



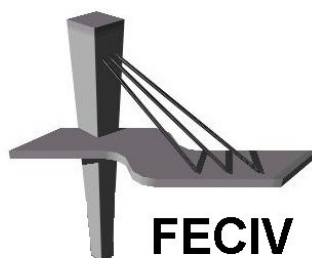
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SEDIMENTAÇÃO
EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA, RUPTURA E
RECREScimento DE FLOCOS OBTIDOS A PARTIR
DE ÁGUA COM TURBIDEZ ELEVADA**

LORENA MIRANDA DE ALMEIDA SILVA

UBERLÂNDIA, 19 DE DEZEMBRO DE 2018



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



LORENA MIRANDA DE ALMEIDA SILVA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SEDIMENTAÇÃO EM
FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA, RUPTURA E
RECRESCEMENTO DE FLOCOS OBTIDOS A PARTIR DE
ÁGUA COM TURBIDEZ ELEVADA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

Uberlândia, 19 de dezembro de 2018.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586a
2018 Silva, Lorena Miranda de Almeida, 1987-
Avaliação da eficiência de sedimentação em função da resistência,
ruptura e recrescimento de flocos obtidos a partir de água com turbidez
elevada [recurso eletrônico] / Lorena Miranda de Almeida Silva. - 2018.

Orientador: André Luiz de Oliveira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3311>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Oliveira, André Luiz de, 1973, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624



ATA

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE

ATA Nº: 230/2018

CANDIDATO: Lorena Miranda de Almeida Silva **Nº. Matrícula:** 11612ECV001

ORIENTADOR: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

TÍTULO: “Avaliação da eficiência de sedimentação em função da resistência, ruptura e recrescimento de flocos obtidos a partir de água com turbidez elevada”.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

PROJETO DE PESQUISA: Avaliação e acompanhamento do processo de floculação por meio de análise de imagens e equipamento de análise fotométrica de dispersão

DATA DA DEFESA: 19 de dezembro de 2018

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 14:00h/16:00h

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGE, assim composta pelos professores doutores: **Fábio Augusto do Amaral – IQ/UFU; Ed Carlo Rosa Paiva – DECIV/UFU e André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU**, orientador da candidata. Ressalta-se que todos os membros da banca participaram da defesa in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. André Luiz de Oliveira**, apresentou a Comissão Examinadora e concedeu à discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata **aprovada**. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Membros titulares:

Prof. Dr. André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU

Prof. Dr. Ed Carlo Rosa Paiva – DECIV/UFU

Prof. Dr. Fábio Augusto do Amaral – IQ/UFU

Uberlândia, 19 de dezembro de 2018.



Documento assinado eletronicamente por **Andre Luiz de Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/12/2018, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Augusto do Amaral, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/12/2018, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Ed Carlo Rosa Paiva, Usuário Externo**, em 22/12/2018, às 14:28, conforme



horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0866160** e o código CRC **84C17A49**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus filhos, Clara e Enrico, que são luz em minha vida e me fazem querer ser melhor a cada dia; ao meu marido, Lúcio, pelo companheirismo, dedicação e amor.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que por sua divina sabedoria nos proporciona, na medida certa, as oportunidades às quais somos capazes de vivenciar;

Aos meus pais, Fátima e Sérgio, que são a base da minha formação, que souberam me amar e educar, e estão continuamente se esforçando para que eu possa crescer sempre mais;

Ao meu companheiro de jornada, Lúcio, sem o qual eu não teria chegado aqui, obrigada por me encorajar e por acreditar em mim mais do que eu mesma;

Aos meus irmãos, Odorico e Marcelo, amigos que posso contar em todas as circunstâncias da vida;

À minha tia, Sula, por me apoiar e incentivar, desde sempre, e principalmente por ser presente;

Ao meu orientador, André Luiz, por me instruir e por todo conhecimento transferido, presente este que não se perde jamais;

À colega de pesquisa, Verônica, sem a qual eu não teria conseguido realizar este trabalho, por todo apoio, ajuda e dedicação;

À colega de mestrado, Alessandra, pelo auxílio e esclarecimento essenciais;

À todos os colegas de trajetória que de alguma forma contribuíram para minha formação;

E à todos os trabalhadores da FECIV que tornam possível a realização do trabalho de todos.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

SILVA, L. M. A. Avaliação da eficiência de sedimentação em função da resistência, ruptura e recrescimento de flocos obtidos a partir de água com turbidez elevada. 2018. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

RESUMO

A proposta deste trabalho foi a avaliação da eficiência de sedimentação em função da resistência, ruptura e recrescimento de flocos obtidos a partir de água com turbidez elevada utilizando-se aluminato de sódio como coagulante químico. Os processos de coagulação, floculação e decantação foram simulados em equipamento de bancada *Jar Test*. A água de estudo foi produzida com adição de caulinita em água destilada, proporcionando turbidez de 50 UNT. A primeira etapa da pesquisa consistiu em produzir diagramas de coagulação/floculação para as velocidades de sedimentação (V_s) de 5; 2,5; 1 e 0,5 cm/min e determinar o par ideal de dosagem de coagulante x pH de coagulação favorável à remoção de turbidez. A dosagem de coagulante adotada para a etapa seguinte foi de 70 mg/L, que permitiu uma remoção superior a 97% para uma faixa de pH de $8,23 \pm 0,05$. Na segunda etapa da pesquisa, o acompanhamento da floculação foi feito por metodologia não intrusiva a partir da aquisição de imagens dos flocos em plano de luz incidente no jarro estabelecido por laser, na qual foi avaliada a influência da ruptura e recrescimento na sedimentabilidade dos flocos. Iniciou-se com tempo de mistura rápida de 10 s e gradiente de mistura de 800 s^{-1} , seguida da floculação para diferentes gradientes de velocidade ($G_f = 20, 30, 40, 50 \text{ e } 60 \text{ s}^{-1}$), em experimentos independentes, com tempo de floculação de 20 min. Posteriormente, realizou-se ruptura induzida, por 10 s, para dois gradientes de velocidade de ruptura ($G_q = 80 \text{ e } 200 \text{ s}^{-1}$) e, imediatamente, para refloculação, foi reestabelecida a condição inicial de cada um dos gradientes de floculação utilizados, com tempo de refloculação de 20 min. Por fim, tanto na etapa de floculação quanto de refloculação, foram realizadas coletas de amostras para as mesmas V_s da primeira etapa, de forma a avaliar a eficiência de remoção de turbidez. O tratamento computacional das imagens foi realizado com o auxílio do software livre *ImageJ 1.51* para obtenção da distribuição do tamanho de partículas (DTP) e parâmetro β , representativo da DTP; evolução do diâmetro estável (d) para análise da recuperação do tamanho do floco e razão de recuperação (RR); avaliação do fator de resistência (FR) e do valor teórico de força do floco (tensão local - σ). Concluiu-se que maiores gradientes de velocidade são responsáveis por gerar uma DTP com maior concentração de partículas nas classes de menor diâmetro, comportamento este, confirmado pelo estudo do parâmetro β e do parâmetro d . Inversamente, o FR e a σ possuem tendências crescentes em resposta à elevação do gradiente de velocidade. Após ruptura induzida, os flocos perderam capacidade de recuperação total do tamanho, de forma que, quanto maior o G_q , menor foi a recuperação, independente do G_f . Da mesma maneira, a remoção da turbidez ficou comprometida pela elevação do G_f , bem como após sofrer ruptura induzida, de modo que o aumento do G_q promoveu ainda mais a perda da eficiência de remoção. Portanto, o aumento do G_f é mais expressivo nas alterações de sedimentabilidade dos flocos que a intensidade do G_q . Para menores velocidades de sedimentação, a elevação do gradiente de floculação foi mais comprometedora para a eficiência de remoção se comparada ao processo de ruptura induzida dos flocos. De forma geral os melhores resultados foram obtidos para o gradiente de floculação 20 s^{-1} .

Palavras-chave: coagulação, floculação, floco, ruptura de flocos, recrescimento de flocos, resistência do floco, sedimentação, turbidez, aluminato de sódio.

SILVA, L. M. A. Evaluation of sedimentation efficiency as a function of resistance, rupture and regrowth of flakes obtained from water with high turbidity. 2018. 104p. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ABSTRACT

The purpose of this work was to evaluate the sedimentation efficiency as a function of the resistance, rupture and regrowth of floc obtained from water with high turbidity using sodium aluminate as a chemical coagulant. The coagulation, flocculation and decantation processes were simulated in Jar Test bench equipment. The study water was produced with the addition of kaolinite in distilled water, providing turbidity of 50 UNT. The first stage of the research consisted of producing coagulation / flocculation diagrams for sedimentation speeds (V_s) of 5; 2.5; 1 and 0.5 cm / min and determined the ideal coagulant dosage pair x coagulation pH favorable to the removal of turbidity. The coagulant dosage adopted for the next step was 70 mg / L, which allowed a removal greater than 97% for a pH range of 8.23 ± 0.05 . In the second stage of the research, the flocculation was monitored by a non-intrusive methodology based on the acquisition of images of the floc in the plane of light incident in the jar established by laser. In which the influence of rupture and regrowth on the sedimentability of the floc was evaluated. It started with a fast mixing time of 10 s and a mixing gradient of 800 s^{-1} , followed by flocculation for different speed gradients ($Gf = 20, 30, 40, 50$ and 60 s^{-1}), in independent experiments, with flocculation time of 20 min. Subsequently, induced rupture was performed, for 10 s, for two rupture speed gradients ($G_q = 80$ and 200 s^{-1}), and immediately, for reflocculation, the initial condition of each of the used flocculation gradients was reestablished, with reflux time of 20 min. Finally, both in the flocculation and reflocculation stages, sample collections were performed for the same V_s as in the first stage, in order to assess the efficiency of turbidity removal. The computational treatment of the images was performed with the aid of the free software *ImageJ 1.51* to obtain the particle size distribution (DTP) and parameter β , representative of the DTP; evolution of the stable diameter (d) to analyze the recovery of the floc size and recovery ratio (RR); evaluation of the strength factor (FR) and the theoretical value of the floc strength (local tension - σ). It was concluded that higher velocity gradients are responsible for generating a DTP with a higher concentration of particles in the smaller diameter classes, a behavior confirmed by the study of parameter β and parameter d . Conversely, FR and σ have increasing trends in response to the rise in the speed gradient. After induced rupture, the flocs lost their ability to recover their initial size, so that the higher the G_q , the lower the recovery, regardless of G_f . In the same way, the removal of turbidity was compromised by the elevation of G_f , as well as after undergoing induced rupture, so that the increase in G_q further promoted the loss of removal efficiency. Therefore, the increase in G_f is more expressive in the sedimentation changes of the flocs than the intensity of G_q . For lower sedimentation speeds, the removal efficiency was more affected by the elevation of the flocculation gradient than by the interference of the induced rupture the flocs process. In general, the best results were shown for the 20 s^{-1} flocculation gradient.

Keywords: coagulation, flocculation, floc, rupture of floc, regrowth of flocs, resistance of flocs, sedimentation, turbidity, sodium aluminate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema ilustrativo da mistura rápida e floculação	20
Figura 2 - Diagrama de coagulação com coagulante sulfato de alumínio para remoção de turbidez	27
Figura 3 - Fluxograma das etapas que compõem o escopo da pesquisa.....	34
Figura 4 - Equipamentos utilizados durante os ensaios: (a) Turbidímetro Policontrol - AP200; (b) pHmetro digital Hanna Instruments – HI 8314; (c) reservatório de polietileno de 250L...	36
Figura 5 - Gráfico em escala logarítmica: rotação (RPM) correspondente ao gradiente de velocidade esperado, com ou sem a utilização de estator.....	40
Figura 6 - Copos descartáveis de 50 mL identificados para serem utilizados na coleta de amostras após coagulação e durante processo de sedimentação	41
Figura 7 - Ilustração esquemática do dispositivo experimental (Jar Test, computador pessoal, câmera digital, <i>laser</i>)	44
Figura 8 - Instalação do equipamento experimental em escala de bancada (Jar Test, câmera digital Nikon D5500 com tripé, <i>laser</i> adaptado e tripé, computador pessoal, programa computacional <i>Camera Control Pro 2.0</i>)	46
Figura 9 - Imagem do posicionamento da régua para realizar a calibração	47
Figura 10 - Momento de aquisição de imagens, com laser como única fonte de luz incidente no jarro com amostra	49
Figura 11 – Imagem original adquirida durante o experimento.	49
Figura 12 – Imagem recortada pelo software JPEG Crops.....	50
Figura 13 – Interface do software <i>ImageJ</i> e sequencia do processamento das imagens:	52
Figura 14 – A área de projeção da partícula em um plano (área em azul) é igual à área da circunferência (em vermelho), portanto têm o mesmo diâmetro.....	53
Figura 15 – Esquema representativo para obtenção do diâmetro máximo ($d_{máx}$) de um agregado hipotético.....	55
Figura 16 - Diagrama de coagulação/floculação de água com 50 UNT apresentando a eficiência de remoção de turbidez com aplicação de 70 mg/L de aluminato de sódio– velocidade de sedimentação de 5 cm/min	60

Figura 17 - Diagrama de coagulação de água com 50 UNT apresentando a eficiência de remoção de turbidez com aplicação de 70 mg/L de aluminato de sódio – velocidade de sedimentação de 2,5 cm/min	61
Figura 18 - Diagrama de coagulação de água com 50 UNT apresentando a eficiência de remoção de turbidez com aplicação de 70 mg/L de aluminato de sódio – velocidade de sedimentação de 1 cm/min	61
Figura 19 - Diagrama de coagulação de água com 50 UNT apresentando a eficiência de remoção de turbidez com aplicação de 70 mg/L de aluminato de sódio – velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min	62
Figura 20 – DTP na fase de estabilidade da floculação e refloculação para diferentes G	66
Figura 21 – Distribuição dos parâmetros β_1 e β_2 para diferentes taxas de cisalhamento	68
Figura 22 – Evolução temporal do diâmetro estável ‘ d ’ do floco para distintos valores de gradiente de velocidade de floculação, para ensaios com ruptura induzida com $G_q = 200\text{s}^{-1}$..	70
Figura 23 – Razão de recuperação após ruptura com $G_q = 80$ e 200 s^{-1} , para diversos gradientes de velocidade médios (G_f) avaliados	73
Figura 24 – Disposição do diâmetro estável para distintos gradientes de floculação médios (G_f): (a) diâmetro estável antes da ruptura - d_1 ; (b) diâmetro estável após a ruptura - d_2	74
Figura 25 – Fator de resistência após ruptura com $G_q = 80$ e 200 s^{-1} , para diversos gradientes de velocidade médios (G_f) avaliados	76
Figura 26 – Obtenção do coeficiente de resistência do floco ‘ r ’ pelo comportamento da curva $\ln d$ e $\ln G_f$, durante a fase estável da floculação	77
Figura 27 –Relação entre o fator de resistência (experimental) e a tensão local (teórica)	78
Figura 28–Comparativo de eficiência de remoção de turbidez entre ensaios sem ruptura e com ruptura induzida de 80 s^{-1} e de 200 s^{-1} : (a) para gradiente de floculação de 20 s^{-1} ; (b) para gradiente de floculação de 30 s^{-1} ; (c) para gradiente de floculação de 40 s^{-1} ; (d) para gradiente de floculação de 50 s^{-1} ; (e) para gradiente de floculação de 60 s^{-1}	80
Figura 29 – Comparativo de eficiência de remoção de turbidez para distintos gradientes de velocidade médio na floculação e refloculação: (a) após 20 min de floculação, sem ruptura dos flocos; (b) após 20 min de refloculação com ruptura induzida de 80 s^{-1} ; (c) após 20 min de refloculação com ruptura induzida de 200 s^{-1}	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais trabalhos realizados até o momento pelo grupo de pesquisa	16
Tabela 2 - Parâmetros gerais de projeto de unidade de floculação	23
Tabela 3 - Parâmetros gerais de projeto de unidade de mistura rápida	24
Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do Aluminato de Sódio	25
Tabela 5 - Parâmetros físicos estabelecidos como condições-padrão para os ensaios de batelada	39
Tabela 6 - Parâmetros físicos utilizados para os ensaios de batelada e aquisição de imagens	43
Tabela 7 - Configurações da câmera mais adequadas para a aquisição das imagens	45
Tabela 8 - Divisão das classes para distribuição de partículas por tamanho	54
Tabela 9 – Turbidez remanescente para diferentes velocidades de sedimentação em função do pH de coagulação para dosagem de 70 mg/L do coagulante aluminato de sódio	63
Tabela 10 – Valores calculados dos coeficientes β_1 e β_2 para distintos gradientes de velocidade	67
Tabela 11–Evolução temporal do diâmetro estável do floco para ensaios com $G_q = 200 \text{ s}^{-1}$...	70
Tabela 12–Diâmetro estável do floco para ensaios com $G_q = 80 \text{ s}^{-1}$	72
Tabela 13–Diâmetro estável do floco para ensaios com $G_q = 200 \text{ s}^{-1}$	72
Tabela 14 - Dados dos diâmetros estáveis, dos parâmetros de resistência do floco com o aumento da taxa de cisalhamento para ensaios com $G_q = 200 \text{ s}^{-1}$	75
Tabela 15 - Eficiência de remoção de turbidez (%)	79

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

HCl	Ácido clorídrico
H ₂ O	Água
Al ³⁺	Alumínio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
A	Coefficiente de densidade da equação de potência
β	Coefficiente de inclinação da equação de potência
l	Comprimento característico dos agregados
p	Coefficiente de potência
r	Coefficiente de resistência do floco
C	Constante multiplicativa de ajuste
n_0	Concentração inicial de partículas primárias ($T_f = 0$)
n_1	Concentração remanescente de partículas primárias ao tempo T_f
$d(N)$	Concentração do número de partículas
ρ_w	Densidade da água (Kg/m ³)
d_p	Diâmetro das partículas
d	Diâmetro estável do floco
d_{eq}	Diâmetro equivalente
$d_{m\acute{a}x}$	Diâmetro máximo da partícula
$d(d_p)$	Fração incremental dos diâmetros das partículas
$F(d_p)$	Função que define a frequência da DTP
FR	Fator de resistência do floco
G	Gradiente de velocidade (s ⁻¹)
G_f	Gradiente de velocidade médio na floculação (s ⁻¹)
G_{mr}	Gradiente de velocidade médio na mistura rápida (s ⁻¹)
G_q	Gradiente de velocidade médio de ruptura dos flocos (s ⁻¹)
G_{rf}	Gradiente de velocidade médio na refloculação (s ⁻¹)

NaOH	Hidróxido de sódio
IF	Índice de floculação
dN	Número de partículas para diâmetros entre d_p e d_p máximo
ζ	Potencial Zeta
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Sulfato de alumínio
RR	Razão de recuperação do tamanho do floco
\mathcal{E}	Taxa de dissipação de energia local por unidade de massa (m^2/s^3)
$\bar{\mathcal{E}}$	Taxa média de dissipação de energia local (m^2/s^3)
T	Temperatura
T_f	Tempo de floculação (s)
T_{mr}	Tempo de mistura rápida (s)
T_q	Tempo de ruptura (s)
T_{rf}	Tempo de refloculação (s)
T_s	Tempo de sedimentação (min)
σ	Tensão local – força do floco (N/m^2)
v	Velocidade da partícula
V_s	Velocidade de sedimentação (cm/min)
ν	Viscosidade cinemática (m^2/s)
μ	Coeficiente de viscosidade
P	Potência aplicada à água

ABREVIATURAS

cm	Centímetros
bits	Dígitos binários (binary digit)
g	Grama
h	Horas
L	Litro
MPixel	Megapixel
m^2	Metros quadrados
μm	Micrometros
mg	Miligrama
mL	Mililitro

V	Volt
mV	Milivolt
W	Watts
mW	Miliwatts
min	Minutos
M	Molar
nm	Nanômetro
pH	Potencial hidrogeniônico
qps	Quadros por segundo
kg	Quilogramas
kgf	Quilograma força
rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
s ⁻¹	Segundos a menos um
uT	Unidade de turbidez
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
uH	Unidade Hazen

SIGLAS

CCP	<i>Camera Control Pro</i>
DTP	Distribuição do Tamanho de Partículas
DCE	Dupla camada elétrica
ETA	Estação de Tratamento de Água
FECIV	Faculdade de Engenharia Civil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	International Standards Organization
MS	Ministério da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PZ	Potencial Zeta
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UV-Vis	Ultravioleta-visível
VMP	Valor máximo permitido

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Grupo de Pesquisa16.....	16
CAPÍTULO 2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2Objetivos específicos.....	18
CAPÍTULO 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 Coagulação/ Floculação.....	19
3.1.1 Mecanismos de coagulação.....	20
3.1.2 Gradiente de velocidade.....	22
3.2 Avaliação da remoção de impurezas.....	24
3.2.1 Turbidez.....	24
3.2.2 Aluminato de sódio.....	25
3.2.3 Diagrama de coagulação.....	26
3.2.4 Análise por imagens.....	28
3.3 Acompanhamento da floculação.....	29
3.3.1 Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP)	29
3.3.2 Resistência do floco.....	30
3.3.3 Ruptura e recrescimento.....	33
CAPÍTULO 4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1 Materiais.....	35
4.1.1 Equipamentos.....	35
4.1.2 Produtos químicos.....	36
4.1.3 Água de estudo.....	37
4.2 Diagrama de coagulação/floculação.....	38
4.2.1 Parâmetros estabelecidos para ensaio de coagulação/floculação.....	38
4.2.2 Ensaio de bancada.....	39
4.2.3 Elaboração do diagrama de coagulação.....	41
4.3 Acompanhamento da floculação por meio de aquisição e análise de imagens.....	42
4.3.1 Condições de coagulação, ruptura e recrescimento.....	42

4.3.2	<i>Aparato experimental</i>	44
4.3.3	<i>Ensaio para aquisição de imagens</i>	46
4.3.4	<i>Processamento e tratamento das imagens</i>	49
4.3.5	<i>Estudo da DTP</i>	53
4.3.6	<i>Determinação da resistência do floco</i>	55
4.4	Avaliação da eficiência de remoção de turbidez	59
	CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1	Diagramas de coagulação/floculação do coagulante Aluminato de Sódio	60
5.2	Análise da DTP	64
5.2.1	<i>Avaliação do parâmetro β</i>	67
5.3	Recuperação do tamanho do floco	69
5.3.1	<i>Diâmetro estável (d)</i>	69
5.3.2	<i>Razão de recuperação (RR)</i>	72
5.4	Avaliação da resistência do floco	74
5.5	Avaliação da eficiência de remoção de turbidez antes e após ruptura induzida dos flocos	79
	CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES	84
	REFERÊNCIAS	86
	APÊNDICE A	95
	APÊNDICE B	102

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico é um conjunto de medidas que controlam o meio físico do homem de modo a assegurar sua saúde física e mental e o bem-estar social (CESAMA, 2014). Segundo Heller e Pádua (2006), essas medidas compreendem: abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza pública, drenagem pluvial e controle de vetores. No Brasil, cerca de 70% do volume de água tratada e distribuída é decorrente do tratamento por ciclo completo, sendo empregado, em maior proporção, nas Regiões Sul e Sudeste (IBGE, 2010). Por isso, é necessário o estudo para otimização dos processos que compreendem o tratamento de água, de forma a garantir que a água tratada adquira os padrões de qualidade exigidos pelo Ministério da Saúde (MS) na Portaria nº 2914/ 2011 antes de ser fornecida à população.

Mais importante ainda, é que o tratamento de água em cada local seja feito utilizando a técnica que melhor se adapte às características do meio, assim, cada processo se torna mais eficiente e o resultado final é uma água tratada de melhor qualidade e a menor custo.

As etapas iniciais do tratamento são de fundamental importância para a qualidade final da água tratada. A clarificação da água ocorre entre a coagulação e a filtração. Quando há elevações súbitas da turbidez da água bruta juntamente com variações do pH, a coagulação torna-se impotente na formação dos flocos e prejudica os processos subsequentes. Nestes casos, os filtros recebem carga elevada de flocos e matéria não coagulada, resultando em carreiras de filtração muito curtas, gerando água tratada de má qualidade (RICHTER, 2009).

Os agregados formados pela coagulação podem ter forma irregular, ser altamente porosos e compostos por partículas primárias de menores tamanhos (HUANG, 1994). Os flocos possuem propriedades como tamanho, estrutura e resistência, que influenciam na eficiência das técnicas de separação e de purificação. Assim sendo, o entendimento das propriedades dos flocos é importante no estudo da coagulação (Li et al., 2007), bem como a busca por novos produtos e técnicas que propiciem maior eficiência no tratamento.

Neste contexto, o presente trabalho procura fazer um estudo em torno da coagulação e floculação, etapas que compreendem a formação e aglomeração dos flocos que serão sedimentados; com foco em investigar o coagulante aluminato de sódio e sua eficiência na remoção de turbidez, com experimentos em nível de bancada, utilizando o equipamento de simulação de tratamento Jar Test. A investigação foi realizada a partir de técnica não intrusiva de análise de imagens dos flocos, obtidas durante o processo de floculação, de forma a monitorar e avaliar o desenvolvimento da distribuição do tamanho de partículas (DTP) e

analisar o comportamento do floco em termos de sua força e sedimentabilidade antes e após aplicação de tensões cisalhantes de ruptura.

1.1. Grupo de Pesquisa

O corrente trabalho vincula-se a um grupo de pesquisa em saneamento, com principal foco nos processos de coagulação e floculação aplicados ao tratamento de água de abastecimento. De forma conceitual e experimental, esta linha de pesquisa investiga, dentre diversos parâmetros inerentes aos processos de coagulação/floculação, a influência das alterações do tamanho, forma e distribuição das partículas e das condições do meio na eficiência dos processos.

O grupo contou com a colaboração de diversos pesquisadores brasileiros dos mais diversos níveis, bem como com a participação de instituições internacionais, fomentando na publicação de inúmeros trabalhos acadêmicos, dentre eles, os principais estão descritos na Tabela 1, em ordem cronológica.

Tabela 1 – Principais trabalhos realizados até o momento pelo grupo de pesquisa

Ano	Autores	Nível de pesquisa	Título	Publicações
2001 - 2004	Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi	Doutorado	“Avaliação da influência da distribuição de tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação no desempenho da flotação, com emprego de sonda ultra-sônica e de técnica de análise por imagem”	MORUZZI et al. (2004); MORUZZI (2005); 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. Dr. Luiza Cintra Campos, Prof. Dr. André Luiz de Oliveira, Pedro Augusto Grava da Silva	Projeto de pesquisa em parceria com Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), University College of London (UCL) e UNESP outorgado e financiado pelo edital FAPESP/SABESP.	“Desenvolvimento e aplicação de sistema de monitoramento contínuo de tamanho de flocos visando otimização da coagulação/floculação e filtração”	MORUZZI, OLIVEIRA E JÚLIO (2015); MORUZZI ET AL. (2016).
2013 - 2014	Ma. Pamela Moreno	Mestrado	“Emprego de técnica dedicada de análise de imagem na avaliação do produto GT no desempenho da floculação”	MORENO (2015); MORENO et al. (2015).
2014 - 2015	Prof. Dr. André Luiz de Oliveira	Pós Doutorado	Projeto: 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	Iniciação Científica - Trabalho de Conclusão de Curso	“Estudo da força 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”	SILVA (2016); SILVA et al. (2015); SILVA, OLIVEIRA E MORUZZI (2016); SILVA E MORUZZI (2017).
2015-2017	Juliana Carvalhinho Bull	Iniciação Científica - Trabalho de Conclusão de Curso	“Determinação da força e recrescimento do floco de água de abastecimento”	BULL, SILVA E MORUZZI (2016); BULL (2017)

2016-2017	Thaís de Almeida	Iniciação Científica - Trabalho de Conclusão de Curso	“Avaliação do desempenho de sedimentação e sua relação com distribuição do tamanho de partículas (DTP) e com agregado fractal”	ALMEIDA (2017)
2015-2017	Me. Pedro Augusto Grava da Silva	Mestrado	“Estudo da força 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”	SILVA (2017)
2015-2017	Me. Yuri Mendes	Mestrado	“Evolução da distribuição do tamanho de partículas na floculação de água de baixa turbidez”	MENDES (2017)
2015-2017	Me. Luan serafim Mendes Gonçalves	Mestrado	“Evolução do diâmetro fractal de agregados formados a partir de água com baixa turbidez”	GONÇALVES (2017)
2015-2017	Me. Ricardo Henrique de Andrade Dutra	Mestrado	“Obtenção dos Parâmetros cinéticos da floculação com utilização de técnica de análise de imagem”	DUTRA (2017)
2015-2017	Ma. Alessandra da Silva Oliveira	Mestrado	“Avaliação da morfologia e da distribuição do tamanho de partículas para pontos distintos do diagrama de coagulação/floculação”	OLIVEIRA, Alessandra (2018) OLIVEIRA et al. (2018)
2016-2018	Me. Marcelo Vandemberg Barbosa Borges	Mestrado	“Avaliação da eficiência de remoção de cor em função da distribuição de tamanho dos flocos e no fator de força”	BORGES (2018) BORGES et al. (2018)
2016-2018	Me. Ricardo Fonseca de Oliveira	Mestrado	“Obtenção das constantes cinéticas de agregação e ruptura de flocos obtidos a partir de água com cor elevada”	OLIVEIRA, Ricardo (2018)
2017-2018	Dra. Verônica	Pós Doutorado	Projeto: avaliação e acompanhamento dos processos de coagulação/floculação por meio de análise de imagens dos flocos em termos de suas características morfológicas e de distribuição.	LOPES et al. (2018) SILVA et al. (2018)

Fonte: Adaptado de Silva, 2017; a Autora, 2018.

CAPÍTULO 2 OBJETIVOS

A seguir são descritos os principais objetivos do trabalho.

2.1. Objetivo geral

Avaliar a eficiência de remoção de turbidez antes e após a ruptura induzida de flocos produzidos no processo de floculação simulado em escala de bancada em função da DTP, razão de recuperação e resistência dos flocos.

2.2. Objetivos específicos

- a) Obtenção das curvas de remoção de turbidez em função do par de valores: pH de coagulação x dosagem de coagulante;
- b) Obtenção e análise das curvas de Distribuição de Tamanho de Partículas para as diversas situações de coagulação/floculação antes e após ruptura;
- c) Verificação da capacidade de recuperação do tamanho do floco após ruptura;
- d) Avaliação da resistência dos flocos;
- e) Avaliação da eficiência de remoção de turbidez em função da ruptura e recrescimento dos flocos.

CAPÍTULO 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata de revisão sobre os mecanismos de coagulação/floculação, remoção de impurezas da água e acompanhamento da floculação por meio de análise de imagens dos flocos.

3.1. Coagulação/ Floculação

A água bruta proveniente de mananciais pode conter uma variedade de impurezas, principalmente partículas coloidais, substâncias húmicas e organismos em geral. Essas impurezas apresentam carga superficial negativa que necessitam que algumas características da água sejam modificadas, desestabilizando as partículas para que sejam removidas por meio da coagulação, floculação, sedimentação e filtração (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; VIANNA, 1997).

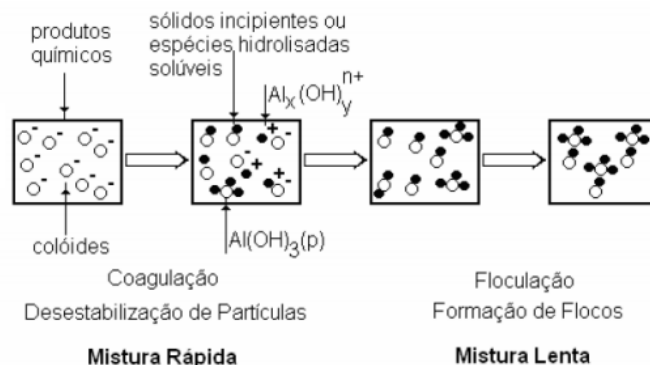
A coagulação, normalmente, ocorre com a adição de sais de alumínio e ferro, que recebem o nome de coagulantes, os quais têm a função de desestabilizar as partículas. Eles acarretam dois fenômenos: o primeiro é químico e depende diretamente da concentração de metal e do pH final da mistura, resulta da reação do coagulante com a água formando espécies hidrolisadas de carga positiva; o segundo fenômeno é físico, quando ocorre o transporte das espécies hidrolisadas de modo a promover o contato entre as partículas de impureza, sendo as principais: partículas coloidais, substâncias húmicas e organismos. Todo o processo é excepcionalmente rápido, variando de 1/10 de segundo a 100 s, e necessita que ocorra em um local que forneça grande quantidade de energia ao líquido, para que haja uma agitação intensa. Em uma estação de tratamento de água, ele ocorre na unidade de mistura rápida (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

A seguir, ocorre a floculação, que necessita de agitação lenta, para que as partículas de impureza choquem-se e aglomerem-se, aumentando de tamanho e formando grandes flocos (partículas sedimentáveis) a serem removidos nas unidades seguintes da estação de tratamento: decantadores e filtros (sistema de tratamento convencional). A floculação ocorre devido a mecanismos de transporte que promovem o encontro das partículas coloidais com precipitados de metal ou espécies hidrolisadas positivas. Estes mecanismos são: a interação pericinética ou movimento Browniano, no qual o movimento errático das partículas é causado pela energia térmica; a interação ortocinética, em que o choque entre partículas é causado pelo

gradiente de velocidade (para escoamento laminar e turbulento); e sedimentação diferenciada, na qual ocorre o encontro de partículas com diferentes velocidades de sedimentação (VOLTAN, 2007).

A Figura 1 retrata a ação do coagulante (especificamente um sal de alumínio) agindo na formação dos flocos.

Figura 1 - Esquema ilustrativo da mistura rápida e floculação



Fonte: Di Bernardo e Dantas, 2005.

3.1.1 Mecanismos de coagulação

Mecanismos de coagulação são os agentes necessários para unir partículas suspensas responsáveis pela cor e turbidez nas águas naturais. Por estarem carregadas eletricamente com carga negativa, as partículas se repelem e por meio da desestabilização, os colóides são neutralizados pelo produto da hidrólise do coagulante químico, normalmente sais de alumínio ou ferro (PAVANELLI, 2001; YU et al., 2015).

Segundo Di Bernardo (2005) considera-se a coagulação como o resultado individual ou combinado da ação de quatro principais mecanismos responsáveis pela formação de agregados de partículas. São eles: compressão de camada difusa de dupla camada elétrica, adsorção e neutralização de carga, varredura, adsorção e formação de pontes, dentre os quais, os mais recorrentes no tratamento de água são a adsorção e neutralização de cargas e a varredura (AMIRTHARAJAH & O'MELIA, 1990; KIM; MOON; LEE, 2001).

3.1.1.1. Compressão da camada difusa

Neste mecanismo, a desestabilização das partículas coloidais é função da adição de íons com carga oposta, as interações são apenas de natureza eletrostática, não possuem características de hidrólise ou de adsorção pois o eletrólito suporte é indiferente. A coagulação ocorre pelo

excesso de íons positivos que se acumulam na camada difusa e induzem seu adensamento, de forma a promover a neutralidade da camada pela redução de seu volume e diminuição da esfera de influência das partículas, de modo tal que as forças de ‘Van der Waals’ sejam dominantes.

Duas considerações importantes foram feitas por Di Bernardo e Dantas (2005) acerca deste mecanismo: primeiramente que a quantidade de eletrólitos capazes de realizar a coagulação, praticamente, não depende da concentração de coloides na água; e que torna-se impossível a reestabilização das partículas coloidais após a adição de qualquer quantidade de eletrólitos, ou seja, após a carga da partícula se tornar positiva, não haverá possibilidade de ser revertida.

3.1.1.2. *Adsorção e neutralização de carga*

No momento da adição do coagulante na água com partículas suspensas, ocorrem três tipos de interações: coagulante-coloide; coagulante-solvente e coloide-solvente. A desestabilização das partículas ocorre pela adsorção, em suas superfícies, de produtos de hidrólise de alumínio ou de ferro ou de polímeros sintéticos catiônicos capazes de neutralizá-las. Para a desestabilização é utilizada uma dosagem de coagulante consideravelmente menor em comparação ao mecanismo da dupla camada (MENDES, 1989).

O coagulante possui capacidade de se dissolver na água, apresentando os cátions responsáveis por neutralizar a carga negativa dos coloides. Neste momento é imprescindível a agitação intensa e rápida, pois antes mesmo da formação dos flocos visíveis, microflocos são formados e retêm a carga positiva na faixa ácida devido a adsorção de H^+ . Logo, estes microflocos também serão responsáveis por neutralizar e cobrir as partículas coloidais. Todo esse processo deve ocorrer rapidamente, devido ao breve tempo de vida das espécies hidrolisadas, e é um mecanismo denominado *desestabilização por adsorção* (ECKENFELDER Jr., 1989; VIANNA, 1997).

Conforme Di Bernardo e Dantas (2005), este mecanismo é muito utilizado em ETAs (Estações de Tratamento de Água) com sistema de tratamento que possui filtração direta após floculação e sedimentação.

Diferentemente do mecanismo da camada difusa, neste caso pode haver a reestabilização das partículas, pelo excesso de coagulante que pode acarretar a reversão de carga dos coloides (YUKSELEN e GREGORY, 2004).

3.1.1.3. *Varredura*

A floculação de varredura ocorre pela precipitação de hidróxido de metal amorfo, quando a dosagem de coagulante é elevada (SNODGRASS *et al.*, 1984).

Segundo Vianna (1997), em até sete segundos todos os produtos de hidrólise tendem a se transformar em hidróxido de alumínio $[Al(OH)_3]$ ou hidróxido férrico $[Fe(OH)_3]$, insolúveis e apresentam-se como flocos gelatinosos e precipitáveis. Estes produtos agem desestabilizando os coloides que não se neutralizaram pela adsorção. Para isso, o gel de hidróxido de alumínio utiliza um mecanismo baseado na saturação da água e arraste dos coloides que se aprisionam ao gel e formam flocos maiores e com velocidade de sedimentação mais alta que flocos formados pelo processo de adsorção, assim denomina-se a *desestabilização por varredura*.

3.1.1.4. *Adsorção e formação de pontes*

Este mecanismo se dá por intermédio de polímeros naturais ou sintéticos de cadeias grandes, que são utilizados como coagulantes. Ao longo de sua cadeia podem apresentar sítios ionizáveis, classificados como catiônicos (positivos), aniônicos (negativos), anfotéricos (positivos e negativos) e não-iônicos (neutros), mas, conforme cita Di Bernardo (1993), pesquisas realizadas com coagulantes poliméricos mostram que a desestabilização de coloides é possível com polímeros catiônicos e aniônicos. A ação dos polímeros sobre os coloides ocorre por sua adsorção às partículas e posterior redução da carga ou pelo entrelaçamento das partículas nas cadeias do polímero (MENDES, 1989).

3.1.2 *Gradiente de velocidade*

Nos sistemas de tratamento de água, para que ocorra a coagulação/floculação, há necessidade de imposição de um gradiente médio de velocidade de mistura, considerado como a força motriz para o transporte de quantidade de movimento. Desta forma, em termos físicos, o gradiente de velocidade representa o número de oportunidades de colisões entre duas partículas presentes no meio fluido em um determinado tempo, em consequência de uma energia externa aplicada ao sistema.

O gradiente de velocidade (G) é um parâmetro que requer atenção especial em projetos de unidade de coagulação e floculação, uma vez que permite quantificar a agitação e as taxas de cisalhamento aplicadas em um determinado fluido (COUFORT *et. al.*, 2008). As primeiras

teorias sobre a conjugação de partículas foram feitas por Smoluchowski (1917) e deram origem ao conceito de gradiente de velocidade aplicado, particularmente, nas unidades de mistura rápida e floculação (Richter e Azevedo Netto, 1991).

A partir do conceito de viscosidade, Camp e Stein (1943) deduziram a equação que permite calcular o valor do gradiente de velocidade (Equação 1).

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot v}} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

G = gradiente de velocidade (s^{-1});

P = potência aplicada à água (kgf.m.s^{-1} ou $\text{W} = \text{N.m.s}^{-1}$);

μ = coeficiente de viscosidade (kgf.s.m^{-2} ou $\text{Pa.s} = \text{N.s.m}^{-2}$);

v = volume da câmara de mistura (m^3).

De acordo com a ABNT NBR 12216:1992, as condições ideais em termos de gradiente de velocidade, tempo de mistura, dosagem de coagulante e pH devem ser determinadas em laboratório. Em situações que não são possíveis a determinação experimental, a norma recomenda que a dispersão de coagulantes metálicos hidrolisáveis (mistura rápida) seja feita com gradientes de velocidade compreendidos entre 700 s^{-1} e 1100 s^{-1} , em um tempo de mistura não superior a 5 s.

A Tabela 2 mostra os valores para projeto de unidades de floculação (mistura lenta) e a Tabela 3 mostra os valores gerais de projeto para unidades de mistura rápida.

Tabela 2 - Parâmetros gerais de projeto de unidade de floculação

Parâmetro	Unidade mecanizada	Unidade hidráulica
Tempo de agitação (min.)	20 a 60	5 a 30
Gradiente de velocidade médio (s^{-1})	70 a 10	50 a 10

Fonte: Adaptado de DI Bernardo e Dantas, 2005.

Tabela 3 - Parâmetros gerais de projeto de unidade de mistura rápida

Coagulante	$G_{mr}(s^{-1})$	$T_{mr}(s)$	Observação
Sulfato de Alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso clorado, hidroxiclreto de alumínio, tanato, etc.	3.000 a 7.000	≤ 5	Coagulação por adsorção e neutralização de carga
	500 a 1.200	≤ 60	Coagulação por varredura
Polímero sintético catiônico	250 a 800	30 a 300	Depende da temperatura da água

Fonte: Adaptado de DI Bernardo; Dantas, 2005.

Percebe-se que a coagulação está fortemente condicionada à intensidade de mistura, ou seja, ao gradiente de velocidade de coagulação. Pela fórmula acima apresentada (Equação 1), nota-se que fatores como o volume e viscosidade do fluido tratado, bem como a potência aplicada na água podem influenciar diretamente no processo de coagulação.

3.2. Avaliação da remoção de impurezas

3.2.1 Turbidez

De acordo com o padrão de potabilidade de água brasileiro (Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde) existem diversos critérios para estabelecimento do limite de turbidez aceitável da água após tratamento, entretanto, a eficiência de inativação dos microrganismos é maior quanto menor o valor limite de turbidez estabelecido para a água tratada.

A turbidez da água ocorre em função da presença de partículas suspensas, dos mais variados tamanhos e de natureza diversa, seja matéria orgânica ou inorgânica e ainda distintos microrganismos que impedem a passagem direta de um feixe de luz no interior do meio. É comum que essa característica esteja associada à agitação da água, que prejudica a sedimentação do material suspenso.

A natureza das partículas suspensas na água é bastante variada, desde argilas, matéria orgânica, partículas coloidais, algas e microrganismos, por isso, devem ser conduzidos estudos para escolha do melhor processo de tratamento.

A turbidez em si não é patogênica, no entanto, a natureza química das partículas suspensas na água pode ser grande inconveniente sanitário. Além disso, a presença da matéria em suspensão dificulta a ação de agentes desinfetantes, agindo de forma protetora para organismos patogênicos (VIANNA, 1997).

Este parâmetro é utilizado como determinante na escolha dos processos de tratamento de água. De acordo com Richter (2009), os equipamentos mais apropriados para medir a turbidez são os nefelômetros, que medem, em uma célula fotoelétrica, a quantidade de luz dispersa capaz de atravessar uma amostra de água, em um ângulo de 90° da luz incidente, sendo que a ausência de partículas resultaria na transmissão da luz em linha reta.

3.2.2 Aluminato de sódio

O aluminato de sódio é um composto químico inorgânico que constitui uma fonte de hidróxido de alumínio. É um produto químico alcalino disponível na forma líquida e sólida. Na forma anidra, é um sólido cristalino branco, óxido misto de sódio e de alumínio. Sua fórmula química pode variar entre NaAlO_2 , $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ou $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$.

Quando sólido, contém de 70 a 90% de $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$, com 23 a 33% de Alumínio. Se líquido, contém aproximadamente 32% de $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$, não corrosivo, com teor de alumínio entre 0,21 e 0,27 Kg/L (RICHTER, 2009; LOPES, 2011).

As principais características físico-químicas do produto estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do Aluminato de Sódio

Propriedades	Descrição
Fórmulas	NaAlO_2 ; $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$
Estado físico	Sólido ou líquido
Cor	De incolor a marrom
pH 25°C	11 a 14
pH de atuação	6 a 8,5
Densidade (g/cm ³) ⁽¹⁾	1,35 a 1,7
Viscosidade - 25°C	10 a 100

Fonte: Vianna (1997); Lopes (2011); Provequim (2015); Aratrop (2018); Sunquímica (2010)

Notas: (1) Para produto líquido

O aluminato de sódio, considerado um coagulante básico, é usado como um aditivo para a coagulação secundária de efluentes altamente coloridos (FREITAS, 2013). Em tratamento de água ele é usado como um adjunto aos sistemas de amaciamento de água, como um

coagulante auxiliar para melhorar a floculação e para remover, magnésio (MgCO_3), cálcio (CaCO_3) e sílica (SiO_2) dissolvida. Se comparado ao Sulfato de Alumínio, ainda é pouco utilizado como coagulante principal, embora tenha boa eficiência.

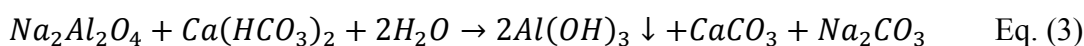
As reações do aluminato de sódio são alcalinas, pois liberam hidroxila (OH^-) na água. Desta forma, possui a vantagem de agir como coagulante e alcalinizante de uma só vez. Assim, para águas de baixa alcalinidade e cor elevada, é indicado como substituto do sulfato de alumínio, que provocaria baixa no pH a um valor fora de sua faixa de atuação para a dosagem necessária na remoção da cor. Além de que, conforme Richter (2009), 1 (um) mg/L de aluminato de sódio corresponde a 3,3 mg/L de sulfato de alumínio e é capaz de aumentar a alcalinidade da água em 0,54 mg/L em CaCO_3 , representando portanto economia de cerca de 70% do consumo de sulfato de alumínio (em massa), além da economia com produtos alcalinizantes.

As Equações 2 e 3 mostram as reações para o aluminato de sódio agindo como coagulante no tratamento de água.

Reações alcalinas retiram hidroxila (OH^-) da água



Na presença de alcalinidade



3.2.3 Diagrama de coagulação

Antes do desenvolvimento do diagrama de coagulação era difícil conhecer as condições adequadas de coagulação em sistemas de filtração direta, sendo necessária a realização de vários ensaios aleatórios de coagulação e floculação que proporcionavam melhor remoção durante a sedimentação. No entanto, essas condições duravam um curto período de tempo, devido as variações da qualidade da água a ser tratada, demandando novos estudos (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008; DI BERNARDO e PATERNIANI, 1986).

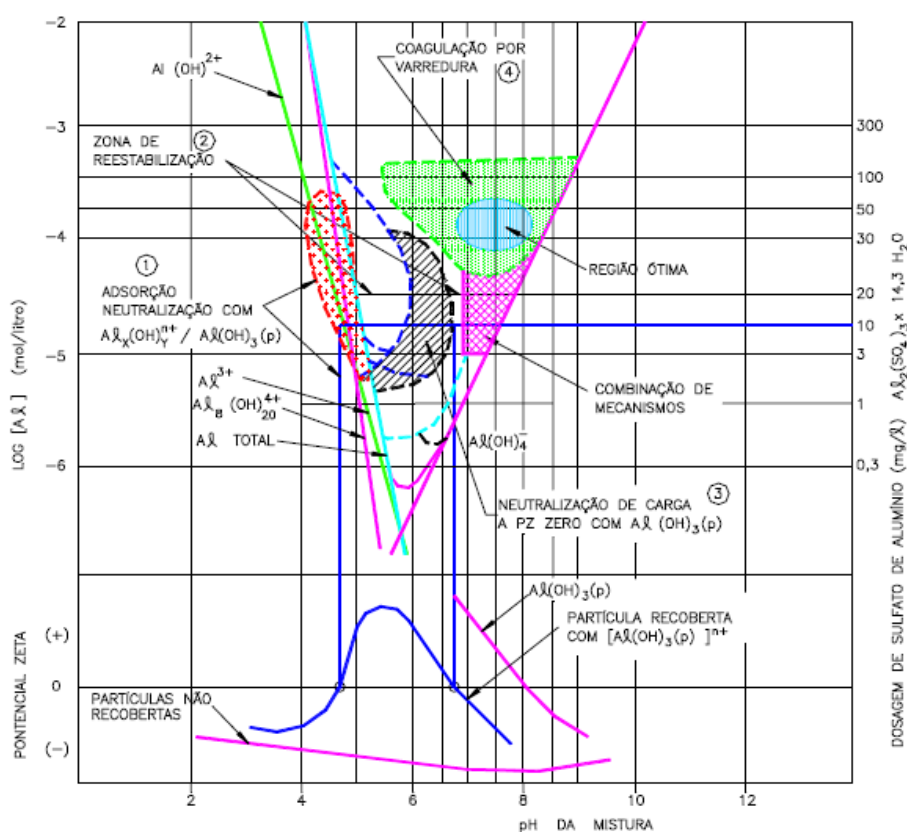
Porém, Amirtarajah e Mills (1982) desenvolveram um diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ através da sobreposição do diagrama de solubilidade do coagulante com as condições químicas em que o processo ocorre (Figura 2). Os ensaios para obtenção de diagramas de coagulação/floculação geralmente são conduzidos em equipamento de bancada

Jartest, com variação dos valores de pH de coagulação e de dosagem do coagulante (Kim et al., 2001; Lin et al., 2008; Bongiovani et al., 2010; Selhorst Filho et al., 2011; Ferrari et al., 2012), desta forma, graficamente torna-se mais fácil conhecer o par de valores: dosagem de coagulante x pH de coagulação de melhor remoção do parâmetro de interesse presente na massa líquida.

No diagrama ficam evidentes distintas regiões que se adequam a cada mecanismo de coagulação em função da dosagem de coagulante e pH de coagulação.

A partir destes estudos, o diagrama de coagulação se tornou uma ferramenta importante para identificação das condições químicas em que determinada coagulação pode ocorrer, possibilitando definir os melhores valores de pH de coagulação e dosagem de coagulante para remoção de cor e/ou turbidez (ARBOLEDA, 1992; AMIRTHARAJAH e O'MELIA, 1990).

Figura 2 - Diagrama de coagulação com coagulante sulfato de alumínio para remoção de turbidez



Fonte: Amirtharajh (1982) apud Di Bernardo (2004)

Para cada água a ser tratada ou tipo de coagulante aplicado deve ser construído um diagrama específico, pois as regiões de eficiência da coagulação/floculação dependem também das características da água e dos parâmetros de projeto.

Pavanelli (2001) ressalta a importância de construir um diagrama para cada água de estudo, a fim de encontrar a melhor área de remoção para cada situação. Neste contexto, o autor pesquisou, para diversos coagulantes químicos, a região apropriada para remoção de cor verdadeira elevada (100 uH) e turbidez elevada (100 UNT) e construiu diagramas de coagulação/floculação correspondentes. O autor observou, em consonância com outros trabalhos relacionados ao tema, que a qualidade da água bruta interfere significativamente nas regiões de prevalência de cada um dos mecanismos de coagulação.

3.2.4 Análise de partículas por imagens

Junker (2006) relata diversos métodos para observação e acompanhamento da distribuição de tamanho de partículas (DTP), tais como: dispersão de luz por meio de laser, ultrassom, análise óptica de imagem, medição mecânica direta e análise digital de imagens.

Para acompanhamento da floculação por aquisição e análise de imagens é imprescindível definir as configurações ideais de aquisição e, após a aquisição das imagens, realizar seu processamento em softwares específicos, que consiste em diferenciar os elementos da imagem transformando-os em *números binários*. Este processo recebe o nome de binarização ou limiarização. É um processo simples, que consiste em escolher um limiar de cinza e converter cada pixel maior ou menor a este limiar em branco e os demais em preto (MARQUES FILHO e VIEIRA NETO, 1999). Desta forma, o objeto de interesse, que possui brilho elevado, é destacado da imagem de fundo e torna-se possível sua contagem (RUSS, 1992). As imagens monocromáticas são representadas matematicamente como uma matriz onde cada índice de linha e coluna representa um ponto, o pixel, menor elemento de uma imagem digital, a intensidade luminosa naquele ponto lhe atribui um valor proporcional em escala de cinza (MARQUES FILHO e VIEIRA NETO, 1999).

Neste trabalho, o interesse é pela determinação da morfologia e distribuição de tamanho dos flocos para fins de avaliação da influência destas características no processo de sedimentação. Diversos estudos que monitoram o comportamento das partículas nos processos de coagulação/floculação vêm sendo conduzidos, como pode ser observado nos trabalhos de Moruzzi (2005), Bouyer et al. (2005), Oliveira et.al. (2015) e Ren et al. (2017). A partir do estabelecimento de um plano de luz incidente em recipiente com suspensão há destaque das partículas o que possibilita a aquisição de imagens por câmera digital, tratadas posteriormente em softwares específicos (MENDES, 2017). Este método de estudo tem a vantagem de não

ser intrusivo e não alterar o processo de coagulação/floculação/sedimentação, se comparado a técnicas como microscopia ou granulometria a laser.

3.3. Acompanhamento da floculação

3.3.1 Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP)

A DTP é determinante na escolha dos processos de tratamento de água e esgoto, pois interfere em praticamente todas as etapas do tratamento (SANTOS *et al.*, 2004). Trata-se de uma característica importante a ser avaliada nos estudos e modelos de tratabilidade de água, uma vez que a DTP exprime de forma segura os efeitos das colisões, agregação e ruptura dos flocos (ZHANG *et al.*, 2011).

De acordo com Lawler (1997), as características físico-químicas, como tamanho, forma, densidade, carga de superfície, velocidade de sedimentação e porosidade, são particulares para cada partícula em suspensão em meio líquido e determinantes no processo de sedimentação, consequentemente, nas etapas seguintes do tratamento.

Para Xiao *et al.* (2011), a DTP baseia-se no número, massa, diâmetro, área superficial e/ou volume das partículas, características estas que podem ser investigadas durante a coagulação, floculação, ruptura e refloculação. Normalmente, para o estudo do desenvolvimento da DTP durante a floculação, as partículas são computadas e separadas por faixas de tamanho (MORENO, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Segundo Santos *et al.* (2004), o conhecimento do número e características das partículas presentes no meio são importantes para concepção e projeto de unidades de separação sólido/líquido empregadas no tratamento de água.

Após contagem, as partículas são agrupadas por faixas de tamanho (de algum dos parâmetros) e o número total é conhecido. Segundo Crittenden *et al.* (2005) a distribuição da frequência do número de partículas $F(d)$ pode ser expressa como a concentração do número de partículas, dN , em relação à fração incremental no tamanho das partículas, $d(dp)$, representada pela Equação 4:

$$F(d_p) = \frac{d(N)}{d(d_p)} \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que:

$F(d_p)$ = função que define a frequência de distribuição de tamanho de partículas (d_1, d_2, d_3, \dots);

$d(N)$ = concentração do número de partículas em termos da variação incremental dos diâmetros das partículas ($d(d_p)$);

$d(d_p)$ = variação incremental dos diâmetros das partículas.

Crittenden *et al.* (2005) relatam ainda, que em águas naturais, a frequência de distribuição de partículas aumenta com a diminuição do diâmetro da partícula, onde esse comportamento pode ser retratado pela equação de distribuição em forma de potência (Equação 5).

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A(d|p)^{-\beta} \approx \frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \quad \text{Eq.(5)}$$

Em que:

A = coeficiente de densidade da equação de potência;

d_p = diâmetro da partícula;

β = coeficiente de inclinação da equação de potência.

A determinação dos coeficientes A e β , que representam a forma da distribuição dos tamanhos das partículas, pode ser feita aplicando *log* em ambos os lados da Equação 5, ou realizando a integração da equação. Em sistemas de coordenadas logarítmicas, a população de partículas e seus respectivos tamanhos têm relação quase linear.

3.3.2 Resistência do floco

Na etapa de floculação, o desenvolvimento dos flocos depende da concentração de partículas, do tipo de água, do tipo de coagulante, do gradiente médio de velocidade na mistura e da eficiência de colisão, entre outros. Conforme se desenvolvem, os flocos podem sofrer ruptura com maior facilidade, tanto por forças destrutivas, como por diminuição da eficiência de colisão das partículas, em relação a força de cisalhamento, ou em função da diminuição do número de flocos (BRAKALOV, 1987; MATSUO e UNNO, 1981).

Neste sentido, há um limite de crescimento das partículas, quando a DTP atinge um estado estacionário, devido ao equilíbrio dinâmico entre as forças de agregação e ruptura dos flocos (ARGAMAN, 1970; MÜHLE, 1993; YUKSELEN e GREGORY, 2004). O estado estático da

DTP está relacionado com o gradiente médio de velocidade, que corresponde ao momento de equilíbrio entre as forças internas dos agregados e a força de cisalhamento aplicada sobre eles (VOLTAN, 2007; SILVA, 2017). Maiores forças de cisalhamento tendem para o crescimento mais rápido dos flocos, pois há maior intensidade na colisão entre as partículas (HE *et al.*, 2011).

Em contrapartida, o aumento da agitação, e consequentemente o aumento de sua energia dissipada durante a floculação, ocasiona o aumento das forças de cisalhamento, bem como a diferença de pressão entre lados opostos dos flocos de maior tamanho, acarretando na fragmentação desses flocos (MÜHLER, 1993; VOLTAN, 2007). Esta desagregação ocorre quando a intensidade de cisalhamento sobrepõe a resistência do floco, no que diz respeito às forças internas do agregado (BOLLER e BLASER, 1998). O que determinará a resistência do floco é a natureza das ligações entre as partículas e a quantidade destas ligações. Portanto, a resistência do floco depende da sua formação e estrutura (MÜHLE, 1993; BACHE *et al.*, 1997; JARVIS *et al.*, 2005).

Para Jarvis *et al.* (2005), há uma abordagem microscópica capaz de medir a resistência do floco, aplicando tensão cisalhante (ou tensão normal) diretamente sobre uma partícula, tornando possível o conhecimento das forças entre as partículas deste floco. Mas há também uma abordagem menos intrusiva, chamada abordagem macroscópica, que avalia a resistência do floco pela energia necessária para sua ruptura em ambiente controlado. Neste método é estimada a quantidade de energia dissipada ou do gradiente médio de velocidade aplicado (YEUNG *et al.*, 1997; BOLLER e BLASER, 1998).

O desempenho da floculação também pode ser avaliado por meio do equipamento *Photometric Dispersion Analyser* (PDA 2000, Rank Brothers Ltd, UK). Conforme resume De Julio (2015), o funcionamento do PDA se dá por um fotodetector que monitora a intensidade de um feixe de luz transmitido através de uma suspensão fluindo por um tubo, onde os resultados consistem em um sinal de componente estável (que depende da turbidez) e de componente flutuante, medidos por meio de um circuito eletrônico. Uma relação entre estas duas componentes expressa o índice de floculação (IF), que pode ser calculado por uma fórmula semi empírica diretamente proporcional à raiz quadrada do número de partículas primárias por floco, de modo que também é possível associar este parâmetro ao tamanho do floco (Gregory, 1985).

De acordo com Gregory (2003) a resistência do floco pode ser obtida pela razão entre os diâmetros médios dos flocos antes e durante a ruptura induzida com o aumento do gradiente médio de velocidade no meio, obtidos indiretamente pelo IF do equipamento PDA nas

situações descritas. Esta relação, expressa o fator de resistência do floco e está relacionado com sua taxa de recuperação de tamanho. Francois (1987) foi um dos primeiros autores a estabelecerem o conceito de fator de resistência do floco (*Strenght fator*) que também pode ser calculado conforme Equação 6 cujos diâmetros médios dos flocos antes e durante a ruptura foram substituídos pelos índices de floculação obtidos nestas duas situações.

$$Fator\ de\ resistência = \frac{I_2}{I_1} 100\% \quad Eq. (6)$$

Em que:

I_1 = Índice de floculação antes da ruptura;

I_2 = Índice de floculação durante a ruptura;

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando um método macroscópico de análise de resistência do floco, que avalia a relação entre a taxa cisalhante aplicada no sistema com o tamanho final dos flocos, conforme equacionamento proposto por Parker et al. (1972), conforme Equação 7.

$$l = CG^{-p} \quad Eq. (7)$$

Em que:

l = um comprimento conhecido do floco (μm);

C = constante multiplicativa de ajuste ($\mu\text{m/s}$);

G = corresponde à taxa de cisalhamento hidrodinâmico (s^{-1});

p = coeficiente da medida do floco.

De acordo com os pesquisadores Francois (1987); Yeung e Pelton (1996); Leentvaar e Rebhun (1983) existe correlação entre o tamanho do floco e a força cisalhante aplicada conforme sugere a equação. Em escala log-log, a relação entre os gradientes de velocidade médios G e uma medida conhecida do floco (como diâmetro médio) gera uma medida para a força do floco, ou seja, há relação entre o tamanho do floco e sua resistência à ruptura. Como explicado por Jarvis *et al.* (2005), o coeficiente ' p ' é considerado um indicador da resistência do floco, que quanto maior for este termo, mais o floco estará predisposto a se romper conforme o aumento da taxa de cisalhamento (G).

3.3.3 Ruptura e recrescimento

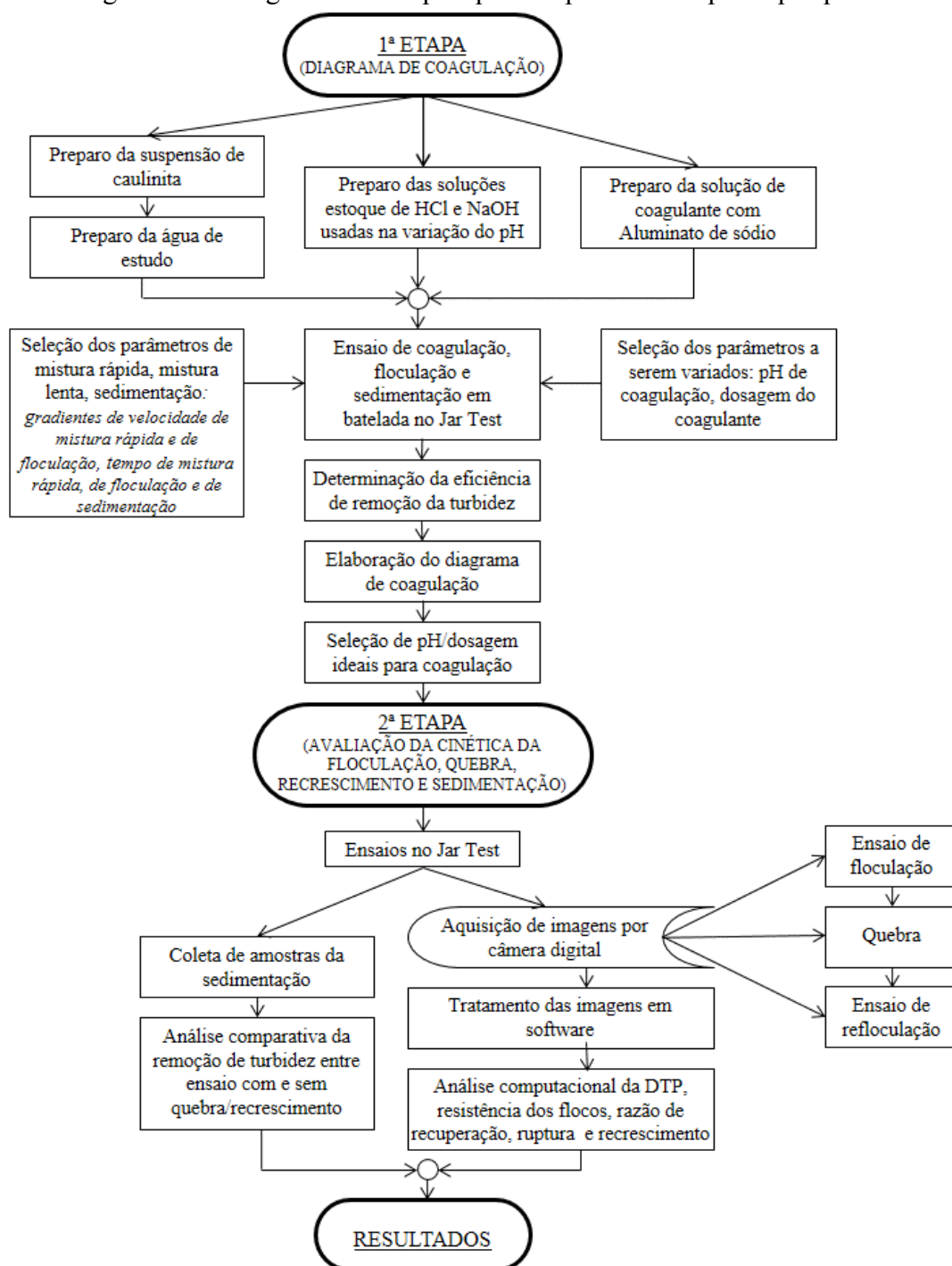
A formação dos flocos é normalmente comprometida pela intensificação não controlada da força cisalhante durante o processo de floculação. Esta é uma ocorrência comum em ETAs, que pode ser oriunda de inadequações na mistura ou ainda pode ocorrer em aberturas, canais, comportas e orifícios dentro da unidade de floculação. De acordo com Yukselen e Gregory (2004), a ruptura dos flocos compromete a eficiência da sedimentação e, portanto, das operações seguintes.

Após a ruptura, os flocos têm capacidade de recuperação limitada, que depende do tipo de coagulante, gradiente médio de velocidade e tempo de floculação. Yu *et al.* (2010) sugerem que seja adicionada uma dose extra de coagulante após a ruptura para que a recuperação no tamanho seja mais exitosa. No entanto, não é sempre possível prever os pontos onde ocorre a ruptura dos flocos, pois, de acordo com Yukselen e Gregory (2004), esse processo de ruptura e recrescimento pode ocorrer várias vezes durante a floculação, e a cada ruptura o tamanho estável do floco é geralmente menor após o recrescimento. Em seus estudos, Yukselen e Gregory (2004a) observaram que o recrescimento se mostrou mais limitado para agitação de ruptura mais intensa, assim como de maior duração. Neste mesmo trabalho, os autores variaram as condições de floculação para vários ensaios, mas mantiveram as mesmas condições de ruptura, com isso foi possível observar que durante a refloculação o valor do IF (índice de floculação) foi praticamente o mesmo para todos os ensaios, mostrando que a recuperação dos flocos não é determinada pelo modo como eles são formados, mas pelas condições de ruptura. A mesma situação de proximidade foi observada entre os valores de turbidez remanescente em cada ensaio, deixando evidente a existência de alguma relação entre o IF e o processo de sedimentação dos flocos.

CAPÍTULO 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados os passos pertinentes ao desenvolvimento da pesquisa, bem como os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados para obtenção dos resultados. O fluxograma da Figura 3 sintetiza as etapas correspondentes à consolidação do estudo.

Figura 3 - Fluxograma das etapas que compõem o escopo da pesquisa



Fonte: A Autora (2018)

Todos os procedimentos inerentes ao estudo foram realizados no laboratório de saneamento da FECIV/UFU, com recursos da própria instituição e CNPq.

4.1 Materiais

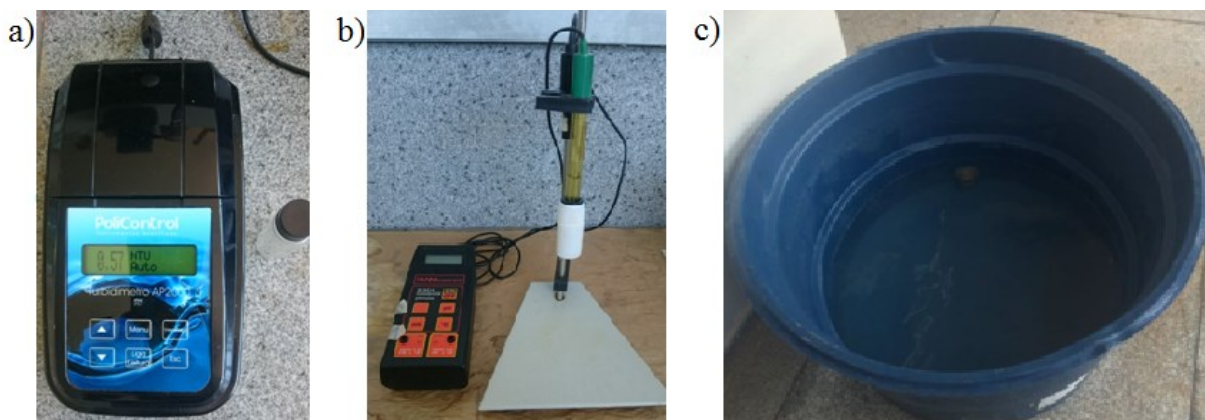
A seguir são descritos os equipamentos e produtos utilizados durante o estudo.

4.1.1 Equipamentos

Para realização dos ensaios e medição dos parâmetros, foram utilizados os equipamentos a seguir:

- Reatores estáticos de bancada (Jar Test): os ensaios foram realizados em dois modelos diferentes. Para a primeira fase (construção do diagrama) foi utilizado o equipamento da marca Nova Ética, modelo 218/6LDB, que possui suporte para coleta de amostras; o equipamento utilizado na segunda fase (aquisição de imagens) é da marca Ethik Technology, modelo 218/6. Ambos os aparelhos possuem paletas giratórias com ajuste digital, passíveis de trabalhar com rotações entre 20 e 600 rpm e têm disposição para seis jarros com ponto de coleta a sete centímetros abaixo do nível de marcação dois litros;
- Turbidímetro: marca Policontrol, modelo AP 2000, que possui cubeta para medição de turbidez (Figura 4-a);
- pHmetro digital: marca Hanna Instruments, modelo HI 8314 (Figura 4-b);
- câmera digital: marca Nikon, modelo D5500 com tripé;
- ponteiro *laser*: com tripé e adaptado para emitir um plano de luz.
- Equipamentos diversos: destilador de água tipo Pilsen, vidrarias variadas, reservatório de polietileno para água de estudo com capacidade para 250L (Figura 4-c), agitador magnético, balança eletrônica digital, cronômetro digital, copos descartáveis 50 ml para coleta das amostras, toalhas de papel, régua de acrílico graduada em centímetros;
- Programas computacionais: *Surfer* 10 (versão gratuita), Câmara Control Pro 2 (Nikon – versão 2.26.0 – versão de avaliação), JPEG Crops (versão 0.7.5 beta), Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint).

Figura 4 - Equipamentos utilizados durante os ensaios: (a) Turbidímetro Policontrol - AP200; (b) pHmetro digital Hanna Instruments – HI 8314; (c) reservatório de polietileno de 250L



Fonte: A Autora (2017)

4.1.2 Produtos químicos

O estudo contou com a utilização de substâncias químicas para simular o devido ambiente de experimentação.

4.1.2.1. Turbidez da água

Para que fosse conferida turbidez à água de estudo, foi empregada suspensão de caulinita, por ser a argila naturalmente mais encontrada em águas superficiais. A caulinita utilizada é da marca Sigma-Aldrich, composta por $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. O preparo da solução foi feito semelhante à metodologia adotada por Pádua (1994) e baseada no trabalho de Gregory e Yukselen (2004), de modo que a caulinita foi adicionada em água destilada e sofreu agitação por 6 h em agitador magnético, após repouso de 12 h foi armazenado o sobrenadante que consiste na suspensão de caulinita.

4.1.2.2. Soluções estoque

Para variação do pH foram utilizados: Ácido Clorídrico (HCl) como acidificante e Hidróxido de Sódio (NaOH) como alcalinizante, ambos preparados em soluções com concentração a $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$, $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ e 1 mol.L^{-1} , utilizando água destilada para o preparo das soluções estoque.

4.1.2.3. *Coagulante*

Na função de coagulante foi empregado o Aluminato de Sódio, da marca Sunquímica, nome comercial 'SUN FLOC 40 AE', fórmula Na_xAlO_x , com concentração de hidrato de alumínio variando entre 44 a 50% em sua composição e alcalinizante variando entre 24 a 27%. Por ser um composto instável, não é possível determinar com precisão a porcentagem de alumínio presente na composição. A substância, solúvel em água, apresentava-se em estado líquido, de cor marrom, pH (puro) entre 12 e 14 e a densidade específica variando entre 1,48 e 1,7 g/cm³. Foi preparada uma solução estoque de 20 g/L, para isso foram adicionados 40 mL de aluminato de sódio em água deionizada para preparar um litro de solução. Portanto, para facilitar a conversão, para cada mL de solução havia 20 mg de aluminato de sódio, desta forma ao se adicionar um mL de solução no jarro de 2 L de água de estudo, obtém-se a concentração de 10mg/L de aluminato de sódio.

4.1.3 *Água de estudo*

A água fornecida pela empresa de abastecimento municipal primeiramente passou por processo de destilação para a remoção de sais minerais e outros componentes, de forma a garantir elevado nível de pureza para a água de preparo, objetivando maior uniformidade e segurança nos resultados da análise.

Para obter uma matriz (água de estudo) com turbidez de 50 ± 2 UNT foi adicionada gradativamente a suspensão de caulinita à água destilada reserva em recipiente de 200 L. Para medição da turbidez foi utilizado o turbidímetro de bancada.

A medição da turbidez foi feita antes de cada ensaio, uma vez que a caulinita em suspensão decanta facilmente, item observado principalmente em dias frios, sendo necessário fazer a correção da turbidez da água de estudo antes de cada ensaio. Os valores de turbidez da matriz medidos antes de cada ensaio estão especificados no Apêndice A, onde estão tabelados todos os dados relevantes coletados em cada ensaio.

Foram utilizados cerca de 460 L de água de estudo para construção do diagrama de coagulação, que consistiu na primeira etapa do estudo e 70 L durante a segunda etapa do trabalho, para a aquisição das imagens.

4.2 Diagrama de coagulação/floculação

O desenvolvimento do diagrama de coagulação constitui a primeira etapa do processo de estudo do tratamento de remoção residual de turbidez para o coagulante aluminato de sódio. O diagrama de coagulação tem como objetivo identificar o ponto de melhor coagulação, variando-se o pH ideal de coagulação com a dosagem ótima de coagulante (pH x DC).

4.2.1 Parâmetros estabelecidos para ensaio de coagulação/floculação

O equipamento utilizado para simulação dos processos de coagulação, floculação e sedimentação, em nível de bancada, foi o *JarTest*, que possui controle digital das hastes giratórias, mas que permite tanto a programação como o comando manual das operações, sendo esta última a forma utilizada na presente pesquisa.

Os ensaios para elaboração do diagrama de coagulação combinaram diversos pares de pH de coagulação e dosagem de coagulante. A dosagem de coagulante variou de 10 em 10 mg/L de Aluminato de Sódio iniciando em 10 mg/L até 70 mg/L, a partir desta última dosagem a variação foi de 5 em 5 mg/L até a dosagem máxima de 100 mg/L. Já o pH de coagulação foi variado dentro da faixa de 5 a 10 aproximadamente, com incrementos de 0,5.

A cada ensaio foi mantida fixa a dosagem do coagulante para os jarros do equipamento e o pH variado entre os jarros com a adição de HCl ou NaOH. Desta forma, foram necessários, no mínimo, três bateladas (ensaio) por dosagem de coagulante para variar os valores desejados de pH.

Uma vez estabelecidas as condições de operação do equipamento (Tabela 5), foram realizados 51 ensaios de batelada para obtenção dos dados necessários para a elaboração do diagrama de coagulação.

Os valores utilizados como condições-padrão foram escolhidos de forma a simular os processos reais de uma ETA. As velocidades de sedimentação (V_s) foram selecionadas baseadas na taxa de aplicação superficial (TAS) utilizada em decantadores reais de ETAs, sendo assim, os tempos de sedimentação (T_s) para coleta correspondentes a cada velocidade de sedimentação foram encontrados pela razão entre a distância do ponto de coleta dos jarros à superfície do líquido (sete centímetros) pela velocidade de sedimentação. Foram adquiridos os seguintes resultados:

- Para $V_{s1}=5$ cm/min, foi obtido $T_{s1}= 1$ min e 24 s;
- Para $V_{s2}= 2,5$ cm/min, foi obtido $T_{s2}= 2$ min e 48 s;

- Para $V_{s3} = 1$ cm/min, foi obtido $T_{s3} = 7$ min;
- Para $V_{s4} = 0,5$ cm/min, foi obtido $T_{s4} = 14$ min.

Tabela 5 - Parâmetros físicos estabelecidos como condições-padrão para os ensaios de batelada

Processo	Parâmetro	Valor
Coagulação (mistura rápida)	G_{mr}	900 s^{-1}
	T_{mr}	10 s
Floculação	G_f	20 s^{-1}
	T_f	20 min
Sedimentação	V_{s1}	5 cm/min
	V_{s2}	2,5 cm/min
	V_{s3}	1 cm/min
	V_{s4}	0,5 cm/min

Fonte: A Autora (2018)

4.2.2 Ensaio de bancada

Antes da coleta da água de estudo no reservatório para a realização dos testes, utilizou-se uma haste para agitar, em movimentos circulares, a água armazenada. Este processo é comumente utilizado para garantir que todas as amostras coletadas tenham as características o mais próximo possível uma das outras.

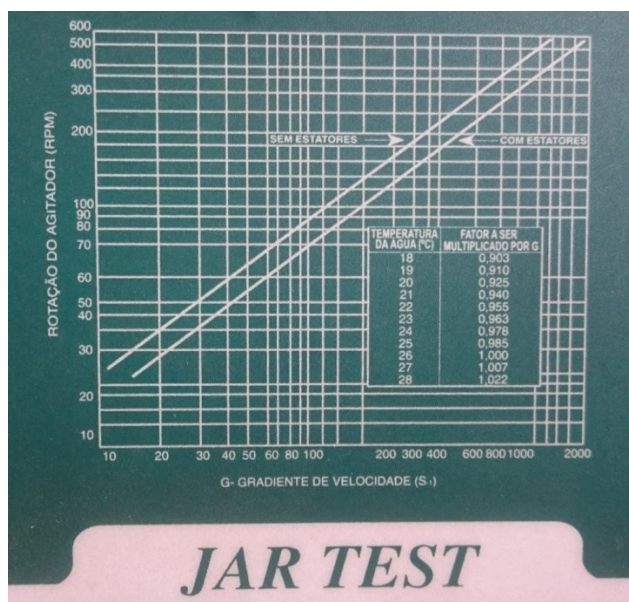
O ensaio no Jar Test seguiu os procedimentos descritos a seguir:

- a) Programou-se a rotação desejada para a mistura rápida. O equipamento apresenta um gráfico (Figura 5) em escala logarítmica que fornece a rotação (rpm) adequada para o gradiente de velocidade esperado. Apesar de ser possível programar no equipamento a rotação e o tempo de cada mistura, esse procedimento foi realizado manualmente;
- b) com o auxílio de uma proveta graduada, colocou-se nos jarros do Jar Test dois litros em cada da água de estudo com turbidez controlada de 50 ± 2 UNT;
- c) posicionou-se duas cubetas por jarro no suporte do equipamento, de modo a preparar uma das cubetas de cada jarro (cubetas frontais) com dosagem fixa de coagulante e variar a dosagem do HCl ou NaOH entre as segundas cubetas (posteriores ao jarro) de modo a variar o pH dentro dos valores esperados. O coagulante aluminato de sódio eleva naturalmente o pH da água, pelo fato das dosagens aplicadas deixarem a água de estudo com pH sempre acima de nove, por isso foi utilizado somente HCl, em distintas

dosagens para fazer a variação do pH. Para cada dosagem do coagulante, foram feitas tantas bateladas quanto foram necessárias para preencher a faixa de pH desejada;

d)

Figura 5 - Gráfico em escala logarítmica: rotação (RPM) correspondente ao gradiente de velocidade esperado, com ou sem a utilização de estator



Fonte: A Autora (2017)

- e) com as hastes giratórias abaixadas, ligou-se já na velocidade de rotação programada para a mistura rápida ($G_{mr} = 900 \text{ s}^{-1}$);
- f) iniciou-se o cronômetro e simultaneamente foi adicionado aos jarros o acidificante presente nas cubetas posteriores, manter agitando por 10s, com a finalidade de deixar a água homogeneizada para receber o coagulante;
- g) decorridos os 10 s, adicionou-se aos jarros o aluminato de sódio presente nas cubetas frontais pelo tempo determinado para a etapa de mistura rápida ($T_{mr} = 10\text{s}$);
- h) imediatamente após os 10 s de coagulação, reduziu-se a velocidade das hastes para a rotação equivalente ao gradiente de velocidade de floculação ($G_f = 20 \text{ s}^{-1}$) e, simultaneamente, foi coletada uma amostra de cada jarro para verificar o pH de coagulação obtido, permanecendo o fluido em processo de floculação pelo tempo determinado ($T_f = 20 \text{ min}$);
- i) desligou-se as hastes giratórias ao final dos 20 min de floculação, prosseguindo o ensaio na etapa de sedimentação;
- j) realizou-se coleta de amostras do processo de sedimentação em cada tempo de sedimentação (T_s) correspondente às velocidades de sedimentação (V_s) definidas na

Tabela 4. Os recipientes para coleta das amostras (copos descartáveis de 50 ml) foram identificados por jarro, de 1 a 4, e de acordo com o tempo de coleta (Figura 6);

Figura 6 - Copos descartáveis de 50 mL identificados para serem utilizados na coleta de amostras após coagulação e durante processo de sedimentação



Fonte: A Autora (2018)

- k) Levar as amostras para determinação do residual remanescente de turbidez utilizando o turbidímetro.

4.2.3 *Elaboração do diagrama de coagulação*

Os estudos pioneiros para avaliação da eficiência de remoção de turbidez em amostras de água após coagulação/floculação/sedimentação através do uso de diagrama de coagulação foram propostos por Amirtharajah e Mills (1982).

Primeiramente, os dados obtidos durante o ensaio foram tabelados (Apêndice A) e posteriormente foram feitas planilhas correspondentes a cada velocidade de sedimentação pelo Office Excel, somente com os pares dosagem de coagulante x pH de coagulação. Desta forma, foi calculado o percentual de remoção de turbidez para cada amostra coletada, conforme a Equação 8, e os valores foram inseridos na planilha.

$$T\% = \left(1 - \frac{T_f}{T_0}\right) 100 \quad \text{Eq.(8)}$$

Em que:

$T\%$ = Eficiência de remoção de turbidez;

T_f = Turbidez remanescente;

T_0 = Turbidez inicial.

A eficiência da remoção da turbidez juntamente com o correspondente par pH x DC foram utilizados para formar o diagrama de coagulação. Para isso, foi utilizado o software *Surfer 10*, que recebeu os dados da planilha e pelo método de Krigagem, que utiliza de uma interpolação dos pontos amostrados, conforme o trabalho de Santos (2006), foram estimados os percentuais médios de remoção de turbidez para pontos não amostrados, possibilitando o traçado de curvas de isoeeficiência de remoção, gerando assim, o diagrama de coagulação.

4.3 Acompanhamento da floculação por meio de aquisição e análise de imagens

A determinação da condição ótima de floculação adotada nos estudos relativos à segunda etapa da pesquisa, foi feita pela análise do diagrama de coagulação (ver Capítulo 5). Foi escolhida a condição de utilização de 70 mg/L de coagulante e pH de $8,23 \pm 0,05$.

4.3.1 Condições de coagulação, ruptura e recrescimento

Para esta fase de pesquisa, além da análise da coagulação e floculação, foram estudadas também a ruptura e o recrescimento dos flocos, bem como a eficiência da remoção em diversas condições, comparando a turbidez final da água com e sem o processo de ruptura dos agregados. O estudo da quebra (ruptura dos flocos) e recrescimento (refloculação) é importante uma vez que situações semelhantes são passíveis de acontecerem em sistemas reais de tratamento. Assim como na etapa anterior, foram estabelecidos os parâmetros de estudo (Tabela 6).

Tabela 6 - Parâmetros físicos utilizados para os ensaios de batelada e aquisição de imagens

Processo	Parâmetro	Valor
Coagulação (mistura rápida)	G_{mr}	800 s^{-1}
	T_{mr}	10 s
Floculação	G_{f1}	20 s^{-1}
	G_{f2}	30 s^{-1}
	G_{f3}	40 s^{-1}
	G_{f4}	50 s^{-1}
	G_{f5}	60 s^{-1}
	T_f	20 min
Quebra (ruptura dos flocos)	G_{q1}	80 s^{-1}
	G_{q2}	200 s^{-1}
	T_q	10 s
Refloculação	G_{rf1}	20 s^{-1}
	G_{rf2}	30 s^{-1}
	G_{rf3}	40 s^{-1}
	G_{rf4}	50 s^{-1}
	G_{rf5}	60 s^{-1}
	T_{rf}	20 min
Sedimentação	V_{s1}	5 cm/min
	V_{s2}	2,5 cm/min
	V_{s3}	1 cm/min
	V_{s4}	0,5 cm/min

Fonte: A Autora (2018)

Para cada gradiente médio de velocidade (G_f) foram feitos três ensaios:

- Coagulação, floculação, sedimentação;
- Coagulação, floculação, ruptura (G_{q1}), refloculação, sedimentação;
- Coagulação, floculação, ruptura (G_{q2}), refloculação, sedimentação.

Ou seja, foram necessários três jarros por gradiente de velocidade estudado, logo, para os cinco gradientes analisados foram realizados 15 ensaios. Importante salientar que em cada ensaio, o gradiente de refloculação adotado foi o mesmo utilizado na floculação. A coleta das amostras seguiu os mesmos tempos de sedimentação calculados na Seção 4.2.1.

Para avaliação do comportamento dos flocos foi feita a aquisição e análise digital das imagens dos flocos, possibilitando a avaliação da DTP, força do floco e demais características

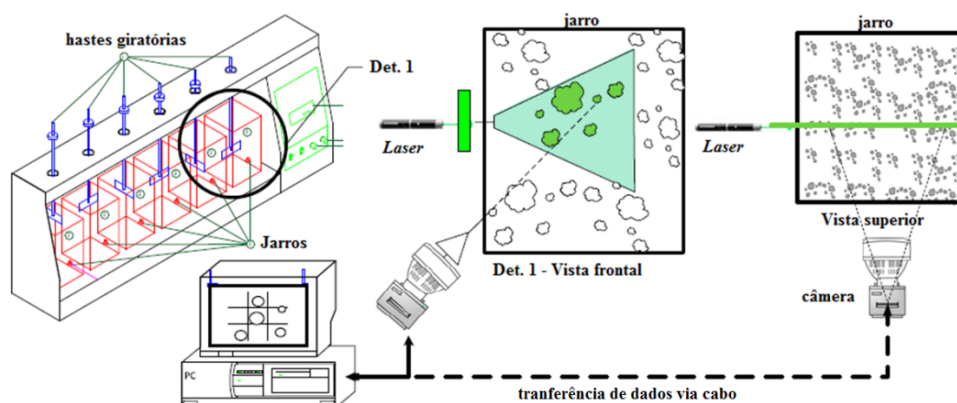
morfológicas, durante todo o procedimento. Para cada ensaio a aquisição das imagens ocorreu durante a floculação e a refloculação, nos tempos de 1, 3, 5, 10, 15 e 20 min. Durante os 10s da ruptura induzida de 200 s^{-1} também foram adquiridas imagens.

4.3.2 *Aparato experimental*

Nesta fase do estudo executou-se o método de aquisição e processamento de imagens para avaliação das partículas floculentas. Este processo foi realizado de forma não intrusiva, em amostras indeformadas, sem coletas antes e durante a obtenção das imagens, por procedimento simples de batelada em Jar Test. As coletas de amostras, nos tempos de sedimentação pré-determinados, foram conduzidas após findados os tempos de floculação e refloculação, respectivamente.

Para a aquisição das imagens o *laser* foi posicionado a 28 cm do jarro com feixe de luz incidindo no líquido, paralelo à parede frontal do jarro e distando cerca de oito milímetros para o interior do mesmo. Foi posicionada uma máquina fotográfica digital de frente para o jarro, distando entre 25 a 30 cm deste (foi feito ajuste manual do foco no plano de luz), de modo perpendicular ao plano de luz (Figura 7). A montagem do equipamento de estudo foi baseada nos trabalhos de Moruzzi (2005), Moreno (2014), Moruzzi, et al. (2015) e Oliveira et al (2016).

Figura 7 - Ilustração esquemática do dispositivo experimental (Jar Test, computador pessoal, câmera digital, *laser*)



Fonte: Adaptado de Oliveira et.al. (2016)

Durante a floculação e refloculação, a câmera foi mantida conectada a um computador e operada pelo programa computacional *Camera Control Pro 2.0* (CCP 2.0), proporcionando

maior controle do equipamento, de forma a minimizar possíveis erros e impedir o deslocamento da câmera. Posteriormente, as imagens foram analisadas pelo programa computacional de análise de imagens: Image J.

Foi utilizada para a obtenção das imagens a câmera digital Nikon D5500 com disposição fotográfica de 24,2 Megapixel, correspondente a imagem de tamanho 6000 x 4000 pixels (unidades elementares), sendo o pixel de tamanho 3,92 μ m. O foco possui ajuste automático e manual, o obturador pode atingir velocidade máxima de 1/4000 s, que possui capacidade de até 5 qps de velocidade de disparo contínuo, sensibilidade do sensor da câmera à luz do ambiente (sensibilidade ISO) de ISO 100 a 25.600, de acordo com informações obtidas pelo manual Nikon Corporation (2015).

O programa computacional *Camera Control Pro 2.0* (CCP 2.0) permitiu que as especificações de configuração da câmera fossem programadas pelo computador, bem como o acompanhamento da aquisição das imagens. A configuração da câmera foi definida de forma a otimizar as imagens e resultados esperados, conforme descrito na Tabela 7.

Tabela 7 - Configurações da câmera mais adequadas para a aquisição das imagens

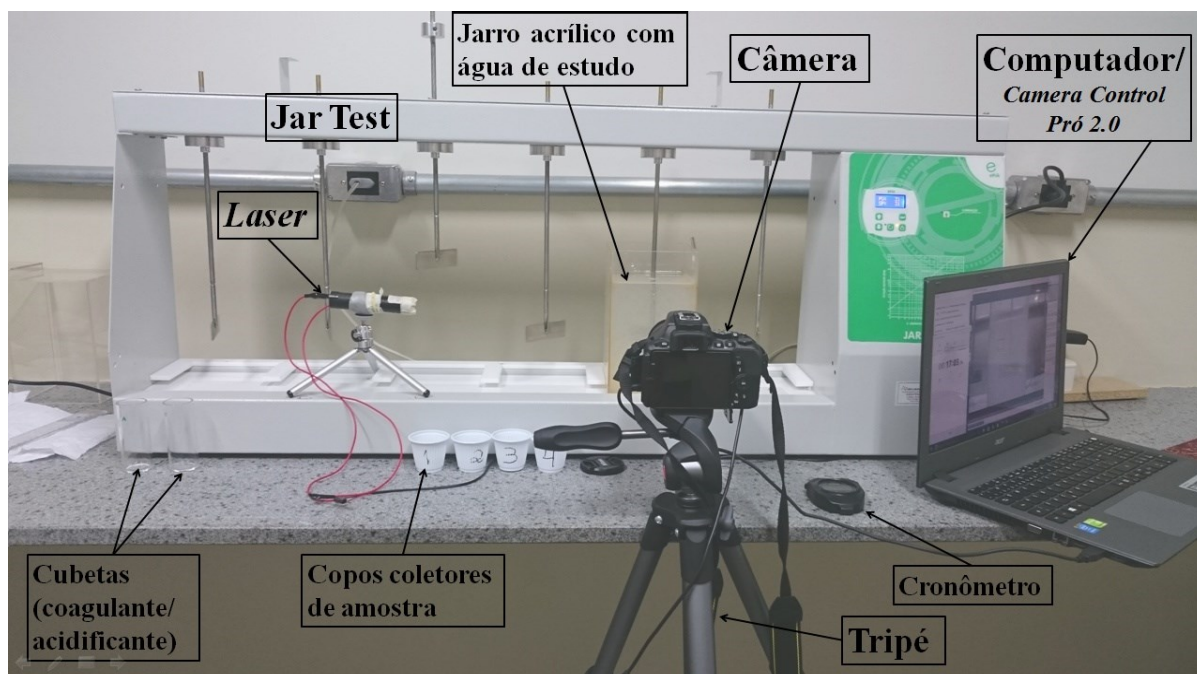
Propriedade	Valor utilizado
Sensibilidade ISO	ISO 12.800
Abertura do obturador	f/4.5
Velocidade de captura do obturador	1/3200 s
Zoom	18x
Compensação de exposição	+1 1/3 EV
Frequência de disparo	4 qps

Fonte: A Autora (2018)

A fonte de luz foi fornecida por um *laser* de espectro verde com comprimento de onda de 532 nm e com potência nominal de 98.000 mW. Para tornar plano o feixe de luz, na saída do laser foi adaptado um bastão de vidro cilíndrico e o equipamento foi utilizado com um tripé pequeno de forma a manter fixada a altura de incidência da luz no jarro do Jar Test. O plano de luz destaca os flocos que o atravessam no momento da captura da imagem, tornando-os mais brilhantes e possibilitando uma análise mais eficaz pelo programa computacional.

É de fundamental importância manter a montagem de toda aparelhagem imóvel, evitando possíveis distorções nos resultados devido a qualquer movimentação do equipamento. A Figura 8 apresenta a instalação do aparato experimental para a aquisição das imagens dos flocos.

Figura 8 - Instalação do equipamento experimental em escala de bancada (Jar Test, câmera digital Nikon D5500 com tripé, *laser* adaptado e tripé, computador pessoal, programa computacional *Camera Control Pro 2.0*)



Fonte: A Autora (2017)

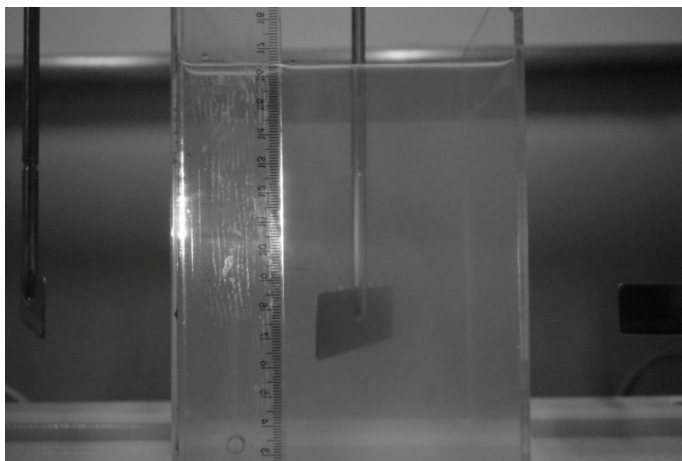
4.3.3 Ensaios para aquisição de imagens

Para a realização da segunda etapa da pesquisa, a água de estudo foi preparada e estocada em quantidade suficiente para realizar todo o procedimento, de forma a minimizar os efeitos da variação de efluente. Periodicamente, antes de iniciar os ensaios, além de ser verificada a turbidez inicial, foram feitos testes com a água de estudo simulando a fase de mistura rápida e coletas de amostras para estabelecer a dosagem ideal do acidificante ácido clorídrico que conferiu o pH desejado, conforme faixa de pH estabelecida na Seção 4.3.

Esta etapa do estudo foi realizada em um ambiente fechado, para evitar interferências de luminosidade.

Primeiramente, foi realizada a calibração de medida, com uma régua graduada inserida no plano de luz. Foi obtida uma imagem (conforme Figura9) para que fossem convertidas as medidas de pixels para milímetros durante o processamento da imagem no programa computacional, a partir de dois pontos, permitindo a determinação da DTP. Esse processo foi repetido antes de cada ensaio, sendo o foco da câmera ajustado manualmente antes da aquisição das imagens, tendo a régua como referência para garantir o foco sobre o plano de luz.

Figura 9 - Imagem do posicionamento da régua para realizar a calibração



Fonte: A Autora (2017)

O procedimento para aquisição das imagens foi semelhante ao descrito na Seção 4.2.2:

- a) programou-se a rotação desejada para a mistura rápida e configurou-se a câmera pelo software CCP2 com as configurações mencionadas na Tabela 6;
- b) com o auxílio de uma proveta graduada, foram colocados no jarro dois litros da água de estudo com turbidez controlada de 50 ± 2 UNT;
- c) preparou-se duas cubetas, uma com a dosagem fixa de coagulante e outra com a dosagem ideal de HCl para conferir pH dentro da faixa esperada, ambos valores são fixos para todos os ensaios;
- d) com as hastes giratórias abaixadas, foram ligadas já na velocidade de rotação programada para a mistura rápida ($G_{mr} = 800 \text{ s}^{-1}$);
- e) iniciou-se o cronômetro e simultaneamente foi adicionado ao jarro o acidificante da cubeta, mantendo agitando por 10s, com a finalidade de deixar a água homogeneizada para receber o coagulante;
- f) decorridos os 10 s, adicionou-se ao jarro o aluminato de sódio presente na outra cubeta e aguardou-se o tempo determinado para a etapa de mistura rápida ($T_{mr} = 10\text{s}$);
- g) imediatamente após os 10 s de coagulação, reduziu-se a velocidade da haste para a rotação equivalente ao gradiente de velocidade de floculação ($G_{fl} = 20 \text{ s}^{-1}$) e o fluido permaneceu em processo de floculação pelo tempo determinado ($T_{fl} = 20 \text{ min}$);
- h) Este tópico se subdivide em três:
 - Para primeiro ensaio, sem ruptura dos flocos: desligou-se as hastes giratórias ao final dos 20 min de floculação, permanecendo o ensaio na etapa de sedimentação,

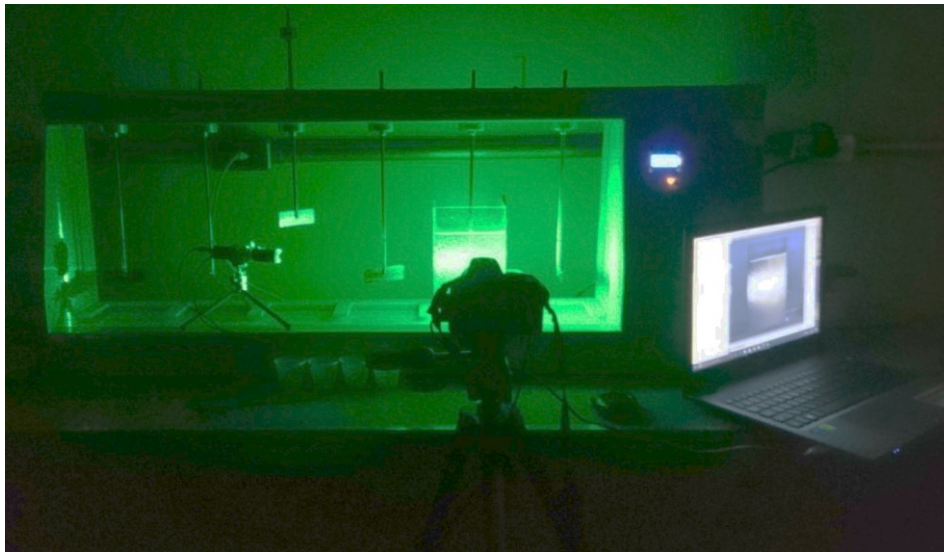
- Para segundo ensaio, com ruptura dos flocos ($G_{q1} = 80 \text{ s}^{-1}$): após os 20 min de floculação elevou-se a velocidade das hastes para gradiente de velocidade $G_{q1} = 80 \text{ s}^{-1}$, agitou-se pelo tempo de ruptura $T_q = 10 \text{ s}$. A rotação regressou para o gradiente de velocidade anterior (de floculação), permanecendo em etapa de refloculação pelo tempo $T_{rf} = 20 \text{ min}$ e desligou-se as hastes giratórias, permanecendo o ensaio na etapa de sedimentação,
- Para terceiro ensaio, com ruptura dos flocos ($G_{q2} = 200 \text{ s}^{-1}$): após os 20 min de floculação elevou-se a velocidade das hastes para gradiente de velocidade $G_{q2} = 200 \text{ s}^{-1}$, agitou-se pelo tempo de ruptura $T_q = 10 \text{ s}$. A rotação regressou para o gradiente de velocidade anterior (de floculação), permanecendo em etapa de refloculação pelo tempo $T_{rf} = 20 \text{ min}$ e desligou-se as hastes giratórias, permanecendo o ensaio na etapa de sedimentação,

Cada um dos três ensaios é independente, sendo necessária uma nova amostra para cada um deles;

- i) realizou-se coleta de amostras do processo de sedimentação em cada tempo de sedimentação (T_s) correspondente às velocidades de sedimentação (V_s) definidas na Tabela 5. Os recipientes para coleta das amostras (copos descartáveis de 50 ml) foram identificados de 1 a 4 de acordo com o tempo de coleta;
- j) As amostras foram encaminhadas ao equipamento para determinar o residual remanescente de turbidez utilizando o turbidímetro;
- k) Repetiu-se o procedimento para todos os gradientes de velocidade de floculação (G_f e G_{rf} correspondente) a serem estudadas, conforme Tabela 5.

A aquisição das imagens foi feita durante todo o processo de floculação/ruptura/recrescimento dos flocos, nos tempos especificados na Seção 4.3.1 e salvas automaticamente no computador. As fotografias se restringiram a uma pequena área do jarro. Para minimizar interferências luminosas do ambiente, no momento imediato anterior a extração de cada imagem, as luzes do ambiente de coleta eram apagadas e a luz *laser* podia ser considerada como a única fonte de luz incidindo no interior no jarro, conforme ilustra Figura 10.

Figura 10 - Momento de aquisição de imagens, com laser como única fonte de luz incidente no jarro com amostra



Fonte: A Autora (2017)

4.3.4 *Processamento e tratamento das imagens*

As imagens digitais adquiridas apresentavam campos além dos necessários e desejados para o estudo, conforme Figura 11.

Figura 11 – Imagem original adquirida durante o experimento.

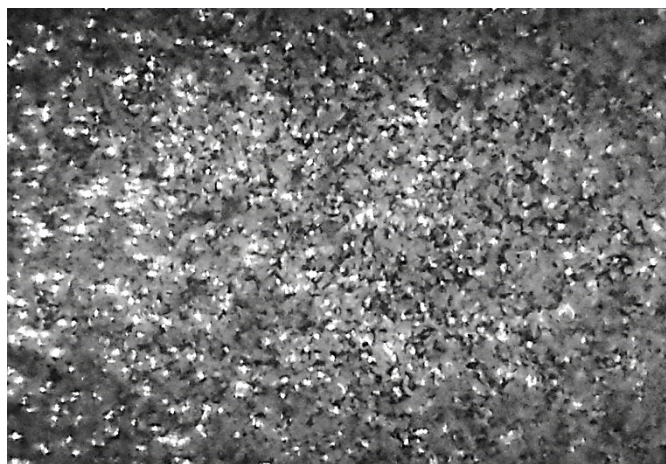


Fonte: A Autora (2017)

Neste sentido, antes do processamento das imagens, o primeiro passo do tratamento consistiu em seleccionar a área de interesse de estudo nas imagens obtidas durante a simulação no *JarTest*. Foi utilizado o software JPEGCrops, versão v0.7.5 beta, para recortar as fotografias

digitais (Figura 12) de forma a restar apenas a área de interesse. O JPEGcrops é um programa do Windows, criado para a preparação de um lote de imagens para impressão, gratuito para uso privado. Este software permitiu abrir numerosas imagens e cortá-las simultaneamente, com garantia de seleção da mesma área em todas as fotos. O tamanho selecionado foi equivalente a 1208 x 830 pixels.

Figura 12 – Imagem recortada pelo software JPEGcrops.



Fonte: A Autora (2018)

Após recortadas, as fotografias digitais foram analisadas com utilização do software livre *ImageJ 1.51*, responsável por fazer a binarização, contagem e mensuração dos flocos. Os principais parâmetros obtidos para análise neste trabalho foram, além da contagem dos flocos, a área, o diâmetro máximo e o diâmetro mínimo de cada floco, através quais foi calculado também o diâmetro equivalente do floco.

O *ImageJ* é um programa de edição, processamento e análise de imagem de código aberto, desenvolvido em linguagem Java pela National Institutes of Health (NIH), do Governo Federal dos Estados Unidos, inspirado na NIH Image, projetado para imagens científicas multidimensionais. Por ser um programa de download gratuito, não requer licença para a utilização e pode ser utilizado por diversos sistemas operacionais, como o Windows, MacOS X e Linux (LOCI, 2016). Está disponível para download em: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>.

O tratamento das imagens consiste na binarização (matriz binária) de cada imagem, que são interpretadas como pixels. Ou seja, a binarização, de acordo com Silva (2016), consiste na transformação da imagem em escala de cinza, que varia de zero (totalmente preto) a 255 (totalmente branco), em uma imagem binária. Os pixels são classificados de acordo com esta

escala de cinza, e foi escolhido um limiar que diferencia os pixels com um valor maior ao limite, que são exibidos como brancos e considerados flocos, daqueles com um valor inferior do ao limite, que são exibidos como negros e não são considerados como flocos.

O limiar desta divisão se baseia no brilho dos flocos fotografados, de forma que somente são considerados os flocos com elevado grau de brilho, sendo estes os que atravessavam o feixe de luz verde do *laser* no momento da aquisição da imagem, garantindo assim que os flocos imediatamente atrás ou à frente do feixe não fossem contabilizados por engano.

A contagem das partículas floculentas é feita de forma a considerar a associação de pixels brancos como um único floco, e enumerar cada floco. Em seguida é feita a mensuração, baseada na calibração com a régua graduada, este processo confere medidas aos flocos. O processamento das imagens gera planilhas eletrônicas (com dados sobre as partículas) que foram analisadas pelo software Microsoft Office Excel.

A utilização do software *ImageJ* segue as seguintes etapas, de maneira sucinta:

1) Calibração

- a) abrir a foto de calibração (foto com régua) e selecionar a ferramenta ‘*Straight*’;
- b) selecionar manualmente na imagem uma medida conhecida, foi selecionado 30 mm pela régua fotografada (Figura 13-a);
- c) definir escala, informando a distância marcada(30) e unidade de trabalho (mm);

2) Binarização

- a) abrir a sequência de imagens a serem tratadas (Figura 13-b);
- b) converter as imagens para 8 bits (Figura 13-c,d);
- c) escolher, por demarcação visual, o limiar da divisão na escala de cinza, de forma a separar os pixels que serão considerados como flocos, o limiar escolhido foi 230 (dentro de uma variação de 0 a 255), ver Figuras 13-e,f;

3) Escolha dos parâmetros de análise

- a) definir as medições que o software irá analisar, as principais escolhidas foram: área, perímetro, diâmetro de Feret, mediana, curtose, forma, entre outras (Figura 13-g);
- b) selecionar número de casas decimais que os resultados apresentarão;

4) Resultados

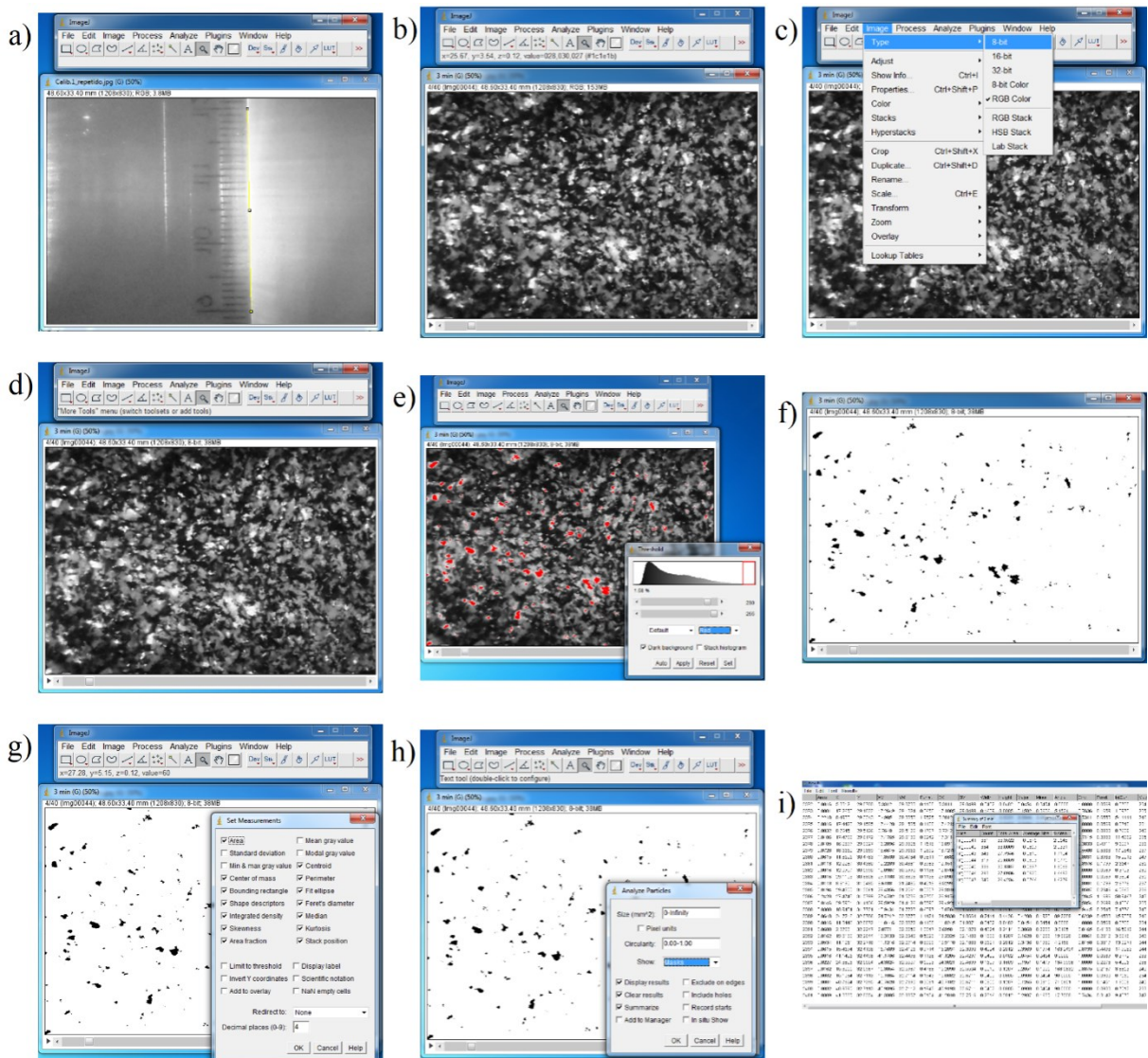
- a) selecionar como serão apresentadas as imagens analisadas, foi utilizada a opção ‘*masks*’ (Figura 13-h);
- b) realizar o processamento de análise das partículas para todas as imagens abertas no programa;

- c) o programa apresenta planilhas com os resultados (Figura 13-i), estes dados foram copiados para planilhas na extensão ‘.xls’, reconhecidas pelo software Excel.

A Figura 13 ilustra a interface do software *ImageJ* e sequencia de processamento das imagens.

Figura 13 – Interface do software *ImageJ* e sequencia do processamento das imagens:

- (a) calibração; (b) importação de imagem recortada; (c) etapa para converter imagem em 8 bits; (d) imagem em escala de cinza; (e) escolha do limiar; (f) imagem binarizada, com as cores preta e branca invertidas, o chamado efeito negativo de cores; (g) seleção de parâmetros a serem analisados; (h) análise das partículas; (i) tabelas geradas com os resultados



Fonte: A Autora (2018)

4.3.5 Estudo da DTP

Dos resultados fornecidos pela análise de imagem, foram selecionados para estudo, o número de cada floco e seus respectivos diâmetros mínimo e máximo e área, todos em milímetros. O diâmetro equivalente ou de (d_{eq}) foi calculado para cada partícula pelo método do diâmetro de Heywood (Equação 9), que considera o diâmetro de uma circunferência que tenha a mesma área da projeção da partícula num plano, conforme ilustra a Figura 14.

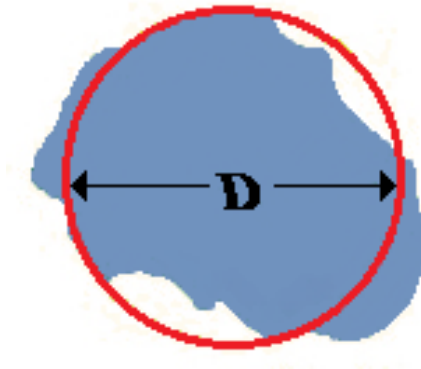
$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4.A}{\pi}} \quad \text{Eq.(9)}$$

Em que:

d_{eq} = Diâmetro equivalente do floco (mm);

A = área do floco (mm²)

Figura 14 – A área de projeção da partícula em um plano (área em azul) é igual à área da circunferência (em vermelho), portanto têm o mesmo diâmetro



Fonte: A Autora (2018)

A escolha do cálculo pelo diâmetro de Heywood, que é utilizado desde meados de 1970 para a análise do tamanho de partícula e sua distribuição, é uma alternativa de medida que normalmente é feita pelo diâmetro de Feret, este realiza o cálculo do diâmetro pela média da distância entre duas linhas paralelas tangentes à projeção da partícula, ou seja, a média entre o diâmetro máximo de Feret e o diâmetro mínimo de Feret. Teoricamente, o diâmetro de Heywood será menor que o diâmetro de Feret, no entanto, é mais fiel ao tamanho da partícula, uma vez que o diâmetro de Feret não leva em consideração a forma irregular da partícula.

Por conseguinte, od_{eq} foi utilizado para a classificação dos flocos por tamanho, separados em 15 classes. A classe 1, corresponde aos flocos de menor diâmetro e a classe 15 aos maiores flocos. Para escolha da amplitude, do limite inferior e superior da classe, foram selecionados o menor e o maior valor de d_{eq} entre todos os experimentos. A amplitude de dados corresponde ao maior d_{eq} menos o menor d_{eq} analisados, e a amplitude de classe corresponde à amplitude de dados dividida pelo número de classes.

A divisão das classes de tamanho de flocos foi estabelecida conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Divisão das classes para distribuição de partículas por tamanho

Amplitude de dados (mm)		0,9414
Amplitude de classe (mm)		0,0627
Classe	Limite inferior (mm)	Valor utilizado (mm)
1	0,045	0,108
2	0,108	0,171
3	0,171	0,233
4	0,233	0,296
5	0,296	0,359
6	0,359	0,422
7	0,422	0,484
8	0,484	0,547
9	0,547	0,610
10	0,610	0,673
11	0,673	0,736
12	0,736	0,798
13	0,798	0,861
14	0,861	0,924
15	0,924	0,987

Fonte: A Autora (2018)

4.3.5.1. *Parâmetro β*

Após a organização da DTP para cada gradiente estudado, foi possível realizar a análise do parâmetro β , representativo da DTP, conforme Equações 4 e 5 da seção 3.3.1. Para utilização das equações, os diâmetros das partícula (dp) foram calculados para cada classe 'n' pela

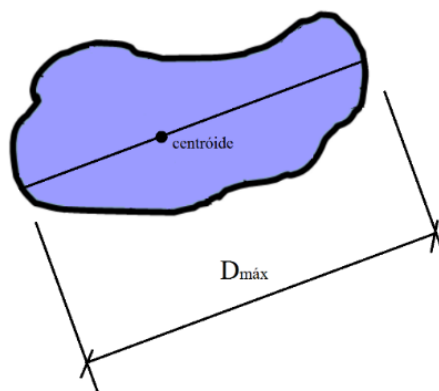
média geométrica do limite inferior e superior da mesma; o valor de ΔN foi definido como a diferença entre a frequência absoluta de partículas presente na classe 'n-1' menos 'n'; para Δdp foi calculada a diferença entre o diâmetro dp da classe 'n' menos 'n-1'. Com isso, a forma gráfica de log-log da Equação 5 permite o cálculo do parâmetro β , que é expresso pelo coeficiente angular da linha de tendência (linear) no gráfico.

Visto que também há o intuito de avaliar o comportamento da DTP após a ruptura, em comparação com a DTP antes da ruptura, foram calculados β_1 e β_2 , o primeiro correspondente ao período de floculação e o segundo à fase de recrescimento dos flocos. Devido ao fato de o parâmetro β ser calculado para cada instante de aquisição das imagens, foi necessário trabalhar com um único valor capaz de representar a tendência do período estacionário da floculação ou refloculação. Para tal, o β_1 foi calculado pela média dos valores de β a partir do patamar de estabilidade da fase de floculação (10 min finais), e evidentemente, o β_2 seguiu o mesmo contexto para o estado estacionário da refloculação.

4.3.6 Determinação da resistência do floco

Dos dados obtidos a partir da análise de imagens, a dimensão característica do diâmetro máximo ($d_{m\acute{a}x}$) é um parâmetro muito importante de ser avaliado no estudo da resistência do floco por apresentar variação relevante quando há alteração no tamanho do agregado, em comparação ao diâmetro médio. Conforme orientam Li et al. (2007) e Moruzzi et al. (2015), o diâmetro máximo representa a maior distância entre dois pontos da extremidade do floco, passando pelo centroide do agregado, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Esquema representativo para obtenção do diâmetro máximo ($d_{m\acute{a}x}$) de um agregado hipotético



Fonte: A Autora (2018)

Outro parâmetro aplicado no estudo da resistência e recuperação do floco é o diâmetro estável do floco (d), indicador da dimensão média do conjunto dos agregados aferidos durante o estado estacionário da floculação, que pode ser entendido como o estado de equilíbrio entre as forças induzidas pelo cisalhamento e a força interna dos agregados, sendo assim, é o momento da floculação que ocorre a estabilização da distribuição do tamanho das partículas. Para melhor caracterização dos flocos, o diâmetro estável foi calculado para o período de estabilidade da curva de evolução temporal do parâmetro $d_{máx}$, que compreendeu os últimos 10 min da floculação, período ao qual a captura de imagens ocorreu a cada 5 min, logo, foram utilizados para o cálculo do diâmetro estável três conjuntos de informações de diâmetro máximo, a 10, 15 e 20 min da floculação. Sendo assim, d foi calculado pela média aritmética dos valores de $d_{máx}$ de todos agregados medidos durante o período estacionário da floculação, por meio da Equação 10.

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{máx} \quad \text{Eq. (10)}$$

Em que:

d = diâmetro estável dos flocos;

$d_{máx}$ = diâmetro máximo característico do floco.

Desta forma, para cada gradiente de velocidade (G) estudado foram calculados dois momentos de diâmetro estável, o primeiro chamado de d_1 , para a floculação, o segundo, d_2 , para a refloculação, possibilitando a determinação da razão de recuperação (RR), por meio da Equação 11.

$$RR = \frac{d_2}{d_1} \quad \text{Eq. (11)}$$

Em que:

RR = razão de recuperação;

d_2 = média dos diâmetros máximos nos 10 min finais da refloculação;

d_1 = média dos diâmetros máximos nos 10 min finais da floculação.

Os resultados de RR que tendem a 1, indicam maior recuperação dos flocos após ruptura, enquanto que resultados mais distantes sugerem ruptura irreversível dos flocos.

Considerando na Equação 7 a dimensão do floco como sendo o diâmetro estável (média dos diâmetros máximos no patamar de estabilização) tem-se a Equação 12. Para obtenção dos valores de valores de C e r , cria-se um gráfico log-log do diâmetro estável pelo gradiente de velocidade aplicado, como mostra a Equação 13. Na confecção do gráfico foram utilizados os valores de diâmetros médios dos flocos obtidos durante a floculação. De acordo com Jarvis et al. (2005a), o tamanho estacionário do floco, para determinada taxa de cisalhamento (gradiente médio de velocidade), é um bom indicador da força do floco.

$$d = CG^{-r} \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\ln d = \ln C - r \ln G \quad \text{Eq. (13)}$$

Em que:

d = diâmetro estável do floco (μm);

C = constante multiplicativa de ajuste ($\mu\text{m/s}$);

G = gradiente médio de velocidade (s^{-1});

r = coeficiente de resistência do floco.

Outra forma de se obter de forma indireta informações sobre a resistência do floco é o *Fator de Resistência* (FR), obtido, originalmente, pela razão entre Índice de Floculação (IF) antes e durante a ruptura induzida dos flocos. O IF é o sinal emitido pelo equipamento *Photometric dispersion analyser* (PDA) que, em linhas gerais, está relacionado com o diâmetro médio dos flocos (Li et al., 2007 e Yu et al., 2010). No caso deste trabalho, ao invés deste sinal, foram utilizados dados de medida direta para cálculo do FR. Neste sentido, os valores do IF (Equação 14) foram substituídos por valores de diâmetros médios dos flocos, conforme descreve a seção 3.3.2. Em vista disso, para a escolha do IF_1 , que representa o máximo valor obtido na fase estacionária da floculação, foi feita a média aritmética de 10% dos maiores valores do diâmetro máximo entre os flocos identificados nos 10 min finais da floculação, pois o valor de diâmetro máximo absoluto não representa com segurança o comportamento da maioria dos flocos. Seguindo o mesmo contexto, o valor de IF_2 foi calculado pela média aritmética de 10% dos maiores valores de diâmetro máximo dos flocos no momento da ruptura induzida, representando a menor medida dos flocos durante a refloculação. Foram calculados os pares de IF para cada gradiente de velocidade (G) estudado durante os experimentos de ruptura induzida com $G_{q2} = 200 \text{ s}^{-1}$.

Portanto, a Equação 6 (seção 3.3.2) foi interpretada conforme demonstra a Equação 14, para obtenção do fator de resistência (FR) dos flocos.

$$FR = \frac{IF_2}{IF_1} 100\% \quad \text{Eq. (14)}$$

Em que:

FR = fator de resistência dos flocos

IF_2 = média dos 10% de diâmetros máximos dos flocos durante a ruptura induzida.

IF_1 = média dos 10% de diâmetros máximos dos flocos nos 10 min finais da floculação;

Os valores de FR mais próximos de 1 significam menor diminuição do diâmetro do floco, o que dá sinais de flocos com boa resistência às tensões cisalhantes.

A última análise conduzida neste trabalho sobre resistência do floco, diz respeito a um método teórico proposto por Bache et al. (1997) que propõe a obtenção de parâmetros de resistência baseado no parâmetro σ , expresso na Equação 15, que representa a força da ação hidrodinâmica média aplicada por unidade de área. O parâmetro $\bar{\varepsilon}$ representa a taxa de dissipação da energia local por unidade de massa, e é usualmente substituído por ε que apresenta relações com o gradiente médio de velocidade aplicado no fluido, conforme Equação 16.

$$\sigma = \frac{4\sqrt{3}}{3} \frac{\rho_w \bar{\varepsilon}^{3/4} d}{\nu^{1/4}} \quad \text{Eq. (15)}$$

$$\bar{\varepsilon} = \nu G^2 \quad \text{Eq. (16)}$$

Em que:

σ = força média da ação hidrodinâmica aplicada por unidade de área (N/m²);

ρ_w = densidade da água (Kg/m³);

ν = viscosidade cinemática (m²/s);

d = diâmetro estável do floco durante a floculação – d_l (mm);

ε = taxa de dissipação de energia local por unidade de massa (m²/s³);

$\bar{\varepsilon}$ = taxa média de dissipação de energia local (m²/s³);

G = gradiente de velocidade média aplicado (s⁻¹).

4.4 Avaliação da eficiência de remoção de turbidez

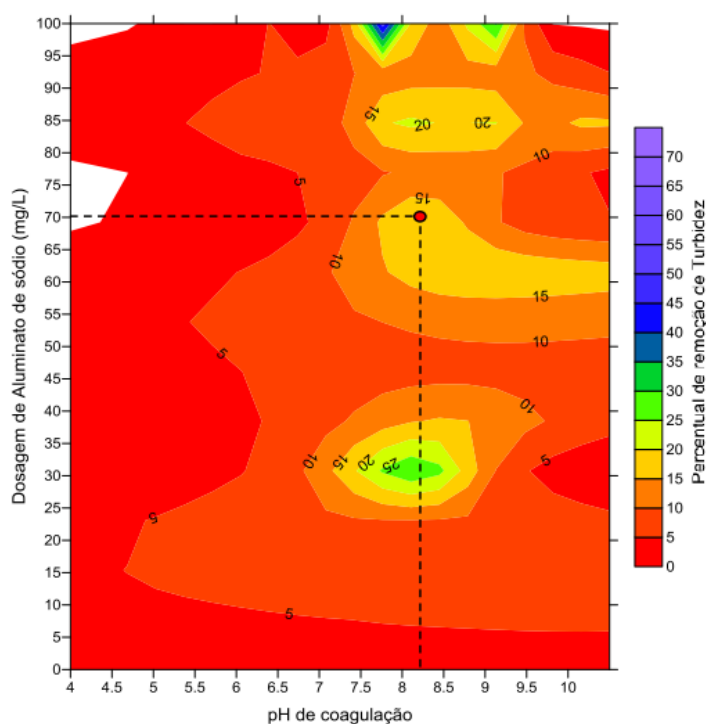
A eficiência de remoção de turbidez foi avaliada antes e após a ruptura induzida dos flocos a fim de se avaliar os efeitos da ruptura na sedimentabilidade dos flocos. Com os valores de turbidez remanescente foram feitas análises comparativas da eficiência de remoção da turbidez utilizando-se o *software Microsoft Excel*. Os estudos foram conduzidos para cada um dos gradientes médios de velocidade de floculação e refloculação estudados (20, 30, 40, 50, 60 s^{-1}) e gradientes médios de velocidade de ruptura de 80 e 200 s^{-1} .

CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Diagramas de coagulação/floculação do coagulante Aluminato de Sódio

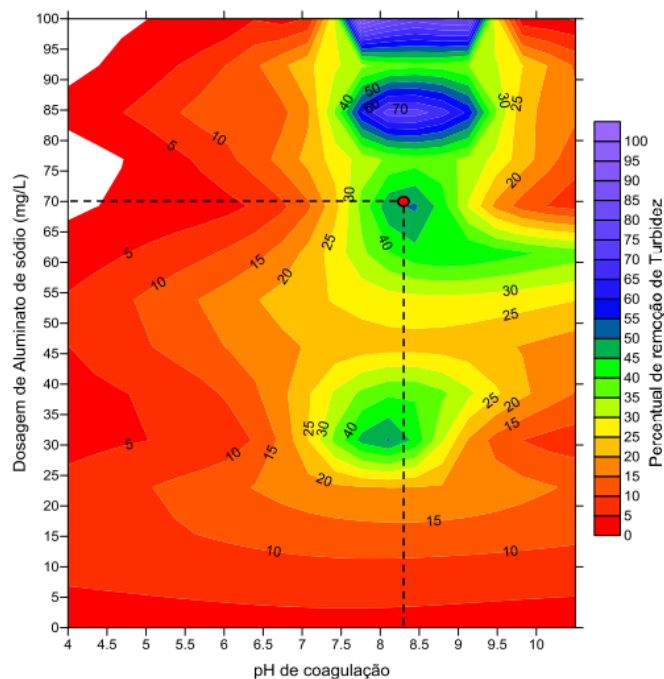
Com os resultados da primeira etapa da pesquisa foram gerados os diagramas de coagulação/floculação. As Figuras 16, 17, 18 e 19 representam, respectivamente, os digramas de coagulação/floculação a partir dos valores remanescentes de turbidez obtidos de amostras coletadas nas velocidades decrescentes de sedimentação de 5 cm/min, 2,5 cm/min, 1 cm/min e 0,5 cm/min. Os dados utilizados para elaboração das figuras encontram-se no Apêndice A.

Figura 16 - Diagrama de coagulação/floculação de água com 50 UNT apresentando a eficiência de remoção de turbidez com aplicação de 70 mg/L de aluminato de sódio– velocidade de sedimentação de 5 cm/min



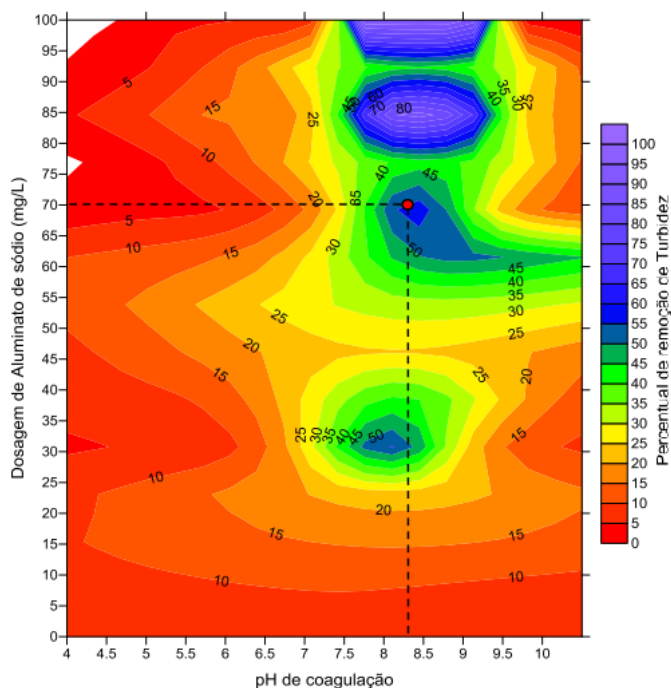
Fonte: A Autora (2018)

Figura 17 - Diagrama de coagulação de água com 50 UNT apresentando a eficiência de remoção de turbidez com aplicação de 70 mg/L de aluminato de sódio – velocidade de sedimentação de 2,5 cm/min



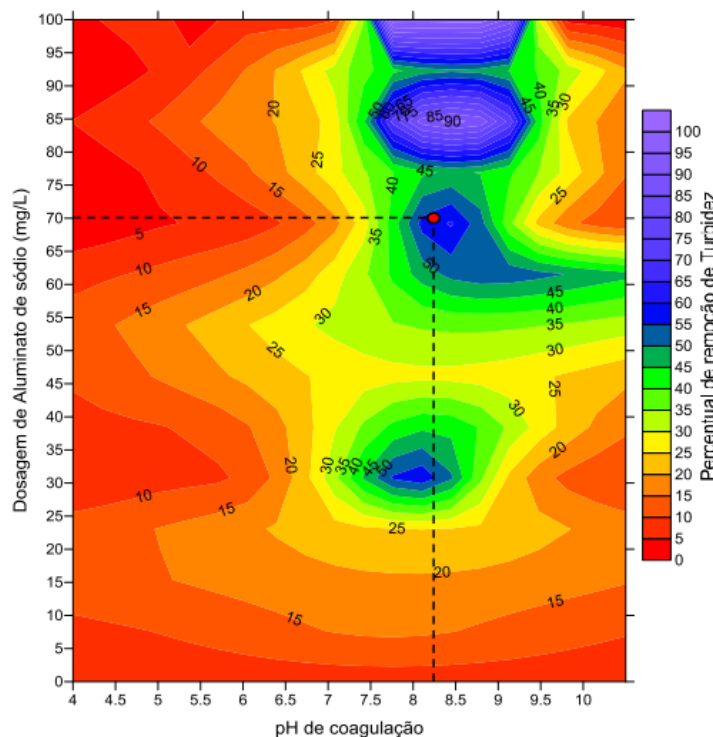
Fonte: A Autora (2018)

Figura 18 - Diagrama de coagulação de água com 50 UNT apresentando a eficiência de remoção de turbidez com aplicação de 70 mg/L de aluminato de sódio – velocidade de sedimentação de 1 cm/min



Fonte: A Autora (2018)

Figura 19 - Diagrama de coagulação de água com 50 UNT apresentando a eficiência de remoção de turbidez com aplicação de 70 mg/L de aluminato de sódio – velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min



Fonte: A Autora (2018)

Conforme Figuras 16, 17, 18 e 19, a remoção da turbidez foi maior quanto menor a velocidade de sedimentação, entretanto, baixas velocidade de sedimentação não são interessantes do ponto de vista prático uma vez sua consideração significa utilização de grandes áreas para unidades de sedimentação.

De forma geral, foram obtidos resultados satisfatórios com o aluminato de sódio como coagulante para amplas faixas de pH de coagulação x Dosagem de coagulante, apresentado alguns valores abaixo de 0,5 UNT compatíveis com o desejado a jusante de unidades de filtração conforme Padrão de Potabilidade Brasileiro (Portaria MS Nº 2914/2011). Ainda, em muitas amostras foram verificados valores de turbidez remanescente menores que 5 UNT, valor este desejado na saída de unidades de sedimentação de modo a aumentar as carreiras de filtração (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008).

A Tabela 9, mostra a capacidade de remoção de turbidez para a dosagem de coagulante de 70 mg/L, os dados da tabela foram adquiridos durante a realização de ensaios da primeira etapa de experimentos, os resultados completos estão tabelados no ‘Apêndice A’ deste trabalho.

Tabela 9 – Turbidez remanescente para diferentes velocidades de sedimentação em função do pH de coagulação para dosagem de 70 mg/L do coagulante aluminato de sódio

pH de coagulação	Velocidade de sedimentação (cm/min)			
	5,0	2,5	1,0	0,5
4,78	51,3	49,8	48,9	49,4
4,82	50,6	49,4	47,7	47,8
5,08	49,8	50,9	48,9	47,3
5,52	51,2	50,0	49,7	47,0
5,76	50,9	50,1	50,6	49,4
6,40	51,5	50,4	49,4	48,9
6,54	49,8	48,5	46,3	45,0
7,31	48,0	47,4	47,1	45,8
7,58	48,6	46,5	50,4	48,6
7,62	49,3	48,3	48,4	48,1
8,00	25,9	4,64	1,45	0,24
8,12	27,6	4,19	1,71	0,43
8,28	33,4	6,61	1,85	0,24
8,38	40,0	8,95	3,78	1,21
8,49	40,0	10,8	4,99	1,87
8,61	46,3	14,8	5,96	3,09
8,68	40,0	15,5	2,90	0,98
8,83	40,0	7,78	4,87	1,35
9,07	48,1	47,7	46,1	46,6

Fonte: A Autora (2018)

As amostras coletadas na velocidade de sedimentação de 5 cm/min apresentaram remoção máxima não superior a 65%. Já as amostras para a velocidade de sedimentação de 2,5 cm/min apresentam, mesmo que pontualmente, percentuais de remoção superiores a 90%, enquanto as amostras para a velocidade de sedimentação de 1 cm/min trazem também percentuais acima de 90% para faixas mais amplas de pH. Por fim, as amostras para a velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min apresentam, para ampla faixa de pH, remoção eficaz, dentro dos parâmetros estabelecidos pelo MS (Ministério da Saúde) na Portaria 2.914 de 2011. Nota-se que valores de pH próximos de 8 proporcionaram maiores percentuais de remoção de cor.

Como o aluminato de sódio eleva consideravelmente o pH do meio, foi necessário utilizar apenas o acidificante HCl para a obtenção dos valores de pH ótimos.

Após avaliação dos diagramas de coagulação/floculação, conforme destacado nas Figuras 16, 17, 18 e 19, foi selecionado o par de valores para condução dos ensaios da segunda etapa de dosagem de aluminato de sódio em 70 mg/Le faixa de pH de $8,23 \pm 0,05$. Em linhas gerais o aumento da dosagem de coagulante proporciona, para valores adequados de pH, aumento da eficiência de remoção de turbidez. Apesar de maiores dosagens de coagulante produzirem água com baixa turbidez, foi adotada na etapa seguinte do trabalho a dosagem de 70 mg/L, que foi a menor dosagem a proporcionar bons resultados de remoção adequados. Em contrapartida, apesar de dosagens mais baixas de coagulante também serem eficientes na remoção de turbidez, são mais sensíveis a variação do pH, dificultando sua utilização. Lopes (2011), realizou ensaios de remoção de turbidez em água residuária industrial, e encontrou par de valores ótimos de pH de coagulação/Dosagem de coagulantes, próximos aos adotados para a próxima etapa deste trabalho. Desta forma, apesar de águas brutas distintas, nota-se coerência entre os dois estudos, ressaltando a característica do aluminato de sódio em promover melhor remoção para valores de pH mais básicos.

5.2 Análise da DTP

A análise da distribuição do tamanho de partículas foi realizada pela frequência relativa de partículas presentes em cada classe de tamanho. A Tabela 8 (seção 4.3.5) apresenta a faixa de tamanho que compreende cada uma das 15 classes fixadas.

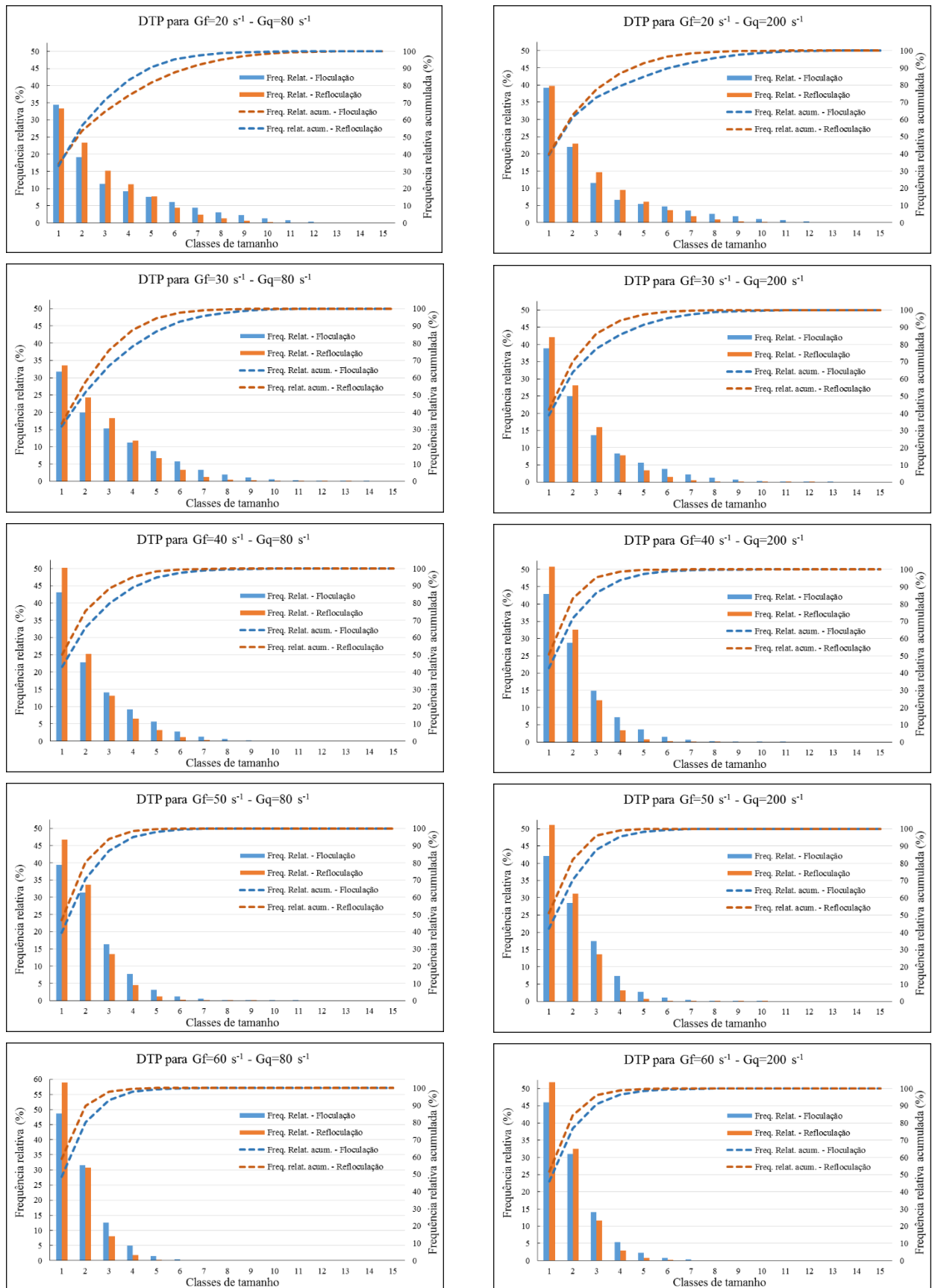
O estudo monitorou os flocos em vários momentos da floculação/refloculação, obtendo informações dos tempos: 1, 3, 5, 10, 15 e 20 min. Observou-se nos minutos iniciais da floculação a formação de grande quantidade de flocos de pequenos diâmetros e de poucos flocos com grandes tamanhos. Ao decorrer da floculação, houve diminuição da quantidade total de partículas e aumento da concentração de partículas maiores, devido à agregação, até o alcance do patamar de estabilização, a partir do qual a mudança na DTP passou a ser mais discreta, sugerindo maior equilíbrio entre a formação e ruptura dos flocos. Após a ruptura induzida o comportamento da DTP durante a refloculação foi semelhante à obtida durante floculação, exceto pelo alcance mais rápido do patamar de estabilização, que representa o início da fase estável da floculação/refloculação. Pode-se inferir que, para os gradientes de ruptura avaliados, não há ruptura total dos agregados e, portanto, iniciam a recuperação do seu tamanho a partir de situação mais favorável em relação à floculação.

Para avaliar a DTP, foram obtidos os diâmetros médios dos flocos na fase estável da floculação e refloculação de forma a caracterizar a distribuição final do tamanho de partículas para cada ensaio realizado. Como o início da estabilização se deu em diferentes tempos para a floculação e refloculação, para possibilitar a comparação entre as duas etapas, foram selecionados os tempos 10, 15 e 20 min, onde tanto a floculação quanto a refloculação já se encontravam na fase de estabilização da DTP. Apesar da média geométrica representar melhor a evolução do tamanho dos flocos, optou-se pela utilização da média aritmética, pois a diferença nos resultados entre as duas formas de cálculo foi irrelevante, além de que a média geométrica não considera valores iguais a zero, e também, não permite a condição de manter a soma total de frequência relativa em 100%.

A Figura 20 ilustra o histograma da DTP (média calculada para o período estável de floculação) para os dez ensaios realizados com diferentes taxas de cisalhamento de floculação e distintas intensidades de ruptura induzida (G_q).

Maiores porcentagens nas primeiras classes indicam maior quantidade de partículas pequenas. Nota-se que para o $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ a curva se desloca para direita em relação às classes de tamanho, até maiores classes de diâmetro, ao passo que conforme o gradiente de velocidade é aumentado, maior a tendência da distribuição se concentrar nas primeiras faixas de tamanho, correspondente aos menores diâmetros. Nota-se que a velocidade afeta a formação do floco, pois favorece choques efetivos.

Observa-se ainda que, em cada gráfico, ao comparar a DTP da floculação com a refloculação, percebe-se que no período de floculação os agregados se distribuem melhor ao longo das classes, até às maiores faixas de diâmetro, visto que, após a ruptura induzida dos flocos, as partículas tendem a deslocar-se para as primeiras classes de tamanho, expressando a incapacidade de recuperação total no tamanho dos agregados.

Figura 20 – DTP na fase de estabilidade da floculação e refloculação para diferentes G 

Fonte: A Autora (2018)

5.2.1 Avaliação do parâmetro β

O parâmetro β representa a forma da distribuição do tamanho das partículas, sendo representado pelo coeficiente de inclinação da reta no gráfico log-log da Equação 5 $\{\log(dp) \text{ versus } \log[\Delta N/\Delta(dp)]\}$, de modo que maiores inclinações para a reta de ajuste, ou seja, maiores valores de β , em módulo, implicam na maior concentração de partículas pequenas. Para a coerência de β na comparação entre ensaios foi necessário padronizar as faixas de diâmetros avaliadas.

A Tabela 10 mostra os valores de β_1 e β_2 , referentes a floculação e refloculação respectivamente, em resposta a cada cenário de estudo, sendo que estes valores foram calculados pela média dos coeficientes de inclinação encontrados durante a fase estável da floculação e refloculação, respectivamente. A Figura 21 ilustra graficamente o comportamento dos parâmetros β_1 e β_2 para ensaios realizados com diferentes gradientes de velocidade, de modo que quanto maior a inclinação da linha de tendência, maior a disposição de flocos em faixas de tamanho de menor diâmetro.

Tabela 10 – Valores calculados dos coeficientes β_1 e β_2 para distintos gradientes de velocidade

G_r/G_{rf} (s^{-1})	$G_q = 80 \text{ s}^{-1}$				$G_q = 200 \text{ s}^{-1}$			
	d_1 (μm)	d_2 (μm)	β_1	β_2	d_1 (μm)	d_2 (μm)	β_1	β_2
	[10 - 20] min	[30 - 40] min	[10 - 20] min	[30 - 40] min	[10 - 20] min	[30 - 40] min	[10 - 20] min	[30 - 40] min
20	275	237	-2,628	-3,733	290	213	-2,103	-3,851
30	255	217	-3,113	-3,777	252	184	-2,804	-4,560
40	200	168	-4,001	-4,634	208	150	-3,655	-4,682
50	187	162	-4,192	-5,586	201	151	-3,632	-5,408
60	162	137	-4,163	-5,190	190	148	-3,747	-4,837

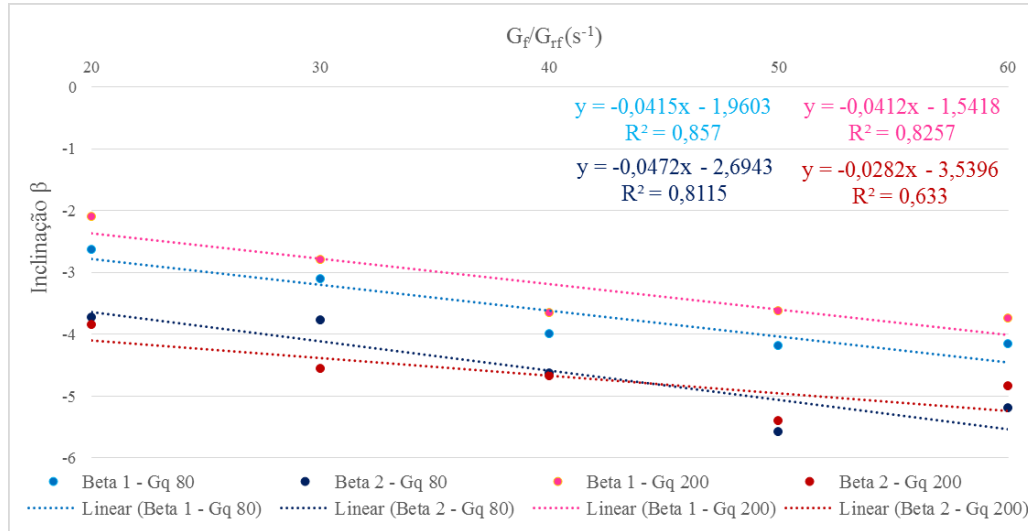
Fonte: A Autora (2018)

Maiores valores de β , em módulo, representam menores flocos. Confere-se assim, que β_1 apresenta maior sensibilidade ao aumento do gradiente de floculação, apresentando flocos maiores.

Verifica-se a tendência da formação de agregados menores para maiores gradientes médios de velocidade, mostrando correspondência com a avaliação feita através da DTP, no início desta seção. Conforme a Tabela 10, o diâmetro estável é decrescente para o aumento da agitação do fluido durante a floculação/refloculação. De maneira geral, o parâmetro β seguiu esta tendência, apresentando maiores valores, em módulo, para maiores taxas de cisalhamento, no

entanto, de mais difícil visualização para avaliar a DTP, se comparado com a utilização dos diâmetros médios dos flocos.

Figura 21 – Distribuição dos parâmetros β_1 e β_2 para diferentes taxas de cisalhamento



Fonte: A Autora (2018)

Avaliando os valores de β_1 , relativos ao patamar de estabilização na fase de floculação, nota-se diferenças entre os valores calculados para os ensaios com ruptura de 80 s^{-1} e 200 s^{-1} , que teoricamente deveriam ser iguais por se tratar da etapa de floculação realizada com as mesmas condições de ensaio, como: dosagem de coagulante; pH de coagulação; gradiente de mistura rápida (G_{mr}); tempo de mistura rápida (T_{mr}); gradiente de floculação (G_f) e tempo de floculação (T_f). Esta diferença fica mais evidente na Figura 21, ao avaliar as linhas de tendência de β_1 para ensaios com ruptura à 80 s^{-1} em azul claro e para ensaios com ruptura de 200 s^{-1} em rosa, apesar das linhas manterem inclinações similares (expressas nas equações das linhas de tendência), elas estão em posições deslocadas. Este assunto também foi observado e melhor discutido na avaliação do diâmetro estável, (seção 5.3). Ressalta-se que estas diferenças são facilmente explicadas pela natureza dos experimentos em que pequenas alterações podem provocar grandes mudanças nos parâmetros analisados. Entretanto, apesar do deslocamento das curvas, o comportamento foi similar, tendo sido influenciados, provavelmente pela contagem computacional de partículas nos experimentos, o que, não necessariamente, está relacionado a diferenças significativas na DTP como pode ser observado na Figura 20.

Contudo, para todos os ensaios, o parâmetro β_2 , que corresponde a fase estável da refloculação, revelou-se menor que seu correspondente β_1 (floculação), explicitando que após

a ruptura, a reorganização da DTP deslocou-se para menores faixas de diâmetro. Percebe-se, de fato, a incapacidade de recuperação total do tamanho dos agregados após a ruptura induzida.

Em análise global, a linha de tendência do β_1 se comportou de maneira decrescente com a elevação do gradiente (Figura 21), enquanto que o β_2 se mostrou menos sensível à variação da taxa de cisalhamento, principalmente após ruptura com maior intensidade (200 s^{-1}), onde houve uma redução significativa na amplitude dos dados. Esse evento é visível pela mudança na inclinação da reta de ajuste, em cor rubro na Figura 21, apresentando porém, menor valor de coeficiente de ajuste de determinação (R^2) que os demais. Através de uma avaliação ponto a ponto, a Tabela 10 mostra oscilações consideráveis nos valores de β_2 com o aumento do G_{rf} . Para a maioria dos G_f avaliados, o parâmetro β_2 apresentou proximidade de valores entre os dados do experimento com G_q de 80 s^{-1} com os do experimento com G_q de 200 s^{-1} . Pode-se dizer que, neste caso, a ruptura foi determinante no comportamento de β_2 .

5.3 Recuperação do tamanho do floco

Diâmetro estável (d)

As análises de diâmetro estável dos flocos foram conduzidas apenas nos ensaios com gradiente de ruptura de 200 s^{-1} . Conforme descrito na seção 4.3.6, para cada momento de aquisição de imagens, o diâmetro estável foi calculado pela média do diâmetro máximo dos flocos. Desta forma, obteve-se a evolução temporal do diâmetro estável do floco, para cada gradiente de velocidade médio G_f estudado cujos dados estão expostos na Tabela 10. Na sequência foi traçado o gráfico da Figura 22 retratando o comportamento do diâmetro estável do floco durante o processo de formação de flocos.

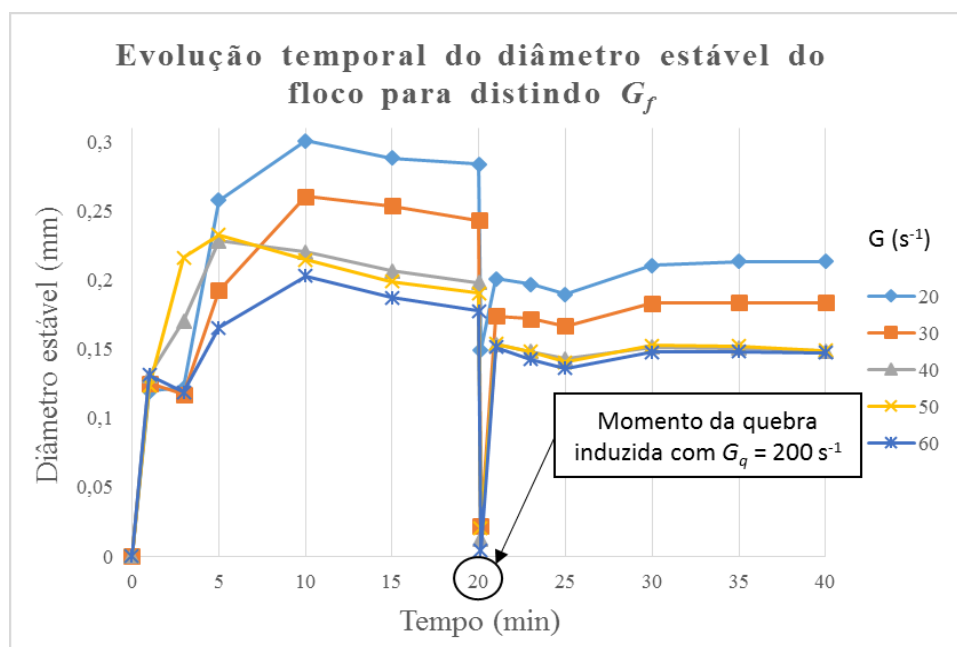
A obtenção das imagens ocorreu nos tempos de floculação de 1, 3, 5, 10, 15 e 20 minutos e nos tempos de refloculação (sem interrupção da contagem de tempo) nos tempos de 21, 23, 25, 30, 35 e 40 minutos).

Observa-se que a agregação tem rápido início uma vez que já no primeiro tempo de amostragem os flocos apresentaram diâmetros estáveis superiores a $100 \mu\text{m}$.

Tabela 11–Evolução temporal do diâmetro estável do floco para ensaios com $G_q = 200 \text{ s}^{-1}$

Tempo (min)		Diâmetro estável do floco (mm)				
		Gradiente de velocidade médio de floculação e refloculação (s ⁻¹)				
		20	30	40	50	60
Floculação	0	0	0	0	0	0
	1	0,120	0,125	0,131	0,123	0,132
	3	0,122	0,117	0,170	0,216	0,119
	5	0,258	0,193	0,228	0,233	0,165
	10	0,301	0,260	0,220	0,215	0,203
	15	0,288	0,254	0,207	0,199	0,187
	20	0,284	0,243	0,198	0,191	0,178
Ruptura (200 s ⁻¹)		0,149	0,022	0,012	0,020	0,004
Refloculação	21	0,201	0,174	0,154	0,154	0,151
	23	0,197	0,172	0,148	0,148	0,143
	25	0,190	0,167	0,143	0,141	0,136
	30	0,211	0,183	0,151	0,153	0,148
	35	0,213	0,184	0,151	0,152	0,148
	40	0,213	0,184	0,149	0,149	0,147

Fonte: A Autora (2018)

Figura 22 – Evolução temporal do diâmetro estável ‘ d ’ do floco para distintos valores de gradiente de velocidade de floculação, para ensaios com ruptura induzida com $G_q = 200 \text{ s}^{-1}$ 

Fonte: A Autora (2018)

Percebe-se, a partir das imagens obtidas nos primeiros três minutos da floculação, que para o gradiente médio de velocidade de 20 s^{-1} houve pouca alteração no diâmetro médio, para

gradientes de 30 e 60 s^{-1} ocorre uma pequena queda no diâmetro, enquanto que para os gradientes de 40 e 50 s^{-1} ocorre uma elevação considerável dos diâmetros médios, que ficam próximos de atingir a estabilidade do tamanho do floco. Nota-se também uma pequena diminuição dos diâmetros estáveis dos flocos se comparados aos minutos iniciais do “patamar de estabilização”. Esta perda no tamanho do diâmetro estável ainda nos primeiros minutos de floculação, possui uma causa difícil de ser definida, mas pode ser explicada pelo desprendimento de partes frágeis dos flocos inicialmente formadas, em função das tensões cisalhantes continuadas.

A partir do décimo minuto, ao atingir o patamar de estabilidade, que compreende os 10 minutos finais da floculação, as partículas alcançam o valor máximo de ‘d’, para a maioria dos ensaios, e começam a decrescer lentamente. De fato, essa ocorrência explica-se, principalmente, pela perda da eficiência de colisão das partículas, que se tornaram maiores e em menor número, ficando sujeitas a sofrerem ruptura com maior facilidade. Provavelmente o verdadeiro estado estacionário demandaria mais tempo, onde haveria equilíbrio entre as forças internas dos agregados e a força de cisalhamento aplicada, mantendo estabilizada a dimensão do floco.

As exceções foram os experimentos com $G_f = 40$ e 50 s^{-1} , nestes dois ensaios não houve decrescimento do ‘d’ nos minutos iniciais, paralelamente, o tamanho do agregado máximo foi registrado com 5 min de floculação, decrescendo vagarosamente deste ponto em diante.

Após vinte minutos de floculação, com a elevação da taxa de cisalhamento para 200 s^{-1} , o diâmetro estável assume o valor mínimo para cada um dos ensaios, com flocos não maiores que 22 μm no momento da ruptura, salvo o experimento com $G_f = 20 s^{-1}$, que apresentou ‘d’ com aproximadamente 150 μm , permanecendo maior que nos minutos iniciais da floculação. Este comportamento atípico também foi observado por Silva (2017) para o G_f em questão, o autor acredita que grandes agregados de sal de alumínio/caulinita podem demandar maior tempo do que o aplicado (10 s de ruptura induzida) para romperem-se em fragmentos menores. No início da refloculação, a agregação das partículas é considerável, mesmo sem total recuperação do tamanho, os novos flocos retomam o crescimento até atingirem o novo patamar de estabilidade, nos 10 minutos finais da etapa. No entanto, os agregados se comportaram de forma diferente da floculação, uma vez que no estado estacionário da refloculação não ocorreram perdas significativas no tamanho dos flocos, o que corrobora com a explicação anterior sobre o desprendimento de partes do floco a partir de ligações mais frágeis.

Razão de recuperação (RR)

A fim de estabelecer uma razão para recuperação do floco, os experimentos foram conduzidos com os gradientes de ruptura de 80 e 200 s⁻¹.

Para cada gradiente de velocidade médio estudado, os diâmetros estáveis do floco, d_1 e d_2 , foram baseados no estado estacionário da floculação e refloculação, respectivamente. A razão d_2/d_1 representa a razão de recuperação do tamanho do floco após ruptura (RR), calculada pela Equação 11, na Seção 4.3.6. Valores de $d_2/d_1 = 1$ corresponderiam à total recuperação do tamanho do floco, inversamente, para $d_2/d_1 = 0$ seria considerado um processo completamente irreversível, com partículas incapazes de reagregarem.

As Tabelas 12 e 13 mostram os valores de d_1 , d_2 e da razão d_2/d_1 , em unidade de μm , para cada G_f . A partir delas foi gerado o gráfico da Figura 23, que retrata a razão de recuperação para os dois gradientes de ruptura induzida observados.

Tabela 12–Diâmetro estável do floco para ensaios com $G_q = 80 \text{ s}^{-1}$

Diâmetro estável do floco			
G_f	d_1	d_2	d_2/d_1
(s ⁻¹)	(μm)	(μm)	
20	275	237	0,86
30	255	217	0,85
40	200	168	0,84
50	187	162	0,86
60	162	137	0,85

Fonte: A Autora (2018)

Tabela 13–Diâmetro estável do floco para ensaios com $G_q = 200 \text{ s}^{-1}$

Diâmetro estável do floco			
G_f	d_1	d_2	d_2/d_1
(s ⁻¹)	(μm)	(μm)	
20	290	213	0,73
30	252	184	0,73
40	208	150	0,72
50	201	151	0,75
60	190	148	0,78

Fonte: A Autora (2018)

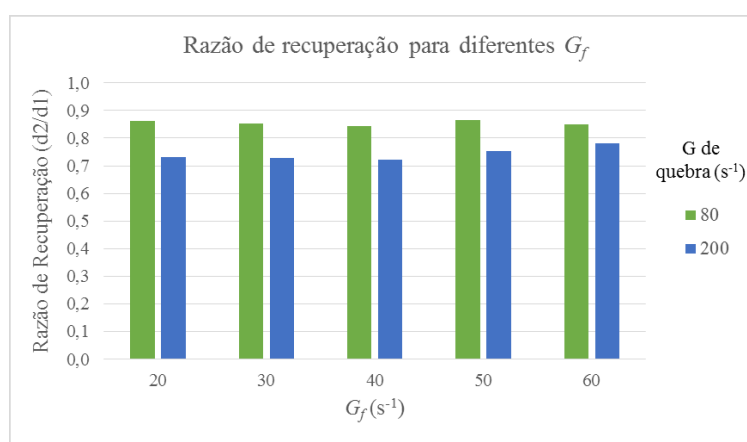
É visível que com o aumento da taxa de cisalhamento (G_f) há diminuição no diâmetro estável do floco, e que o diâmetro estável d_2 sempre apresentou-se menor que d_1 , afirmando a incapacidade de reversão total do tamanho dos flocos após ruptura, conforme relatam Yukselen e Gregory (2004).

Ainda, tanto para d_1 como para d_2 , observa-se que com o aumento do G_f , o tamanho do floco formado apresenta-se cada vez menor, sendo que durante a floculação, a amplitude de dados é maior que os dados da refloculação.

Teoricamente os valores de d_1 para ambos os experimentos deveriam ser iguais, visto que trata-se da mesma água de estudo. No entanto, mínimas interferências, como a temperatura

nos dias dos experimentos podem modificar o pH e consequentemente a dosagem do HCl, ocasionado pH de coagulação diferente, mesmo que com valores próximos. Apesar disso, a diferença é pouco relevante para a análise em pauta. Com isso, observa-se que maiores gradientes de velocidade são mais sensíveis a interferências e alterações do meio, uma vez que, no geral, quanto maior o G_f , maior foi a diferença do d_l entre os ensaios com ruptura induzida de 80 e 200 s^{-1} .

Figura 23 – Razão de recuperação após ruptura com $G_q = 80$ e 200 s^{-1} , para diversos gradientes de velocidade médios (G_f) avaliados



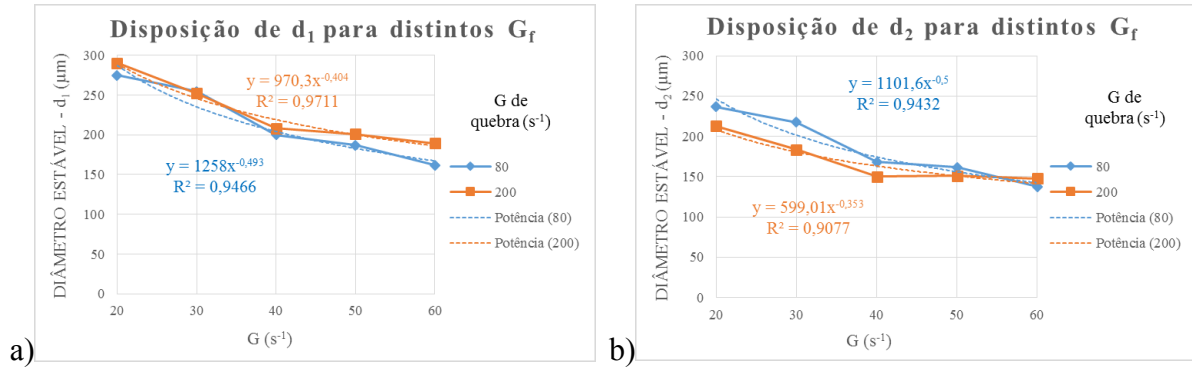
Fonte: A Autora (2018)

A partir da Figura 23 constata-se que o gradiente médio de floculação aplicado (G_f) pouco interferiu na razão de recuperação (RR) do floco após ruptura induzida. Ou seja, para todos os gradientes médios de velocidade de floculação avaliados, a razão d_2/d_1 manteve-se com certa constância. No entanto, o gradiente de ruptura afetou a RR, de forma que a taxa de cisalhamento mais alta ocasionou a maior perda da capacidade de recuperação do tamanho do agregado. Esta situação é também verificada nos estudos de Yukelsen e Gregory (2002 e 2004), em que constataram que além da capacidade de recuperação do floco tornar-se mais limitada com aumento do gradiente médio de velocidade na ruptura, o mesmo ocorre com o aumento do tempo de exposição este gradiente, mesmo para tempos pequenos de ruptura (5s) onde os flocos perdem a capacidade de retomarem as condições iniciais.

Apesar desse cenário, é importante uma interpretação cautelosa da razão de recuperação do tamanho do floco, visto que valores maiores de RR não são indicativos de flocos com melhores condições de remoção. Isto é, a razão de recuperação faz uma comparação adimensional do tamanho do agregado antes e após ruptura, assim só é possível ser comparado com o mesmo gradiente de velocidade médio (G_f).

Os gráficos da Figura 24 mostram a distribuição do diâmetro estável para cada taxa de cisalhamento estudada.

Figura 24 – Disposição do diâmetro estável para distintos gradientes de floculação médios (G_f): (a) diâmetro estável antes da ruptura - d_1 ; (b) diâmetro estável após a ruptura - d_2



Fonte: A Autora (2018)

O gráfico (a) da Figura 24, teoricamente deveria exibir as distribuições de d_1 análogos para ambos os ensaios, como já mencionado anteriormente, mas a diferença entre os ensaios fica expressa nos parâmetros de ajuste C e p da Equação 7.

Contudo, o experimento com ruptura induzida de $80\ s^{-1}$, mesmo apresentando menor granulometria (d_1) antes da ruptura para a maioria dos G_f , forneceu maiores valores de diâmetro estável (d_2) na refloculação. Com exceção para o $G_f = 60\ s^{-1}$, que exibiu menor valor de d_2 para o ensaio com $G_q = 80\ s^{-1}$. Este evento pode ser explicado pelo fato do d_1 apresentado pelo ensaio com ruptura de $80\ s^{-1}$, ser menor que o d_1 do ensaio com ruptura de $200\ s^{-1}$. Contudo, essa eventualidade não interferiu na melhor capacidade de recuperação do tamanho do floco para o experimento com menor intensidade de agitação de ruptura.

Da mesma forma que d_1 , no gráfico (b) da Figura 24, observa-se que o d_2 respondeu de maneira semelhante à variação do G_f , verifica-se bom ajuste pelo coeficiente de determinação (R^2) superior a 90% para todas as curvas de distribuição do diâmetro estável. Assim, para esta água com turbidez elevada e coagulada com aluminato de sódio, há uma relação entre o cisalhamento induzido e a resistência do agregado após ruptura.

5.4 Avaliação da resistência do floco

A partir do IF_1 e IF_2 foi calculado o valor do Fator de resistência 'FR' (Equação 14), para cada G_f avaliado, e pelo método teórico foi calculada a força do floco ' σ ' (Equação 15),

ambos referentes ao patamar de estabilidade da floculação (10 – 20 min), bem como o diâmetro estável ‘d’, que foi calculado através da Equação 10, pela obtenção da média dos diâmetros máximos dos flocos analisados neste período. A seção 4.3.6 descreve a metodologia para o cálculo de cada um dos parâmetros apresentados na Tabela 13 sendo que os dados utilizados foram obtidos dos ensaios conduzidos com $G_q = 200 \text{ s}^{-1}$. A Tabela 14 mostra os dados.

Tabela 14 - Dados dos diâmetros estáveis, dos parâmetros de resistência do floco com o aumento da taxa de cisalhamento para ensaios com $G_q = 200 \text{ s}^{-1}$

Gradiente de velocidade médio	Média dos diâmetros máximos	Média dos diâmetros máximos antes da ruptura	Média dos diâmetros máximos durante a ruptura	Fator de resistência (IF ₂ /IF ₁)	Valor teórico da força do floco
G_f	d_1	IF ₁	IF ₂	FR	σ
(s ⁻¹)	(μm)	(μm)	(μm)	(%)	(N/m ²)
20	290	779	307	39,48	0,060
30	252	644	293	45,43	0,095
40	208	493	271	54,99	0,121
50	201	464	293	62,98	0,164
60	190	440	315	71,44	0,203

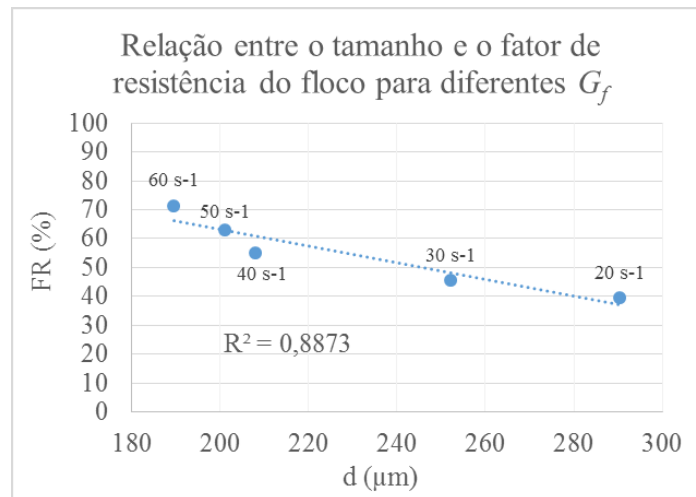
Fonte: A Autora (2018)

Fator de resistência dos flocos

Vários estudos avaliam a resistência dos flocos através do *flocculation index*, traduzido como ‘índice de floculação’ (IF), obtido por meio de testes macroscópicos que utilizam o equipamento *PDA* (McCURDY et al., 2004; Li, T et al., 2007; SILVA, 2017). Segundo Li, et al., 2007 existe uma relação diretamente proporcional entre o sinal IF emitido pelo PDA e o tamanho do floco, de forma que o valor do IF monitorado pelo equipamento pode ser usado como um indicador confiável do desenvolvimento do tamanho do agregado. Diante disso, foi selecionada uma medida conhecida do floco (média dos diâmetros máximos), adquirida no processo de tratamento das imagens, para ser admitida como IF. O nome do parâmetro IF foi mantido, uma vez que esta análise de resistência do floco, foi baseada em metodologias realizadas com a utilização do PDA.

É notória a diminuição do diâmetro estável (d_l) do floco com o aumento do gradiente de velocidade médio de floculação, inversamente a este fato, o fator de resistência (FR) cresce com a elevação da taxa de cisalhamento aplicada, assim como a força do floco (tensão local - σ) também aumenta, em decorrência da utilização do parâmetro G_f para o cálculo desta tensão. Observa-se, pela Figura 25, que o tamanho do floco é inversamente proporcional ao fator de resistência, com alto grau de correlação expresso pelo $R^2 = 0,8873$. O valor de FR foi de 39,48% para 71,44% ao saltar do G_f de 20 s^{-1} para 60 s^{-1} , enquanto que o valor de d_l passou de 290 para 190 para a mesma amplitude de G_f . Portanto, maiores G_f seriam responsáveis por formarem flocos mais compactos, mas com ligações internas entre partículas mais resistentes à ruptura. A explicação para esta causa pode ser devido à maiores taxas de cisalhamento de floculação aumentarem o choque entre partículas, e fornecerem maior energia para a formação dos agregados, ao mesmo tempo que ocasionam a ruptura de grandes agregados com formato disperso (estrutura ramificada e solta), resultando em flocos menores, mas com ligações mais forte entre partículas.

Figura 25 – Fator de resistência após ruptura com $G_q = 80$ e 200 s^{-1} , para diversos gradientes de velocidade médios (G_f) avaliados



Fonte: A Autora (2018)

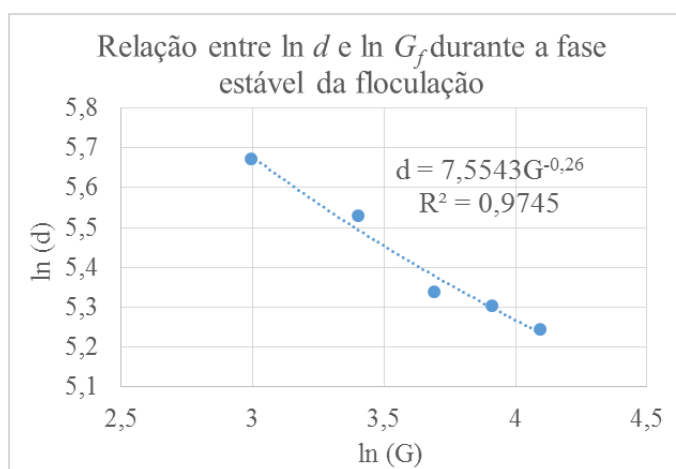
A fase estável da floculação é representada pela constância do tamanho do floco, momento em que há o equilíbrio entre a ruptura e a agregação das partículas. Pela Figura 25 verifica-se que os flocos formados em maiores taxas de cisalhamento apresentaram vínculos internos mais fortes e maior capacidade de resistirem à ruptura com elevado G_q . Desta forma, ocorreria a quebra das ligações fracas dos agregados em alta taxa de cisalhamento hidráulico (G_q), ocasionando a divisão dos flocos maiores em várias partes, assim o tamanho do floco

diminuiria simultaneamente. Entretanto, as partes residuais do floco original mantêm as ligações fortes, conseqüentemente, o floco menor e com ligações fortes poderia ter maior força para resistir à taxa de cisalhamento aplicada no momento da ruptura induzida.

Coefficiente de resistência dos flocos

A Figura 26 estabelece uma análise da resistência do floco na fase de estável da floculação a partir do coeficiente ‘ r ’ da Equação 12, este expoente representa o tamanho do floco estável, pode ser calculado pela inclinação da curva log-log (Equação 13). Li, T et al., 2007 considera que o valor de r pode ser um bom indicador da força do floco, de forma que quanto mais íngreme a inclinação da curva, mais propensos os flocos estão à ruptura com a elevação da taxa de cisalhamento.

Figura 26 – Obtenção do coeficiente de resistência do floco ‘ r ’ pelo comportamento da curva $\ln d$ e $\ln G_f$ durante a fase estável da floculação



Fonte: A Autora (2018)

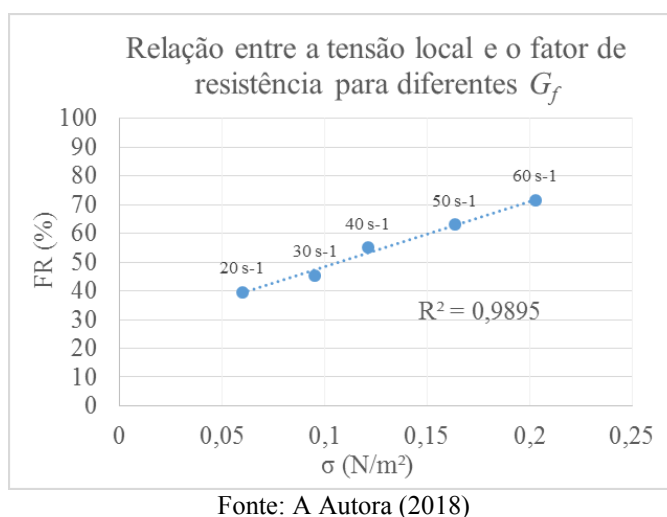
No gráfico nota-se o comportamento decrescente do diâmetro estável ‘ d ’ em resposta do aumento da taxa de cisalhamento ‘ G_f ’, com razão de decrescimento de aproximadamente $r = 0,26$. Esta inclinação ‘ r ’ está abaixo do valor estipulado por Francois (1987), que em seus estudos concluiu que os valores da inclinação estavam em torno de 0,5 para todos os tipos de flocos formados por alumínio-caulinita sob diferentes dosagens de sulfato de alumínio. Por este motivo, a utilização do aluminato de sódio como coagulante pode ser uma das causas da curva menos íngreme e conseqüentemente da maior resistência do floco. No entanto, o valor

de r tem forte dependência com a metodologia aplicada para a medição do floco, de forma que o modelo utilizado nesta pesquisa pode ter majorado a resistência aparente dos flocos.

Comparação dos parâmetros de resistência dos flocos

A Figura 27 apresenta a relação entre a tensão local ' σ ' que representa a força do floco calculada por método teórico e o fator de resistência FR calculado a partir dos valores de IF_1 e IF_2 obtidos por meio da aquisição de imagens.

Figura 27 –Relação entre o fator de resistência (experimental) e a tensão local (teórica)



Nota-se alto grau de correlação entre os dois parâmetros, expresso pelo $R^2 = 0,9895$, de forma que ambos são crescentes com o aumento do G_f . No entanto, este comportamento era esperado, uma vez que ambos se basearam no diâmetro máximo do floco durante a fase estável da floculação, porém cada cálculo com sua particularidade.

Os valores da σ foram de 0,06 para 0,203 N/m^2 com a elevação do G_f de 20 para 60 s^{-1} . Estes resultados, assim como os valores obtidos para o FR, estão coerentes com o trabalho de Silva (2017), que também realizou o estudo baseado no diâmetro máximo do floco durante a fase estável da floculação. Desta forma, ambos métodos de caracterização da resistência do floco são bons indicadores da floculação e refloculação.

No geral, é perceptível que a força do floco depende significativamente da condição hidráulica, de forma que esta interfere no número e na força das ligações entre as partículas durante a formação do floco.

5.5 Avaliação da eficiência de remoção de turbidez antes e após ruptura induzida dos flocos

A partir das medidas de turbidez remanescente para as condições de floculação estabelecidas após a primeira etapa, foram feitas coleta de amostra para quatro velocidades de sedimentação em todos os ensaios, conforme parâmetros apresentados no Apêndice B. Os dados de turbidez remanescente obtidos foram reorganizados na Tabela 15, em termos de eficiência de remoção de turbidez, conforme Equação 8 da seção 4.2.3, viabilizando a análise gráfica a partir da eficiência de remoção de turbidez para cada parâmetro estudado.

Tabela 15 - Eficiência de remoção de turbidez (%)

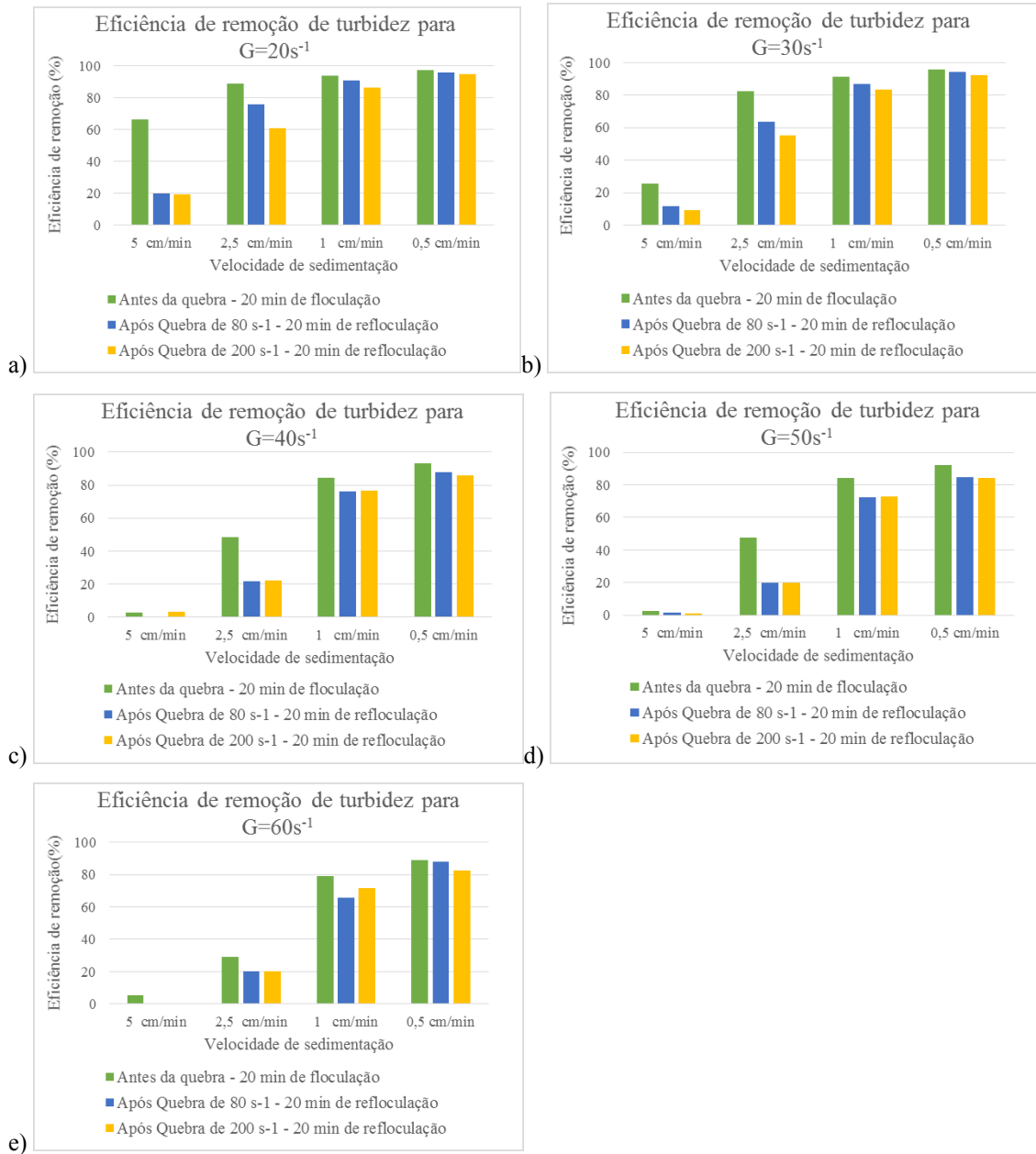
Gradiente de floculação	Velocidade de sedimentação											
	Antes da ruptura (20 min de floculação)				Após ruptura de 80 s ⁻¹ (20 min de refloculação)				Após ruptura de 200 s ⁻¹ (20 min de refloculação)			
	5	2,5	1	0,5	5	2,5	1	0,5	5	2,5	1	0,5
	cm/m in	cm/m in	cm/m in	cm/m in	cm/m in	cm/m in	cm/m in	cm/m in	cm/m in	cm/m in	cm/m in	cm/m in
20 s ⁻¹	66,40	89,00	93,82	97,24	20,00	76,00	90,88	95,74	19,20	60,80	86,44	94,76
30 s ⁻¹	25,60	82,64	91,34	95,78	11,60	63,60	86,80	94,42	9,20	55,20	83,68	92,56
40 s ⁻¹	3,00	48,60	84,58	92,90	0,00	21,80	76,20	87,78	3,20	22,40	76,40	86,00
50 s ⁻¹	2,80	47,60	84,08	92,40	1,60	20,00	72,20	84,74	1,00	20,00	72,80	84,04
60 s ⁻¹	5,40	29,00	79,20	89,24	0,00	20,00	65,80	87,94	0,00	20,00	71,80	82,34

Fonte: A Autora (2018)

Para estudar os efeitos da ruptura e refloculação na eficiência de remoção, os resultados foram dispostos em gráficos de “velocidade de sedimentação \times eficiência de remoção” de maneira a avaliar comparativamente as condições de remoção de turbidez para cada um dos gradientes de floculação antes e após a ruptura induzida, considerando-se os gradientes de ruptura de 80 s⁻¹ e 200 s⁻¹.

A Figura 28 mostra a eficiência da remoção de turbidez comparando os ensaios com e sem ruptura induzida.

Figura 28–Comparativo de eficiência de remoção de turbidez entre ensaios sem ruptura e com ruptura induzida de 80 s^{-1} e de 200 s^{-1} : (a) para gradiente de floculação de 20 s^{-1} ; (b) para gradiente de floculação de 30 s^{-1} ; (c) para gradiente de floculação de 40 s^{-1} ; (d) para gradiente de floculação de 50 s^{-1} ; (e) para gradiente de floculação de 60 s^{-1}



Fonte: A Autora (2018)

A Figura 28 revela que após a ruptura ocorre perda da capacidade de sedimentação dos flocos, principalmente para a ruptura com o maior gradiente de ruptura ($G_q = 200\text{ s}^{-1}$), porém para menores G_f a diferença na remoção pós ruptura é ainda mais sensível com o aumento do G_q , ou seja, para os gradientes de floculação 20 e 30 s^{-1} , comparando a remoção com ruptura de 80 s^{-1} à remoção com ruptura de 200 s^{-1} (apresentados nas cores azul e amarelo,

respectivamente), nota-se maior diferença de eficiência de remoção, uma vez que, para os G_f de 40 e 50 s^{-1} , os valores de remoção após a ruptura exibem uma diferença mais sutil em relação aos dois G_q estudos. Por exemplo, para a velocidade de sedimentação $V_s = 2,5$ cm/min a eficiência de remoção de turbidez cai de 76% (pós ruptura de 80 s^{-1}) para 60,8% (após ruptura de 200 s^{-1}) com o gradiente de floculação $G_f = 20$ s^{-1} , já para $G_f = 40$ s^{-1} , estes valores são de 21,8% e 22,4%, respectivamente.

Para o G_f de 60 s^{-1} , ocorre novamente uma diferença notável na eficiência de remoção entre ambos G_q , isso pode ser explicado pelo fato do gradiente de floculação está se aproximando do gradiente de ruptura de 80 s^{-1} , no entanto, são necessários mais estudos para melhor compreensão do comportamento do gradiente de ruptura na interferência da eficiência de remoção da turbidez com aluminato de sódio.

Outro aspecto analisado nos gráficos da Figura 28 é a influência da velocidade de sedimentação (V_s) na eficiência de remoção. É evidente que menores velocidades de sedimentação proporcionam melhor remoção. Contudo, Voltan (2007) afirma que comumente a maioria das unidades de decantação são projetadas com velocidade de sedimentação entre 1,5 e 4 cm/min.

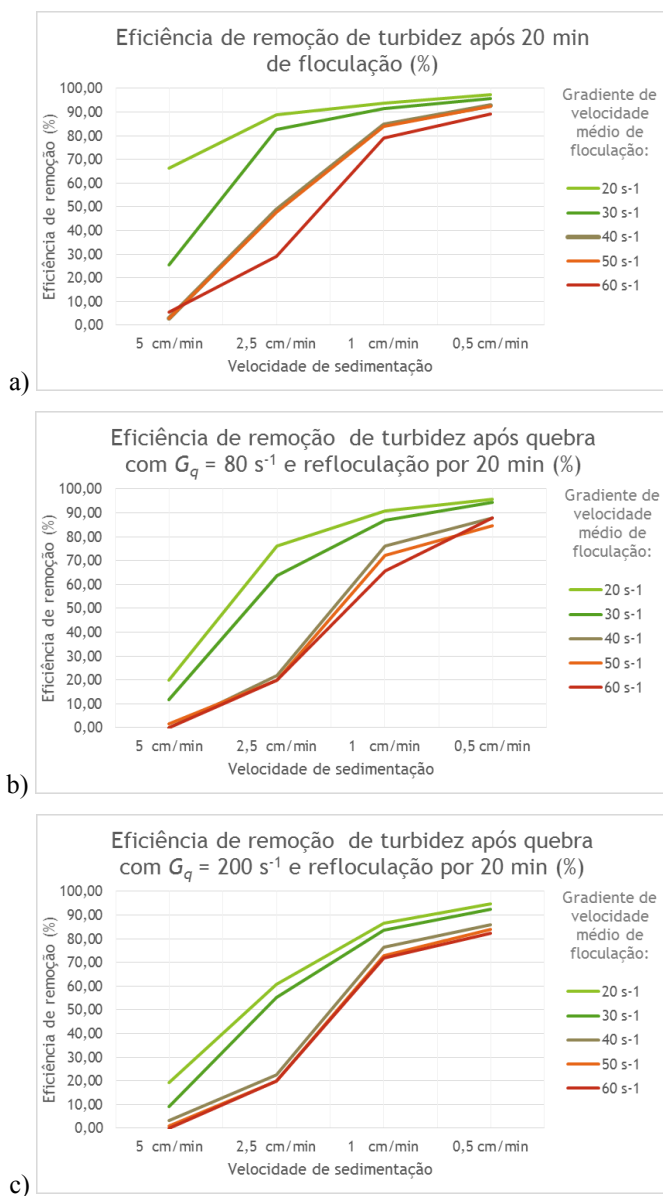
Apesar disso, nota-se nos gráficos que para maiores velocidades de sedimentação, a remoção antes da ruptura é efetivamente maior se comparada a ambos valores pós ruptura. Principalmente para as V_s de 5 e 2,5 cm/min. Como exemplo, o $G_f = 20$ s^{-1} , que apresenta eficiência de remoção de 66,4% para $V_s = 5$ cm/min, essa porcentagem cai para 20% e 19,2% após ruptura de 80 s^{-1} e 200 s^{-1} , respectivamente. Já para $V_s = 0,5$ cm/min, nota-se que para os três ensaios a eficiência de remoção é similar, sendo de 97,24%, 95,74% e 94,76% para os ensaios antes da ruptura, após ruptura de 80 s^{-1} e pós ruptura de 200 s^{-1} , nesta ordem.

Com isso observa-se que os flocos que são submetidos à ruptura induzida sofreram alterações em sua estrutura, necessitando de maior tempo para decantarem, pois apresentaram-se menores e mais leves. Ainda, percebe-se que o gradiente de velocidade de ruptura interfere diretamente na remoção de turbidez, para todas as velocidades de sedimentação a eficiência de remoção mostrou-se menor para o G_q de maior velocidade, com poucas exceções. Provavelmente, isso pode ser explicado pela atuação de maiores taxas de ruptura, que promovem a ruptura dos flocos em tamanhos gradativamente menores.

À vista disso, os decantadores das ETAs que são operadas com sobrecarga de vazão, com velocidade de sedimentação normalmente acima de 2,5 cm/min, estão mais suscetíveis a sofrer os efeitos da ruptura dos flocos, e consequentemente o aumento da turbidez remanescente do sobrenadante na etapa de decantação.

Os gráficos da Figura 29 mostram a influência do gradiente de velocidade de floculação na eficiência de remoção.

Figura 29 – Comparativo de eficiência de remoção de turbidez para distintos gradientes de velocidade médio na floculação e refloculação: (a) após 20 min de floculação, sem ruptura dos flocos; (b) após 20 min de refloculação com ruptura induzida de 80 s^{-1} ; (c) após 20 min de refloculação com ruptura induzida de 200 s^{-1}



Fonte: A Autora (2018)

As Figuras 28 e 29 mostram que com o $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ a eficiência de remoção da turbidez se apresentou maior que os demais G_f para os três ensaios realizados, e foi decrescendo conforme

o aumento do G_f . A partir do $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ a perda da eficiência foi cada vez menor, exibindo aproximação dos resultados entre os gradientes de velocidade média de floculação de 40, 50 e 60 s^{-1} .

Além disso, com o aumento do G_f , houve perda da capacidade de sedimentação rápida, principalmente para a $V_s = 2,5 \text{ cm/min}$, mesmo para os flocos que não sofreram ruptura induzida, neste caso, este efeito é melhor observado para a $V_s = 5 \text{ cm/min}$. Isso justifica-se pela deficiência na formação de flocos grandes conforme o aumento do G_f , assim como estudo realizado por Oliveira et al., 2015b. Além de que, agitações mais lentas não possuem energia suficiente para manter os flocos suspensos, ocasionando uma sedimentação melhor e mais rápida.

Em suma, há perda de remoção com o aumento do gradiente de floculação e refloculação, bem como com a elevação da velocidade de sedimentação. Ressalta-se que, para este estudo com água de turbidez elevada, após a ruptura dos flocos ocorre perda da eficiência de remoção de turbidez, principalmente para a $V_s = 2,5 \text{ cm/min}$, como observado na Figura 28 (a, b, c, d), que dentre as velocidades de sedimentação estudadas, é a que melhor representa projetos reais de decantadores em ETAs. Além de que, este efeito (perda da eficiência de remoção após ruptura induzida para $V_s = 2,5 \text{ cm/min}$) ficou bastante evidente na Figura 29 (b, c) para os $G_f = 40, 50$ e 60 s^{-1} .

Todavia, nota-se que mesmo após submetidos à ruptura induzida, os flocos que passaram pelo processo de refloculação apresentaram capacidade, ainda que reduzida, de reorganização e agregação, possibilitando a remoção por sedimentação.

Para menores velocidades de sedimentação, verifica-se, pela Figura 29, que a ação do aumento do G_f foi mais comprometedora para a eficiência de remoção do que a ocorrência da ruptura dos flocos, para ambos G_q avaliados. Por exemplo, para a $V_s = 0,5 \text{ cm/min}$, a eficiência de remoção de turbidez (sem ruptura) foi de 97,24% para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, porém, após ruptura utilizando-se gradiente médio de velocidade de 200 s^{-1} a remoção obtida foi de 94,76% e para $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$, a eficiência de remoção sem ruptura foi de 89,24%, ou seja, é possível inferir que o aumento do gradiente médio de floculação é mais expressivo nas alterações de sedimentabilidade dos flocos que a aplicação do gradiente de ruptura. Entretanto, esta afirmação apenas é válida caso haja tempo suficiente para recuperação dos tamanhos dos flocos, o que muitas vezes não ocorre em sistemas reais de tratamento de água.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES

A utilização do aluminato de sódio como coagulante promoveu a remoção da turbidez da água de estudo, mas foi mais eficiente para baixas velocidades de sedimentação, além de atuar em uma faixa estreita de pH. No entanto, com o aumento da concentração do coagulante, observou-se certa ampliação da faixa e elevação do pH capaz de propiciar a remoção da turbidez. Mas mesmo para baixas dosagens, o pH mínimo foi próximo a 7,5 e para altas dosagens, próximo a 9,2. Portanto, o aluminato de sódio atua como coagulante em meio alcalino.

Verificou-se que após ruptura induzida dos flocos, aumenta a incidência de flocos nas faixas de menores tamanhos e que conforme o aumento do gradiente de floculação (G_f) e refloculação (G_{rf}) também houve diminuição no tamanho dos flocos. Assim, quanto maior o gradiente de mistura, menor foi o tamanho médio do floco.

Após a mistura rápida (floculação) ou ruptura induzida (refloculação), os flocos continuam a agregação e há um aumento do tamanho até atingirem o patamar de estabilização.

A partir da avaliação do parâmetro β , foi possível verificar a tendência da formação de agregados menores para maiores agitações de mistura lenta, assim como na representação da curva de DTP com distribuição percentual das faixas de tamanho.

A inclinação da reta de ajuste do gráfico $\{\log(dp) \text{ versus } \log[\Delta N/\Delta(dp)]\}$ aumenta com elevação do gradiente de floculação, expressando β_1 (floculação) maior, em módulo, conforme maior for o G_f .

O β_2 apresentou-se sempre maior (em módulo) que seu respectivo β_1 , mostrando redistribuição da DTP para menores faixas de tamanho após ruptura induzida, ressaltando perda no tamanho dos flocos estáveis após ruptura. Porém o β_2 aumentou de forma inconstante com a elevação do G_{rf} , e apontou menor amplitude de dados, principalmente para experimentos com ruptura induzida de 200 s^{-1} . Portanto, o β_2 apresentou melhor resposta à ruptura induzida do que à variação do gradiente de floculação.

O Diâmetro estável (d) atingiu o patamar de estabilidade para maioria dos ensaios nos 10 minutos finais da floculação e da refloculação. O estudo a partir do parâmetro d , evidenciou que o aumento do gradiente de mistura lenta provoca a diminuição do diâmetro estável do floco.

O diâmetro estável do floco na refloculação (d_2) mostrou-se sempre menor que seu correspondente d_1 (diâmetro estável do floco na floculação), salientando a incapacidade de

recuperação total do tamanho do floco após a ruptura induzida. No entanto, o gradiente de floculação não interferiu, de maneira significativa na razão de recuperação dos flocos. Todavia, a taxa cisalhante de ruptura mais elevada (200 s^{-1}) limitou mais a recuperação do tamanho do floco se comparada à taxa de ruptura de 80 s^{-1} . Portanto, G_q mais elevados ocasionam em maior perda da capacidade de recuperação do tamanho do agregado.

A avaliação do diâmetro estável ' d ' mostrou este parâmetro mais representativo para avaliar o comportamento dos flocos, se comparado ao parâmetro β .

Inversamente ao comportamento do d , quanto maior o gradiente de floculação/refloculação, maior foi o fator de resistência (FR) do floco e a força do floco (σ). Cálculos experimentais e cálculos teóricos responderam proporcionalmente à elevação do G_f/G_{rf} .

Naturalmente, a remoção mais eficaz de turbidez por sedimentação aconteceu antes da ruptura induzida. Após a ruptura houve a perda da eficiência de remoção de impurezas.

O gradiente de velocidade de ruptura interfere diretamente na remoção de turbidez. Para todas as velocidades de sedimentação a eficiência de remoção mostrou-se menor para o G_q de maior intensidade. Com isso, observou-se que os flocos submetidos à ruptura induzida sofreram alterações em sua estrutura, necessitando de maior tempo para sedimentarem, em função da redução de tamanho, considerando inalteradas as densidades dos flocos.

Conforme o aumento do gradiente de velocidade de floculação e de refloculação houve maior perda da capacidade de remoção de turbidez. Isso justifica-se pela deficiência na formação de flocos com boas características de sedimentabilidade em função do aumento do G_f .

Assim, há perda de remoção com o aumento do gradiente de floculação e refloculação, do gradiente de ruptura, bem como com a elevação da velocidade de sedimentação.

Portanto, apesar dos flocos apresentarem maior força e resistência à ruptura com o aumento do gradiente de floculação, a capacidade de sedimentação foi diminuída, devido ao tamanho do floco ser menor com a elevação do G_f , evidenciando que a dimensão é mais influente na separação sólido-liquido do que a força do floco.

De forma geral os melhores resultados foram obtidos para o gradiente de floculação 20 s^{-1} conforme observado por Oliveira et al. (2015c).

REFERÊNCIAS

- 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. 2017
- AMIRTHARAJH, A.; MILLS, K. M. **Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation**. Journal of the American Water Works Association, v. 74. n. 4, p. 210-216, 1982. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/41271001>>. Acesso em: 18 jan. 2018. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1982.tb04890.x>
- AMIRTHARAJH, A. **Tecnologias para tratamento de águas de abastecimento – The mechanisms of coagulation**. 20p. Jul, 1989.
- AMIRTHARAJAH, A.; O'MÉLIA, C. R. **Coagulation Processes: Destabilisation, Mixing and Flocculation**. In: Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies. MacGraw-Hill, New York, p. 269-365, 1990.
- ARATROP. **Aluminato de sódio industrial**. 2018. Produtos para tratamento de água. Disponível em: <<http://www.aratrop.com.br/conteudo/aluminato-de-sodio.html>>. Acesso em: 2 fev. 2018.
- ARBOLEDA, J. **Teoria y Practica de la Purificación Del Agua**. In: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – ACODAL, Colombia, 684p.1992.
- ARGAMAN, Y.; KAUFMAN, W. J. **Turbulence and flocculation**. JEED-ASCE. v.96 (5A2). p.223-241. 1970.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992.
- 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, 49–56, 1997. <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0084>
- BOLLER, M.; BLASER, S. **Particles under stress**. Water Sci. Technol. 37, 9–29. 1998. <https://doi.org/10.2166/wst.1998.0367>
- BONGIOVANI, M. C.; KONRADT-MORAES, L. C.; BERGAMASCO, R.; LOURENÇO, B. S. S.; TAVARES, C. R. G. **Os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável**. Acta Scientiarum Technology, v. 32, n. 2, p. 167 – 170, 2010. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v32i2.8238>
- BORGES, M. V. B. **Avaliação da eficiência de remoção de cor em função da distribuição de tamanho dos flocos e no fator de força**. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

- BORGES, M. V. B.; LOPES, V. S.; OLIVEIRA, A. L. **Avaliação da influência da concentração de cloreto férrico na sedimentabilidade de flocos**. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2018. (no prelo).
- BOUYER, D.; COUFORT, C.; LINÉ, A.; DO-QUANG, Z. **Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions**. Elsevier - Journal of Colloid and Interface Science, 292, p.413-428, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.06.011>
- BRAKALOV, L. B. **A connection between orthokinetic coagulation capture efficiency of aggregates and their maximum size**. Chemical Engineering Science. 42, 2373–2383. 1987. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(87\)80111-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(87)80111-2)
- 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. **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.
- CAMP, T. R.; STEIN, P.C. **Velocity gradient and internal work in fluid motion**. J. Boston Soc. Civil. Engs, 30, 1943.
- CESAMA. **Saneamento Básico**: Conceitos. Disponível em:
< <http://www.cesama.com.br/?pagina=saneamento>>. Acesso em: 13 nov. 2017.
- CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLOUS, G. **Water Treatment**: Principles and Design. 2nd ed. 2005.
- COUFORT, C. et al. **Analysys of floc size distributions in a mixing tank**. Chemical Engineering and Processing, Toulouse, v. 47, n. 3, p.287-294, mar. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.01.009>
- De JULIO, M.; RIBAS, A. B.; SILVA, B. L.; CUNHA, W. C. **Desenvolvimento de equipamento de monitoramento contínuo da floculação**. Revista DAE – Sabesp, São Paulo, SP, n. 200, p. 13-24, set./dez. 2015. <https://doi.org/10.4322/dae.2014.149>
- DI BERNARDO, L.; PATERNIANI, J. E. S. **Influência de descargas de fundo durante o funcionamento de instalações de filtração direta ascendente**. REVISTA DAE, v. 46, n.146, p. 290-297. 1986.
- DI BERNARDO, A. S. **Desempenho de sistema de dupla filtração no tratamento de água com turbidez elevada**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 281p. São Carlos. 2004.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2ed. 792 p. São Carlos: Rima. 2005.

- DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. – São Carlos: Editora LDIBE LTDA, 878 p. (Vol. 1).2008.
- DUTRA, R. H. de A. **Obtenção dos parâmetros cinéticos da floculação com utilização de técnica de análise por imagem**. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia.2017.
- ECKENFELDER Jr., W. W. **Industrial water pollution control**. 2ed. Singapura, Mc Graw- Hill Book Company, p. 84- 95. 1989.
- FRANCOIS, S. B. **Strength of aluminum hydroxide flocs**. Water Res. 21, 1023 – 1030. 1987. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(87\)90023-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(87)90023-6)
- FERRARI, T. N.; DE JULIO, M.; DE JULIO, T. S.; SOUSA JÚNIOR, W. C. **Estudos de tratabilidade das águas do Rio Paraíba do Sul que abastecem o município de São José dos Campos/SP**. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales, v. 5, n. 2, p. 45 – 58. 2012.
- GONÇALVES, L. S. M. **Evolução do diâmetro fractal de agregados formados a partir de água com baixa turbidez**. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia.2017.
- GREGORY, J.; YUKSELEN, M.A. **The reversibility of floc breakage**. International Journal of Mineral Processing, v. 73, p. 251-259, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00077-2)
- HE, W. et al. **Characteristic analysis on temporal evolution of floc size and structure in low-shear flow**. Water Research, Harbin, v. 46, n. 2, p.509-520, nov. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.040>
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (Org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. rev. e atual. – Belo Horizonte: Editora UFMG, 859 p. (Vol. 1).2006.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 218 p.2010.
- JARVIS P.; JEFFERSON B.; PARSONS, S. A. **Breakage, Regrowth and Fractal Nature of Natural Organic Matter Flocs**. Environmental Science e Technology, no. 39, p. 2307-2314. 2005. <https://doi.org/10.1021/es048854x>
- JARVIS P.; JEFFERSON B.; GREGORY, J.; PARSONS, S. A. **A review of floc strength and breakage**. Water Research, no. 39, 3121 – 3137. 2005a. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.022>
- JUNKER, B. **Measurement of bubble and pellet size distributions: past and current image analysis technology**. Bioprocess and Biosystems Engineering, v. 29, n. 3, p. 185-206, set. 2006. <https://doi.org/10.1007/s00449-006-0070-3>
- KIM, S.; MOON, B.; LEE, H. **Effects of pH and dosage on pollutant removal and floc structure during coagulation**. Microchemical Journal, v. 68, p. 197 – 203. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0026-265X\(00\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0026-265X(00)00146-6)

- LEENTVAAR, J.; REBHUN, M. **Strength of ferric hydroxide flocs**. Water Res. 17, 895 – 902. 1983. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90163-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90163-X)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.012>
- LIN, J.; HUANG, C.; PAN, J. R.; WANG, D. **Effect of Al(III) speciation on coagulation of highly turbid water**. Chemosphere, v. 72, p. 189 – 196, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.01.062>
- LOCI. **ImageJ**. University of Wisconsin-Madison. 2016. Disponível em: <<https://imagej.net/Welcome>>. Acesso em: 08 fev. 2018.
- LOPES, M. A. **Remoção de cor e turbidez utilizando ciclo completo com flotação: estudo em escala de bancada**. 2011. 192 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2011.
- LOPES, V. S.; SILVA, L. M. A.; OLIVEIRA, A. L. **Estudo da coagulação/floculação de água com turbidez na sedimentação e flotação por ar dissolvido**. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2018. (no prelo).
- MATSUO, T., UNNO, H. **Forces acting on floc and strength of floc**. J. Environ. Eng. ASCE 107, 527– 545. 1981.
- MCCURDY, K., CARLSON, K., GREGORY, D. **Floc morphology and cyclic shearing recovery: comparison of alum and polyaluminum chloride coagulants**. Water Research, 38, 486 – 494. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.10.005>
- MENDES, C. G. N. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1989.
- MENDES, Y. C. **Evolução da distribuição do tamanho de partículas na floculação de água de baixa turbidez**. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia. 2017.
- MORENO, P. **Emprego de técnica dedicada de análise de imagem na avaliação do produto GT no desempenho da floculação**. 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru. 2015.
- MORENO, P.; OLIVEIRA, A. L.; SILVA, P. A. G.; JULIO, M de; 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.

- 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. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522004000400005>
- MORUZZI, R. B. **Avaliação da influência da Distribuição do Tamanho de Partículas e do binômio de velocidade/tempo de detenção na zona de reação no desempenho da flotação com utilização de sonda ultrasônica e técnica de análise por imagem.** 240 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2005.
- MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. **Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro – RJ, v.12, n.3, p.273-283. jul./set. 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000300007>
- 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. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.784>
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; JULIO, M. D. **Equipamento de Monitoramento Contínuo da Flocculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração.** Revista DAE. n. 200, p. 25-36, set./dez. 2015. <https://doi.org/10.4322/dae.2014.150>
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; De JULIO, 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 Sanitária e Ambiental, v. 21, p. 1-8. 2016. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016144959>
- MÜHLE, K. **Floc stability in laminar and turbulent flow.** In: Dobias, B. (Ed.), Coagulation and Flocculation. Dekker, New York, pp. 355–390. 1993.
- NIKON CORPORATION [manual]. 2015. **Manual de referência Câmera Digital Nikon D5500.** Disponível em: < <http://downloadcenter.nikonimglib.com/pt-br/products/196/D5500.html>>. Acesso em: 04 fev. 2018.
- OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G.; JULIO, M de; MORUZZI, R. B. **Avaliação 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. de, MORENO, P., SILVA, P. A. G. da, JULIO, M. D.; 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. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1081833>

- OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G.; JULIO, M de; 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.; DUTRA, R. H. DE A.; JULIO, M de; MORUZZI, R. B. **Avaliação de parâmetros representativos da distribuição de tamanho de partículas presentes em coleções hídricas.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS. v. 20, n. 4, p. 1084-1092, out./dez. 2015c. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p1084-1092>
- OLIVEIRA, A. L. et.al. **Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter.** Journal Desalination and Water Treatment, v. 57, q. 36. 2016.
- OLIVEIRA, A. S. **Avaliação da morfologia e da distribuição do tamanho de partículas para pontos distintos do diagrama de coagulação/floculação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia. 2018.
- OLIVERA, A. S.; LOPES, V. S.; COUTINHO FILHO, U.; MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L. **Neural network for fractal dimension evolution.** Water Science and Technology. v. 78, n. 4, p. 795-802, set. 2018. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.349>
- OLIVEIRA, R. F. **Obtenção das constantes cinéticas de agregação e ruptura de flocos obtidos a partir de água com cor elevada.** 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia. 2018.
- 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 ensaios em reatores estáticos.** 165p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 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.
- PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada.** 216 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001.
- PROVEQUIM. **Aluminato de sódio.** 2015. Boletim técnico informativo de produto químico. Disponível em: <<http://www.provequim.com.br/projetos-e-equipamentos/>>. Acesso em: 2, fev. 2018.
- REN, Pangfei et al. **Analysis of floc morphology in a continuous-flow flocculation and sedimentation reactor.** Journal Of Environmental Sciences, [s.l.], v. 52, p.268-275, fev. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.04.007>

- RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. de. **Tratamento de água: Tecnologia atualizada**. – São Paulo: Editora Edgard Blücher, 332 p.1991.
- RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. – São Paulo: Blucher, 340 p.2009.
- RUSS, J. C. **The image processing handbook**. CRC Press.1992.
- SANTOS, H. R.; PRADO, G. S.; VIDAL, C. M. S.; MORUZZI, R. B.; CAMPOS, J. R. **Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. V.9, n.4, p.291-300. Out/Dez. 2004. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522004000400005>
- SANTOS, H. R. **Coagulação/precipitação de efluentes de reator anaeróbio de leito expandido e de sistema de lodo ativado precedido de reator UASB, com remoção de partículas por sedimentação ou flotação**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2006.
- SELHORST FILHO, O.; WIECHETECK, G. K.; ANDRADE FILHO, A. G.; DÖLL, M. M. R. **Otimização de parâmetros de classificação de água do sistema de tratamento de água de Ponta Grossa (PR)**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 3, n. 2, p. 35-46. 2011.
- SILVA, L. M. A. **Estudo de caso do tratamento de água do município de Araxá, MG**. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba. 2014.
- 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.
- SILVA, P. A. G. **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**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro. 2017.
- 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. 2017.
- SILVA, A. F. T.; OLIVEIRA, A. S.; LOPES, V. S.; MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L. **Acompanhamento da evolução da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) e da dimensão fractal no processo de floculação de água com cor elevada**. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2018. (no prelo).
- SMOLUCHOWSKI, M. V. **Versuch einer mathematischen theorie der koagulationskinetik kolloider Lösugen**. Zeitschrift fuer physikalische Chemie, v. 92, p. 129-168.1917. <https://doi.org/10.1515/zpch-1918-9209>

- SNODGRASS, W. J.; CLARK, M. M.; O'MELIA, C. R. **Particle formation and growth in dilute aluminum (III) solutions: Characterization of particle size distributions at pH 5.5**. Water Research, 18, 479 – 488. 1984. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(84\)90157-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(84)90157-X)
- SUN PRODUTOS QUÍMICOS LTDA. (SUNQUÍMICA). **SUN FLOC 40 AE: Aluminato de sódio**. Uberlândia, 8 p. FISPQ – Ficha de informações de segurança de produtos químicos. 8 nov. 2010.
- VIANNA, M. R. **Hidráulica Aplicada às estações de tratamento de água**. 3. Ed. - Belo Horizonte: Imprimatur, 576p.:Il. 1997.
- VOLTAN, P. E. N. 2007. **Avaliação da ruptura e do recrescimento de flocos na eficiência de sedimentação em água com turbidez elevada**. 113p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007.
- YEUNG, A. K., PELTON, R. **Micromechanics: a new approach to studying the strength and breakup of flocs**. Journal of Colloid and Interface Science, 184, 579 – 585. 1996. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0654>
- YEUNG, A. K.; GIBBS, A.; PELTON, R. P. **Effect of shear on the strength of polymer-induced flocs**. Journal of Colloid and Interface Science, 196, 113–115. 1997. <https://doi.org/10.1006/jcis.1997.5140>
- YU, W.; GREGORY, J.; CAMPOS, L. **Breakage and Regrowth of Al-Humic Flocs – Effect of additional Coagulant Dosage**. Environmental Science e Technology, no. 44. 2010. <https://doi.org/10.1021/es1007627>
- YU, W.; GREGORY, J.; CAMPOS, L.; GRAHAM, N. **Dependence of floc properties on coagulant type, dosing mode and nature of particles**. Water Research 68, p 119-126. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.09.045>
- YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. **Breakage and re-formation of alum flocs**. Environmental Engineering Science, n.4, v.19, p.229-236. 2002. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.09.045>
- YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. **The reversibility of flocs breakage**. Internacional Journal of Mineral Processing, v. 73, no. 2-4, p. 251-259. 2004. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00077-2)
- YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. **The effect of rapid mixing on the break-up and re-formation of flocs**. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, v.79, p.782-788. 2004a. <https://doi.org/10.1002/jctb.1056>
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global water supply and sanitation assessment**. 2000 report. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/globassessment/Global1.htm>. Acesso em: 13 dez. 2014.

ZHANG, X. H.; ZHONG, R. S.; LI, X. Y.; LAM, K. M.; XIAO, F. **PIV Characterisation of flocculation dynamics and floc structure in water treatment**. Elsevier. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 379, 27–35. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.053>

APÊNDICE A

RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA CONSTRUÇÃO DOS DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

Resultados dos ensaios para 10 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 10 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante		pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)			Molaridad e	5	2,5	1,0		0,5
		HCl	NaOH			cm/min 1,24'	cm/min 2,48'	cm/min 7'		cm/min 14'
6,65	50,8	1,7		0,5M	4,75	47,1	46,6	45,2	45,5	
6,65	50,8	1,4		0,5M	5,12	48,7	47,8	45,5	46,4	
	52	1,5		0,5M	5,22	49,9	48,4	47	45,5	
6,65	50,8	1,2		0,5M	5,83	48,7	45,6	45,4	45,2	
6,65	50,8	1		0,5M	6,62	45,9	45,2	44	43,4	
	52	1		0,5M	7,03	49,1	48,8	45,4	44,3	
6,65	50,8	0,75		0,5M	7,23	46,5	45,8	45,2	43,2	
	52	0,5		0,5M	7,68	46,6	40	35,6	20,2	F
6,65	50,8	0,5		0,5M	8,08	45,5	41,9	39,6	26	F
	52			/	8,2	53,9	49,2	46,9	43,4	
6,65	50,8	0,1		0,1M	8,56	47,6	47,6	48	44,3	
6,65	50,8			/	9,23	47	46,9	45,6	45,1	

Resultados dos ensaios para 20 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 20 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante			pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)		Molaridad e		5	2,5	1,0	0,5	
		HCl	NaOH			cm/min 1,24'	cm/min 2,48'	cm/min 7'	cm/min 14'	
6,65	50,8	2,2		0,5M	5,12	48,8	48	46,6	44	
6,65	50,8	2,1		0,5M	5,18	47,4	47	46,5	45,8	
6,65	50,8	2		0,5M	5,73	46,7	46,2	45,7	45,1	
6,65	50,8	1,9		0,5M	6,05	48,8	47,5	47,3	46,2	
6,65	50,8	1,8		0,5M	6,22	48,8	45,8	45,3	45	
6,65	50,8	1,7		0,5M	6,8	46,2	44,7	44,4	43,2	
6,65	50,8	1,6		0,5M	7,18	49,8	48	46,3	43,8	
	52	1,5		0,5M	7,34	45,4	40,1	40	32,5	
	52	0,5		0,5M	7,43	46,7	45,2	44,9	42,4	
	52	1		0,5M	7,92	33,4	11	6,21	4,08	F
5,91	50,2	0,75		0,5M	8,47	20,7	5,96	7,79	2,96	F
5,91	50,2	0,5		0,5M	8,67	48,2	46,6	45,7	45,9	
	52	/	/	0,5M	8,7	51,5	45	44	43,6	
5,91	50,2	/	/	0,5M	9,7	48,8	47,9	44,6	43,8	
6,65	50,8	/	/	0,5M	9,77	48,8	45,3	45	44,8	

Resultados dos ensaios para 30 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 30 mg/L										
Água de estudo	Acidificante/Alcalinizante			pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)			Molaridade	5	2,5	1,0		0,5
		HCl	NaOH			cm/min	cm/min	cm/min		cm/min
pH					1,24'	2,48'	7'	14'		
6,65	50,8	4		0,5M	4,82	50	48,1	47,9	47,5	
6,65	50,8	3,5		0,5M	4,9	49,9	46,9	46,2	44,3	
7,04	50,8	3,5		0,5M	4,95	47,2	46,7	47	46,2	
7,04	50,8	3,25		0,5M	5,01	47,5	47	46,8	45,9	
6,65	50,8	3		0,5M	5,2	49,2	47,2	46,8	43,1	
7,04	50,8	3		0,5M	5,33	48,7	48,1	48	46,4	
5,91	50,2	2		0,5M	6,14	47,7	50	51,8	51,1	
7,04	50,8	2,75		0,5M	6,21	50,2	48	47,1	47	
6,65	50,8	2,5		0,5M	6,94	47,2	46,8	45,2	40,6	
5,91	50,2	1,75		0,5M	7,51	51	48,4	47,6	46,4	
6,65	50,8	2		0,5M	8,04	30,5	7,57	3,76	2,36	F
5,91	50,2	1,5		0,5M	8,2	16,5	2,28	2,26	0,39	F
6,65	50,8	1,5		0,5M	8,42	18,4	8,94	2,43	2,27	F
6,65	50,8	1		0,5M	8,78	51,4	46,9	46,2	45,6	
6,65	50,8	0,5		0,5M	9,61	51,9	47,4	46,2	45,7	

Resultados dos ensaios para 40 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 40 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante		pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)			Molaridad e	5	2,5	1,0		0,5
		HCl	NaOH			cm/min 1,24'	cm/min 2,48'	cm/min 7'		cm/min 14'
7,04	50,8	4,5		0,5M	4,93	49	48,3	46,1	45,2	
7,04	50,8	4		0,5M	5,13	49,3	47,4	46,8	46,1	
6,95	50,8	3,7		0,5M	5,42	54,7	54,4	53,7	52,5	
6,95	50,8	3,5		0,5M	6,14	53,4	53,7	52,9	49,9	
7,04	50,8	3,5		0,5M	6,26	47,3	47,9	47,1	46,5	
6,95	50,8	3,3		0,5M	6,75	51,6	50,8	48,7	48,5	
6,95	50,8	3,1		0,5M	7,3	49	47,2	42,4	40	
7,04	50,8	3		0,5M	7,77	40	4,38	3,37	1,89	F
7,04	50,8	2,5		0,5M	8,29	39	6,04	4,55	2,53	F
7,04	50,8	2		0,5M	8,57	22,1	6,8	6,11	3,8	F
7,04	50,8	1,5		0,5M	8.75	48,8	46,8	46,2	45	
7.04	50.8	1		0.5M	9.27	48.2	45.7	47.6	45.6	

Resultados dos ensaios para 50 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 50 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante		pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)			Molaridade	5	2,5	1,0		0,5
		HCl	NaOH			cm/min	cm/min	cm/min		cm/min
					1,24'	2,48'	7'	14'		
5,91	50,2	4		0,5M	5,01	53,4	50,9	48	47	
6,94	50,2	5		0,5M	5,02	49	48,9	48,6	47,6	
6,94	50,2	4,75		0,5M	5,11	50,7	50	49,2	48,2	
5,91	50,2	3,6		0,5M	5,2	48,3	48,7	49,8	49,9	
6,94	50,2	4,5		0,5M	5,4	50,4	50,2	49,2	48,7	
5,91	50,2	3,25		0,5M	6,4	48,1	47,2	44,5	43,4	
6,95	50,8	4,2		0,5M	6,67	49,6	48,2	46,5	45,7	
6,94	50,2	4		0,5M	6,99	49,5	49,3	48,1	42,3	
6,95	50,8	3,8		0,5M	7,47	40	9,35	6,68	4,97	F
6,95	50,8	3,4		0,5M	8,22	42,5	9,72	8,84	2,24	F
6,95	50,8	3		0,5M	8,48	40	10,3	5,31	2,02	F
6,95	50,8	2,7		0,5M	8,66	30,3	5,51	2,85	1,73	F
6,95	50,8	2,3		0,5M	8,82	20,6	6,26	4,18	3,66	F
6,95	50,8	1,9		0,5M	8,96	49,6	48,2	47	46,2	
6,95	50,8	1,5		0,5M	9,34	48,2	48,3	47,8	45,9	

Resultados dos ensaios para 60 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 60 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante		pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)			Molaridad e	5	2,5	1,0		0,5
		HCl	NaOH			cm/min 1,24'	cm/min 2,48'	cm/min 7'		cm/min 14'
5,58	50,9	4		1M	4,73	49,1	48,9	43,6	44,8	
5,58	50,9	3,5		1M	4,8	47,3	47,3	45,2	45	
5,58	50,9	7		0,5M	4,83	47,4	46,6	46,2	45,2	
5,58	50,9	3		1M	4,91	49,9	49,9	49,2	48	
5,58	50,9	6		0,5M	4,95	45,7	45,6	45,6	44,6	
5,91	50,2	4,75		0,5M	5	48	46	45	48,8	
5,58	50,9	5		0,5M	5,47	49,7	46,7	42,6	42,3	
5,58	50,9	2,5		1M	5,64	47,8	46	45,5	45	
5,58	50,9	4,8		0,5M	6,58	49	48,8	46,3	44,3	
5,58	50,9	4,6		0,5M	7,11	49,5	48,4	47,2	46,3	
5,58	50,9	4,5		0,5M	7,55	49,6	49,6	48	47,5	
5,58	50,9	4,4		0,5M	8	28,8	7,02	4,47	1,79	F
5,58	50,9	4,2		0,5M	8,22	30,2	4,82	2,08	1,93	F
6,94	50,2	4		0,5M	8,31	40	10	5,16	2,11	F
5,58	50,9	4		0,5M	8,5	33,9	7,48	2,26	2,78	F
6,94	50,2	3,5		0,5M	8,61	39,5	7,02	6,43	2,45	F
6,94	50,2	3		0,5M	8,79	30,3	5,35	4,52	2,76	F
6,94	50,2	2,5		0,5M	8,96	40	28	22,8	22,3	

Resultados dos ensaios para 70 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 70 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante		pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)			Molaridad e	5	2,5	1,0		0,5
		HCl	NaOH			cm/min 1,24'	cm/min 2,48'	cm/min 7'		cm/min 14'
5,58	50,9	7		0,5M	4,78	51,3	49,8	48,9	49,4	
5,58	50,9	6,5		0,5M	4,82	50,6	49,4	47,7	47,8	
5,58	50,9	5,25		0,5M	5,08	49,8	50,9	48,9	47,3	
5,99	49,9	4,75		0,5M	5,52	51,2	50	49,7	47	
6,11	49,6	4,82		0,5M	5,76	50,9	50,1	50,6	49,4	
5,99	49,9	4,5		0,5M	6,4	51,5	50,4	49,4	48,9	
6,11	49,6	4,65		0,5M	6,54	49,8	48,5	46,3	45	
5,99	49,9	4,45		0,5M	7,31	48	47,4	47,1	45,8	
5,99	49,9	4,4		0,5M	7,58	48,6	46,5	50,4	48,6	
6,11	49,6	4,5		0,5M	7,62	49,3	48,3	48,4	48,1	
5,99	49,9	4,3		0,5M	8	25,9	4,64	1,45	0,24	F
5,99	49,9	4,2		0,5M	8,12	27,6	4,19	1,71	0,43	F
5,99	49,9	4,1		0,5M	8,28	33,4	6,61	1,85	0,24	F
5,99	49,9	4		0,5M	8,38	40	8,95	3,78	1,21	F
5,58	50,9	4,5		0,5M	8,49	40	10,8	4,99	1,87	F
5,58	50,9	6*		0,5M	8,61	46,3	14,8	5,96	3,09	
5,99	49,9	3,5		0,5M	8,68	40	15,5	2,9	0,98	F
5,58	50,9	3,5		0,5M	8,83	40	7,78	4,87	1,35	F
5,58	50,9	2,5		0,5M	9,07	48,1	47,7	46,1	46,6	

Resultados dos ensaios para 75 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 75 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante		pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)			Molaridad e	5	2,5	1,0		0,5
		HCl	NaOH			cm/min	cm/min	cm/min		cm/min
					1,24'	2,48'	7'	14'		
6,09	50,4	5,75		0,5M	5,03	51,1	52,2	48,4	47	
6,09	50,4	5,5		0,5M	5,15	50,9	50,8	49,3	48,7	
6,09	50,4	5,25		0,5M	5,33	49,7	49	48,1	46	
6,09	50,4	5,1		0,5M	5,83	49,9	49,5	49,6	47,9	
6,09	50,4	5,05		0,5M	6,11	49	48,8	47,9	47,4	
6,09	50,4	5		0,5M	6,71	53,5	49,7	46,4	44,6	
6,09	50,4	4,9		0,5M	7,17	49,9	47,8	47,3	47	
6,09	50,4	4,8		0,5M	7,61	49,2	49,1	47,6	43,8	
6,09	50,4	4,6		0,5M	8,13	35,5	6,81	3,54	0,3 F	
6,09	50,4	4		0,5M	8,62	40	9,23	3,41	0,89 F	
6,09	50,4	3		0,5M	8,97	34,3	6,34	3,3	0,59 F	
6,09	50,4	2		0,5M	9,59	51,6	50,6	48,6	48,2	

Resultados dos ensaios para 80 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 80 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante		pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)			Molaridad e	5	2,5	1,0		0,5
		HCl	NaOH			cm/min 1,24'	cm/min 2,48'	cm/min 7'		cm/min 14'
5,99	49,9	6		0,5M	5,03	49,8	49,6	49	47,8	
5,99	49,9	5,75		0,5M	5,19	49,3	49	48,7	47,4	
5,99	49,9	5,5		0,5M	5,32	49,7	46,9	45,3	43,5	
5,78	50,9	5,5		0,5M	5,36	42,6	47,6	47,1	48	
6,11	49,6	5,5		0,5M	5,71	50,9	50,1	50,9	49,1	
5,78	50,9	5,4		0,5M	5,85	49,8	47,8	46,9	45,8	
5,91	50,2	5,3		0,5M	6,09	59,8	53,1	53,8	49	
6,11	49,6	5,3		0,5M	6,94	50,5	50,6	49,8	49,9	
5,78	50,9	5,2		0,5M	7,15	49,9	47,3	47,1	46,5	
5,91	50,2	5,15		0,5M	7,17	48,9	49,2	48,9	48,7	
5,78	50,9	5		0,5M	7,61	52,1	50,2	48,3	46,8	
5,99	49,9	5		0,5M	7,65	39,7	10,3	5,65	3,26	F
5,78	50,9	4,85		0,5M	8,16	37,8	6,07	0,58	0,18	F
5,78	50,9	4,5		0,5M	8,43	40	8,24	4,16	1,12	F
5,99	49,9	4,5		0,5M	8,44	40	7,55	3,02	0,89	F
5,99	49,9	4		0,5M	8,67	37,8	8,14	4,07	1,44	F
5,99	49,9	3,5		0,5M	8,83	37,6	6,11	0,61	1,38	F
5,78	50,9	3,5		0,5M	8,87	40	8,25	2,94	0,99	F
5,78	50,9	2,9		0,5M	9,04	31,5	6,38	1,4	1,3	F
6,09	50,4	2		0,5M	9,55	50,9	48,6	47,4	47,2	

Resultados dos ensaios para 85 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 85 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante		pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)			Molaridade e	5	2,5	1,0		0,5
		HCl	NaOH			cm/min 1,24'	cm/min 2,48'	cm/min 7'		cm/min 14'
6,1	49,4	6		0,5M	5,34	47,4	46	44,3	43,9	
6,1	49,4	5,8		0,5M	5,56	49	43	41,9	41	
6,1	49,4	5,7		0,5M	5,94	44,3	43,6	41,7	41	
6,1	49,4	5,6		0,5M	6,76	45,3	45,1	43,9	40	
6,1	49,4	5,5		0,5M	6,87	48,1	45,9	43,1	40,9	
6,1	49,4	5,4		0,5M	7,33	48,2	42,9	42,8	40	
6,1	49,4	5,3		0,5M	7,83	34,7	8,69	3,35	2,29	F
6,1	49,4	5,2		0,5M	8,14	39,8	8,49	1,76	0,83	F
6,1	49,4	5		0,5M	8,35	40	9,46	2,04	0,64	F
6,1	49,4	4		0,5M	8,9	40,8	17,1	5,85	0,69	F
6,1	49,4	3		0,5M	9,11	34	7,32	2,05	0,57	F
6,11	49,6	2		0,5M	9,62	49,3	48,4	48	47,7	
6.1	49.4	1.75		0.5M	9.94	40.6	40.2	40	40	

Resultados dos ensaios para 90 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 90 mg/L										
Água de estudo	Acidificante/Alcalinizante			pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
	pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)		Molaridad e	5	2,5	1,0		0,5
HCl			NaOH	cm/min 1,24'		cm/min 2,48'	cm/min 7'	cm/min 14'		
5,92	50,9	7,3		0,5M	4,91	47,6	47,8	46,8	45,9	
5,92	50,9	6,5		0,5M	5,15	51,2	49,7	49,9	47,8	
5,92	50,9	6,2		0,5M	5,43	48,6	48,2	47,8	46,1	
5,92	50,9	6		0,5M	6,11	49,1	48,9	48,3	47,6	
6,11	49,6	6		0,5M	6,25	52,9	49,8	49,1	48,5	
5,92	50,9	5,9		0,5M	6,54	47,7	50,1	49,3	47,2	
6,11	49,6	5,9		0,5M	7,17	50	49,3	49	47,5	
5,92	50,9	5,8		0,5M	7,28	49,6	48,8	48,1	47,2	
6,11	49,6	5,8		0,5M	7,51	49,3	48,4	48,9	46	
5,92	50,9	5,6		0,5M	7,83	33,8	5,03	1,23	0,26	F
5,78	50,9	5,5		0,5M	7,97	32,3	3,99	2,87	0,97	F
6,11	49,6	5,55		0,5M	8,05	31,4	5,49	3,86	1,98	F
5,92	50,9	6,9		0,5M	8,17	40	5,69	1,39	0,1	F
5,92	50,9	5,4		0,5M	8,38	40	6,16	2,21	1,71	F
5,78	50,9	5		0,5M	8,51	34,4	5,56	3,55	1,18	F
5,78	50,9	4,5		0,5M	8,74	40	11,4	4,34	1,53	F
5,78	50,9	3,5		0,5M	8,97	40	5,37	3,68	0,69	F
6,09	50,4	3		0,5M	8,99	21,2	5,76	3,78	1,65	F
6,09	50,4	2		0,5M	9,86	51	49,4	49,8	47,5	

Resultados dos ensaios para 95 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 95 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante		pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos	
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)			Molaridad e	5	2,5	1,0		0,5
		HCl	NaOH			cm/min 1,24'	cm/min 2,48'	cm/min 7'		cm/min 14'
6,22	49,6	7,5		0,5M	5	54	50,4	49	52,1	
6,22	49,6	7		0,5M	5,14	50,9	51,4	51,3	50,8	
6,22	49,6	6,5		0,5M	5,59	52,7	51,9	49,2	49	
6,22	49,6	6,35		0,5M	6,29	50,5	50,7	48,2	50,9	
6,22	49,6	6,25		0,5M	6,63	52,4	50,5	49,8	49,4	
6,22	49,6	6,2		0,5M	6,96	50,5	49,1	50,6	50,3	
6,22	49,6	6,1		0,5M	6,97	49,1	49,1	50,5	49,4	
6,11	49,6	6,05		0,5M	7,72	42,8	40	22	14	F
6,22	49,6	6		0,5M	7,8	40	16,2	5,19	3,81	F
6,09	50,4	5,7		0,5M	8,23	40	7,47	4,04	1,28	F
6,11	49,6	5,5		0,5M	8,5	45,9	14,8	4,32	1,7	F
6,11	49,6	4,9		0,5M	8,8	40	11,9	4,61	0,8	F
6,11	49,6	4,2		0,5M	9,01	40,1	13,2	6,8	0,95	F
5,91	50,2	3		0,5M	9,16	28,2	9,03	5,22	2,41	F
6,11	49,6	3,5		0,5M	9,18	40	7,05	1,84	0,95	F
5,91	50,2	2,75		0,5M	9,34	47,7	46,8	46,5	45,8	
6,09	50,4	2		0,5M	9,93	50,5	50	48,7	48,2	
5,91	50,2	2		0,5M	10,1	52,2	47,3	49,3	43,4	

Resultados dos ensaios para 100 mg/L de dosagem de coagulante

Aluminato de Sódio (20 g/L) - Dosagem 100 mg/L										
Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante			pH de coagulação	Turbidez remanescente				Formação de flocos
pH	Turbidez (UNT)	Dosagem (ml)		Molaridad e		5	2,5	1,0	0,5	
		HCl	NaOH			cm/min 1,24'	cm/min 2,48'	cm/min 7'	cm/min 14'	
5,92	50,9	7,6		0,5M	5	50,1	50,2	49,5	46,2	
5,92	50,9	7,25		0,5M	5,21	48,2	50	46,2	45,3	
5,92	50,9	7		0,5M	5,27	50,4	50,2	48	50,8	
5,92	50,9	6,75		0,5M	5,96	50,3	51,8	47,7	46,1	
5,92	50,9	6,6		0,5M	6,34	47,1	47,5	47,4	46,3	
6,11	49,6	6,55		0,5M	6,84	50,5	48,8	47,6	46,6	
5,92	50,9	6,4		0,5M	7,31	47,2	45,8	44,1	43,7	
5,92	50,9	6,25		0,5M	7,74	25,4	3,56	2,54	0,63	F
5,92	50,9	6,1		0,5M	8,09	40	8,75	2,36	0,65	F
5,92	50,9	5,75		0,5M	8,41	44,5	11,5	2,28	0,99	F
5,92	50,9	5		0,5M	8,74	40	10,4	2,27	1,1	F
5,92	50,9	4		0,5M	8,97	37,8	7,56	2,57	0,63	F
6,09	50,5	3,5		0,5M	9,09	33,4	5,78	2,48	2,17	F
6,09	50,5	2,5		0,5M	9,63	50,3	49	48,3	48,2	

APÊNDICE B

RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE TURBIDEZ REMANESCENTE DO SOBRENADANTE DAS AMOSTRAS COLETAS DURANTE PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO

Tabela B.1 - Resultados de turbidez remanescente dos ensaios com $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$

Gradiente de velocidade de floculação - 20 s^{-1}											
Coleta do sobrenadante	Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante			pH coag.	Coagulante Aluminato de Sódio (20g/L)	Turbidez remanescente (UNT)			
	pH	Turb. Inicial	Dosagem (ml)		Mol.			5 cm/min	2,5 cm/min	1,0 cm/min	0,5 cm/min
	(UNT)	(UNT)	HCl	NaOH			Dosagem (mg/L)	1,24'	2,48'	7'	14'
Após 20 min. de floculação	5,8	49,9	4,25	-	0,5 M	8,26	70	16,80	5,50	3,09	1,38
Após ruptura de 80 s^{-1} e 20 min. de refloculação	5,8	49,9	4,25	-	0,5 M	8,26	70	40,00	12,00	4,56	2,13
Após ruptura de 200 s^{-1} e 20 min. de refloculação	5,75	50,7	4,25	-	0,5 M	8,24	70	40,40	19,60	6,78	2,62

Tabela B.2 - Resultados de turbidez remanescente dos ensaios com $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$

Gradiente de velocidade de floculação - 30 s^{-1}											
Coleta do sobrenadante	Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante			pH coag.	Coagulante Aluminato de Sódio (20g/L)	Turbidez remanescente (UNT)			
	pH	Turb. Inicial	Dosagem (ml)		Mol.			5 cm/min	2,5 cm/min	1,0 cm/min	0,5 cm/min
	(UNT)	(UNT)	HCl	NaOH			Dosagem (mg/L)	1,24'	2,48'	7'	14'
Após 20 min. de floculação	5,6	50,2	4,3	-	0,5 M	8,25	70	37,20	8,68	4,33	2,11
Após ruptura de 80 s^{-1} e 20 min. de refloculação	5,6	50,2	4,3	-	0,5 M	8,25	70	44,20	18,20	6,60	2,79
Após ruptura de 200 s^{-1} e 20 min. de refloculação	5,75	50,7	4,25	-	0,5 M	8,24	70	45,40	22,40	8,16	3,72

Tabela B.3 - Resultados de turbidez remanescente dos ensaios com $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$

Gradiente de velocidade de floculação - 40 s^{-1}											
Coleta do sobrenadante	Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante			pH coag.	Coagulante Aluminato de Sódio (20g/L)	Turbidez remanescente (UNT)			
	pH	Turb. Inicial	Dosagem (ml)		Mol.			5 cm/min	2,5 cm/min	1,0 cm/min	0,5 cm/min
	(UNT)		HCl	NaOH			Dosagem (mg/L)	1,24'	2,48'	7'	14'
Após 20 min. de floculação	5,8	49,9	4,25	-	0,5 M	8,20	70	48,50	25,70	7,71	3,55
Após ruptura de 80 s^{-1} e 20 min. de refloculação	5,8	49,9	4,25	-	0,5 M	8,20	70	50,50	39,10	11,90	6,11
Após ruptura de 200 s^{-1} e 20 min. de refloculação	5,75	50,7	4,25	-	0,5 M	8,24	70	48,40	38,80	11,80	7,00

Tabela B.4 - Resultados de turbidez remanescente dos ensaios com $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$

Gradiente de velocidade de floculação - 50 s^{-1}											
Coleta do sobrenadante	Água de estudo		Acidificante/Alcalinizante			pH coag.	Coagulante Aluminato de Sódio (20g/L)	Turbidez remanescente (UNT)			
	pH	Turb. Inicial	Dosagem (ml)		Mol.			5 cm/min	2,5 cm/min	1,0 cm/min	0,5 cm/min
	(UNT)		HCl	NaOH			Dosagem (mg/L)	1,24'	2,48'	7'	14'
Após 20 min. de floculação	5,8	49,9	4,25	-	0,5 M	8,26	70	48,60	26,20	7,96	3,80
Após ruptura de 80 s^{-1} e 20 min. de refloculação	5,8	49,9	4,25	-	0,5 M	8,26	70	49,20	40,00	13,90	7,63
Após ruptura de 200 s^{-1} e 20 min. de refloculação	5,75	50,7	4,25	-	0,5 M	8,24	70	49,50	40,00	13,60	7,98

Tabela B.5 - Resultados de turbidez remanescente dos ensaios com $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$

Gradiente de velocidade de floculação - 60 s^{-1}											
Coleta do sobrenadante	Água de estudo		Acidificante/ Alcalinizante			pH coag.	Coagulante Aluminato de Sódio (20g/L)	Turbidez remanescente (UNT)			
	pH	Turb. Inicial	Dosagem (ml)		Mol.			5 cm/min	2,5 cm/min	1,0 cm/min	0,5 cm/min
		(UNT)	HCl	NaOH			Dosagem (mg/L)	1,24'	2,48'	7'	14'
Após 20 min. de floculação	5,8	49,9	4,25	-	0,5 M	8,26	70	47,30	35,50	10,40	5,38
Após ruptura de 80 s^{-1} e 20 min. de refloculação	5,8	49,9	4,25	-	0,5 M	8,26	70	51,40	40,00	17,10	6,03
Após ruptura de 200 s^{-1} e 20 min. de refloculação	5,75	50,7	4,25	-	0,5 M	8,24	70	51,70	40,00	14,10	8,83