Tabela 4) e para o tipo 2 (Tabela 5).

Tabela 4. Diâmetro estável e resistência do floco para água tipo 1

G (s ⁻¹)	d (μm)	σ (N/m ²)	FR (%)
20	337	0,07	36,73
30	287	0,11	56,82
40	200	0,12	55,56
50	245	0,20	69,70
60	217	0,23	69,34
80	173	0,29	83,33
100	157	0,36	83,33
120	146	0,44	95,00

Tabela 5. Diâmetro estável e resistência do floco para água tipo 2

G (s ⁻¹)	d μm	σ (N/m ²)	FR (%)
20	407	0,08	33,33
30	236	0,09	35,56
40	298	0,17	61,82
50	197	0,16	65,42
60	228	0,24	68,00
80	217	0,36	62,00
100	167	0,39	78,00
120	154	0,47	85,23

É visível nas Tabelas 4 e 5 que o diâmetro estável do agregado é menor para valores mais altos de G . Uma análise mais detalhada do tamanho do floco foi feita na Seção 4.3.1.

Nas Tabelas 4 e 5, é visível também, que os parâmetros de resistência do floco indicam que valores altos de G produzem flocos com σ elevado, como consequência direta da aplicação de G na Equação 8 da Seção 3.4. Os valores de σ para a água tipo 1 são em geral menores, porém muito próximos daqueles da água tipo 2.

Por conta do balanço entre ruptura e agregação, sabe-se que flocos formados em altas intensidades de cisalhamento podem ter resistência elevada, com fortes ligações. Tal fato é evidenciado nas Tabelas 1 e 2 pelo aumento do valor de FR , obtido pela Equação 7 da Seção 3.4, que variou de 29,74 % para G de 20 s⁻¹ até 78,59 % para G de 120 s⁻¹ em flocos alumínio-ácido húmico e de 33,33 % para G de 20 s⁻¹ até 85,23 % para G de 120 s⁻¹ em flocos alumínio-caulinita.

A Figura 9 representa a análise da resistência do floco na fase estável da floculação pelo coeficiente de resistência γ . Por meio da variação do parâmetro d em resposta a G observou-se uma tendência de decréscimo deste parâmetro com o aumento de G a uma taxa próxima a 0,45 para as duas águas de estudo. O valor similar de γ para ambas as águas de estudo indica baixa influência da natureza da partícula primária na resistência do floco.

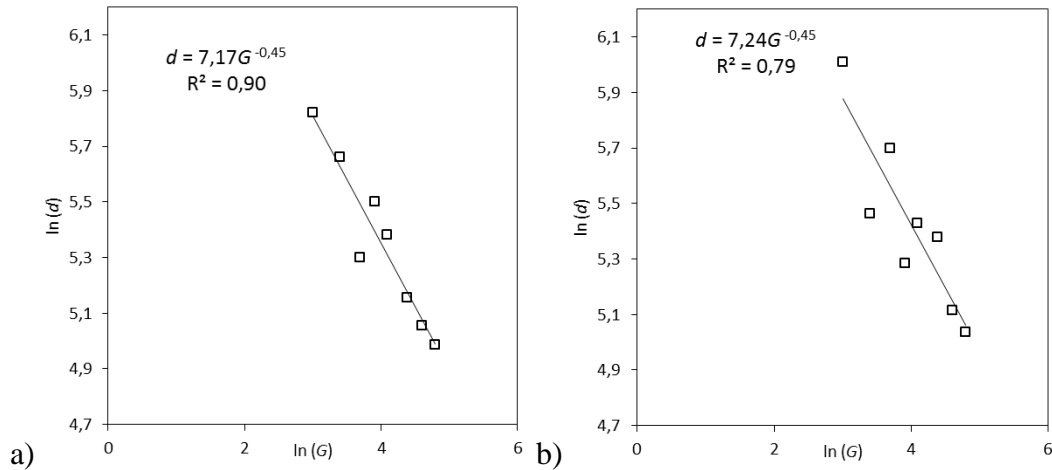


Figura 9. Relação $\ln d$ e $\ln G$ para a fase pré-quebra. (a) água tipo 1 e (b) água tipo 2.

O resultado da análise do fator de resistência (FR) frente ao parâmetro γ , mostrou que eles são diretamente proporcionais, com os valores de ambos os parâmetros aumentando com a elevação de G . A Figura 10 apresenta esta relação, sendo que os valores de σ para água tipo 1 foram menores que para a água 2, variando de 0,07 até 0,44; enquanto para a água 2 os valores foram de 0,08 até 0,47. Com relação a FR , a água tipo 1 obteve valores maiores, o que representa que a quebra induzida provocou uma menor redução do tamanho do agregado. Porém, a proximidade dos valores obtidos entre as duas águas de estudo indica uma baixa influência da natureza da partícula primária na resistência do floco.

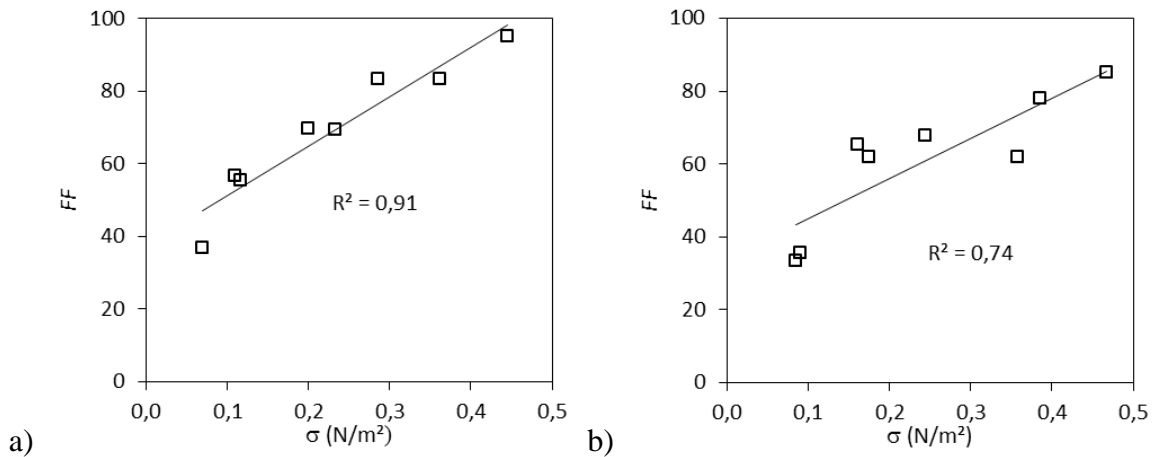


Figura 10. Relação entre FR e a tensão local σ . (a) água tipo 1 e (b) água tipo 2.

Os resultados apontam que de ambos os métodos de monitoramento utilizados neste estudo (análise de imagem e dispersão de luz) derivam bons indicadores para a análise da floculação. O parâmetro d_I que é oriundo da análise de imagem se mostrou bem relacionado ($R^2 > 0,6$) com aquele obtido a partir do sinal do *PDA*, como apresentado pela relação entre d e FR da Figura 11.

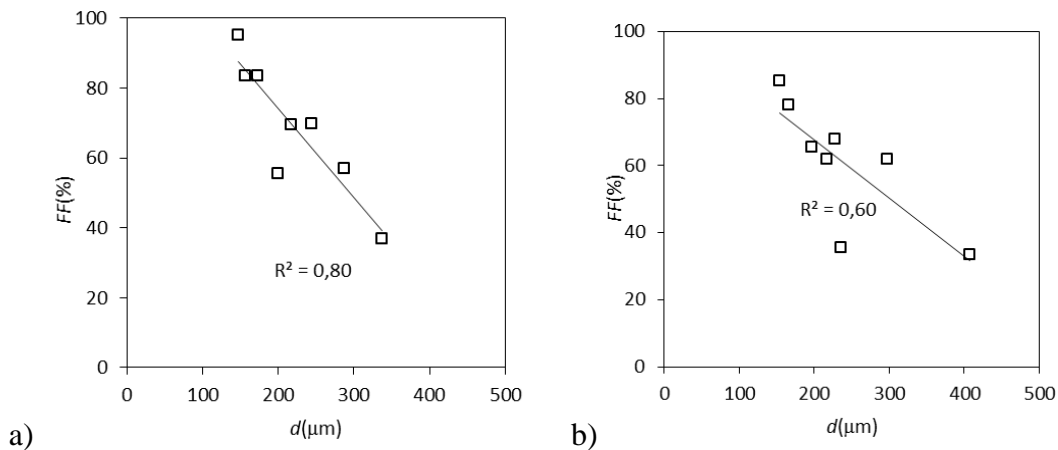


Figura 11. Relação entre o fator de resistência (FR) e o diâmetro estável (d) do floc. (a) água tipo 1 e (b) água tipo 2.

4.3 Recuperação do tamanho do floc

4.3.1 Diâmetro estável do floc (d)

A evolução do diâmetro estável (d) para os agregados Al-ácido húmico e Al-caulinita em diferentes taxas de cisalhamento, expressas como gradientes de velocidade médios (G), são mostrados na

Figura 12. A formação de agregados, a quebra e recrescimento ao longo do tempo e G foram observados. O comportamento expresso na Figura 10 é bastante semelhante àquele encontrado por outros autores (Yu *et al.*, 2015).

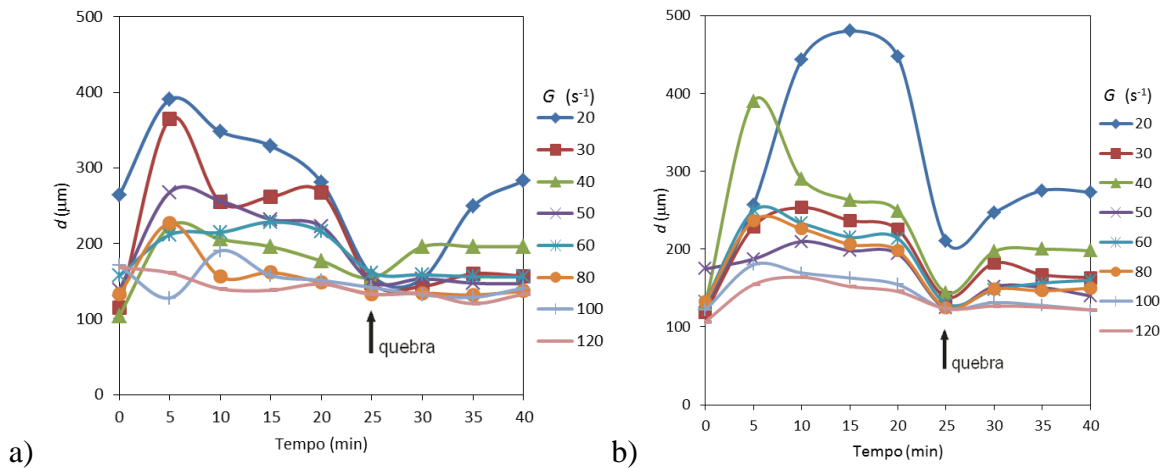


Figura 12. Evolução temporal de d para os diferentes G adotados. (a) água tipo 1 e (b) água tipo 2.

Inicialmente, os valores de d tendem a aumentar até o patamar ser atingido, onde d_1 foi calculado para o intervalo [10-20] minutos. Em alguns casos, um tamanho agregado máximo é atingido, seguido por uma diminuição, como também descrito por Peng e Williams (1994). Em seguida, os agregados foram quebrados com alta taxa de cisalhamento, e os valores de d diminuíram em vale para um valor mínimo, seguido por uma reformação e um novo diâmetro estável (d_2) foi calculado para o intervalo [30-40] minutos.

A quebra induzida dos agregados por altas intensidades de G ocorreu em 25 minutos para todas as condições investigadas. Neste ponto, a maioria dos valores de d atingiram valores próximos de 150 μm , exceto para G de 20 s^{-1} na água do tipo 2, em que d foi de cerca de 250 μm . Este comportamento é difícil de explicar, mas acredita-se que os grandes agregados de Al-caulinita demandariam mais tempo do que o aplicado para quebrar em fragmentos menores.

Os valores de d_1 e d_2 calculados para os gradientes de velocidade médios (G), juntamente com a razão d_2/d_1 são apresentados nas Tabelas 6 e 7. É visível que os valores de d_2 foram sempre menores do que d_1 para todas as condições investigadas, tal como também relatado por Yukselen e Gregory (2004). A razão d_2/d_1 pode ser usada para avaliar a recuperação do tamanho do agregado, em que quanto mais próxima da unidade, melhor recuperação (a recuperação é totalmente alcançada para

$d_2/d_1 = 1$). No entanto, a razão d_2/d_1 é maior para valores altos de G , pois os valores de d_1 foram menores nesses casos. Assim, os valores da razão d_2/d_1 tem que ser cuidadosamente interpretados, pois valores próximos a 1,0 não podem ser considerados como melhores resultados, a menos que sejam comparados com a mesma taxa de cisalhamento (G). Geralmente, os agregados de Alcaulinita (tipo 2) parecem recuperar melhor seu tamanho, quando comparados com o ácido Al-ácido húmico (tipo 1) no mesmo valor de G .

Tabela 6. Diâmetro estável para água tipo 1

$G (s^{-1})$	d_1 (μm)	d_2 (μm)	d_2/d_1
20	337	157	0.47
30	287	148	0.52
40	200	154	0.77
50	244	149	0.61
60	217	161	0.74
80	173	133	0.77
100	156	141	0.90
120	146	132	0.90

Tabela 7. Diâmetro estável para água tipo 2

$G (s^{-1})$	d_1 (μm)	d_2 (μm)	d_2/d_1
20	407	233	0.57
30	236	138	0.59
40	298	223	0.75
50	197	124	0.63
60	228	222	0.98
80	217	148	0.68
100	166	123	0.74
120	154	123	0.80

A partir da Equação 4, da Seção 3.3.1 construiu-se o gráfico da Figura 13, em que são apresentados os valores da Razão de Recuperação para as duas águas de estudo contra os G adotados. Como explicado anteriormente, valores altos de d_2/d_1 apontam para uma maior recuperação do tamanho inicial dos agregados. É evidente na Figura 13 uma maior recuperação para gradientes elevados. No entanto, este resultado deve ser analisado com cautela, visto que agregados formados em altos G , apesar de recuperar melhor seu tamanho após a quebra, não necessariamente tem originalmente tamanho e propriedades vantajosas para a separação sólido-líquido.

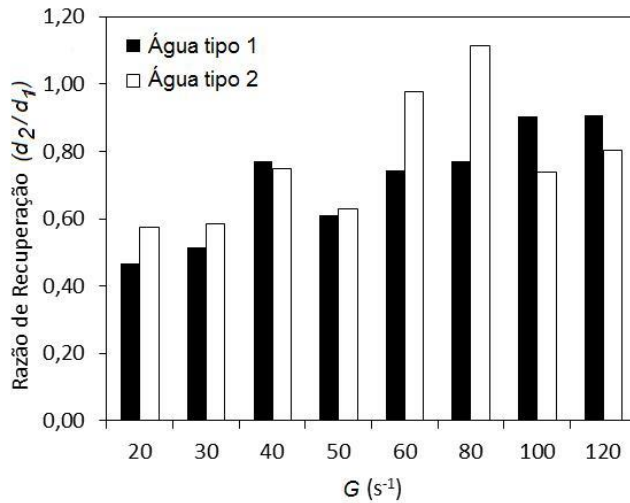


Figura 13. Valores da Razão de Recuperação (d_2/d_1) analisados em relação ao gradiente de velocidades médio (G) para as duas águas de estudo.

A relação de d_1 com G é mostrada na Figura 14. Foi observado o mesmo comportamento para ambos os agregados de Al-ácido húmico e Al-caulinita e com bom ajuste, isto é, coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,79. Além disso, os parâmetros de ajuste (C e γ da Equação 2) estavam muito próximos. Os resultados apontam que a natureza da partícula que compõe o agregado tem pouca influência nesta sensibilidade. Isto porque, na comparação entre as duas águas de estudo (Figuras 11-a e 11-b), os valores do expoente e da constante são muito próximos e indicam que os flocos Alumínio-Caulinita e Alumínio-Ácido húmico têm os diâmetros diminuídos com o aumento de G a uma taxa semelhante. Esta afirmação está de acordo com os resultados relatados por Yu *et al.* (2005).

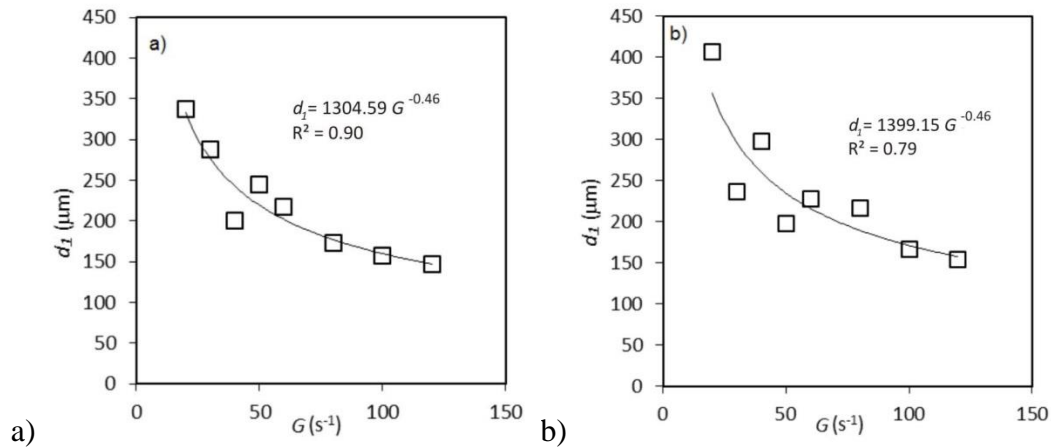


Figura 14. Gráfico da distribuição do diâmetro estável na fase de floculação (d_1) em resposta ao gradiente de velocidades médio (G) para: (a) água tipo 1 (b) água tipo 2.

Por outro lado, d_2 não respondeu à variação de G da mesma forma d_1 . É mostrado na Figura 15 um ajuste ruim para ambos os casos ($R^2 < 0,51$). Além disso, d_2 não seguiu o mesmo comportamento quando G foi alterado, mostrando baixa sensibilidade em resposta à variação G . Uma possível explicação é que a quebra induzida danifica os agregados de forma irreversível e, portanto, a atividade superficial dos agregados quebrados é diminuída, como também observado por Wenzheng *et al.* (2012). Assim, a relação entre o cisalhamento induzido e a resistência do agregado foi perdida após a quebra.

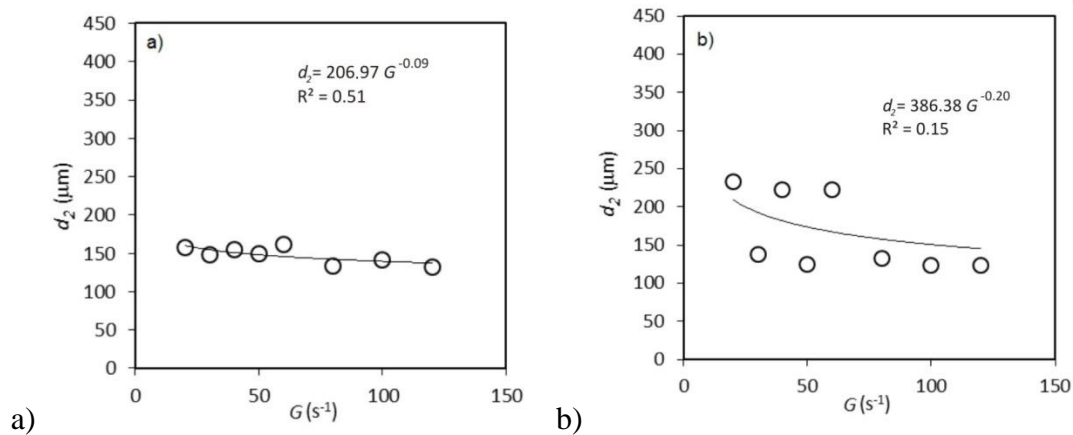


Figura 15. Gráfico da distribuição do diâmetro estável na fase de recrescimento (d_2) em resposta ao gradiente de velocidades médio (G) para: (a) água tipo 1 (b) água tipo 2.

4.3.2 Parâmetro característico da função de distribuição de tamanho (β)

As Figuras 16-a e 16-b apresentam o ajuste linear para a Equação 10 da Seção 3.5, em que o parâmetro β é o expoente da equação. O parâmetro β , como explicado anteriormente, caracteriza a distribuição de tamanho das partículas, sendo que, quanto mais inclinada estiver a reta de ajuste, ou seja, quanto maior valor em módulo do coeficiente de inclinação da equação de reta, maior a ocorrência dos agregados pequenos. A Figura 16-a apresenta resultado típico da distribuição de tamanho de partículas, medida por meio do parâmetro característico β , referentes aos agregados floculados a partir da água tipo 1. O valor maior de β_2 , em comparação com β_1 , demonstra que a distribuição após a quebra induzida dos agregados foi deslocada para a região de menores tamanhos. A Figura 16-b exemplifica o mesmo comportamento para a água tipo 2.

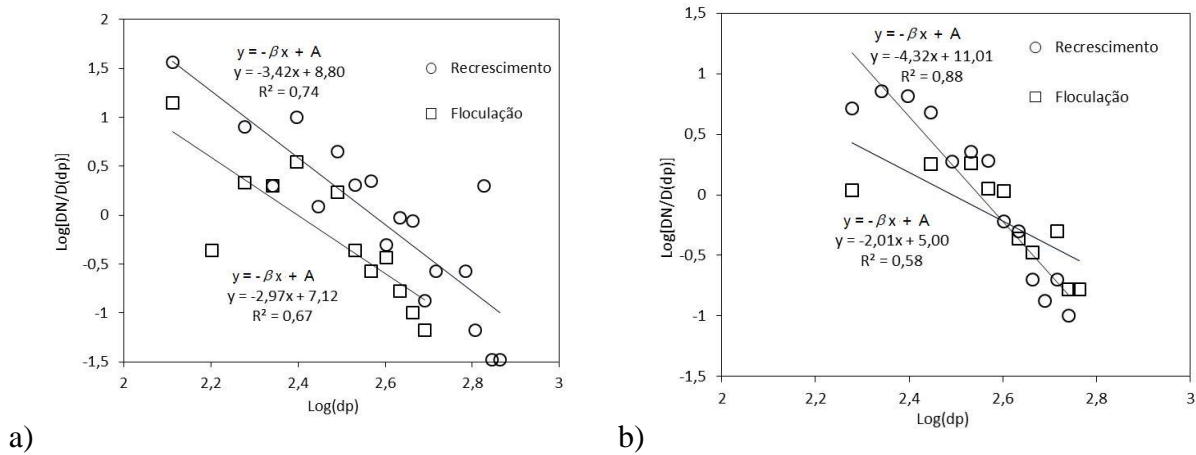


Figura 16. Ajuste linear do parâmetro β para água tipo 2 para G de 40 s^{-1} .

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados os resultados do parâmetro β_1 e β_2 para as diferentes condições estudadas. Os resultados mostraram que tendência a estabilização da floculação, dado pelo estado estacionário, sendo que o diâmetro estável é menor quanto maior é a agitação. Ainda nas Tabelas 8 e 9, é visível maiores valores (em módulo) de β_1 e β_2 em resposta a maiores valores de G . Isso representa que gradientes maiores produziram uma distribuição do tamanho de partículas com maior concentração nas faixas de pequenos tamanhos.

Em comparação, para as águas tipo 1 e 2, é visível que a água tipo 2 apresentou uma amplitude maior na variação de todos os parâmetros analisados, indicando uma sensibilidade maior dos agregados de caulinita frente à variação de G .

Tabela 8. Parâmetros da DTP para água tipo 1

$G(s^{-1})$	$d_1(\mu m)$	$d_2(\mu m)$	β_1	β_2
20	337	157	-1,61	-1,24
30	287	148	-1,23	-4,60
40	200	154	-2,97	-3,42
50	244	149	-3,19	-4,81
60	217	161	-3,01	-5,11
80	173	133	-4,58	-5,94
100	156	141	-4,18	-5,07
120	146	132	-4,34	-4,67

Tabela 9. Parâmetros da DTP para água tipo 2

$G(s^{-1})$	$d_1(\mu m)$	$d_2(\mu m)$	β_1	β_2
20	407	233	-0,37	-0,56
30	236	138	-1,27	-3,83
40	298	222	-2,01	-4,32
50	197	124	-2,80	-4,37
60	227	222	-3,58	-4,56
80	216	241	-4,32	-5,20
100	166	123	-4,68	-6,60
120	154	123	-5,91	-7,66

Na Figura 17, os valores de β_1 indicam o parâmetro característico da distribuição da função de tamanho para a fase de floculação, enquanto β_2 refere-se a fase de refloculação, isto é, após quebra dos agregados. É evidente a partir da Figura 17, que os valores β mais elevados (em módulo) foram obtidos a partir dos valores mais elevados G , indicando assim que a distribuição de tamanho do agregado foi deslocada para a região das menores faixas de tamanho quando G é aumentado. Além disso, foram observados valores inferiores de β para a fase de floculação (β_1), que indica abundante formação de grandes agregados antes da fase de quebra.

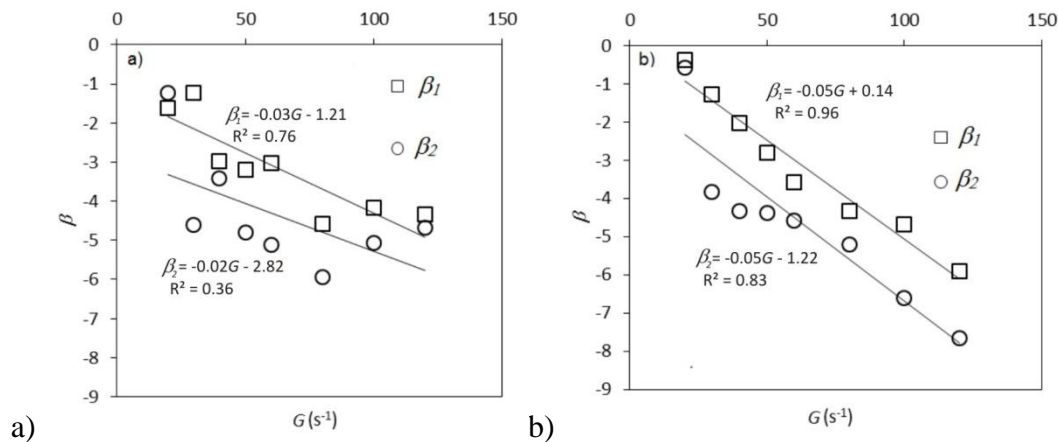


Figura 17. Gráfico da distribuição dos parâmetros β_1 e β_2 em resposta aos diferentes G utilizados para: (a) água tipo 1 (b) água tipo 2.

Na Figura 17 vê-se ainda que comportamento β versus G pode ser explicado por uma reta, que permanece linear após a quebra em uma linha paralela à inicial, mas em uma posição deslocada. O deslocamento de valores de β , de β_1 para β_2 reflete uma mudança real na distribuição de tamanho dos agregados e nas propriedades dos flocos. Esta variação clara na distribuição de tamanho é consequência da não recuperação de tamanho dos agregados.

Por fim, a maior amplitude de variação de β para a água do tipo 2 (Al-caulinita), vai de acordo com o que mostrou os resultados do diâmetro estável. Entretanto, diferentemente do comportamento do diâmetro estável (d), os valores de β ainda respondem às variações de G após a quebra induzida. Portanto, a fase de quebra não resultou em perda de sensibilidade para β_2 , mas este apresentou menores valores do coeficiente de determinação (R^2), quando comparados com a regressão β_1 .

4.3.3 Considerações finais

Os resultados apresentados aqui mostraram aspectos muito relevantes da recuperação do tamanho dos agregados, usando o diâmetro estável (d) e o parâmetro da função de distribuição tamanho (β), como parâmetros monitoramento e avaliação da refloculação. Os agregados foram formados por dosagem de alumínio [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$] na região de varredura para as duas águas sintéticas, preparadas a partir de caulinita (*Fluka*) e ácido húmico (*Aldrich Chemical*). Nestas condições, e

com base em gradientes de velocidade (G) variando de 20 a 120 s^{-1} , a ruptura mostrou ser uma questão irreversível.

Os valores de diâmetro estável dos agregados após a ruptura (d_2) foram sempre inferiores aos seus valores correspondentes durante a floculação (d_1), com d_2 variando de 157 a 132 μm para flocos Al-ácido húmico e de 233 a 132 para agregados de Al-caulinita, variando G de 20 a 120 s^{-1} . Valores de β_2 depois da quebra foram sempre superiores aos seus valores conjugados, variando de 1,2 a 4,6 para Al-ácido húmico e de 0,6 a 7,7 para Al-caulinita.

Os resultados também mostraram que o diâmetro estável (d) é uma poderosa ferramenta para acompanhar o comportamento do agregado, bem como o parâmetro característico (β). No entanto, β ainda responde à variação G após quebra, enquanto d não.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados descritos neste trabalho, verificou-se que os parâmetros Fator de Resistência (FR) e a tensão local (σ) têm variação positiva em resposta ao aumento de G .

Os dois métodos de monitoramento empregados, sendo eles a análise de imagem e o equipamento baseado em dispersão de luz, estão bem relacionados e deles derivam bons parâmetros para análise da resistência do floco.

A análise comparativa entre as diferentes águas de estudo indica que a natureza da partícula primária teve pouca influência na resistência do floco.

Com base nos resultados aqui apresentados, pode-se concluir que não houve a recuperação total do tamanho dos agregados de Al-ácido húmico e Al-caulinita, reforçando assim que a quebra dos flocos deve ser evitada tanto quanto possível.

Recomenda-se a utilização tanto do diâmetro estável (d) quanto do parâmetro característico (β), tomados da distribuição de tamanho agregado, para acompanhar a floculação e a quebra como parâmetros de monitoramento, viu-se porém, que β tem melhor resposta do que a de d na fase de refloculação dos agregados.

Valores de d mais baixos e valores de β mais elevados (em módulo) foram encontrados para G mais altos, e vice-versa. Contudo, a natureza das partículas primárias que compõe os agregados

mostrou ter influência limitada na quebra e no recrescimento do agregado, indicando que o precipitado amorfo de alumínio pode ser determinante nas propriedades do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, T. Avaliação do desempenho de sedimentação e sua relação com distribuição do tamanho de partículas (DTP) e com agregados fractal. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Campus Rio Claro. Jul 2017.
- BACHE, D.H.; JOHNSON, C.; MCGILLIGAN, J.F.;RASOOL, E. A conceptual view of floc structure in the sweep floc domain. *Water Sci. Technol.* 36 (4), p. 49–56. 1997.
- BOLLER, M.; BLASER, S. Particles under stress. *Water Sci. Technol.* 37 (10), p. 9–29, 1998.
- BRAKALOV, L.B. A connection between orthokinetic coagulation capture efficiency of aggregates and their maximum size. 1987.*Chem. Eng. Sci.* 42, 2373– 2383.
- BROWN, G.M.; GREGORY, J.; JACKSON, P.J.; NELSON, D.W.; TOMLINSON, E.J. An on-line monitor for flocculation control. In: *Instrumentation and Control of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems* (Edited by Drake R. A. R.). Pergamon Press Oxford, p.239-245, 1985.
- BÜLL, J. C. Determinação da força e recrescimento do floco de águas de abastecimento.. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Câmpus Rio Claro, 2017.
- BÜLL, J. C.; SILVA, P. A. G; MORUZZI, R. B. Determinação da força do floco e da refloculação de águas de abastecimento 2016. XXVII Congresso de Iniciação Científica. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Câmpus Rio Claro, 2016.
- CHAKRABORTI, R. K.; GARDNERB, K. H.; ATKINSON, J. F.; VAN BENSCHOTEN, J. E. Changes in fractal dimension during aggregation. *Water Research*, no. 37, p. 873–883, 2003.
- CONSTANTINO, L. T. Ruptura e recrescimento de flocos em água com substâncias húmicas aquáticas coagulada com sulfato de alumínio e cloreto férrico. 164 p. Thesis (Master Degree in Hidráulica e Saneamento) - Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2008.

- CRITTENDEN, J. C; TRUSSEL, R. R; HAND, D. W, HOWE, K. J. AND TCHOBANOGLIOUS, G. *Water Treatment: Principles and Design*. 2nd ed., 2005.
- DI BERNARDO, L; DANTAS, A. D. B. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. Segunda Edição. São Carlos. RiMa, 792 f., 2005.
- FRANÇOIS, S.B., Strength of aluminum hydroxide flocs. *Water Res.* 21, p. 1023–1030, 1987.
- GREGORY, J.; CHUNG, H. Continuous monitoring of floc properties in stirred suspensions. *J. Water SRT – Aqua*, Blackwell Science Ltd, v.44, no.3, p.125-131, 1995.
- GREGORY, J. Monitoring floc formation and breakage. In: *Proceedings of the Nano and Micro Particles in Water and Wastewater Treatment Conference*. International Water Association, Zurich, 2003.
- GREGORY, J. The density of particle aggregates. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 36, No. 4, pp. 1-13. Elsevier Science Ltd. Great Britain, 1997.
- GREGORY, J. Turbidity fluctuations in flowing suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.105, n.2, p. 357-371, 1985.
- GREGORY, J.; NELSON, D.W. A new optical method for flocculation monitoring. In: J. Gregory (Ed.), *Solid-Liquid Separation*, Ellis Horwood, Chichester, p. 172-182, 1984).
- GREGORY, J.; NELSON, D.W. Monitoring of aggregates in flowing suspensions. *Colloids and Surfaces*, 18, p.175-188, 1986.
- JARVIS P.; JEFFERSON B.; PARSONS, S. A. Breakage, Regrowth, and Fractal Nature of Natural Organic Matter Flocs. *Environ. Sci. Technol.*, no. 39, p. 2307-2314, 2005.
- LEENTVAAR, J. and Rebhun, M. Strength of ferric hydroxide flocs, *Water Research*, no. 17, p. 895–902, 1983.
- LI, T.; ZHU, Z.; WANG, D.; YAO, C; TANG, H. 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, 2007.
- MATSUO, T.; UNNO, H., Forces acting on floc and strength of floc. *J. Environ. Eng. ASCE* 107, 527– 545, 1981.
- MIKKELSEN, L.H.; KEIDING, K. The shear sensitivity of activated sludge: an evaluation of the possibility for a standardised floc strength test. *Water Res.* 36, 2931–2940, 2002.
- MORENO, P.; CONCEIÇÃO, F. T.; ANTUNES, M. L. P.; LOPES, M. S.; MORUZZI, R. B. Aplicação de lama vermelha como nucleador de floco. *Hydro*, São Paulo, v. 12, p. 46-48, 2016.
- MORENO, P.; MORUZZI, R. B.; Conceição, F.T. da . investigação da aplicação da lama vermelha 'red mud' na mistura rápida como nucleador de flocos visando sua remoção por sedimentação. In: *AIDIS, 2013, Tegucigalpa, Honduras. Anais do XXVIII AIDIS, 2013.*

- MORENO, P.; OLIVEIRA, A. L.; SILVA, P. A. G.; DE JÚLIO, M.; MORUZZI, R. B. Investigação do efeito do número de camp (NC) na distribuição de tamanho de partículas (DTP). In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES. v. 1, 2015.
- MORENO, P. Emprego de técnica dedicada de análise de imagem na valiação do produto GT no desempenho da floculação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Uiversidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2015.
- MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. 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, v. 12, no.3, p. 273-283, 2007.
- MORUZZI, R. B.. Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital, 2004.
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; DE JÚLIO, M; DUTRA, R. H. A.; SILVA, P. A. G. Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas.. Engenharia Sanitaria e Ambiental , v. 21, p. 1-8, 2016.
- MORUZZI, R. B.; SANTOS, H. R.; PRADO, G. S.; VIDAL, C. M. S.; CAMPOS, J. R. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. Engenharia Sanitária e Ambiental , Rio de Janeiro - RJ, v. 9, p. 291-300, 2004.
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; DE JÚLIO, M. Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração. Revista DAE, n. 200, p. 25–36, 2015.
- MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by anon-intrusive image analysis system and tracer tests. IWA Publishing, Water Science & Technology, 61, (1), p.253-262, 2010.
- MÜHLE, K. Flocc stability in laminar and turbulent flow. In: Dobias, B. (Ed.), Coagulation and Flocculation. Dekker, New York, pp. 355–390, 1993.
- OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G.; DE JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Análise da distribuição do tamanho de partículas em função do tempo de floculação. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015, Rio de Janeiro: ABES,. v. 1, 2015b.
- OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G.; DE JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Avaiiação da melhor distribuição de tamanho de partículas para a sedimentação mantendo-se fixo o número de Camp. Monterrey - Mexico. XXXIV Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental - Aspirando a un ambiente sostenible. MExico: AIDIS,. v. 1. p. 1, 2014.

OLIVEIRA, A.L.; MORENO, P.; SILVA, P.A.G., DE JULIO, M.; MORUZZI, R.B. The effect of form and particle size distribution (PSD) on the removal of particulate matter. *Desalination and Water Treatment.*, Vol. 57 (36). p. 1-12, 2015a.

OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; DE JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Avaliação de Parâmetros Representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas Presentes em Coleções Hídricas / Evaluation of Particle Size Distribution in Hydro Collections. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, p. 1084-1092, 2015.

PÁDUA, V.L. 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, 1994.

PARKER, D.S.; KAUFMAN, W.J.; JENKINS, D. Floc breakup in turbulent flocculation processes. *J. Sanit. Eng. Div.: Proc. Am. Soc. Civ. Eng. SA1*, 79–99, 1972.

PENG S. J.; WILLIAMS R. A. Direct Measurement of Floc Breakage in Flowing Suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, no. 166, p. 331-322, 1994.

SILVA, P. A. G.; MORUZZI, R. B. Reversibility of al-kaolin and al-humic aggregates monitored by stable diameter and size distribution. *Brazilian Journal of Chemical Engineering. Scielo* (no prelo), 2017.

SILVA, P. A. G. Força e dimensão fractal para floco de caulinita coagulado com sal de alumínio aplicado ao tratamento de água para abastecimento. 22 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio claro, 2016.

SNODGRASS, W.J.; CLARK, M.M.; O’MELIA, C.R. Particle formation and growth in dilute aluminum (III) solutions. *Water Res.* 18, 479– 488, 1984.

SUN, S.; WEBER-SHIRK, M.; LION, L.W., Characterization of Floccs and Floc Size Distributions Using Image Analysis. 10 p. School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 2015.

VOLTAN, P. E. N. Avaliação da ruptura e recrescimento de flocos em água com turbidez elevada. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

WEI, J.C.; GAO, B. Y.; YUE, Q. Y.; WANG, Y. Strength and regrowth properties of polyferric-polymer dual-coagulant floccs in surface water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, no. 175, p. 949–954, 2009.

YEUNG, A.K.; PELTON, R. Micromechanics: a new approach to studying the strength and breakup of floccs, *Journal of Colloid and Interface Science*, no. 184, p. 579–585, 1996.

YEUNG, A.K.; GIBBS, A.; PELTON, R.P. Effect of shear on the strength of polymer-induced flocs. *J. Colloid Interface Sci.* 196, 113–115, 1997.

YU, W.; HU, C.; LIU, H.; QU, J. Effect of dosage strategy on Al-humic flocs growth and re-growth. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 404. p. 106– 111, 2012).

YU, W.; GREGORY, J.; CAMPOS, L., Breakage and Regrowth of al Humic Flocs – Effect of additional Coagulant Dosage. *Environ. Sci. Technol.*, no. 44, 2010a.

YU, W.; GREGORY, J.; CAMPOS, L., Effect of Coagulation and Applied Breakage Shear on the Regrowth of Kaolin Flocs. *Environmental Engineering Science*, v. 27, no. 6, 2010b.

YU, W.; GREGORY, J.; CAMPOS, L.; GRAHAM, N., Dependence of floc properties on coagulant type, dosing mode and nature of particles. *Revista WaterResearch* 68, p 119-126, 2015.

YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. The reversibility of flocs breakage. *Internacional Journal of Mineral Processing*, v. 73, no. 2-4, p. 251-259, 2004.

YUKSELEN, M.A.; GREGORY, J. Breakage and reformation of alum flocs. *Environ. Eng. Sci.* no. 19, p. 229–236, 2002.

