



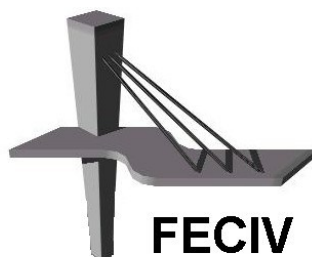
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA MORFOLOGIA E DA
DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS
PARA PONTOS DISTINTOS DO DIAGRAMA DE
COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO**

ALESSANDRA DA SILVA OLIVEIRA

UBERLÂNDIA, 09 DE MARÇO 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



Alessandra da Silva Oliveira

**AVALIAÇÃO DA MORFOLOGIA E DA DISTRIBUIÇÃO DO
TAMANHO DE PARTÍCULAS PARA PONTOS DISTINTOS
DO DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO**

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**.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

Uberlândia, 09 de março de 2018.

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

O48a
2018 Oliveira, Alessandra da Silva, 1992-
Avaliação da morfologia e da distribuição do tamanho de partículas para pontos distintos do diagrama de coagulação/floculação / Alessandra da Silva Oliveira. - 2018.
164 f. : il.

Orientador: André Luiz de Oliveira.

Coorientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1140>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Coagulação - Teses. 3. Floculação - Teses. 4. Análise de imagem - Teses. I. Oliveira, André Luiz de. II. Schmidt, Marcio Augusto Reolon. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



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

ATA Nº: 205/2018

CANDIDATO: Alessandra da Silva Oliveira

Nº. Matrícula: 11522ECV018

ORIENTADOR: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

TÍTULO: "Avaliação da morfologia e da distribuição do tamanho de partículas para pontos distintos do diagrama de coagulação/floculação".

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

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

PROJETO DE PESQUISA: Tratamento convencional e avançado de Água de Abastecimento e Residuíria

DATA DA DEFESA: 09 de março de 2018

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

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 09:00 - 12:00

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 PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Carlos Eugênio Pereira – FECIV/UFU; Rodrigo Braga Moruzzi – IGCE/UNESP e André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU** orientador do candidato. Ressalta-se que o **Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi** participou da defesa por meio de vídeo conferência desde a cidade de Rio Claro/SP e os demais membros da banca e a aluna participaram 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 APROVADO. 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.



Professor Orientador: **Prof. Dr. André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU**



Membro externo: **Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi – IGCE/UNESP**



Membro interno: **Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira – FECIV/UFU**

Uberlândia, 09 de março de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por conduzir meus caminhos e me permitir a realização de mais uma etapa em minha vida, com saúde e discernimento.

Agradeço aos meus queridos pais, Elizabeth e Dirceu, por todo o incentivo, força, atenção, amor e por fazerem o possível para seguir meu caminho. Sem o apoio de vocês, jamais chegaria tão longe. À minha família, que sempre torceram por mim. Agradeço também ao Andreive pelo apoio, amor, paciência nos momentos de ansiedade, compreensão e companheirismo.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, pela oportunidade e infraestrutura disponibilizada para realização deste trabalho de pesquisa.

Ao meu orientador, professor André Luiz, por todos os anos de orientação, apoio, empenho, confiança e ensinamento compartilhado para a realização deste e outros trabalhos. Por todo o tempo dedicado em me incentivar em progredir na pesquisa e carreira acadêmica. Foi um privilégio ser sua orientada.

Ao meu co-orientador, professor Marcio Schmidt, que se dispôs a ajudar sempre que necessário, pela orientação com sabedoria, ensinamentos e contribuições na realização desta pesquisa.

À técnica do laboratório de saneamento, Aline Martins, pela ajuda no manuseio de equipamentos, paciência e ensinamentos compartilhados.

Aos membros da banca de qualificação e de defesa, pelas valiosas sugestões e interesse na contribuição para o desenvolvimento e aperfeiçoamento deste trabalho.

A todos meus companheiros do grupo pesquisa, especialmente à Verônica Lopes e Adolfo Freitas, pela parceria, amizade e ajuda com os experimentos.

A todos os amigos, professores e funcionários da FECIV, que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa, por meio do Projeto nº 453912/2014-1, que possibilitaram a execução deste trabalho.

A todos vocês que contribuíram direta ou indiretamente, a minha gratidão!

“Assim como casas são feitas de pedras, a ciência é feita de fatos. Mas uma pilha de pedras não é uma casa e uma coleção de fatos não é, necessariamente, ciência”.

(Jules Henri Poincare)

Oliveira, A. S. Avaliação da morfologia e da distribuição do tamanho de partículas para pontos distintos do diagrama de coagulação/floculação. 164 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

RESUMO

A coagulação e floculação são etapas essenciais no tratamento de água para abastecimento público para a remoção das impurezas contidas. O conhecimento acerca da distribuição do tamanho de partículas (DTP) e suas características morfológicas é de grande valia para a compreensão dos mecanismos que envolvem a agregação e posterior remoção dos flocos. Neste contexto, o presente estudo teve como finalidade o acompanhamento da evolução da distribuição de tamanho e estrutura dos flocos formados em diferentes configurações químicas (diversos pares de pH de coagulação e dosagem de coagulante) durante o processo de floculação em águas com cor aparente elevada (100 ± 5 uH), utilizando-se sulfato de alumínio como coagulante, a partir da simulação laboratorial em equipamento de *Jar Test* submetida à oito gradientes de velocidade médio (20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 s^{-1}). A mensuração das partículas foi realizada pela técnica de análise de imagens digitais obtidas por método não intrusivo e não destrutivo, constituído de plano de luz gerado por um *laser* e câmera fotográfica de alta resolução, possibilitando a avaliação direta da dinâmica de crescimento e ruptura dos flocos. Os resultados de distribuição de partículas por faixas de tamanho indicaram que a condição química de coagulação interfere na evolução da DTP, constatando que a formação de agregados maiores ocorre mais rapidamente em regiões compreendidas pelo mecanismo de varredura do que pela neutralização de cargas. O aumento gradual da taxa de cisalhamento promoveu a ruptura dos flocos, acarretando na distribuição mais concentrada nas menores faixas de tamanho, que foi praticamente inalterada para gradientes de floculação superiores a 60 s^{-1} . A dimensão fractal (D_f) variou entre 1,49 e 1,95. O aumento do gradiente de velocidade na floculação tendeu a diminuir o valor de D_f , promovendo flocos menos compactos e mais ramificados. Foi observado um aumento gradual de D_f nos minutos iniciais de floculação para configurações de dosagens de alumínio mais baixas e pH mais ácidos, sugerindo que a estrutura morfológica das partículas está diretamente ligada ao mecanismo de coagulação.

Palavras-chave: Tratamento de água, coagulação, floculação, distribuição do tamanho de partículas, dimensão fractal, análise digital de imagem.

Oliveira, A. S. Evaluation of the morphology and particle size distribution for distinct points of coagulation/flocculation diagram. 164 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2018.

ABSTRACT

Coagulation and flocculation are essential steps in the water treatment for public supply for the impurities removal. The knowledge of flocculent particle size distribution (PSD) and morphological characteristics is of great value to the understanding of the mechanisms that involve the flocs aggregation and subsequent removal. In this context, the present study has an objective the size distribution evolution and flocs structure monitoring formed in different chemical configurations (several pairs of pH of coagulation and coagulant dosage) during flocculation process in water with apparent high color (100 ± 5 uH), using aluminum sulphate as coagulant, from the laboratory simulation in Jar Test equipment submitted to eight shear rates (20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 and 120 s^{-1}). Particle measurement was performed by digital image analysis technique obtained by non-intrusive and non-destructive method, consisting of light plane generated by a laser and high-resolution camera, enabling the direct assessment of growth and rupture flocs dynamics. The results of particles distribution by size range indicated that the chemical coagulation condition interferes in the PSD evolution, stating that the larger aggregates formation occurs faster in regions acknowledged by the charges neutralization mechanism. The gradual shear rate increase promoted the flocs breakage, carrying in the more concentrated distribution in the size ranges smaller, which was practically unchanged for flocculation gradients higher than 60 s^{-1} . The fractal dimension (D_f) varied between 1.49 and 1.95. The speed gradient increase in flocculation has tended to reduce the D_f value, promoting less compact and more branched flocs. It was observed a D_f gradual increase in the initial flocculation minutes for lower aluminum dosages settings and more acidic pH, suggesting that particles morphological structure is directly linked to the coagulation mechanism.

Keywords: Water treatment, coagulation, flocculation, particle size distribution, fractal dimension, digital image analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação das tecnologias de tratamento de água para consumo humano	27
Figura 2 - Fluxo esquemático do tratamento completo de águas superficiais.....	28
Figura 3 - Distribuição do tamanho de partículas presentes na água	29
Figura 4 - Fórmula estrutural do ácido húmico ($C_{306}H_{328}O_{90}N_5$).....	31
Figura 5 - Representação esquemática das etapas de coagulação e floculação.....	33
Figura 6 - Configuração esquemática da distribuição de cargas nas proximidades de uma partícula coloidal carregada e variação dos potenciais associados à dupla camada elétrica na interface sólido-líquido.....	34
Figura 7 - Processo eletrocinético baseado em eletroforese.....	35
Figura 8 - Processo eletrocinético baseado em eletro-osmose	36
Figura 9 - Processo eletrocinético baseado em potencial de corrente	36
Figura 10 - Esquema de reações de coagulação por adsorção e neutralização de carga e por varredura utilizando sulfato de alumínio como coagulante.....	40
Figura 11 - Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio como agente coagulante e associação das condições químicas com mecanismos de coagulação.....	43
Figura 12 - Regiões de remoção de cor verdadeira de 100 uH e turbidez de 0 uT, utilizando sulfato de alumínio como agente coagulante.....	44
Figura 13 - Desempenho temporal da floculação de água com turbidez de 25 ± 2 uT, coagulada com dosagem de $2,0 \text{ mg Al}^{3+} \cdot \text{l}^{-1}$ e pH de 7,5, sob taxas de cisalhamento de 20 s^{-1} a 60 s^{-1} , para dados obtidos com taxa de sedimentação de $0,5 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$	49
Figura 14 - Principais mecanismos atuantes na desagregação de flocos no processo de floculação.....	50
Figura 15 - Quebra e recrescimento de flocos sob diferentes taxas de cisalhamento na mistura rápida	51
Figura 16 - Autossimilaridade de agregados fractais	53
Figura 17 - Variação do tamanho de partículas para diferentes coagulantes	56
Figura 18 - Evolução da dimensão fractal em função do tempo de floculação para diferentes coagulantes	56
Figura 19 - Diferentes diâmetros equivalentes para uma mesma partícula.....	58

Figura 20 - Elementos de um sistema de processamento de imagens	63
Figura 21 - Demonstração esquemática de uma binarização utilizando 3 x 3 <i>pixels</i> (limiar selecionado manualmente para demonstração).	65
Figura 22 - Ilustração das etapas para aquisição e processamento de imagens obtidas de flocos em um tanque de mistura.....	67
Figura 23 - Fluxograma das etapas de estudo	69
Figura 24 - Interpolação de dados experimentais e nós de uma malha de discretização	75
Figura 25 - Acompanhamento da coagulação e formação de flocos.....	77
Figura 26 - (a) Vista frontal, ilustrando o plano de luz para visualização dos flocos e (b) esquematização do aparato experimental em bancada para aquisição de imagens	78
Figura 27 - Instalação experimental para aquisição de imagens digitais em escala de bancada, composto de equipamento <i>Jar Test</i> para a realização dos ensaios de coagulação/floculação, <i>laser</i> , câmera Nikon D5500 e computador com CCP 2.0	79
Figura 28 - Abertura do arquivo imagem da régua utilizada como sistema de referência de medida	82
Figura 29 - Acesso à função e janela “ <i>Set Scale</i> ” utilizada para calibração da imagem.....	83
Figura 30 - Transformação da imagem em 8 bits.....	84
Figura 31 - Ferramenta <i>Threshold</i> modo manual para binarização das imagens	85
Figura 32 - Escolha do limiar de binarização através do histograma de intensidade e aparecimento dos flocos de acordo com o limiar adotado.....	85
Figura 33 - Aplicação do limiar de binarização	86
Figura 34 - Seleção da função “ <i>Set Measurements</i> ” e janela contendo os parâmetros de medição das partículas	87
Figura 35 - Função “ <i>Analyze Particles</i> ” para detecção e medição das partículas.....	87
Figura 36 - Delimitação e preenchimento da área de cada objeto detectado e o número correspondente a contagem efetuada pelo <i>ImageJ</i> 1.51	88
Figura 37 - Parâmetros geométricos da seção transversal de uma partícula	89
Figura 38 - Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio em termos de percentual de remoção de cor aparente para velocidade de sedimentação de 5,0 cm.min ⁻¹	94
Figura 39 - Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio em termos de percentual de remoção de cor aparente para velocidade de sedimentação de 2,5 cm.min ⁻¹	94
Figura 40 - Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio em termos de percentual de remoção de cor aparente para velocidade de sedimentação de 1,0 cm.min ⁻¹	95

Figura 41 - a) imagem dos flocos em 24 bits; b) matriz binarizada; c) matriz em processo de contagem e medição pelo programa computacional <i>ImageJ</i> 1.51	98
Figura 42 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 1 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,11 e 9,5 mg.l ⁻¹ de Al ³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s ⁻¹ a 120 s ⁻¹	103
Figura 43 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 2 do Diagrama de Coagulação (pH de 5,14 e 4,0 mg.l ⁻¹ de Al ³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s ⁻¹ a 120 s ⁻¹	104
Figura 44 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 3 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,13 e 13,0 mg.l ⁻¹ Al ³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s ⁻¹ a 120 s ⁻¹	105
Figura 45 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 4 do Diagrama de Coagulação (pH de 7,69 e 6,5 mg.l ⁻¹ de Al ³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s ⁻¹ a 120 s ⁻¹	106
Figura 46 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 5 do Diagrama de Coagulação (pH de 8,02 e 11,0 mg.l ⁻¹ de Al ³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s ⁻¹ a 120 s ⁻¹	107
Figura 47 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 6 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,47 e 11,0 mg.l ⁻¹ de Al ³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s ⁻¹ a 120 s ⁻¹	108
Figura 48 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 7 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,44 e 1,0 mg.l ⁻¹ de Al ³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s ⁻¹ a 120 s ⁻¹	109
Figura 49 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 8 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,51 e 1,25 mg.l ⁻¹ de Al ³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s ⁻¹ a 120 s ⁻¹	110
Figura 50 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 9 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,41 e 4,5 mg.l ⁻¹ de Al ³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s ⁻¹ a 120 s ⁻¹	111
Figura 51 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 10 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,07 e 3,0 mg.l ⁻¹ de Al ³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s ⁻¹ a 120 s ⁻¹	112
Figura 52 - DTP para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, 40 s^{-1} , 60 s^{-1} , 80 s^{-1} e 120 s^{-1} , com $T_f = 60 \text{ min}$, nas seguintes condições: Ponto 1 (a), Ponto 2 (b), Ponto 3 (c), e Ponto 4 (d).....	113

Figura 53 - DTP para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, 40 s^{-1} , 60 s^{-1} , 80 s^{-1} e 120 s^{-1} , com $T_f = 60 \text{ min}$, nas seguintes condições: Ponto 5 (a), Ponto 6 (b), Ponto 7 (c), Ponto 8 (d), Ponto 9 (e) e Ponto 10 (f).....	114
Figura 54 - Exemplo de função contínua linearizada que permite a determinação dos parâmetros β e A	116
Figura 55 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 1 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,11 e dosagem de Al^{3+} de $9,5 \text{ mg.l}^{-1}$)	116
Figura 56 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 2 do Diagrama de Coagulação (pH de 5,14 e dosagem de Al^{3+} de $4,0 \text{ mg.l}^{-1}$)	117
Figura 57 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 3 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,13 e dosagem de Al^{3+} de $13,0 \text{ mg.l}^{-1}$)	117
Figura 58 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 4 do Diagrama de Coagulação (pH de 7,69 e dosagem de Al^{3+} de $6,5 \text{ mg.l}^{-1}$)	118
Figura 59 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 5 do Diagrama de Coagulação (pH de 8,02 e dosagem de Al^{3+} de $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$)	118
Figura 60 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 6 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,47 e dosagem de Al^{3+} de $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$)	119
Figura 61 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 7 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,44 e dosagem de Al^{3+} de $1,0 \text{ mg.l}^{-1}$)	119
Figura 62 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 8 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,51 e dosagem de Al^{3+} de $1,25 \text{ mg.l}^{-1}$)	120
Figura 63 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 9 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,41 e dosagem de Al^{3+} de $4,5 \text{ mg.l}^{-1}$)	120
Figura 64 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 10 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,07 e dosagem de Al^{3+} de $3,0 \text{ mg.l}^{-1}$)	121
Figura 65 - Exemplo de imagens obtidas de flocos formados sob $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ (a) e $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ (b), com $T_f = 60 \text{ min}$	123
Figura 66 - Comparação da evolução temporal do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio entre os pontos: a) 3 (pH de 6,13 e $13,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}) e 7 (pH de 6,44 e $1,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}); b) 6 (pH de 4,47 e $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}) e 8 (pH de 4,51 e $1,25 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}).....	124
Figura 67 - Comparação da evolução temporal do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio entre os pontos 5 (pH de 8,02 e $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}) e 6 (pH de 4,47 e $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+})	125
Figura 68 - Diâmetro fractal de partículas formadas em diferentes G_f adotados em função de T_f : (a) evolução temporal de D_f para o Ponto 1 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,11 e dosagem de Al^{3+} de $9,5 \text{ mg.l}^{-1}$) e (b) exemplo de determinação de D_f	126

Figura 69 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 2 do Diagrama de Coagulação (pH de 5,14 e dosagem de Al^{3+} de 4,0 mg.l ⁻¹)	127
Figura 70 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 3 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,13 e dosagem de Al^{3+} de 13,0 mg.l ⁻¹)	127
Figura 71 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 4 do Diagrama de Coagulação (pH de 7,69 e dosagem de Al^{3+} de 6,5 mg.l ⁻¹)	127
Figura 72 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 5 do Diagrama de Coagulação (pH de 8,02 e dosagem de Al^{3+} de 11,0 mg.l ⁻¹)	128
Figura 73 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 6 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,47 e dosagem de Al^{3+} de 11,0 mg.l ⁻¹)	128
Figura 74 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 7 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,44 e dosagem de Al^{3+} de 1,0 mg.l ⁻¹)	128
Figura 75 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 8 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,51 e dosagem de Al^{3+} de 1,25 mg.l ⁻¹)	129
Figura 76 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 9 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,41 e dosagem de Al^{3+} de 4,5 mg.l ⁻¹)	129
Figura 77 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 10 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,07 e dosagem de Al^{3+} de 3,0 mg.l ⁻¹)	129
Figura 78 - Curvas de níveis da evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para as 10 condições químicas avaliadas	132
Figura 79 - Variação de D_f em resposta aos diferentes G_f avaliados para o Ponto 1 (pH de 6,11 e 9,5 mg.l ⁻¹ de Al^{3+}), Ponto 2 (pH de 5,94 e 4,0 mg.l ⁻¹ de Al^{3+}) e Ponto 3 (pH de 6,13 e 13,0 mg.l ⁻¹ de Al^{3+}) nos tempos de floculação de 1 min (a); 30 min (b) e 60 min (c)	133
Figura 80 - Variação de D_f em resposta aos diferentes G_f avaliados para o Ponto 5 (pH de 8,02 e 11,0 mg.l ⁻¹ de Al^{3+}) e Ponto 6 (pH de 4,47 e 11,0 mg.l ⁻¹ de Al^{3+}) nos tempos de floculação de 1 min (a); 30 min (b) e 60 min (c)	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos realizados utilizando a técnica de análise de imagens digitais no acompanhamento da floculação.....	23
Tabela 2 - Classificação e características das substâncias húmicas	30
Tabela 3 - Dimensão fractal para seis diferentes velocidades de rotação	55
Tabela 4 - Expressões de diâmetro equivalente para determinação do tamanho de um agregado.....	59
Tabela 5 - Métodos utilizados na obtenção de tamanho de partículas	61
Tabela 6 - Parâmetros físicos adotados na realização dos ensaios para construção dos diagramas de coagulação	74
Tabela 7 - Configurações da câmera fotográfica para aquisição de imagens dos flocos formados durante a floculação.....	80
Tabela 8 - Pontos do diagrama de coagulação selecionados para avaliação da DTP e características morfológicas dos flocos	97
Tabela 9 - Distribuição das faixas de tamanho das partículas formadas nas condições químicas referentes ao Ponto 1 do diagrama de coagulação, sob G_f de 20 s^{-1}	98

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

HCl	Ácido clorídrico
H ₂ O	Água
Al ³⁺	Alumínio
A _C	Amplitude da classe
A _T	Amplitude dos dados
A _S	Área superficial do floco
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
K _A	Coefficiente de agregação
A	Coefficiente de densidade da equação de potência
K _B	Coefficiente de ruptura
β	Coefficiente que caracteriza a DTP
k _{es}	Coefficiente relacionado à resistência dos flocos
l	Comprimento característico dos agregados
n ₀	Concentração inicial de partículas primárias (T _f = 0)
n ₁	Concentração remanescente de partículas primárias ao tempo T _f
D	Constante dielétrica da água
d _p	Diâmetro das partículas
d _F	Diâmetro equivalente de Feret
d _{Fmáx}	Diâmetro equivalente de Feret máximo
D _{eq}	Diâmetro equivalente de Feret médio
d _{Fmín}	Diâmetro equivalente de Feret mínimo
D _f	Dimensão fractal
d _{máx}	Diâmetro máximo do floco
d(d _p)	Fração incremental dos diâmetros das partículas
F(d _p)	Função que define a frequência da DTP
G _f	Gradiente de velocidade médio na floculação
G _{mr}	Gradiente de velocidade médio na mistura rápida
°C	Grau Celsius

Al(OH)_3	Hidróxido de alumínio
NaOH	Hidróxido de sódio
Fe(OH)_3	Hidróxido ferroso
η	Microescala de turbulência de Kolmogoroff's
M	Mobilidade eletroforética
NC	Número de classes
dN	Número de partículas para diâmetros entre d_p e d_p máximo
R	Percentual de remoção de cor aparente
%	Porcentagem
E	Potencial aplicado por unidade de comprimento da célula eletroforética
ζ	Potencial Zeta
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Sulfato de alumínio
T	Temperatura
T_f	Tempo de floculação
T_{mr}	Tempo de mistura rápida
T_s	Tempo de sedimentação
v	Velocidade da partícula
V_s	Velocidade de sedimentação
μ	Viscosidade dinâmica da água

ABREVIATURAS

cm	Centímetros
bits	Dígitos binários (<i>binary digit</i>)
g	Gramas
h	Horas
l	Litro
log	Logaritmo
MPixel	Megapixel
m^2	Metros quadrados
μm	Micrometros
μs	Microsssegundos
mg	Miligrama
ml	Mililitro

ml	Mililitro
mm	Milímetros
mV	Milivolt
mW	Miliwatts
min	Minutos
M	Molar
nm	Nanômetro
pH	Potencial hidrogeniônico
qps	Quadros por segundo
kg	Quilogramas
rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
s ⁻¹	Segundos a menos um / por segundo
uT	Unidade de turbidez
uH	Unidade Hazen
V	Volt

SIGLAS

AF	Ácido fúlvico
AH	Ácido húmico
CCP	<i>Camera Control Pro</i>
DTP	Distribuição do Tamanho de Partículas
DCE	Dupla Camada Elétrica
ETA	Estação de Tratamento de Água
EV	Valor de Exposição (<i>Exposure Value</i>)
MS	Ministério da Saúde
MON	Matéria Orgânica Natural
PDI	Processamento Digital de Imagens
SH	Substância húmica
UV-Vis	Ultravioleta-visível
VMP	Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 OBJETIVOS	25
2.1 Objetivo geral	25
2.2 Objetivos específicos	25
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1 Considerações sobre tecnologia de tratamento da água	26
3.2 Impurezas da água	28
3.3 Substâncias húmicas e águas superficiais de cor elevada	29
3.4 Coagulação	32
3.4.1 Mecanismos de Coagulação	37
3.4.1.1 Compressão da camada difusa.....	37
3.4.1.2 Adsorção e neutralização de carga	38
3.4.1.3 Varredura	39
3.4.1.4 Adsorção e formação de pontes.....	40
3.4.2 Sulfato de alumínio como agente coagulante.....	41
3.4.3 Remoção de cor por coagulação química	41
3.4.4 Diagrama de Coagulação	43
3.5 Floculação	45
3.5.1 Cinética de agregação.....	46
3.5.2 Agregação, ruptura e recrescimento dos flocos.....	49
3.6 Propriedades e características físicas dos flocos.....	52
3.6.1 Dimensão fractal.....	52
3.6.2 Distribuição de tamanho de partículas (DTP).....	57
3.7 Processamento digital e análise de imagens	60
3.7.1 Etapas do processamento de imagens	62
3.7.1.1 Aquisição	63
3.7.1.2 Armazenamento.....	64
3.7.1.3 Pré-processamento.....	64
3.7.1.4 Segmentação	64

3.7.1.5 Extração de atributos	66
3.8 Trabalhos com emprego da técnica de análise de imagens de partículas	66
4 MATERIAL E MÉTODOS	69
4.1 Produtos químicos	70
4.2 Equipamentos	70
4.3 Preparação da água de estudo	71
4.4 Ensaio de coagulação e floculação.....	72
4.4.1 Determinação do percentual de remoção de cor aparente.....	74
4.5 Traçado dos diagramas de coagulação.....	74
4.6 Acompanhamento da floculação por meio da aquisição de imagens.....	76
4.7 Aquisição de imagens digitais	77
4.7.1 Instalações experimentais.....	78
4.7.2 Procedimentos para aquisição de imagens das partículas	79
4.8 Tratamento das imagens.....	81
4.8.1 Calibração	82
4.8.2 Tratamento das imagens e obtenção de tamanhos	83
4.8.3 Análise de imagens	89
4.8.3.1 Determinação da distribuição do tamanho de partículas	89
4.8.3.2 Obtenção e definição de β como parâmetro característico da DTP.....	90
4.8.3.3 Determinação da dimensão fractal	91
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.1 Diagramas de Coagulação	93
5.2 Aquisição e tratamento das imagens digitais.....	97
5.3 Avaliação de características dos flocos.....	98
5.3.1 Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP).....	98
5.3.2 Evolução do diâmetro equivalente médio e parâmetro característico da função de distribuição de tamanho (β).....	115
5.3.3 Dimensão Fractal.....	126
6 CONCLUSÕES.....	136
REFERÊNCIAS	138
APÊNDICE A	150

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Como consequência da ausência de manejo e uso sustentável dos recursos naturais, bem como desigualdade social e degradação da natureza de forma indiscriminada provocada por atividades antrópicas, a disponibilidade de água doce de muitos mananciais utilizados como manancial de abastecimento público vem sendo reduzida. Devido à falta de saneamento básico, precariedade no controle dos lançamentos de resíduos em cursos de água, muitas vezes, o corpo receptor de determinados locais é o mesmo manancial de abastecimento de outro, admitindo-se que o tratamento da água se trata de um pós-tratamento de efluentes. Diante desta problemática, faz-se necessário o estudo contínuo de técnicas de tratamento de água e esgoto, visando proporcionar qualidade e segurança ao meio ambiente e à saúde populacional.

Muitas fontes de abastecimento de água possuem baixa turbidez e cor verdadeira elevada como principais características físicas. A cor é originada pela presença de substâncias húmicas de natureza orgânica e alta complexidade e estabilidade, sendo, portanto, de difícil remoção. A origem da matéria orgânica pode ser tanto natural, como decomposição de resíduos animais e vegetais; quanto artificial, como lançamento direto de efluentes e carreamento de compostos químicos de uso agrícola para corpos de água, provocado por escoamento superficial após um período de precipitação.

A desestabilização de impurezas dissolvidas, coloidais e suspensas presentes na água através de um tratamento físico-químico torna-se indispensável, principalmente de águas provenientes de mananciais superficiais, que são mais susceptíveis à contaminação pela recepção de uma variedade de compostos.

Diversas tecnologias contemplam o tratamento de água, as quais são condicionadas pela natureza da água bruta e a qualidade desejada para a água tratada, definida pelos padrões de

potabilidade, abordada pela Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde (MS). Dessa forma, enquanto alguns mananciais requerem apenas tratamento simplificado para que a água se torne própria para consumo, outros necessitam de tratamento avançado. A seleção da tecnologia de tratamento adequada para uma determinada qualidade da água de um manancial deve ser realizada, preferencialmente, por meio da realização de estudos de tratabilidade da água e de pesquisas em instalações pilotos por um determinado período de tempo.

No Brasil, as técnicas de coagulação e floculação são as mais utilizadas em Estações de Tratamento de Água (ETAs). Através da aplicação de coagulantes químicos, há formação de espécies hidrolisadas, principalmente hidróxidos metálicos, com carga positiva, os quais atuam na precipitação de compostos em solução e desestabilização de suspensões coloidais de partículas sólidas. Por constituírem as etapas iniciais no tratamento de água, a coagulação e floculação desempenham um papel substancial, visto que o sucesso das demais etapas dependem da eficiência destas. Por este motivo, a realização de pesquisas a respeito destes processos é de extrema importância.

Apesar da existência de muitos estudos acerca da cinética de floculação, a maioria correlaciona a eficiência do processo de floculação com a sedimentabilidade dos flocos de forma indireta, através de análises simples e rápidas de parâmetros representativos de qualidade da água, como cor e turbidez, desconsiderando os efeitos de colisões, agregações e rupturas dos flocos que ocorrem durante o processo, capazes de ocasionar alterações estruturais e na distribuição do tamanho de partículas (DTP).

Deste modo, muitos pesquisadores, tais como Gregory (2009), Xiao et al. (2011), Moruzzi et al. (2017) e Ren et al. (2017), buscaram o entendimento mais detalhado da cinética de floculação através de técnicas de análise de imagens, que segundo Bushell et al. (2002), são mais robustas e versáteis, capazes de realizar análises mais complexas das partículas. A partir da obtenção e análise de imagens, podem ser obtidas características dos flocos, como a distribuição de tamanho e diâmetro fractal, que respectivamente permitem o acompanhamento da evolução da distribuição de partículas e a verificação da estrutura morfológica dos flocos durante o processo dinâmico de floculação, possuindo, portanto, relação direta na eficiência do tratamento de água.

O presente trabalho está inserido em uma linha de pesquisa que permeia estudos de aspectos conceituais, fenomenológicos e experimentais do tratamento de águas para abastecimento, por

meio da investigação das características das partículas durante a etapa de floculação empregando-se a técnica de análise digital de imagens, buscando uma correlação com o desempenho da separação sólido-líquido.

Os estudos do atual grupo de pesquisa iniciaram-se em meados dos anos 2000, por Moruzzi (2004), que desenvolveu em sua tese, um aparato experimental e metodologia não intrusiva baseada em análise de imagens digitais, cuja finalidade era de avaliar as partículas e microbolhas por meio de análise de imagens em unidades de flotação por ar dissolvido (FAD) em escala piloto. Desde então, diversos estudos pertinentes à temática desta dissertação foram desenvolvidos, envolvendo pesquisadores de todos os níveis, inclusive de instituições internacionais. Alguns dos principais trabalhos são listados em ordem cronológica na Tabela 1.

Diante deste contexto, o presente trabalho adota a técnica de análises de imagens digitais de alta resolução já consolidado pelo grupo para a avaliação direta da evolução da coagulação/floculação, a partir do acompanhamento contínuo da formação de agregados formados durante esta etapa, visando investigar a distribuição de tamanho e estruturas morfológicas dos mesmos, correspondentes às propriedades mais significantes para a eficiência operacional de um número de inúmeros processos, incluindo sedimentação, flotação e filtração por membrana.

Tabela 1 - Estudos realizados utilizando a técnica de análise de imagens digitais no acompanhamento da floculação

(continua)

Período	Autor (es)	Nível de Pesquisa	Objetivo	Trabalhos Publicados
2001 - 2004	Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi	Doutorado	Estudo de partículas e microbolhas por meio da análise de imagem digital em estação de tratamento em escala piloto.	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	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	Implementação de sistema de monitoramento contínuo de partículas flocculentas em estações de tratamento que empregam coagulação e floculação.	Moruzzi et al. (2016); Moruzzi et al. (2017).
2013 - 2014	Ma. Pamela Moreno	Mestrado	Aplicação da lama vermelha no tratamento de água e emprego de técnica dedicada de análise de imagem no desempenho da floculação.	Moreno, Moruzzi e Conceição (2013); Moreno (2014); Moreno et al. (2015); Moreno et al. (2016).
2014 - 2015	Prof. Dr. André Luiz de Oliveira	Pós-doutorado	Estudo de partículas flocculentas e monitoramento contínuo da floculação.	Oliveira et al. (2014); Oliveira et al. (2015a); Oliveira et al. (2015b); Oliveira et al. (2016).
2013 - 2017	Me. Pedro Augusto Grava da Silva	Iniciação Científica e Mestrado	Avaliação da resistência, refloculação e geometria não euclidiana no tratamento de água.	Silva (2016); Silva (2017).
2015 - 2017	Me. Luan Serafim Mendes Gonçalves	Mestrado	Análise da evolução do diâmetro fractal de agregados formados na floculação de água de baixa turbidez utilizando técnicas de obtenção e tratamento de imagem digital.	Gonçalvez (2017).

Tabela 1 - Estudos realizados utilizando a técnica de análise de imagens digitais no acompanhamento da floculação

(conclusão)

Período	Autor (es)	Nível de Pesquisa	Objetivo	Trabalhos Publicados
2015 - 2017	Me. Ricardo Henrique de Andrade Dutra	Mestrado	Obtenção de parâmetros cinéticos de floculação utilizando técnicas de obtenção e tratamento de imagem digital.	Dutra (2017).
2015 - 2017	Me. Yuri Cardoso Mendes	Mestrado	Análise da evolução da Distribuição do Tamanho de Partículas na floculação de água de baixa turbidez.	Mendes (2017).
2015 - 2017	Juliana Carvalhinho Büll	Iniciação Científica	Investigação de parâmetro da floculação, utilizando o monitoramento contínuo da floculação por dispersão de luz.	Büll, Silva e Moruzzi (2016); Büll (2017).
2016 - 2017	Adolfo Freitas Terra Silva	Iniciação Científica	Avaliação da Distribuição de Tamanho de Partículas em água com cor aparente elevada empregando técnica de análise de imagens.	Silva (2017).
2016 - 2017	Thaís de Almeida	Iniciação Científica	Investigação da eficiência de separação sólido-líquido no tratamento de águas de abastecimento monitorado por análise de imagem e dispersão de luz.	Almeida (2017).

Fonte: Autora (2018)

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a evolução da distribuição de tamanho de partículas e das características morfológicas dos flocos utilizando sulfato de alumínio como agente coagulante no tratamento de água com cor elevada, para diferentes condições químicas de coagulação.

2.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral, são compreendidos os seguintes objetivos específicos:

- a) seleção de pontos do diagrama de coagulação compreendendo distintos mecanismos;
- b) avaliação temporal da distribuição de tamanho de partículas e de seu parâmetro representativo β durante a floculação nos pontos selecionados e sob diferentes taxas de cisalhamento;
- c) avaliação temporal das características morfológicas dos agregados formados sob distintas condições de coagulação e gradientes de velocidade de floculação;
- d) análise comparativa da distribuição de tamanho e morfologia das partículas e influência dos mecanismos de coagulação.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentado um suporte informativo e teórico, abordando considerações sobre tecnologia de tratamento de água para abastecimento público e as impurezas contidas em mananciais superficiais; águas superficiais de cor elevada e seu tratamento por coagulação; mecanismos de coagulação; floculação e cinética de agregação e ruptura dos flocos; propriedades e características dos flocos, com ênfase nas características morfológicas e DTP; e finalmente, considerações sobre processamento digital e análise de imagens, bem como a contextualização por meio de estudos com emprego desta técnica para análise dos flocos.

3.1 Considerações sobre tecnologia de tratamento da água

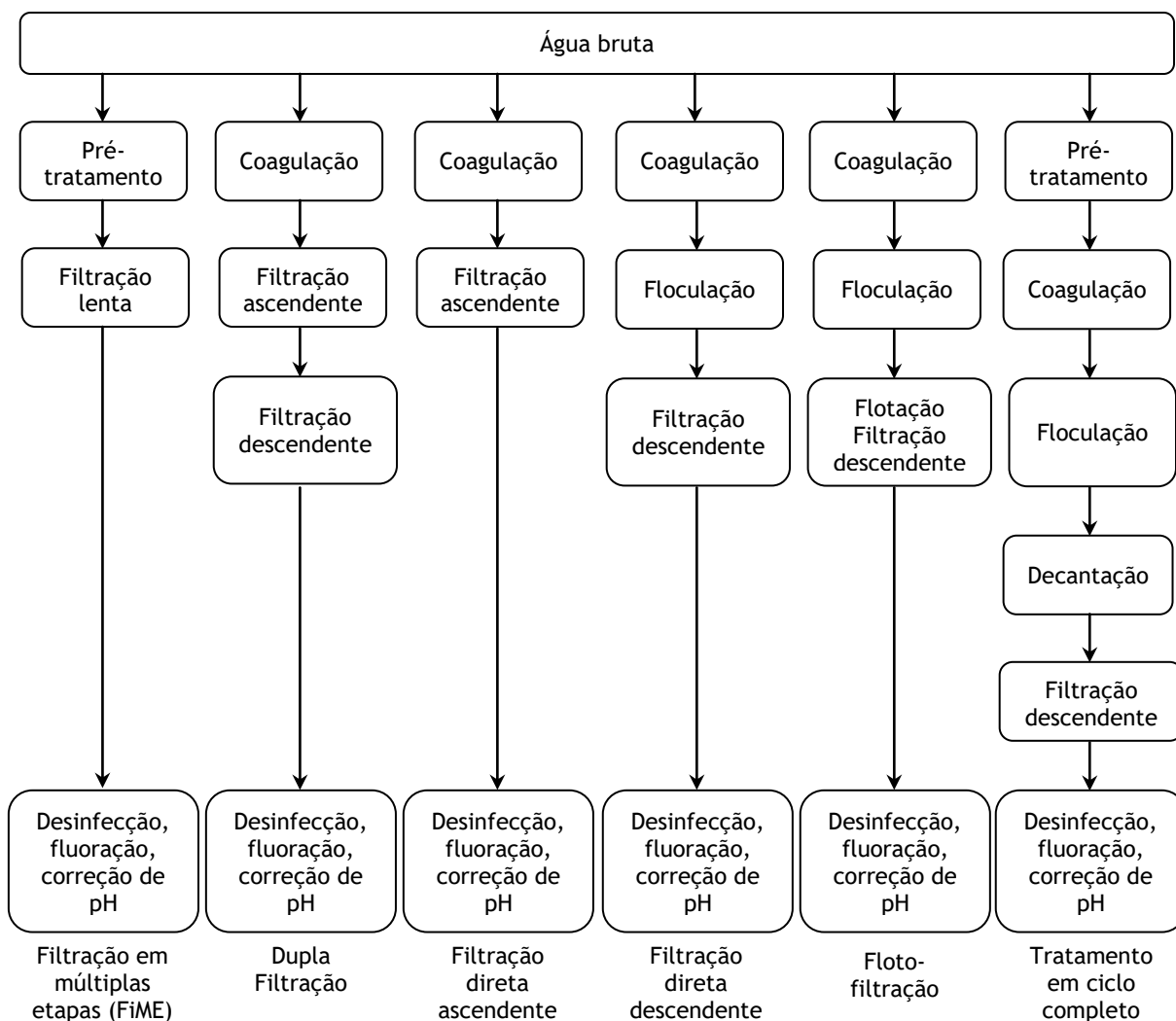
Embora imprescindível à sobrevivência humana, apenas 0,3% do volume total de água existente na natureza pode ser aproveitada de forma direta, havendo ainda uma predominância de água subterrânea. Ainda assim, podem conter determinados constituintes da água bruta que necessitam ser removidos ou reduzidos a concentrações que se adequem aos padrões de potabilidade para que não sejam prejudiciais à saúde humana, mediante processos de tratamento apropriadamente selecionados. Mesmo que seja possível aproveitamento de qualquer corpo d'água como fonte para obtenção de água potável independente de sua qualidade, a indisponibilidade orçamentária e credibilidade da operação e manutenção é capaz de inviabilizá-lo completamente (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; RICHTER, 2009).

Alterações de características físicas, químicas e biológicas estão propensas em decorrência da poluição dos recursos hídricos, ocasionada pelo lançamento de elementos químicos ou microbiológicos presentes em efluentes sanitários, industriais e agrícolas. Associadas à contaminação biológica da água, estão as transmissões de doenças, tais como: cólera, febre

tifoide, salmonelose, disenteria, giardíase, amebíase, viroses, dentre outras (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; FUNASA, 2015).

Existem uma ampla variedade de métodos de tratamento da água que podem ser empregados para o consumo humano (Figura 1). Os processos podem ser resumidos em dois grupos (sem coagulação e com coagulação química) e a seleção da tecnologia mais adequada para a obtenção de água potável, ou seja, que atenda aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério do Meio Ambiente (MS) está subordinada à qualidade da água do manancial, de forma que algumas águas necessitam de tratamentos mais elaborados e outras, tratamentos mais simplificados. Desta forma, a consideração de determinadas técnicas e descarte de outras para uma determinada circunstância é possível somente com a execução de análises laboratoriais e em instalações de bancada ou em instalações piloto.

Figura 1 - Classificação das tecnologias de tratamento de água para consumo humano

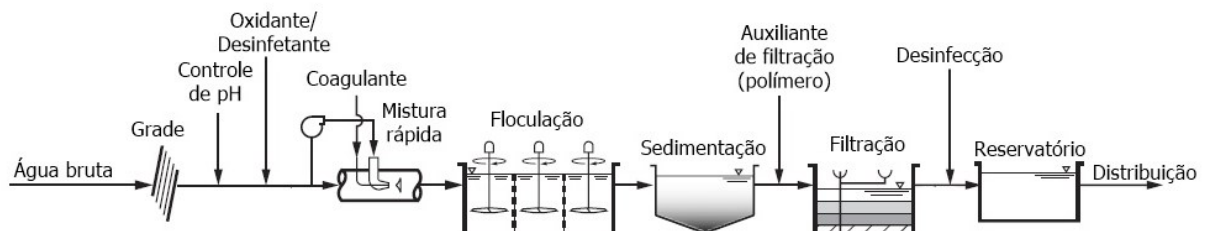


Fonte: Adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005)

De acordo com Di Bernardo e Paz (2008), a tecnologia de tratamento completo da água (Figura 2) é a categoria de maior número de unidades usuais, incluindo a seguinte cadeia de processos: pré-tratamento químico, necessário para a geração de flocos sedimentáveis, constituída por mistura rápida (coagulação), onde as impurezas da água bruta são detidas por precipitados de metal formados pela adição de coagulantes químicos, geralmente sais de ferro ou alumínio; floculação, caracterizada pela condição de agitação lenta por um determinado período para a aglomeração das impurezas, formando flocos com tamanho e massa específica suficientes para uma efetiva remoção por sedimentação; filtração, por meio de unidades de escoamento descendente, contendo materiais granulares (areia ou antracito e areia), suportadas por uma camada de cascalho, capazes de reter partículas em suspensão que passaram pelos decantadores; correção de pH e desinfecção, onde é realizada a aplicação de cloro para a oxidação da matéria orgânica, constituída por bactérias e outros micro-organismos.

Ademais, segundo Huang et al. (2016), a coagulação e floculação é um dos processos de tratamento de água mais comumente utilizados para a remoção de partículas coloidais e matéria orgânica natural (MON) durante as últimas décadas.

Figura 2 - Fluxo esquemático do tratamento completo de águas superficiais



Fonte: Adaptado de Crittenden et al. (2012)

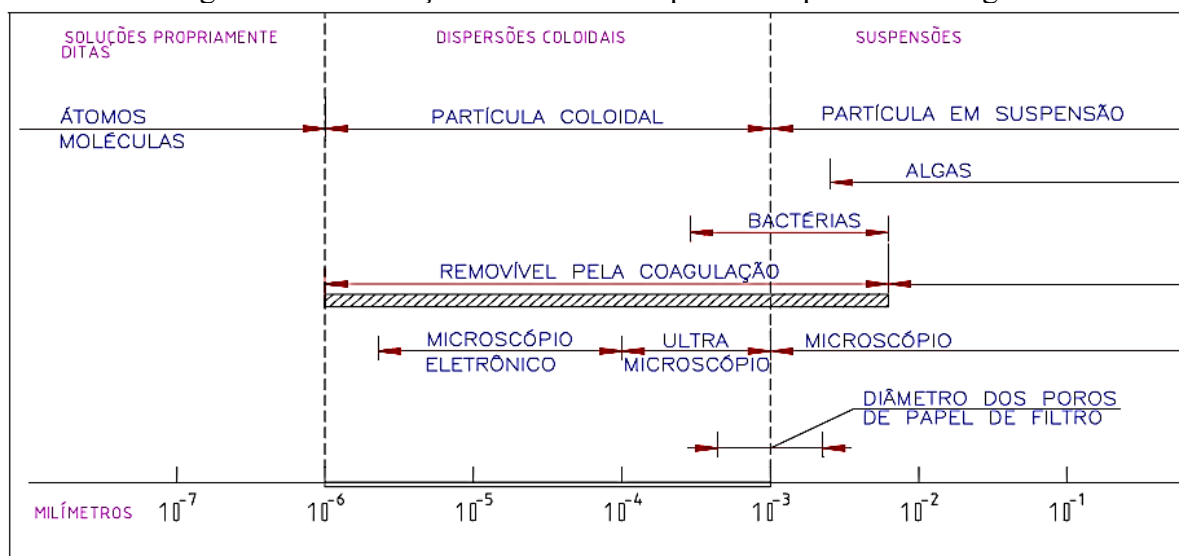
3.2 Impurezas da água

As substâncias contidas em águas superficiais podem estar sob duas formas principais: dissolvidas (sólidos dissolvidos em forma ionizada, gases e compostos orgânicos) e em suspensão, tais como micro-organismos e coloides. De acordo com Eckenfelder (1989), a maioria destas partículas apresentam carga negativa em sua superfície, fazendo com que haja repulsão entre elas, a ponto de mantê-las em suspensão de forma estável por longos períodos de tempo.

A Figura 3 apresenta as diferentes partículas presentes na água, destacando as diversas ordens de grandeza. As partículas em suspensão (10^{-3} mm a 10^{-1} mm) podem ser removidas através de

técnicas de sedimentação ou flotação em tempo razoável, de aproximadamente uma hora. Por outro lado, as partículas de tamanho reduzido (entre 10^{-6} mm a 10^{-3} mm), compreendidas na região de dispersão coloidal (faixa retangular hachurada), requer um tempo maior para a sedimentação, fazendo com que a interferência da força gravitacional na sedimentabilidade das mesmas seja desprezível, visto que a área superficial das partículas é excessivamente maior que seu próprio peso. Tal região representa a maioria das impurezas presentes na água, incluindo as moléculas de substâncias húmicas que, dependendo do grau de polimerização, podem atingir valores entre $3,5$ e 10×10^{-6} mm (AMIRTHARAJAH; O'MELIA, 1990). Deste modo, o emprego da técnica de coagulação pela adição de produtos químicos torna-se fundamental para a aglomeração das partículas sólidas, desencadeando a sedimentação das mesmas.

Figura 3 - Distribuição do tamanho de partículas presentes na água



Fonte: Pavanelli (2001)

3.3 Substâncias húmicas e águas superficiais de cor elevada

De acordo com Flaing et al. (1975), os compostos que constituem a matéria orgânica podem ser classificados em substâncias não húmicas e húmicas. As substâncias não húmicas pertencem a grupos cujas características físicas e químicas já são conhecidas na química orgânica. Comumente, são representados por compostos degradados facilmente por micro-organismos, tendo tempo curto de vida nos solos e sedimentos, como proteínas, aminoácidos, polissacarídeos e ácidos orgânicos de baixa massa molar.

Por outro lado, as substâncias húmicas (SH), originadas pela decomposição da matéria orgânica de origem vegetal ou animal, possuem natureza quimicamente complexas, predominantemente

aromáticas, hidrofílicas, altamente estáveis e de elevado peso molecular. São ácidos que promovem a coloração amarela ou marrom presente em águas superficiais que poderão ser utilizadas para abastecimento público (SNOEYINK; JENKINS, 1980; EDWARDS; AMIRTHARAJAH, 1985; RATNAWEERA; GJESSING; OUG, 1999).

Hall e Packham (1965) afirmam que o termo “substâncias húmicas” é compreendido por uma ampla variedade de compostos que, mesmo possuindo constituição essencialmente similar e muitas propriedades em comum, diferem-se no peso molecular e proporção de vários grupos funcionais. A Tabela 2 contém a classificação e características de acordo com a solubilidade das substâncias húmicas.

Tabela 2 - Classificação e características das substâncias húmicas

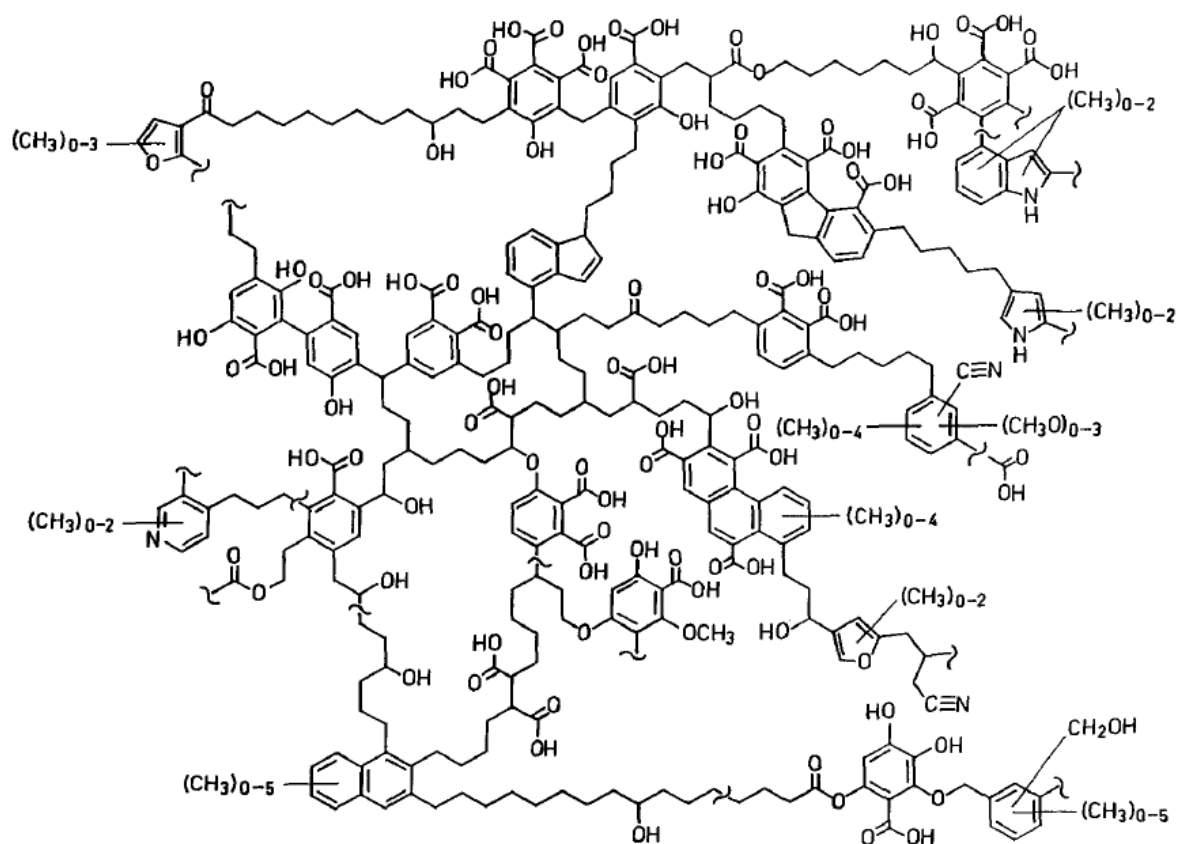
Nome da fração	Característica
Ácido húmico	Solúvel em NaOH e insolúvel em ácidos minerais e álcool
Ácido fúlvico	Solúvel em NaOH e ácidos minerais
Ácido himatomelânico	Solúvel em NaOH e álcool e insolúvel em ácidos minerais
Huminas	Insolúveis em água e NaOH

Fonte: Hall e Packham (1965)

Os ácidos húmicos (AH), existentes em diferentes graus de polimerização em meios naturais, como lençóis freáticos, águas superficiais, água potável e solo, são constituídos de uma mistura polidispersa de muitas substâncias, contendo principalmente grupos carboxila e fenólico. Em virtude da elevada massa molecular, os mesmos são capazes de se agregarem e formarem partículas coloidais com peso molecular aparente muito mais elevado. A Figura 4 apresenta a fórmula estrutural mais recente para o ácido húmico, proposta por Schulten e Schitzer (1993). Esta é caracterizada pela existência de vários grupos carboxílicos, fenólicos e alcoólicos e de grupos nitrogenados como aminas e nitrilas, bem como grandes cadeias alifáticas, apresentando massa molar é de 5540 g mol^{-1} e fórmula molecular $\text{C}_{306}\text{H}_{328}\text{O}_{90}\text{N}_5$. Em virtude da presença de muitos grupos funcionais nas moléculas de AH, pesquisadores, como Han et al. (2014), Erhayem e Sohn (2014) e Gong et al. (2013), observaram que as mesmas podem funcionar como um mediador de transferência de elétrons durante os processos de degradação de contaminantes orgânicos. Os ácidos fúlvicos (AF) apresentam estrutura semelhante à dos ácidos húmicos, no entanto, com massa molecular inferior (SCHINITZER, 1978; DI BERNARDO, 1983; ROCHA; ROSA, 2003).

A cor pode ser definida de duas formas: aparente, em que a medição é realizada sem a remoção de partículas suspensas na água; ou verdadeira, que não sofre interferência de partículas suspensas na água, sendo determinada experimentalmente após submissão da amostra à centrifugação ou filtração, conforme o procedimento descrito pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1999). De acordo com a Portaria MS nº 2.914/2011, o Valor Máximo Permitido (VMP) estabelecido para a cor aparente é de 15 uH, para que a água tratada seja distribuída à população.

Figura 4 - Fórmula estrutural do ácido húmico ($C_{306}H_{328}O_{90}N_5$)



Fonte: Schulten e Schnitzer (1993)

Em plantas de Estações de Tratamento de Água (ETAs), um dos maiores problemas que pode ser deparado é a remoção de matéria orgânica dissolvida, visto que, por ser composta principalmente por substâncias húmicas, a remoção por coagulação é dificultada, além de possuir tamanho de partículas tão pequenas que não são retidas na filtração, podendo, dessa forma, reagir com oxidantes utilizados na etapa de desinfecção, formando substâncias tóxicas e potencialmente cancerígenas, como trihalometanos e ácidos halocéticos, além de outros subprodutos durante a pré-oxidação e desinfecção (EDWARDS; AMIRTHARAJAH, 1985; LI et al., 2011; XU et al., 2016a).

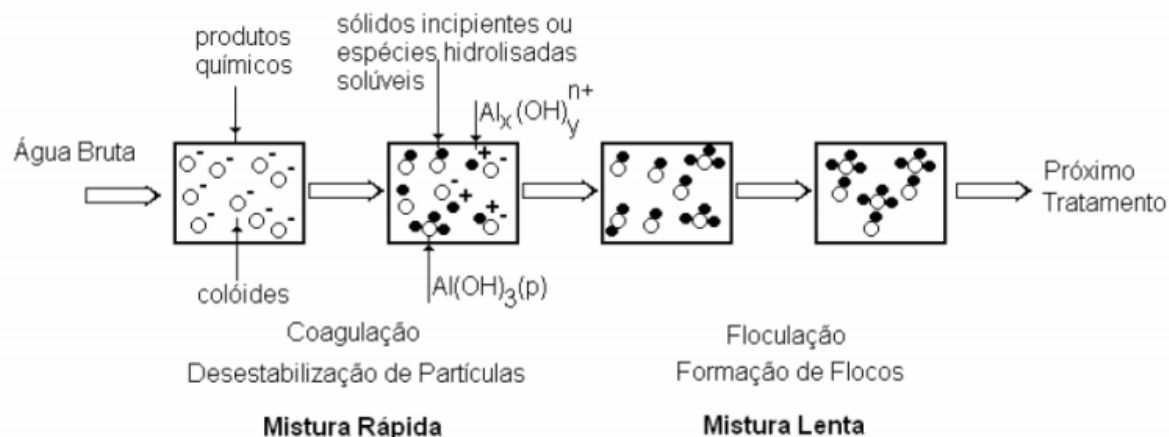
3.4 Coagulação

A coagulação química trata-se de uma das primeiras e mais importantes etapas no tratamento convencional da água, e tem como finalidade a remoção de partículas coloidais e consequentemente, a clarificação da água (AMIRTHARAJAH; MILLS, 1982; LI et al., 2008). Tais partículas, por apresentarem cargas negativas, se mantêm repelidas e estáveis no meio líquido, necessitando assim, da adição de um produto químico apropriado (Figura 5), geralmente coagulantes metálicos (sais de ferro e de alumínio) ou de polímeros sintéticos para que haja alteração das características das impurezas, e então, possibilitando a formação de espécies hidrolisadas, principalmente de hidróxidos metálicos, que são capazes de alterar a força iônica do meio e atuar na desestabilização de partículas coloidais ou neutralização de moléculas de substâncias húmicas presentes na água bruta, possibilitando a aproximação e aglomeração das mesmas, formando flocos maiores que podem ser removidos facilmente nas unidades posteriores (LICSKÓ, 1997; PAVANELLI, 2001; VOLTAN, 2007; DI BERNARDO; PAZ, 2008).

Conforme Di Bernardo e Dantas (2005), na unidade de mistura rápida, o coagulante químico é adicionado sob condições necessárias para sua rápida e uniforme distribuição na massa de água. A coagulação é caracterizada por dois fenômenos: primeiramente, o coagulante reage com a água, formando espécies hidrolisadas carregadas positivamente, sendo, portanto, fundamentalmente químico. Em seguida, tais espécies são transportadas, de modo a entrar em contato com as impurezas da água, caracterizando um processo essencialmente físico. Isto pode ocorrer em décimos de segundo até cerca de 100 segundos, dependendo das características da água. Ao final desta fase, a mistura lenta (floculação), é necessária para que as impurezas se choquem uma com as outras, formando partículas maiores. Estas etapas são representadas esquematicamente na Figura 5.

A efetividade do processo de coagulação é afetada por diversos fatores, e, por esta razão, trata-se de um fenômeno complexo. Dentre estes fatores, estão a dosagem de coagulantes, pH, temperatura, concentração de coloides ou turbidez, cor ou concentração de substâncias húmicas na massa de água, ânions e cátions presentes na água, intensidade da mistura rápida e gradiente médio de velocidade da mistura lenta, e mobilidade eletroforética das partículas (VALENCIA, 1990; CRITTENDEN et al., 2012).

Figura 5 - Representação esquemática das etapas de coagulação e floculação



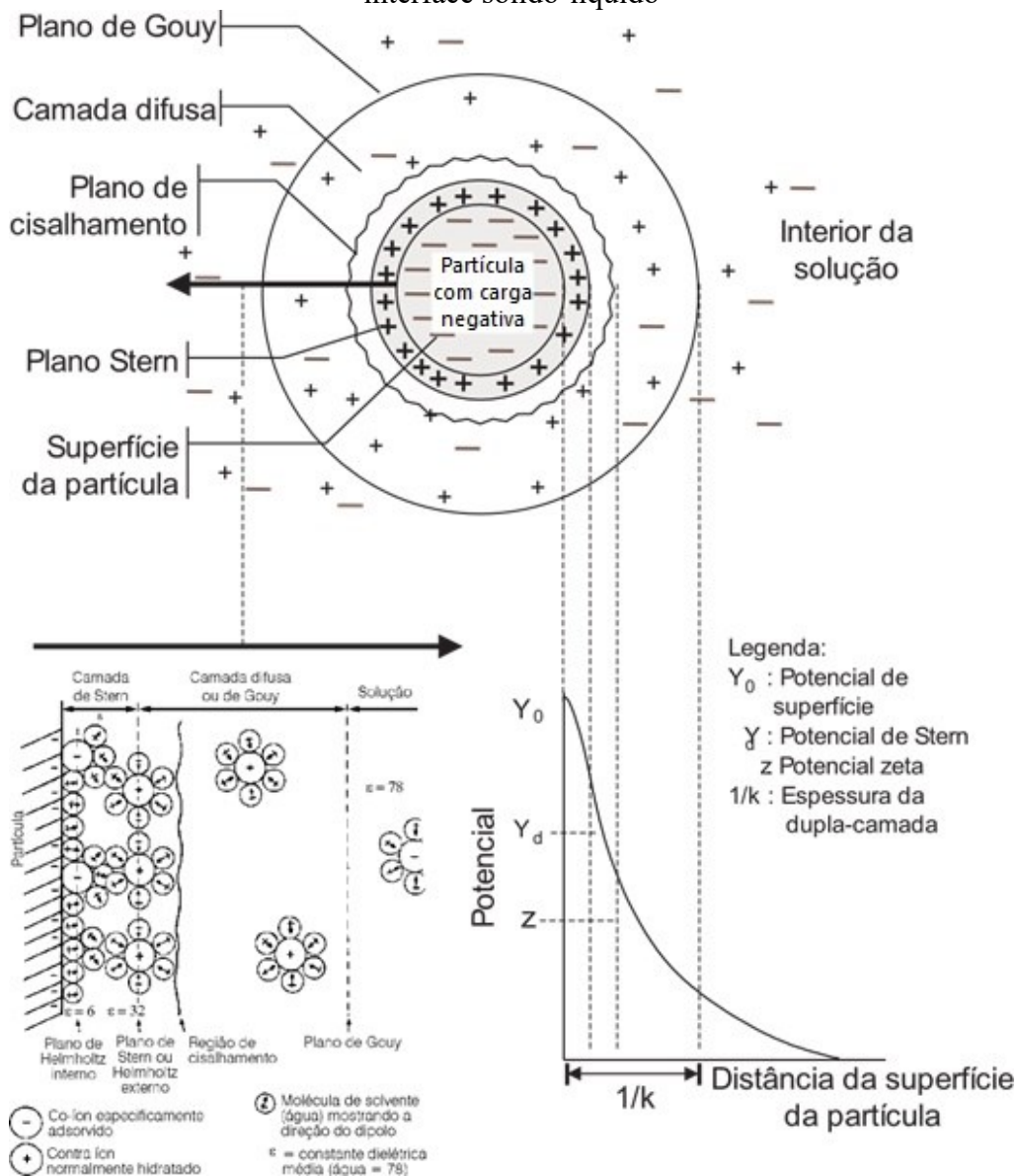
Fonte: Di Bernardo e Paz (2008)

Pelo fato das partículas coloidais serem carregadas negativamente, um excesso de íons de carga oposta é acumulado na região superficial das mesmas, formando uma camada interna firmemente aderida, mostrada esquematicamente na Figura 6. Já os íons de mesma carga são repelidos, formando um conjunto de camadas compacta (camada de Stern) e difusa, denominada Dupla Camada Elétrica (DCE). A camada difusa resulta da atração eletrostática de íons de cargas opostas às partículas e repulsão eletrostática de íons de mesma carga, e difusão molecular e térmica que age contra o gradiente de concentração produzido pelos efeitos eletrostáticos. A concentração destes íons é reduzida de forma exponencial a partir da superfície, até se igualar à concentração do meio líquido. A diferença de potencial elétrico decresce gradualmente entre um ponto prontamente fora da superfície da partícula e a concentração igualada à solução. É chamado de Potencial Zeta ou potencial eletrocinético, o potencial eletrostático no plano de cisalhamento de uma partícula, ou seja, a superfície que separa a camada interna da camada difusa (AMIRTHARAJAH, O'MELIA, 1990; RICHTER, 2009).

De acordo com Azevedo Netto et al. (1977), o principal objetivo deste processo é a redução do Potencial Zeta, um parâmetro útil na determinação da carga eletrostática superficial de partículas coloidais presentes na água. Sua medição pode ser considerada como um bom índice na caracterização da magnitude das interações de repulsão entre as mesmas. Desta forma, reduzir o Potencial Zeta nada mais é do que reduzir o potencial elétrico entre a superfície externa da camada compacta que se desenvolve em torno da partícula e o meio líquido em valores que permitam uma posterior aglomeração ou unificação das impurezas, assegurando a floculação. Dinger (2006) afirma que os valores típicos são de + 100 mV, passando por 0 mV até - 100 mV, sendo que valores absolutos superiores a cerca de 60 mV são característicos de

suspensões dispersas. A maior eficiência de coagulação é quando o valor do Potencial Zeta é neutralizado, ou seja, igual ou próximo de zero, entre + 10 mV e - 10 mV.

Figura 6 - Configuração esquemática da distribuição de cargas nas proximidades de uma partícula coloidal carregada e variação dos potenciais associados à dupla camada elétrica na interface sólido-líquido



Fonte: Adaptado de Jafelicci Junior e Varanda (1999)

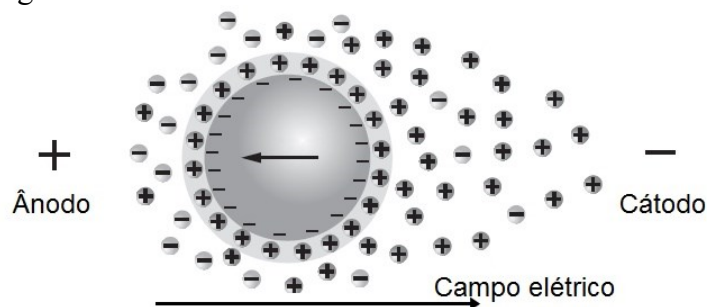
Black e Willems (1961), ao realizarem um estudo eletroforético de coagulação em água com cor orgânica utilizando sulfato férrico e sulfato de alumínio como agentes coagulantes, observaram que a região onde houve remoção ótima de cor ocorreu quando a mobilidade de partículas foi próxima de zero, ou seja, atingindo o ponto isoelétrico.

Conforme Yokosawa¹ (2001 apud Pavanelli, 2001), devido às reações de protonação (incorporação de um ou mais prótons – H^+) e desprotonação (retirada de prótons) de óxidos em soluções aquosas ácidas e básicas, respectivamente, o Potencial Zeta é correlacionado ao pH do meio, à força iônica de suspensão e à espessura da dupla camada elétrica, que depende da concentração de íons adsorvidos.

A importância do Potencial Zeta para diversas aplicações em ciência e engenharia desencadeou uma série de técnicas para sua medição, baseadas em um dos três efeitos eletrocinéticos:

- a) eletroforese: é o procedimento mais empregado na determinação do Potencial Zeta, e se baseia na movimentação de partículas coloidais em um campo elétrico em direção ao ânodo, carregando parte da dupla camada difusa em um campo elétrico, obtendo a velocidade do coloide através de uma técnica microscópica adequada (Figura 7);
- b) eletro-osmose: pode ser considerada como um complemento da eletroforese, onde suas fases estacionárias e móveis estão trocadas com relação às estabelecidas para a eletroforese (BRETT; BRETT, 1993). Dessa forma, a superfície carregada permanece constante, como uma parede de vidro da célula, e a aplicação um campo elétrico na suspensão acarreta na movimentação dos íons de cargas opostas, arrastando também a água (Figura 8);
- c) potencial de corrente: um campo elétrico é criado quando uma solução eletrolítica passa ao longo de uma superfície carregada estacionária pela ação de uma diferença de pressão (Figura 9). É o procedimento com menor frequência de uso (VALENCIA, 1973; SZE et al., 2003; PICCININI, 2013).

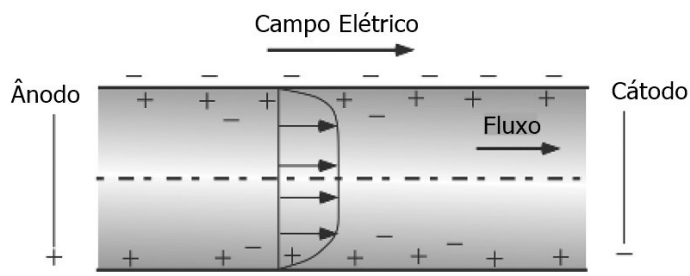
Figura 7 - Processo eletrocinético baseado em eletroforese



Fonte: Adaptado de Crittenden et al. (2012)

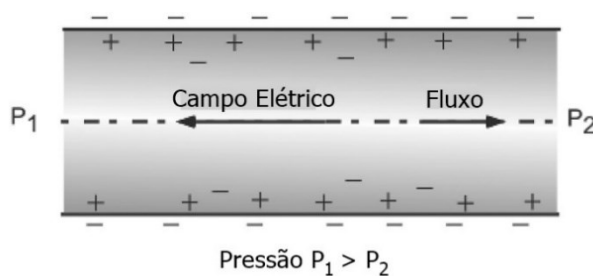
¹ YOKOSAWA, M. M. **Polieletrólitos sintéticos e derivados de polímeros naturais na estabilização de suspensões aquosas de alumina**. 2001. 134 f. Tese (Doutorado em Físico-Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

Figura 8 - Processo eletrocinético baseado em eletro-osmose



Fonte: Adaptado de Masliyah e Bhattacharjee (2006)

Figura 9 - Processo eletrocinético baseado em potencial de corrente



Fonte: Adaptado de Masliyah e Bhattacharjee (2006)

Smoluchowski² (1917 apud Richter, 2009) utilizou pela primeira vez a mobilidade eletroforética para calcular a magnitude do Potencial Zeta, utilizando-se a Equação 1.

$$\zeta = \frac{4\pi \cdot v}{E \cdot D} = 1,256 \cdot 10^5 \cdot \mu \frac{M}{D} \quad (1)$$

em que:

ζ : potencial zeta (mV);

v : velocidade da partícula ($\mu\text{m s}^{-1}$);

μ : viscosidade dinâmica da água (poises – 1 poise = 0,0102 kg s m⁻²);

E : potencial aplicado por unidade de comprimento da célula eletroforética (volt cm⁻¹);

$M = \frac{v}{E}$: mobilidade eletroforética ($\frac{\mu\text{m s}^{-1}}{\text{V cm}^{-1}}$);

D : constante dielétrica da água = 80,4 c.g.s.e. a 20 °C e 78,5 c.g.s.e. a 25 °C.

O equipamento de medição do Potencial Zeta mais comumente utilizado é o zetâmetro, que utiliza o método de microeletroforese. Este equipamento constitui-se de uma célula

² SMOLUCHOWSKI, M. V. Versuch einer mathematischen theorie der koagulationskinetik kolloider Lösungen. *Zeitschrift fuer physikalische Chemie*, v. 92, p. 129-168, 1917.

eletroforética e de um microscópio estereoscópio e seu funcionamento é baseado na aplicação de um campo elétrico no interior da célula, energizando os eletrodos e o tempo de deslocamento das partículas em um reticulado de dimensões conhecidas, observadas pelo microscópio é medido (RICHTER, 2009).

3.4.1 Mecanismos de Coagulação

Inúmeras variáveis estão relacionadas com o processo de coagulação, tornando-se importante o estudo das características físico-químicas da água em tratamento. De acordo com Amirtharajah e Mills (1982) e Di Bernardo e Dantas (2005), quando as condições propícias à coagulação são preenchidas, quatro mecanismos distintos podem desencadear de forma individual ou associada, a desestabilização de partículas coloidais. São eles: compressão da camada difusa; adsorção e neutralização de carga; varredura; e adsorção e formação de pontes. O predomínio e eficiência de um destes mecanismos está relacionado a fatores como pH de coagulação, do coagulante utilizado e sua dosagem, das características iniciais da água bruta, da carga e da concentração de partículas. No tratamento de água, destacam-se a adsorção e neutralização de carga e a varredura (KIM; MOON; LEE, 2001). Estes mecanismos são descritos de forma mais detalhada nos subtópicos seguintes.

3.4.1.1 Compressão da camada difusa

A compressão da camada difusa foi demonstrada através de um modelo eletrostático de Derjaguin, Landau, Verwey, e Overbeek, conhecida como DLVO, desenvolvida por Schulze e Hardly, em 1900. Trata-se de um mecanismo onde os colóides repelem íons de mesma carga ao mesmo tempo que atraem os de carga oposta. Dessa forma, a desestabilização de partículas coloidais em suspensão na água bruta por um eletrólito indiferente (não possui característica de hidrólise ou de adsorção) decorre de interações puramente eletrostáticas. Ao inserir um colóide em um sistema coloidal, a densidade de cargas na camada difusa é aumentada, visando a neutralidade da camada e, assim, promovendo a coagulação pelo adensamento da camada difusa pela redução da “esfera” de influência das partículas (VALENCIA, 1973; AMIRTHARAJAH; O’MELIA, 1990).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), dois aspectos são destacados neste mecanismo de coagulação:

- a) a quantidade de eletrólitos para conseguir a coagulação é, praticamente, independente da concentração de partículas coloidais na água;
- b) independentemente da quantidade de eletrólitos adicionada, a reestabilização dos coloides é impossível, ou seja, as cargas (que passam a ser positivas) não são revertidas.

3.4.1.2 Adsorção e neutralização de carga

A desestabilização de uma dispersão coloidal pela adsorção e neutralização de carga consiste nas interações entre coagulante-coloide, coagulante-solvente e coloide-solvente. O mecanismo de adsorção é comum de ocorrer quando há utilização de espécies hidrolisadas de alumínio, ferro ou polímeros sintéticos catiônicos, causada pela interação entre coagulante e coloide.

Conforme Eckenfelder (1989), devido à dissolução do coagulante químico, os cátions servem para neutralizar as partículas em suspensão carregadas negativamente. Isto ocorre antes da formação visível do floco, e a mistura rápida é efetiva nesta etapa. Assim sendo, são formados microflocos capazes de reter a carga positiva na faixa ácida devido a adsorção de íons H^+ , bem como atuar na neutralização e cobrir os coloides.

Este mecanismo é fundamental quando se tem tratamento realizado por meio de tecnologia de filtração direta, uma vez que não há necessidade da geração de flocos para posterior sedimentação ou flotação, e as partículas desestabilizadas são retidas no meio granular dos filtros (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Segundo Di Bernardo (2000), as principais diferenças entre o mecanismo de adsorção e neutralização de carga e o de compressão da camada difusa são:

- a) as partículas coloidais são desestabilizadas com dosagens menores de coagulantes necessárias para a compressão da camada difusa;
- b) uma relação estequiométrica é observada entre a razão da concentração de coloides e a quantidade necessária de espécies desestabilizantes por adsorção;
- c) a reversão da carga superficial dos coloides é possível mediante dosagem excessiva de espécies adsorvíveis.

3.4.1.3 Varredura

Este mecanismo, capaz de produzir flocos maiores, consiste na introdução de um sal metálico (cloreto férrico e sulfato de alumínio, por exemplo) que exceda seu limite de solubilidade na água, ocasionando a precipitação de hidróxidos metálicos gerados, como $Al(OH)_3$ e $Fe(OH)_3$, capazes de envolver coloides e partículas suspensas (VALENCIA, 1973). Comparado com o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas, as velocidades de sedimentação são maiores e, portanto, a varredura vem sendo empregada em estações de tratamento de ciclo completo (PAVANELLI, 2001).

As espécies hidrolisadas são formadas em um curto espaço de tempo (entre 1 e 7 segundos), e, posteriormente, os precipitados de hidróxidos metálicos são formados, efetivando o mecanismo de varredura (FRANCO, 2009).

Em uma avaliação realizada por Di Bernardo, Guimarães e Mendes³ (1987 apud Di Bernardo, 2000), através da coagulação de água com cor verdadeira alta (100 uH) em relação à turbidez (5 uT), e outra com cor verdadeira baixa (5 uH) em relação à turbidez (200 uT) por mecanismos de adsorção e neutralização de carga e por varredura, concluíram que a região de adsorção é caracterizada por valores de pH e dosagens de coagulante inferiores que os da região da varredura, e os resultados mais eficientes no mecanismo de adsorção e neutralização foram obtidos em faixas de dosagem de coagulante e pH final bem mais estreitas que no mecanismo de varredura.

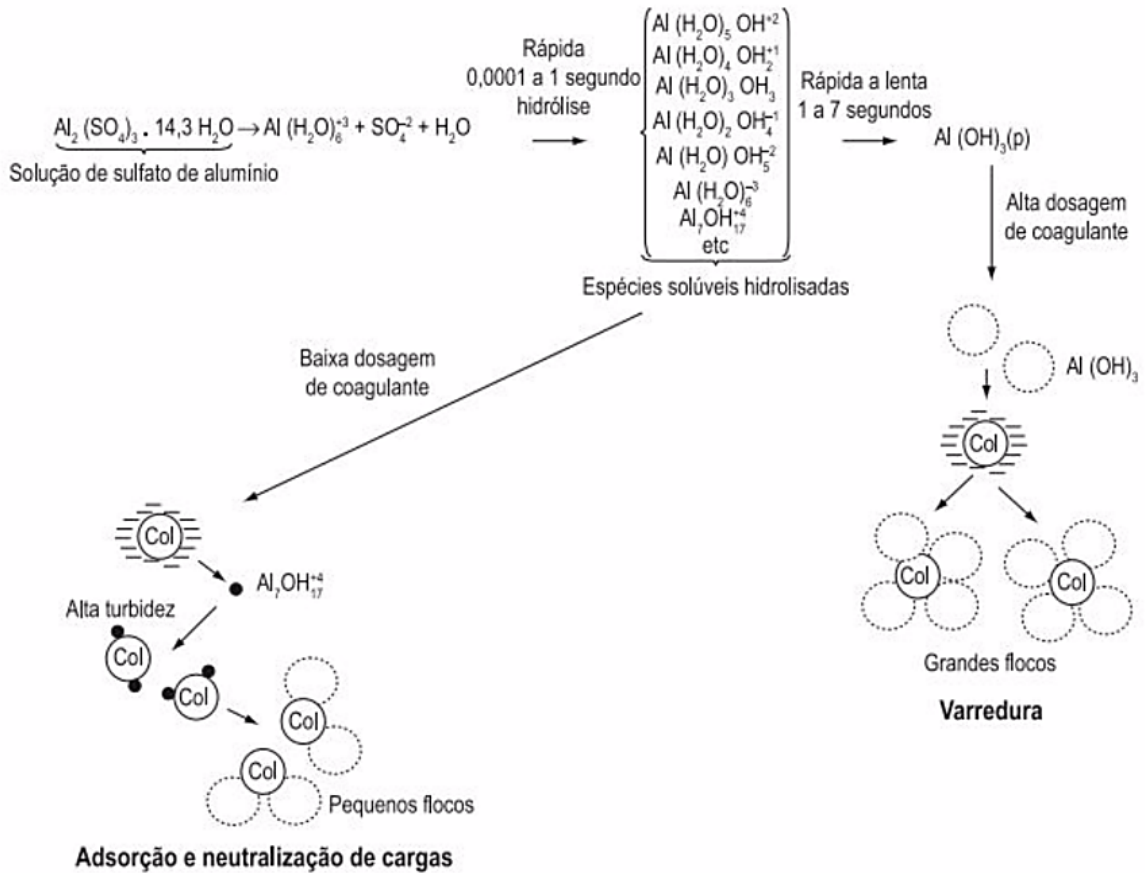
Di Bernardo⁴ (1993 apud De Julio et al., 2006) menciona que este mecanismo, pelo fato de não depender da neutralização da carga dos coloides, a condição ótima de coagulação pode não corresponder àquela onde o Potencial Zeta é mínimo.

A Figura 10 mostra as possíveis reações que podem ocorrer através dos mecanismos de coagulação por adsorção e neutralização de cargas e por varredura, quando utilizado sulfato de alumínio como agente coagulante.

³ DI BERNARDO, L.; GUIMARÃES, A. F.; MENDES, C. G. N. Coagulação, floculação de água com turbidez ou cor elevada. **Revista DAE**, v. 47, n. 150, p. 227-239, 1987.

⁴ DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993. v. 2.

Figura 10 - Esquema de reações de coagulação por adsorção e neutralização de carga e por varredura utilizando sulfato de alumínio como coagulante



Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

3.4.1.4 Adsorção e formação de pontes

Este mecanismo é caracterizado pelo emprego de polímeros naturais ou sintéticos de grandes cadeias moleculares como agente coagulante, ligando a superfície à qual estão aderidos a outras partículas. Estes compostos, denominados polieletrólitos, podem ser classificados segundo os sítios ionizáveis: catiônicos, quando possuem sítios ionizáveis positivos, capazes de neutralizar cargas negativas dos coloides; aniônicos, compostos por sítios ionizáveis negativos; anfotéricos, que possuem sítios ionizáveis positivos e negativos; e não-iônicos, que são neutros. A desestabilização de partículas com cargas negativas é possível tanto pelo uso de polímeros catiônicos, como aniônicos (DI BERNARDO, 2000; DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

O comportamento de polímeros como coagulantes, conforme explicado por Amirtharajah e O'Melia (1990), é baseado na capacidade de alguns grupos reativos da molécula em adsorver quimicamente partículas coloidais, seguida pela redução da carga ou pelo emaranhamento das partículas pelos polímeros. Neste caso, a coagulação não é influenciada essencialmente por

forças eletrostáticas, e sim pelo fenômeno de adsorção em um ou mais pontos, de modo que o restante da cadeia polimérica fique livre, podendo se aderir em outro coloide, formando uma ponte molecular entre uma partícula e outra, permitindo assim, a aglutinação de partículas, formando os flocos.

3.4.2 Sulfato de alumínio como agente coagulante

O sulfato de alumínio, identificado pela fórmula molecular $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$, em que “n” representa cerca de 14 a 18 moléculas de água de cristalização, é o coagulante mais utilizado no tratamento de água por ser eficiente e de baixo custo. É caracterizado pela cor branca-acinzentada, solúvel em água, e pode ser disponibilizado em pedra, pó e soluções concentradas. A faixa de pH capaz de proporcionar coagulação efetiva está no intervalo de 5,0 a 8,0 (DI BERNARDO, 1983; PAVANELLI, 2001; FRANCO, 2009).

Segundo Amirtharajah e O’Melia (1990), quando o produto é adicionado na água, uma série de espécies hidrolisadas poderão ser originadas para um valor de pH estabelecido. No caso do sulfato de alumínio, as principais são: Al^{3+} ; $Al(OH)^{2+}$; $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ e $Al(OH)_4^-$. Estas espécies hidrolisadas são capazes de adsorver ou formar superfícies complexas, permitindo a formação de flocos.

Anteriormente a formação do precipitado amorfo, reações de hidrólise intermediárias ocorrem quando o sulfato de alumínio é incorporado à água, fazendo com que haja liberação de prótons (H^+), consumindo substâncias que conferem alcalinidade à água, caso existente, da ordem de $1,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de sulfato de alumínio para cada $0,5 \text{ mg.l}^{-1}$ de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

3.4.3 Remoção de cor por coagulação química

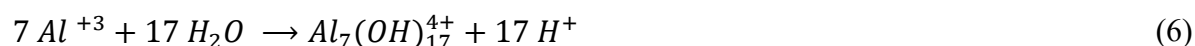
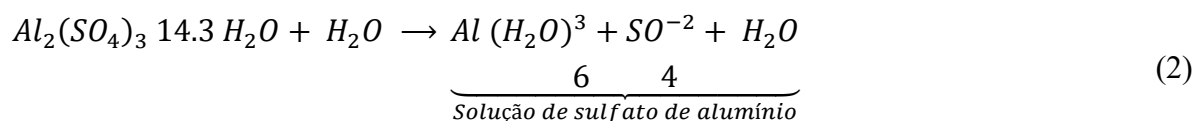
Conforme já descrito na sessão 3.3, as partículas de substâncias húmicas são de difícil remoção, visto que apresentam diâmetro reduzido e, para que o tratamento seja eficaz, a aglomeração das partículas é essencial para a remoção das mesmas.

Segundo De Julio et al. (2006), o emprego da técnica de tratamento de água de ciclo completo com decantação é dificultado para águas que apresentam cor verdadeira relativamente alta e turbidez baixa, devido a redução da ocorrência de colisões entre as partículas que, por dificultar

a formação de agregados, reduz a eficiência da etapa de floculação, assim como as etapas seguintes do tratamento.

Enquanto que o principal mecanismo da coagulação de água com turbidez elevada em relação à cor é o de adsorção de monômeros e polímeros de alumínio pelas partículas coloidais, em águas caracterizadas por cor elevada em relação à turbidez, têm-se um revestimento das partículas coloidais por compostos orgânicos e ácidos húmicos e fúlvicos livres em solução.

De início, há reação dos polímeros resultantes da hidrólise do coagulante químico com as substâncias húmicas em dispersão, formando partículas que precipitam. Posteriormente, os polímeros adicionais reagem com as partículas de turbidez e compostos orgânicos coloidais, sendo necessárias então, dosagens maiores de coagulantes comparadas com águas de cor baixa. As reações de hidrólise com sulfato de alumínio em águas de cor elevada são apresentadas nas Equações 2 a 7, ilustrando o mecanismo de coagulação de forma mais detalhada (DI BERNARDO, 1983).



Edwards e Amirtharajah (1985) observaram que a coagulação utilizando sulfato de alumínio em água com cor e turbidez apresentou custo inferior quando comparado com o tratamento de águas somente com cor elevada (excesso de substâncias húmicas). Isto ocorre devido a característica extremamente leve e frágil do floco formado em águas com cor elevada, ao passo que, a presença de turbidez pode conceder um maior peso, beneficiando a sedimentação de flocos.

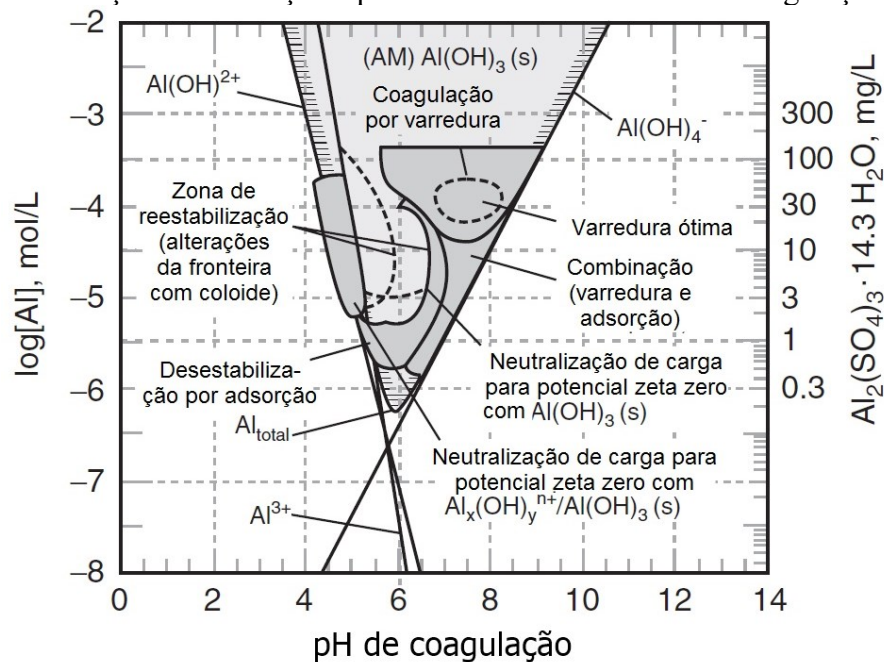
Black et al. (1963), ao estudar a atuação do sulfato férrico e sulfato de alumínio como agentes coagulantes em águas com cor elevada, observou que o primeiro possui melhor eficiência de remoção. No entanto, segundo Valencia (1990), este é desvantajoso pelo fato de aumentar a concentração de ferro na água.

3.4.4 Diagrama de Coagulação

O diagrama de coagulação é uma ferramenta muito útil para estimar as melhores condições químicas em que determinada coagulação pode ocorrer, possibilitando a definição do melhor valor de pH e dosagem de coagulante para os quais a coagulação é mais eficiente. Sua elaboração é importante em diversos estudos, como remoção de turbidez, cor, filtração direta e seleção de dispositivos de mistura rápida. Além disso, a estrutura de diagramas é capaz de associar as condições químicas específicas com a atuação de diferentes mecanismos de coagulação de forma individual e associada, conforme ilustrado na Figura 11.

Sua construção se dá pela sobreposição do diagrama de solubilidade do coagulante com as condições químicas em que o processo ocorre, aferidas por meio de *Jar Test*, variando o valor de pH de coagulação e dosagem de coagulante (AMIRTHARAJAH; O'MELIA, 1990; VALENCIA, 1990).

Figura 11 - Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio como agente coagulante e associação das condições químicas com mecanismos de coagulação

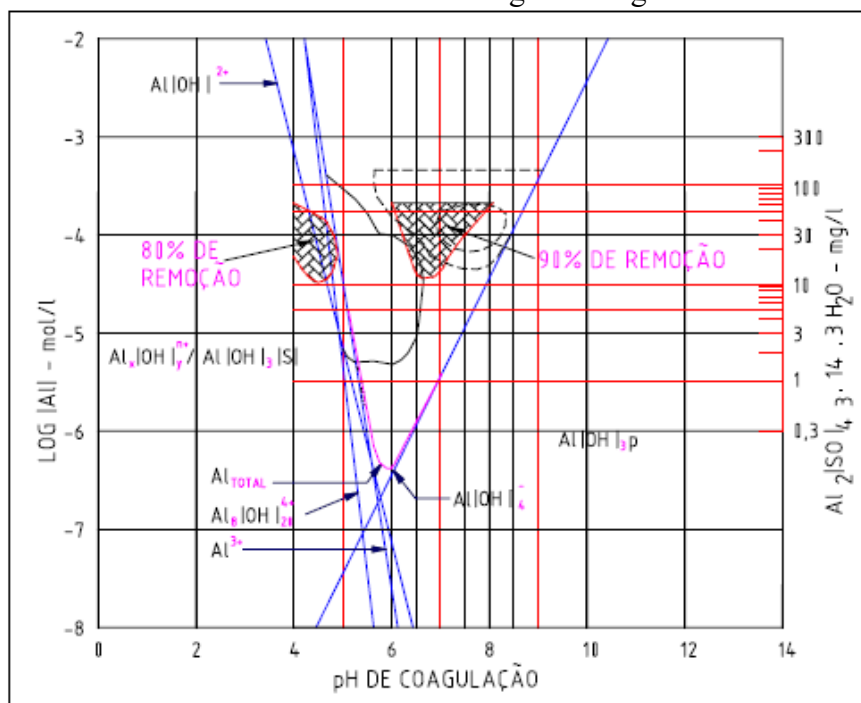


Fonte: Adaptado de Crittenden et al. (2012)

Voltan (2007) esclarece que não existe uma dosagem ótima de coagulante, nem mesmo um pH de coagulação ótimo. Para cada situação, tem-se um apropriado par de valores de dosagem de coagulante e pH de coagulação, considerando também a utilização de acidificante ou alcalinizante, custeio de produtos químicos, percentual desejado de remoção de cor e/ou turbidez, entre outros.

Um diagrama típico de coagulação, elaborado a partir de estudos realizados por Amirtharajah e Edwards (1985), é apresentado na Figura 12, mostrando regiões nas quais a amostra de água foi preparada com cor verdadeira de 100 uH e sem turbidez.

Figura 12 - Regiões de remoção de cor verdadeira de 100 uH e turbidez de 0 uT, utilizando sulfato de alumínio como agente coagulante



Fonte: Amirtharajah e Edwards ⁵ (1985 apud Pavanelli, 2001)

Duas regiões distintas são observadas no diagrama da Figura 12: uma com pH na faixa de 6,0 a 8,3 com dosagens de coagulante de 12 mg.l⁻¹ a 55 mg.l⁻¹, onde ocorre precipitação de hidróxido de alumínio (mecanismo de varredura), e outra com pH entre 4,0 e 4,8 e dosagens de coagulante de aproximadamente entre 10 mg.l⁻¹ e 80 mg.l⁻¹, onde as substâncias húmicas são removidas por neutralização de cargas, caracterizada pela presença de um limite superior de remoção de cor nesta região. Este limite é atribuído à reestabilização por excesso de dosagem,

⁵ AMIRTHARAJAH, A.; EDWARDS, G. A. Removing color caused by humic acids. **Journal American Water Works Association**, v. 77, n. 3, p. 50-57, mar. 1985.

inexistente na região onde há precipitação de hidróxido de alumínio. A região de neutralização de carga apresentou percentual de remoção ligeiramente mais baixo, resultado da baixa concentração de moléculas de ácido húmico na água de estudo.

Gregor, Nokes e Fenton (1997) também verificaram os dois mecanismos principais na remoção de matéria orgânica natural de águas com baixa turbidez pela hidrólise de coagulantes, como sais de alumínio e de ferro: a ligação de espécies metálicas catiônicas em sítios aniônicos do material húmico, neutralizando assim sua carga e conduzindo à precipitação, mais significativo em pH baixo (em torno de 5,0 ou menos); e a precipitação de hidróxido metálico amorfo, que ocorre rapidamente em pH mais elevado, possibilitando a adsorção de substâncias húmicas dissolvidas, que podem ser removidas por técnicas de separação física, como sedimentação e filtração.

Amirtharajah e Mills (1982) asseguram a importância da construção do diagrama de coagulação para cada água de estudo, uma vez que as características da água são capazes de mudar as condições do mecanismo de coagulação.

3.5 Flocculação

Conforme já abordado anteriormente, o processo de flocculação consiste em promover interações entre as impurezas desestabilizadas na coagulação e os precipitados de metal em um sistema de baixa turbulência, recebendo velocidade de agitação lenta controlada (geralmente com um gradiente de velocidade inferior a 80 s^{-1}), que favorece a taxa de colisões entre as partículas, visando a efetivação da agregação das mesmas gradualmente, possibilitando a formação e crescimento de flocos, removidos posteriormente através de sedimentação, filtração ou flotação (SPICER; PRATSINIS, 1996; DI BERNARDO; DANTAS, 2005; VOLTAN, 2007).

As interações entre as partículas desestabilizadas ocorrem através de três mecanismos: interação pericinética, interação ortocinética e sedimentação diferenciada. As interações pericinéticas (movimento Browniano) ocorrem devido ao movimento errático das partículas causado pela energia térmica. Segundo Bratby, Miller e Marais (1977), pelo fato de serem efetivadas por energia própria, a agregação de partículas ocorre até um determinado tamanho (da ordem de 0,1 a $1 \mu\text{m}$). Assim, este tipo de interação não produz resultados relevantes no processo floculatório, já que as dispersões coloidais apresentam flocos relativamente grandes. Por outro lado, as interações ortocinéticas são mais efetivas no tratamento de água, por serem

resultado do encontro das partículas decorrentes do gradiente de velocidade do meio. Por fim, o mecanismo de sedimentação diferenciada correspondente à colisão de partículas com diferentes velocidades de sedimentação, promovendo o aumento do tamanho dos flocos e conseqüentemente, na melhoria da sedimentabilidade (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; GREGORY, 2009).

Visando uma eficiência no tratamento de uma determinada água, o estudo do coagulante empregado e otimização das condições químicas e parâmetros operacionais de mistura rápida e floculação é fundamental para que os flocos sejam produzidos com características apropriadas para a remoção. Para tal finalidade, inicialmente é determinado o par de valores de pH de coagulação e dosagem de coagulante através da construção do diagrama de coagulação. Em seguida, os parâmetros ótimos de coagulação são determinados experimentalmente, fixando-se o gradiente médio de velocidade (G_f) e tempo de floculação (T_f). Finalmente, os parâmetros da mistura lenta são otimizados, obtendo assim, as melhores condições de tratamento. Em geral, o valor de G_f varia entre 10 e 60 s^{-1} , enquanto o de T_f pode variar entre 10 e 40 min (DI BERNARDO; BOTARI; PAZ, 2004; MORENO, 2014).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), o uso da modelagem matemática a partir de fenômenos de agregação e ruptura passou a ser adotada na estimativa do desempenho da floculação. Os flocos são formados em virtude das colisões entre as partículas, que são diretamente proporcionais ao aumento do gradiente médio de velocidade e do tempo de floculação. Entretanto, um sistema submetido a uma elevada agitação é capaz de promover a ruptura dos flocos pela força de cisalhamento.

3.5.1 Cinética de agregação

As teorias e modelagens matemáticas relativas à cinética de agregação começaram a ser desenvolvidas por Smoluchowski (1917), onde as frequências de colisões entre as partículas eram representadas por expressões básicas, assumindo uma série de simplificações: 1) a eficiência de colisão é a mesma para todas as partículas; 2) o fluxo é laminar; 3) as partículas são monodispersas (isto é, possuem o mesmo tamanho); 4) não há quebra dos flocos formados; 5) todas as partículas são esféricas, até mesmo após os choques; e 6) as colisões envolvem apenas duas partículas.

Thomas, Judd e Fawcett (1999) afirmam que, embora as expressões analíticas desenvolvidas por esta abordagem clássica definem o processo de floculação, sua pertinência para sistemas reais é significativamente limitada em virtude das hipóteses consideradas. Desta forma, Argaman e Kaufman (1970) desenvolveram um modelo matemático capaz de estimar a cinética de floculação integrando os fenômenos de agregação e ruptura dos flocos resultantes da ação combinada de diferentes mecanismos, sendo o mais utilizado atualmente no estudo da cinética de agregação (MORUZZI; OLIVEIRA, 2013). Apesar destas modificações propostas, a floculação é um processo complexo em que diversos aspectos ainda são pouco compreendidos em sua totalidade. A variação do número de partículas por tempo pode ser descrita conforme a Equação 8.

$$\frac{dn_1}{dt} = K_B n_0 G_f^{k_{es}} - K_A n_1 G_f \quad (8)$$

Sendo:

n_0 : concentração inicial de partículas primárias ($t = 0$) (m^{-3});

n_1 : concentração remanescente de partículas primárias no tempo t (m^{-3});

K_A : coeficiente de agregação (adimensional);

K_B : coeficiente de ruptura (s);

G_f : gradiente de velocidade médio durante a floculação (s^{-1});

k_{es} : coeficiente relacionado à resistência dos flocos, sendo $k_{es} = 2$ para $d_p < \eta$ (microescala de turbulência de Kolmogoroff's);

$\frac{dn_1}{dt}$: variação do número de partículas por tempo.

Integrando-se a Equação 8 para ($t = 0$; $n = n_0$) e ($t = T_f$; n_1), obtém-se a Equação 9.

$$n_1 = \frac{K_B}{K_A} n_0 G_f + n_0 \left(1 - \frac{K_B}{K_A} G_f \right) e^{-K_A G_f T_f} \quad (9)$$

Rearranjando a Equação 9, a cinética da floculação em um reator estático pode ser descrita conforme a Equação 10.

$$\frac{n_0}{n_1} = \left[\frac{K_B}{K_A} G_f + \left(1 - \frac{K_B}{K_A} G_f \right) e^{-K_A G_f T_f} \right]^{-1} \quad (10)$$

Em que:

T_f : tempo de floculação (s);

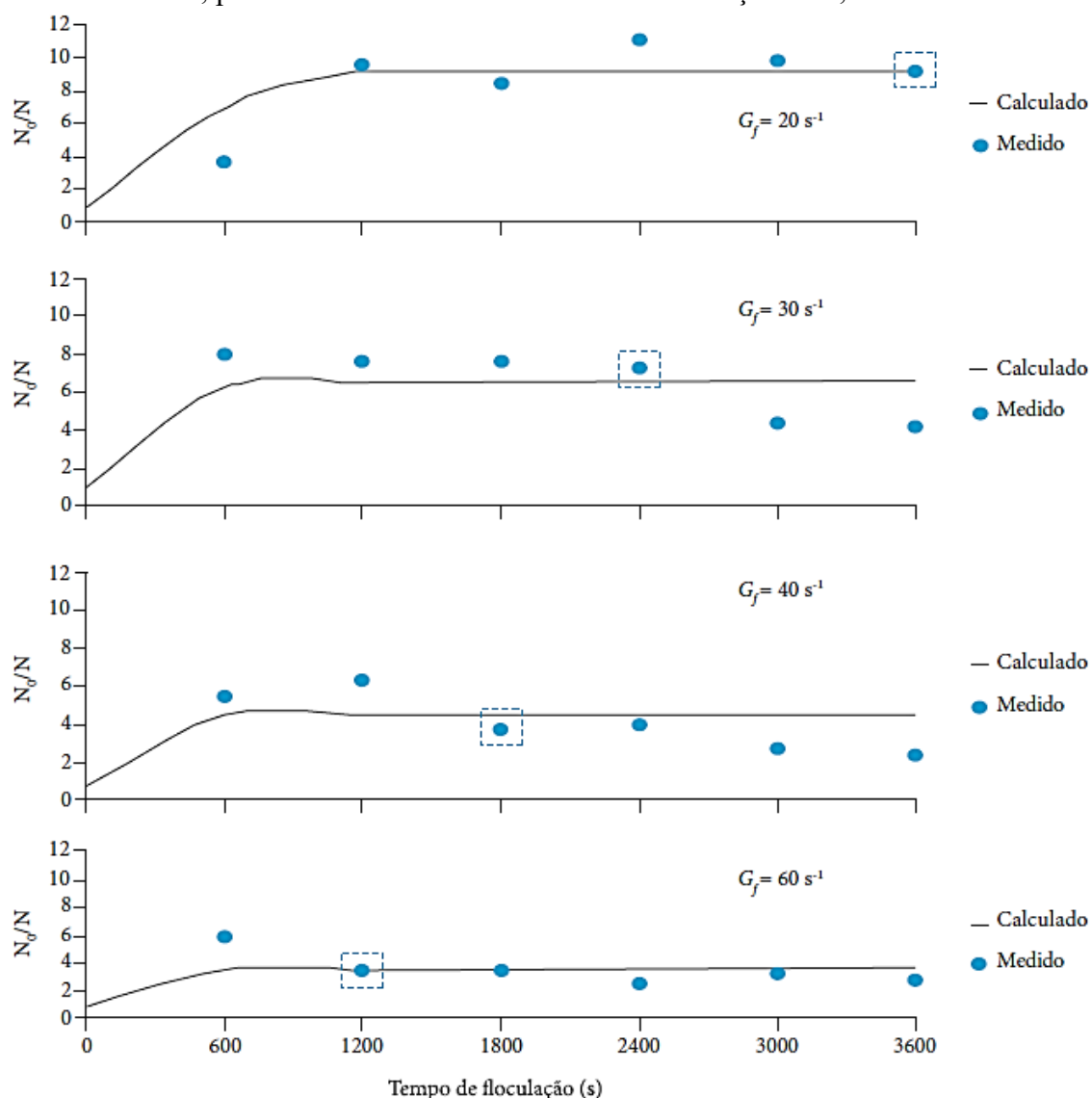
$\frac{n_0}{n_1}$: refere-se ao parâmetro de desempenho.

Bratby, Miller e Marais (1977) descreveram uma metodologia para a determinação dos coeficientes de agregação e ruptura durante a floculação através de ensaios laboratoriais de coagulação, floculação e sedimentação por diferentes tempos de agitação (comumente maior que 2 h) e de gradiente de velocidade médio de floculação para as condições ótimas de mistura rápida. Assim, são plotadas curvas de tendência a partir dos resultados obtidos de eficiência de remoção em função do tempo de floculação para cada G_f estudado (BRATBY, 1981).

Moruzzi et al. (2016), a partir do estudo com água de turbidez inicial de 25 uT, determinaram os coeficientes de agregação e ruptura para intervalo de confiança de 95% ($K_A = 2,74 \times 10^{-4} \pm 2,02 \times 10^{-6}$ e $K_B = 1,41 \times 10^{-6} \pm 8,76 \times 10^{-8}$) e verificaram a ocorrência do equilíbrio dinâmico pressuposto pela Equação 10 a partir dos primeiros minutos de floculação, através da linha de tendência de estabilização da floculação ilustrada na Figura 13, para os diferentes G_f analisados (20 s^{-1} , 30 s^{-1} , 40 s^{-1} , 60 s^{-1}).

Ao comparar os valores de eficiência, apontados em termos de n_0/n_1 para os G_f estudados, é possível verificar uma relação proporcional entre o gradiente médio de velocidade e a quebra dos flocos, obtendo melhor eficiência para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ e $T_f = 3600 \text{ s}$. Esta relação também foi observada por Argaman (1971).

Figura 13 - Desempenho temporal da floculação de água com turbidez de 25 ± 2 uT, coagulada com dosagem de $2,0 \text{ mg Al}^{3+} \cdot \text{l}^{-1}$ e pH de 7,5, sob taxas de cisalhamento de 20 s^{-1} a 60 s^{-1} , para dados obtidos com taxa de sedimentação de $0,5 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$



Fonte: Moruzzi et al. (2016)

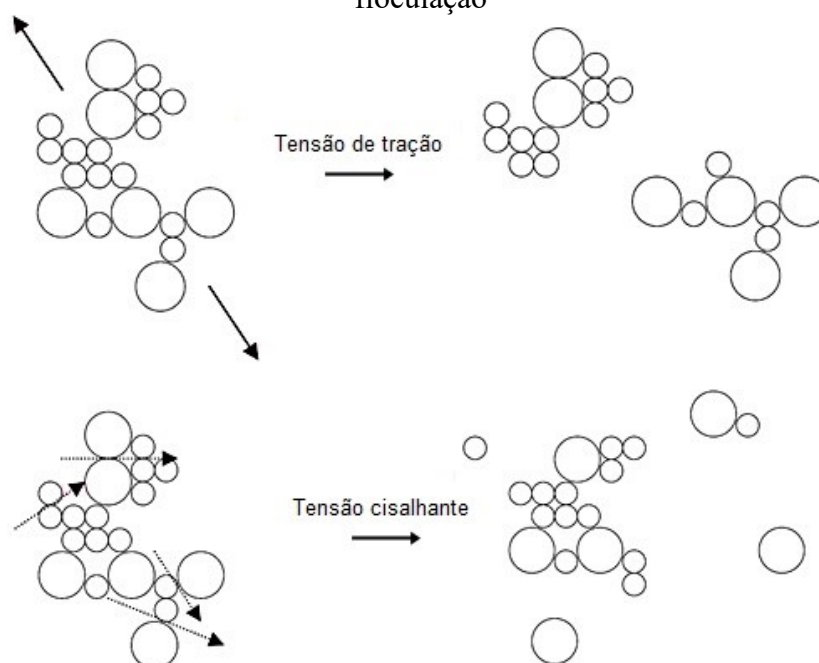
3.5.2 Agregação, ruptura e recrescimento dos flocos

A taxa de choques entre as partículas é acrescida durante a agitação lenta, onde estas agregam-se para formar partículas maiores. No entanto, as forças de cisalhamento geradas pela agitação e redução da eficiência de colisão no campo de cisalhamento provocado pelo aumento do tamanho das partículas podem limitar o crescimento das mesmas, acarretando na quebra dos flocos de acordo com seu tamanho (BRAKALOV, 1987). Esta quebra, segundo Ray e Hogg (1986), ocorre quando o emprego de uma taxa de cisalhamento é tal que a força do floco se torna insuficiente para suportar o estresse hidrodinâmico (DI BERNARDO; BOTARI; PAZ,

2004). Assim, a agregação e ruptura ocorrem simultaneamente, conduzindo a uma condição estática, que pode levar ao estado estacionário na distribuição de tamanho do floco, dependente da taxa de cisalhamento aplicada (MÜHLE⁶, 1993 apud YUKSELEN; GREGORY, 2004). Em outros casos, entretanto, a agregação de partículas atinge um diâmetro máximo, seguido de um decréscimo após um determinado tempo de floculação (PENG; WILLIAMS, 1994).

De acordo com Jarvis et al. (2005), a desagregação de flocos pode ocorrer por dois mecanismos principais: a fragmentação em larga escala e erosão superficial, conforme ilustrado na Figura 14. A fragmentação em larga escala é decorrente das diferenças de pressão dinâmica em lados opostos das partículas, provocando inicialmente, uma deformação, seguida de desfragmentação em tamanho similar, não resultando em um aumento de partículas primárias. Já a erosão superficial é provocada pelo arraste da água por intermédio das forças de cisalhamento na superfície dos flocos de forma tangencial em um escoamento turbulento, lapidando pequenas partículas das superfícies dos flocos, que, por sua vez, acarreta em um aumento de partículas primárias. Este fenômeno é considerado até mesmo como principal mecanismo de desagregação para alguns autores, como Argaman e Kaufman (1970).

Figura 14 - Principais mecanismos atuantes na desagregação de flocos no processo de floculação

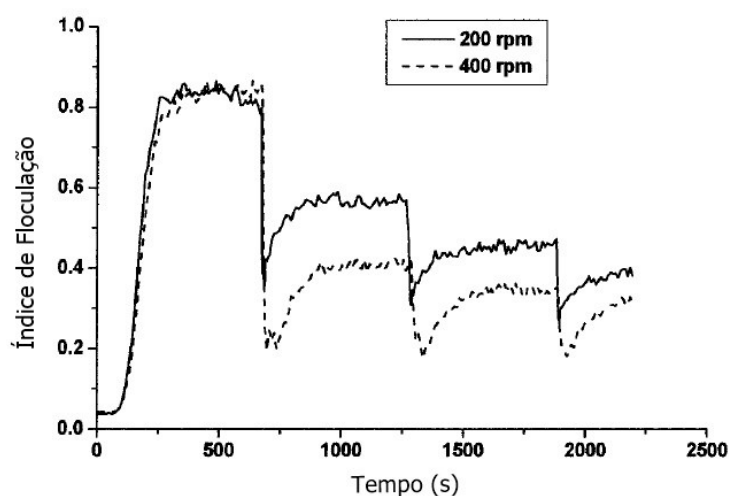


Fonte: Adaptado de Jarvis et al. (2005)

⁶ MÜHLE, K. Floc stability in laminar and turbulent flow. In: DOBIAS, B. **Coagulation and Flocculation**. 1. ed. New York: CRC Press. 1993. p. 355-390.

Diversos estudos foram realizados acerca da reversibilidade da quebra dos flocos. Yukelen e Gregory (2002), por exemplo, avaliaram a floculação de água com argila em suspensão, coagulada com sulfato de alumínio sob mecanismo de varredura por 10 minutos com rotação de 50 rpm, equivalente a aproximadamente 23 s^{-1} , a qual foi submetida à quebra (com agitações de gradientes de velocidade entre 180 s^{-1} e 520 s^{-1} , por tempo de ruptura de 10 segundos) e refloculação (condição anterior) por diversas vezes. Com isto, verificaram através da queda acentuada do índice de floculação que os flocos são quebrados rapidamente nos primeiros segundos de agitação rápida, principalmente quando submetido a uma agitação de 400 rpm e, após retomar às condições anteriores, houve recrescimento dos flocos, conforme mostrado na Figura 15. Isto ocorre em virtude da interação das partículas por fenômenos físicos (forças eletrostáticas ou de Van der Waals). Todavia, este recrescimento ocorreu até um tamanho limitado, inferior ao encontrado anteriormente, verificando assim, que a reversibilidade dos flocos não é completamente reversível, sobretudo para agitação mais intensa.

Figura 15 - Quebra e recrescimento de flocos sob diferentes taxas de cisalhamento na mistura rápida



Fonte: Yukelen e Gregory (2002)

Jarvis, Jefferson e Parsons (2005a) também avaliaram a ruptura e reagregação através do tamanho dos flocos formados por meio de diferentes agentes coagulantes (sulfato de alumínio, sulfato férrico, e polímero catiônico polidialil, dimetil amônia cloreto – polyDAMAC) para água com matéria orgânica natural em grande quantidade e baixa turbidez. Foi observado que a quebra dos flocos ocorre em pontos fracos e deste modo, tendem a se rearranjarem em estruturas mais estáveis e compactas, já que, durante a ruptura, os sítios de ligação disponíveis antes da desagregação ficam indisponíveis. Este fenômeno é responsável pela limitação do tamanho dos flocos durante o recrescimento.

Yu, Gregory e Campos (2010) verificaram que a irreversibilidade da quebra dos flocos está também associada à natureza do precipitado hidróxido amorfo formado sob mecanismo de varredura. Em condições próximas da neutralização de carga (baixa dosagem de coagulante e pH de 5,0), houve recrescimento quase completo dos flocos, enquanto que em condições próximas da varredura (dosagens maiores de coagulante e pH de 7,0), a agregação após a quebra foi limitada. Além disso, foi estudado o efeito da adição de coagulante durante a ruptura dos flocos, verificando a ocorrência do aumento da reagregação em pH igual a 7,0, causada provavelmente pela adsorção de hidróxido recém-precipitado na superfície das partículas. Por outro lado, o efeito foi o desfavorável em pH igual a 5,0, onde a capacidade de recrescimento dos flocos foi reduzida.

3.6 Propriedades e características físicas dos flocos

As características dos flocos, como tamanho e estrutura sofrem alterações contínuas nos estágios da floculação (crescimento, quebra, recrescimento e finalmente a estabilidade com o balanço entre agregação e ruptura dos agregados) e, portanto, são consideradas como as principais propriedades físicas que desempenham um impacto significativo na eficiência dos processos unitários em ETAs (NAN; LI; HE, 2011; VANDAMME et al., 2014; XU et al., 2016b). Agregados altamente porosos e soltos, por exemplo, são mais susceptíveis à quebra e difícil sedimentação, e vice-versa (NAN et al., 2009; KIM et al., 2013). Nos subtópicos seguintes são abordadas com mais detalhes tais características físicas dos agregados.

3.6.1 Dimensão fractal

O termo fractal pode ser definido como sistemas desordenados com dimensões que não são inteiras. Após o desenvolvimento da teoria fractal, através de estruturas matemáticas por Mandelbrot⁷ (1983 apud Spicer e Pratsinis, 1996), o conceito de geometria fractal passou a ser largamente empregado em muitos estudos como método quantitativo para o estabelecimento da evolução da complexa estrutura morfológica superficial dos flocos formados nas etapas do tratamento de água, que não são bem definidos pela estrutura euclidiana, sendo que o grau de

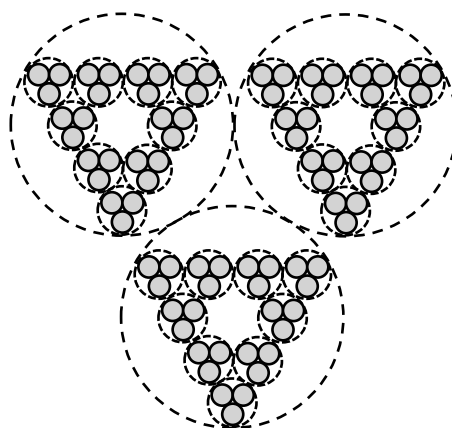
⁷ MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. 1. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1982. 497 p.

compactação destes flocos é representado pela dimensão fractal (ZHAO, 2003; JARVIS; JEFFERSON; PARSONS, 2005a; XU et al., 2016b).

À medida que os flocos colidem e se agregam durante o processo de floculação da água, podem ser representados por estruturas fractais em relação à forma, que se torna mais porosa e outras propriedades, como redução da densidade e crescimento da fração de volume de flocos (LI et al., 2006; BACHE; GREGORY⁸, 2007 apud WEBER-SHIRK; LION, 2015).

Uma das importantes características de objetos fractais é a autossimilaridade estrutural, ou seja, se uma parte deste objeto é recortada e em seguida, ampliada, o objeto resultante possui estrutura exata ou aproximadamente igual ao original. A Figura 16 ilustra esquematicamente esta propriedade, onde a unidade fundamental corresponde ao trio de esferas iguais e a estrutura mostrada apresenta quatro níveis de agregação. A natureza autossimilar dos agregados formados no tratamento de água se dá pela presença de níveis estruturais contínuos de grande escala até partículas primárias individuais. Esta propriedade conduz ao comportamento da lei de potência entre a escala de comprimento e propriedades dos flocos, como densidade e área superficial (GREGORY, 1997; WIESNER, 1992).

Figura 16 - Autossimilaridade de agregados fractais



Fonte: Adaptado de Gregory (1997)

Diferentemente da geometria euclidiana, o cálculo da área e volume na geometria fractal não é realizado necessariamente pela elevação do comprimento característico padrão de um objeto para uma potência de número inteiro. Objetos desuniformes, ou seja, que possuem limites irregulares, podem ser determinados por relações não-lineares em que as propriedades da escala com uma dimensão de comprimento característico elevada a uma potência denominada

⁸ BACHE, D. H.; GREGORY, R. **Flocs in water treatment**. London: IWA Publishing, 2007. 296 p.

dimensão fractal. Sua definição é possível em termos lineares (unidimensionais), de área (bidimensionais) ou volumétricos (tridimensionais) (JIANG; LOGAN, 1991; LOGAN; KILPS, 1995; GARDNER; THEIS; YOUNG, 1998).

Em termos bidimensionais, a dimensão fractal é definida por uma relação potencial entre a área (transversal ou projetada) de uma partícula (A_s), o comprimento característico dos agregados (l), e a dimensão da área fractal (D_f), conforme a Equação 11:

$$A_s \sim l^{D_f} \quad (11)$$

Para objetos com geometria Euclidiana, D_f geralmente é um número inteiro, mas para objetos fractais, apresenta valores fracionários entre 1 e 2 no espaço bidimensional, implicando na área projetada do floco variando entre formas lineares ($D_f = 1$) e circulares ($D_f = 2$). A dimensão fractal corresponde à inclinação da reta de um gráfico da área A_s em função do comprimento característico l em uma escala logarítmica (WAITE, 1999; CHAKRABORTI; ATKINSON; VAN BENSCHOTEN, 2000; LI et al., 2007; HUANG et al., 2016; MA et al., 2017).

De acordo com Gregory (2009) e Jarvis et al. (2005), o estudo da dimensão fractal de partículas, além de ser eficiente na descrição de suas características estruturais, é importante para a compreensão do processo de floculação, pois as mesmas possuem implicações práticas, como por exemplo, a densidade do agregado.

Inúmeros fatores intrínsecos ao tratamento de água podem afetar a estrutura fractal, como o gradiente de velocidade, pH da solução, tipo de mecanismo predominante, agente coagulante e dosagem aplicada. Dessa forma, a morfologia das partículas é considerada um relevante objeto de estudo, abarcando pesquisas que demonstram como a floculação e velocidade de sedimentação podem ser influenciadas pela morfologia das partículas, dentre elas, a de He et al. (2012), Vahedi e Gorczyca (2012), Yang et al. (2013) e Moruzzi et al. (2017).

Li et al. (2007), utilizaram um modelo de suspensão contendo caulinita, de modo a conferir turbidez de 50 uT, e sulfato de alumínio como agente coagulante a uma concentração de 0,1 mol.l⁻¹ de Al³⁺ para compreender as propriedades e características dos flocos formados em diferentes condições de gradiente médio de velocidade de floculação através do monitoramento óptico contínuo em equipamento *Jar Test*. Resumidamente, o ensaio foi realizado pela mistura rápida a uma rotação de 250 rpm por 1 min, seguindo pela fase de mistura lenta a 20 rpm, 40 rpm, 80 rpm, 100 rpm e 250 rpm por 15 min, respectivamente. Dentre estas propriedades, a

estrutura do floco caracterizada pela dimensão fractal foi analisada (Tabela 3), concluindo que em condições de baixos G_f , a dimensão fractal foi menor, resultando em flocos formados com estrutura mais lineares. Em contrapartida, sob condições de maiores valores de G_f , verificaram a presença de flocos mais densos e com valores maiores de dimensão fractal devido à quebra das estruturas abertas pela elevada força de cisalhamento as quais são rearranjadas em estruturas mais compactas.

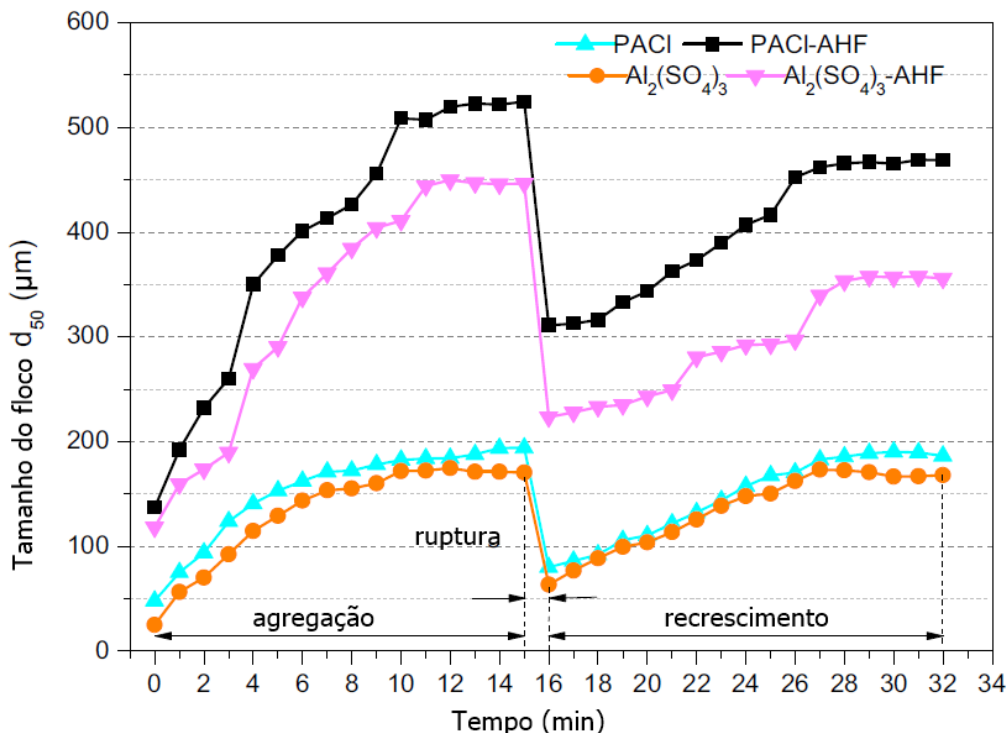
Tabela 3 - Dimensão fractal para seis diferentes velocidades de rotação

Velocidade de rotação (rpm)	G_f (s ⁻¹)	Dimensão fractal	
		D_f ($\pm 0,05$)	R ²
20	4,5	1,30	0,90
40	11,3	1,34	0,86
80	29,1	1,41	0,90
100	39,7	1,45	0,94
150	67,7	1,55	0,94
250	134,6	1,63	0,92

Fonte: Li et al. (2007)

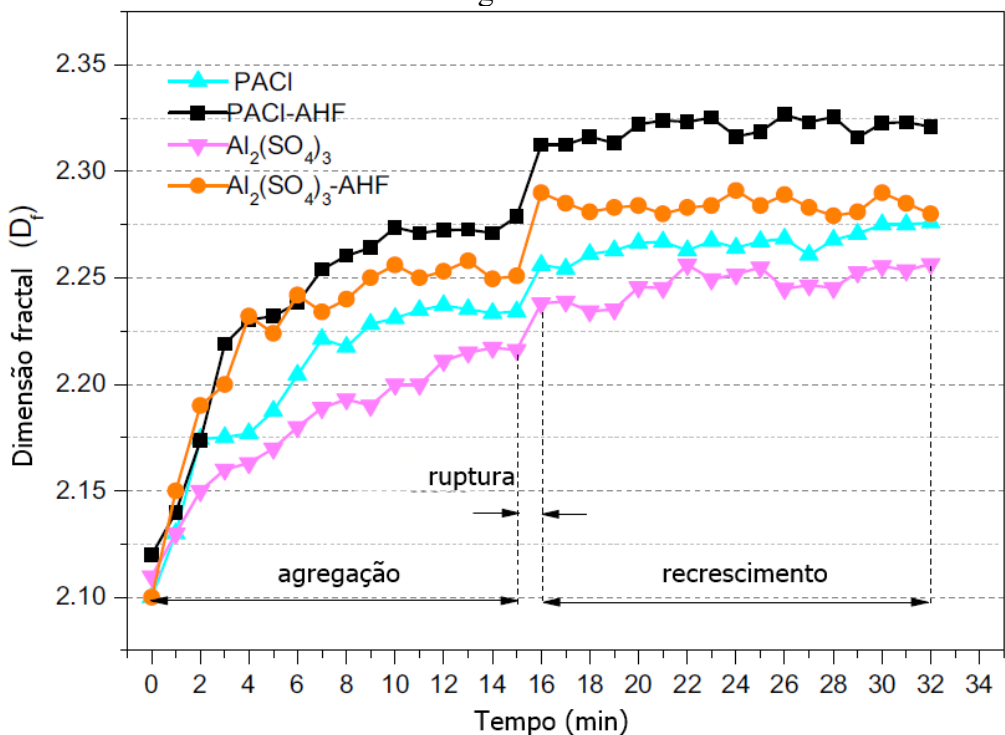
Xu et al. (2016) avaliaram as características das partículas durante a floculação de água sintética preparada com caulinita e ácido húmico, conferindo turbidez de $10 \pm 0,5$ uT, utilizando quatro tipos de coagulantes, sendo dois coagulantes tradicionais: sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$) e cloreto de polialumínio (PACl), e dois utilizando os mesmos coagulantes com adição de flocos de ácido húmico (FAH) sedimentados ($PACl^- FAH$ e $Al_2(SO_4)_3^- FAH$), produzidos em testes de coagulação em *Jar Test*. Os autores observaram um aumento contínuo da dimensão fractal com o aumento do tempo de coagulação, atingindo um valor máximo ao final da etapa de mistura lenta (Figura 18). Além disso, apesar da redução do tamanho das partículas (representadas pelo diâmetro médio volumétrico equivalente, d_{50}) expostas à agitação rápida durante 1 min através do teste de ruptura e recrescimento dos flocos, a dimensão fractal aumentou, conforme os resultados apresentados nas Figuras 17 e 18, respectivamente, gerando flocos com estruturas mais compactas. Entretanto, esta compactação não interferiu na remoção de substâncias orgânicas.

Figura 17 - Variação do tamanho de partículas para diferentes coagulantes



Fonte: Adaptado de Xu et al. (2016)

Figura 18 - Evolução da dimensão fractal em função do tempo de floculação para diferentes coagulantes



Fonte: Adaptado de Xu et al. (2016)

Ren et al. (2017) analisaram a evolução da formação de agregados nos processos de coagulação e sedimentação de água para abastecimento público através da morfologia dos flocos em um

reator de fluxo contínuo, em que a água bruta foi preparada com adição ácido húmico e caulinita, conferindo turbidez de 100 ± 5 uT, empregando cloreto de polialumínio (PAC) como agente coagulante. A água foi coagulada e floculada de forma sequencial por um tanque de mistura rápida e três para a floculação, reduzindo gradativamente o gradiente médio de velocidade (548 s^{-1} , 69 s^{-1} , 32 s^{-1} e 15 s^{-1}), sob três dosagens de coagulante. A partir disto, verificaram que na dosagem de 1 mg.l^{-1} de Al, os flocos gerados foram mais compactos, e o tamanho médio dos mesmos aumentou de $62 \mu\text{m}$ para $78 \mu\text{m}$, enquanto que o aumento da dosagem para 5 mg.l^{-1} resultou na formação de estruturas mais ramificadas e menos densas, além de ocasionar uma redução do tamanho médio do agregado, que atingiu o patamar de estabilização em aproximadamente $65 \mu\text{m}$.

3.6.2 Distribuição de tamanho de partículas (DTP)

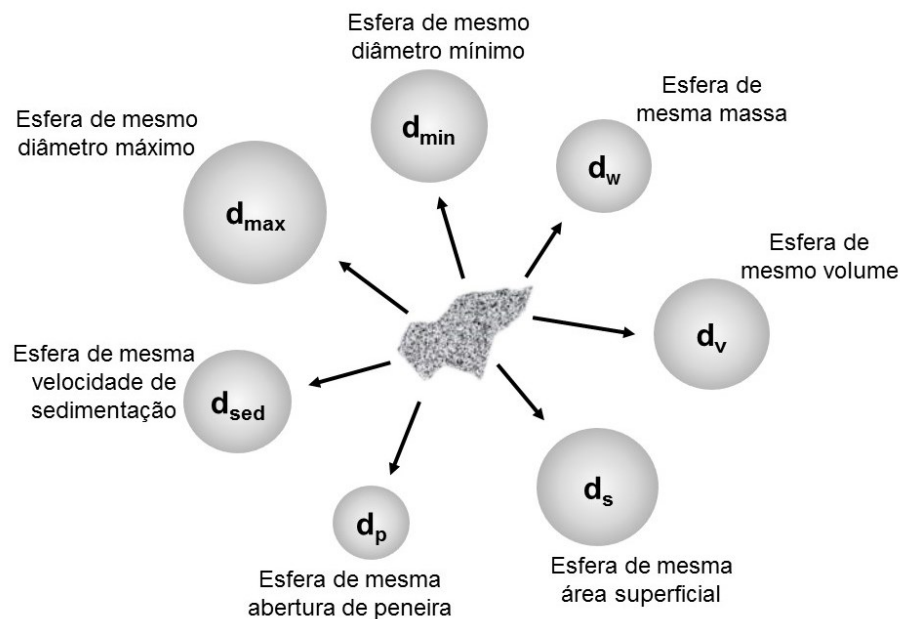
As impurezas em suspensão encontradas em águas possuem estruturas tridimensionais de caráter heterogêneo, ou seja, possuem estruturas irregulares e polidispersas, diferenciadas por várias propriedades físico-químicas, tais como tamanho, forma, densidade, carga de superfície, velocidade de sedimentação e possivelmente, porosidade, capaz de influenciar seu comportamento na água e conseqüentemente, na capacidade de remoção por sedimentação, impactando no desempenho do processo de filtração descendente. É esta heterogeneidade nas características das partículas que origina uma distribuição de tamanho de partículas (LAWLER, 1997; AMJAD; KHAN; TARABARA, 2015).

A dinâmica da DTP é capaz de caracterizar os flocos durante os processos de mistura rápida, floculação, ruptura e recrescimento, uma vez que se fundamenta no número, massa, diâmetro, área superficial e/ou volume dos flocos (XIAO et al., 2011). À vista disso, pode-se considerar que a DTP é uma ferramenta substancial para a caracterização do processo de floculação, bem como na otimização de projetos de unidades de separação sólido/líquido no tratamento de água, fornecendo informações adicionais sobre o desempenho da agregação de partículas, além de estabelecer relações entre parâmetros operacionais, já que seu comportamento depende das condições de floculação (gradiente de velocidade médio e tempo de exposição dos flocos). Sua determinação pode ser feita através de uma gama de parâmetros, como diâmetro, volume e área, onde a escolha deve ser feita com base no processo que se deseja descrever (KOBLER; BOLLER, 1997; BOUYER; LINÉ; QUANG, 2004).

Basicamente, o tamanho da área irregular de um agregado pode ser expressado por um valor representativo de sua forma, considerado um importante parâmetro da morfologia do agregado coloidal, cujo tamanho pode ser obtido a partir de medições diretas ou através de técnicas que relacionam uma de suas propriedades, tais como perímetro da área projetada, área projetada, maior ou menor diâmetro, área superficial, volume, velocidade de sedimentação, dentre outras, ao diâmetro equivalente de uma esfera (princípio da esfera equivalente), por ser forma passível de ser representada por um único número em todas as direções no espaço tridimensional. Portanto, a correlação de tais propriedades de uma mesma partícula floculenta resulta em diferentes respostas, conforme esquematizado na Figura 19.

A escolha do método de determinação mais apropriado depende de fatores, como natureza da amostra (dissolvida ou em suspensão, solubilidade e tamanho das partículas), natureza do processo (utilidade do valor de diâmetro obtido), resolução de cada técnica (precisão do método), e a tradição da utilização da técnica (SANTOS et al., 2004; JUNKER, 2006).

Figura 19 - Diferentes diâmetros equivalentes para uma mesma partícula



Fonte: Adaptado de Santos (2004)

Diversas expressões podem ser utilizadas para a descrição do diâmetro equivalente, conforme listado nas equações da Tabela 4. Dentre estas expressões, o diâmetro de Feret é utilizado por diversos autores na análise da evolução do tamanho de partículas durante a floculação (VANDAMME et al., 2014; XU et al., 2016a; REN et al., 2017).

Tabela 4 - Expressões de diâmetro equivalente para determinação do tamanho de um agregado

Diâmetro equivalente	Expressão	Símbolo
Diâmetro de Feret: diâmetro equivalente a uma circunferência com mesma área de um floco irregular	$d_F = \left(\frac{4 \cdot A_s}{\pi}\right)^{1/2}$	A_s é a área projetada de um floco
Diâmetro médio aritmético da partícula	$d_a = \frac{\sum d_i}{n}$	d_i é o diâmetro da partícula i e n é o número total de partículas
Diâmetro médio de Sauter: quantifica efeitos de transferência de massa	$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}$	$n_i d_i^3$ é o volume e $n_i d_i^2$ a área
Diâmetro médio volumétrico	$d_{30} = \frac{(\sum 6V_b/\pi)^{1/3}}{n}$	V_b é o volume total de bolhas

Fonte: Junker (2006)

As metodologias para determinação da DTP podem ser divididas em dois grupos: com e sem fracionamento da amostra. Nas que são realizadas o fracionamento, as partículas são retiradas da amostra por frações de tamanho, permitindo a análise individual das mesmas, ao passo que nas técnicas sem fracionamento, as faixas de tamanho presentes na amostra são determinadas por meio de uma única medição, já que nenhum mecanismo de separação é aplicado (SANTOS et al., 2004).

Em tratamento de água, a DTP é comumente estabelecida utilizando-se um contador de tamanho de partículas. Após a contagem, as partículas floculentas são congregadas por faixas de tamanho de algum dos parâmetros (diâmetro, área superficial, dentre outros), e assim, o número total é conhecido (MORENO, 2014; OLIVEIRA et al.; 2015b).

De acordo com O'Melia (1980), a distribuição da frequência do número de partículas $F(d_p)$ pode ser definida como a concentração do número de partículas, dN , em relação à fração incremental no tamanho das partículas, $d(d_p)$, conforme a Equação 12:

$$F(d_p) = \frac{dN}{d(d_p)} \quad (12)$$

Em que:

$F(d_p)$: função que define a frequência da DTP (d_1, d_2, d_3, \dots);

dN : concentração do número de partículas para diâmetros entre d_p e $d_p + d(d_p)$;

$d(d_p)$: fração incremental dos diâmetros das partículas.

A frequência de distribuição de tamanho de partículas aumenta com a diminuição do diâmetro da partícula, ao passo que a distribuição do volume aumenta com o aumento do tamanho. Normalmente, esta distribuição segue em forma de potência, representada na Equação 13:

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A(d_p)^{-\beta} \approx \frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \quad (13)$$

Onde:

A : coeficiente de densidade da equação de potência;

β : coeficiente de inclinação da equação de potência que caracteriza a DTP;

d_p : diâmetro das partículas.

Os coeficientes A e β , que representam a forma de distribuição do tamanho das partículas, são determinados aplicando-se *Log* em ambos os lados da Equação 13, ou através de sua integração. Foi comprovada uma relação aproximadamente linear entre a população de partículas e seus respectivos tamanhos em sistemas de coordenadas logarítmicas. Além disso, o coeficiente β representa a inclinação da reta no gráfico log-log, que descreve a distribuição de tamanho de agregado (YAO; NAN; CHEN, 2014).

3.7 Processamento digital e análise de imagens

A área de processamento e análises de imagens possui aplicações que permeiam uma ampla variedade do ramo do conhecimento humano, podendo ser empregada como ferramenta na extração de informações úteis e relevantes para a resolução de uma diversidade de problemas e análises complexas, visto que consiste de métodos capazes de melhorar a informação visual para interpretação humana ou percepção automática por máquinas. Dentre as áreas de aplicação, estão: biologia, medicina, geografia, sensoriamento remoto, geoprocessamento, meteorologia, astronomia, segurança, bem como a área de saneamento ambiental (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; ESQUEF, 2002).

A análise baseia-se na aquisição de imagens macro ou microscópicas por técnicas de captura utilizando dispositivos físicos como câmeras fotográficas e de vídeo, equipamentos de radiografia, microscópios eletrônicos, magnéticos e de força atômica, radares, equipamento de

ultrassom, entre outros, possibilitando a determinação da distribuição do tamanho de partículas através do processamento das mesmas, objetivando a elevação da sua qualidade e conseqüentemente, analisá-las para obtenção de medições confiáveis, por meio de programas computacionais específicos (ESQUEF, 2002).

Diversas técnicas têm sido desenvolvidas com a finalidade de mensurar características estruturais e a distribuição do tamanho de partículas, tais como dispersão de luz através de um *laser* de ângulo baixo, ultrassom, análise de imagens ópticas e medição mecânica direta, onde cada método origina dados precisos de tamanho de partícula de tamanho de partícula com um conjunto de parâmetros pretendidos (CRAWLEY; MALCOLMSON⁹, 2004 apud JUNKER, 2006). Na área de saneamento, destacam-se aquelas que empregam o princípio da difração a *laser*, da interferência de campo (por meio da eletrorresistividade *Coulter* e do bloqueio de luz) e análise de imagens. De acordo com Jarvis, Jefferson e Parsons (2005b), os métodos utilizados na extração, preparação e medição de objetos mede uma amostra representativa ou subamostra da suspensão do floco original. A Tabela 5 lista alguns métodos utilizados na caracterização do tamanho de agregados em cinco categorias.

Tabela 5 - Métodos utilizados na obtenção de tamanho de partículas

Método de determinação do tamanho de flocos	Forma de extração de atributos
Microscopia	Observação do tamanho do floco estático
	Observação do tamanho do floco dinâmico
Análise de imagens	Observação do tamanho do floco estático em suspensão
	Observação do tamanho do floco dinâmico sob condições turbulentas
	Observação do tamanho do floco dinâmico sob fluxos laminares
Dispersão de luz	Dispersão de luz traseira/frontal pelos flocos
Luz transmitida	Luz transmitida através da suspensão de flocos
Sensores de partículas individuais	Sensores ópticos ou sensores elétricos de flocos

Fonte: Jarvis, Jefferson e Parsons (2005b)

⁹ CRAWLEY, G.; MALCOLMSON, A. Online particle sizing as a route to process optimization. **Chemical Engineering**, v. 111, n. 9, p. 37, 2004.

Ao ser comparada com outras técnicas existentes, como microscopia e granulometria a *laser*, a análise digital de imagem possui a vantagem de ser uma técnica não intrusiva, ou seja, não causa deformação da amostra a ser estudada. Entretanto, por depender de um processamento, em que a imagem original é convertida em outra por meio de programas computacionais, enfatiza-se a importância da obtenção de um contraste bem definido entre o objeto e o plano de fundo para evitar a medição de tamanhos incorretos devido aos limites desfocados (CHAKRABORTI et al.; 2000; BOUYER, 2005; MORUZZI; REALI, 2007; MORENO, 2014).

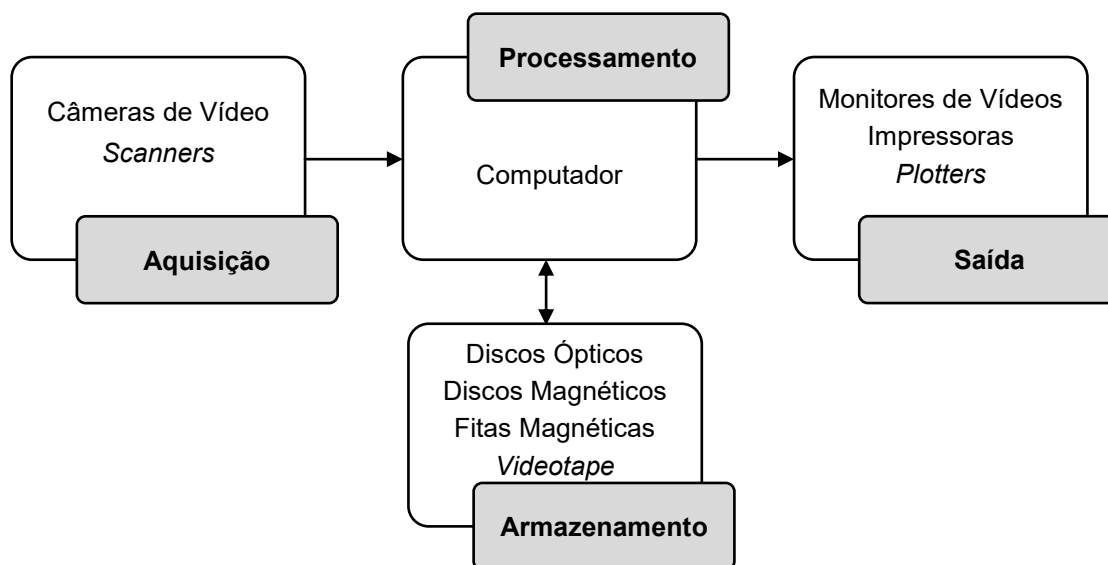
De acordo com Marques Filho e Vieira Neto (1999), define-se imagem como uma matriz bidimensional, onde os índices de linhas e colunas identificam um ponto da imagem e o correspondente valor da matriz naquele ponto identifica o nível de cinza de um determinado elemento da imagem, denominado *pixel* (menor ponto de uma imagem digital), que são os elementos dessa matriz, comumente apresentado na forma quadrada ou retangular, possuindo níveis de cinza com potências inteiras de dois. Comumente, câmeras atuais possuem 256 níveis de cinza representados pelo modo 8 bits ($2^8 = 256$) (MORUZZI; REALI, 2007).

Geralmente, a obtenção de informações desejadas requer transformações e realces de uma imagem pura adquirida através de um dispositivo, tornando-a mais adequada e, conseqüentemente, aumentando a eficiência do conteúdo extraído. Dessa forma, diversos tipos de Processamento Digital de Imagens (PDI) podem ser implementados por algoritmos computacionais para a realização destas transformações necessárias, de modo a obter uma imagem com os realces pretendidos ou atributos e dados pertinentes (ESQUEF, 2002).

3.7.1 Etapas do processamento de imagens

Um sistema de processamento de imagens é constituído por uma série de etapas, conforme o fluxograma esquematizado na Figura 20: aquisição de imagem, que consiste na inicialização, definição do foco, captura e otimizar a qualidade da imagem adquirida; armazenamento; processamento; extração e análise de atributos e informações úteis da imagem processada.

Figura 20 - Elementos de um sistema de processamento de imagens



Fonte: Adaptado de Marques Filho e Vieira Neto (1999)

3.7.1.1 Aquisição

A etapa de aquisição digital de uma imagem consiste em convertê-la em uma representação numérica adequada para o posterior processamento digital. Para isto, dois elementos são fundamentais. O primeiro é um dispositivo físico, sensível ao espectro de energia eletromagnético, como por exemplo o raio-x, luz ultravioleta, visível ou infravermelha, capaz de produzir em sua saída um sinal elétrico proporcional ao nível de energia recebido; e o segundo é um digitalizador para a conversão do sinal elétrico analógico produzido na saída do sensor em um sinal digital, ou seja, que pode ser representado através de bits (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; ESQUEF, 2002).

Junker (2006) afirma que na etapa de aquisição, um dos grandes problemas é a captura de imagens em movimento. Assim, câmeras de alta velocidade de captura (*high-speed*) com velocidades de obturação inferior a 0,001 s são utilizadas convencionalmente com a finalidade de evitar imagens desfocadas e formação de rastros das partículas de interesse. Entretanto, é necessário o uso de uma grande quantidade de luz, que pode ser gerada através de luz colimada não fria (ponteiro *laser*).

3.7.1.2 Armazenamento

Segundo Marques Filho e Vieira Neto (1999), o armazenamento de imagens é considerado uma das maiores dificuldades em um sistema de processamento devido à grande quantidade de bytes requeridos. O mesmo pode ser dividido em três categorias: armazenamento de curta duração (memória RAM), enquanto a mesma é utilizada temporariamente em várias etapas do processamento; armazenamento de massa para ações relativamente rápidas de reaquisição de imagens; e arquivamento de imagens para futura recuperação, caso necessário.

3.7.1.3 Pré-processamento

O principal objetivo da etapa de processamento é aprimorar a qualidade da imagem para as etapas subsequentes, incluindo passos com filtragem de ruídos introduzidos pelos sensores e correção de distorções geométricas causados pelo sensor (DE QUEIROZ; GOMES, 2006).

O processamento de imagens consiste em metodologias expressas geralmente na forma algorítmica. Deste modo, com exceção das etapas de aquisição e exibição, grande parte das funções de processamento de imagens pode ser implementada com a utilização de programas computacionais. Já o uso de computadores específicos é necessário somente para situações em que limitações intoleráveis de computadores principais, como por exemplo, a velocidade de transferência de dados através do barramento (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

3.7.1.4 Segmentação

A segmentação é a etapa mais crítica no processo de tratamento de uma imagem para a extração de informações desejadas, pois é nesta que se se faz a subdivisão da imagem em regiões ou objetos de interesse para processamento e análise posteriores. Como consequência, quaisquer erros ou distorções neste processo refletem nas demais etapas, podendo gerar resultados não desejados e contribuir negativamente para a eficiência do tratamento como um todo (RUSS, 1998; ESQUEF, 2002).

Deve-se enfatizar que não existe uma metodologia formal para a segmentação. Consiste de um procedimento adaptativo, procurando a adequação das características particulares de cada tipo de imagem e aos objetivos pretendidos no estudo (ESQUEF, 2002).

Duas abordagens são utilizadas nas técnicas de segmentação: a similaridade entre os *pixels* e a descontinuidade entre eles. Dentre a diversidade de técnicas existentes, a mais utilizada é a binarização (baseada na similaridade), por ser eficiente e simples do ponto de vista computacional (ESQUEF, 2002). Este procedimento é utilizado para converter uma imagem em escala de cinza em uma imagem binária. Se uma imagem estiver no modo RGB, seus valores de *pixel* devem ser transformados em valores de escala de cinza, variando de zero (preto) a 255 (branco), através de uma soma ponderada de seus componentes vermelho, verde e azul. No processo de binarização, cada *pixel* da imagem em escala de cinza é verificado comparando seu valor de *pixel* com o valor do limiar, onde um valor de *pixel* maior que o limiar conduz um valor de *pixel* igual a 1 (branco) na imagem binária, enquanto valores menores resultam em valores de *pixel* igual a 0 (preto), conforme demonstrado esquematicamente na Figura 21 (KIM et al., 2017).

Figura 21 - Demonstração esquemática de uma binarização utilizando 3 x 3 *pixels* (limiar selecionado manualmente para demonstração).



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2017)

A limiarização (*thresholding*) baseia-se na análise da similaridade dos níveis de cinza, visando a extração de objetos de interesse em função de um determinado limiar que separa os agrupamentos de níveis de cinza da imagem. O desafio encontrado neste procedimento é a determinação do valor mais adequado de limiarização. Para tal, deve-se analisar o histograma da imagem, de modo a estabelecer um limiar na região do vale situado entre picos que caracterizam regiões de interesse na imagem. Dentre as variantes de limiarização existentes, a mais simples consiste no particionamento do histograma por um único limiar, varrendo-se a imagem, *pixel a pixel* e rotulando cada um como pertencente ao objeto ou fundo, em função da relação entre o valor do *pixel* e o valor do limiar. O sucesso deste método é dependente de uma boa definição dos grupos de *pixels* de interesse no histograma da imagem segmentada (DE QUEIROZ; GOMES, 2006).

3.7.1.5 Extração de atributos

A obtenção de um conjunto informações numéricas ao final do sistema de processamento digital é realizada através da extração de atributos de uma imagem binária processada.

Após o processo de segmentação, a imagem obtida contém regiões correspondentes aos objetos de interesse, contiguamente agrupadas por *pixels* contíguos, separados das regiões correspondentes ao fundo da imagem. Assim, é necessária a rotulação para a identificação de cada grupo de *pixels*, permitindo uma posterior parametrização dos objetos segmentados e cálculo de parâmetros específicos para cada um destes grupos nos processos seguintes (ESQUEF, 2002).

Basicamente, existem duas classes de medidas (ESQUEF, 2002):

- a) atributos da imagem como um todo (*field features*), que inclui todas as regiões em uma determinada imagem, obtendo informações quanto ao número de objetos, área total de objetos, dentre outros; e
- b) atributos de região (*region features*), que se refere aos objetos independentemente, por exemplo área, perímetro, forma e diâmetro. Para estes, os objetos podem ser divididos em classes de similaridades em função dos parâmetros.

Com o objetivo de se obter os parâmetros e distribuição do tamanho de partículas de interesse com medidas em milímetros, é de fundamental importância a realização da calibração do sistema através da aquisição de uma imagem de calibração utilizando um objeto de referência (por exemplo, uma régua) anteriormente à execução de um ensaio, informando o tamanho correspondente a uma determinada distância entre dois pontos (MORUZZI; REALI, 2007).

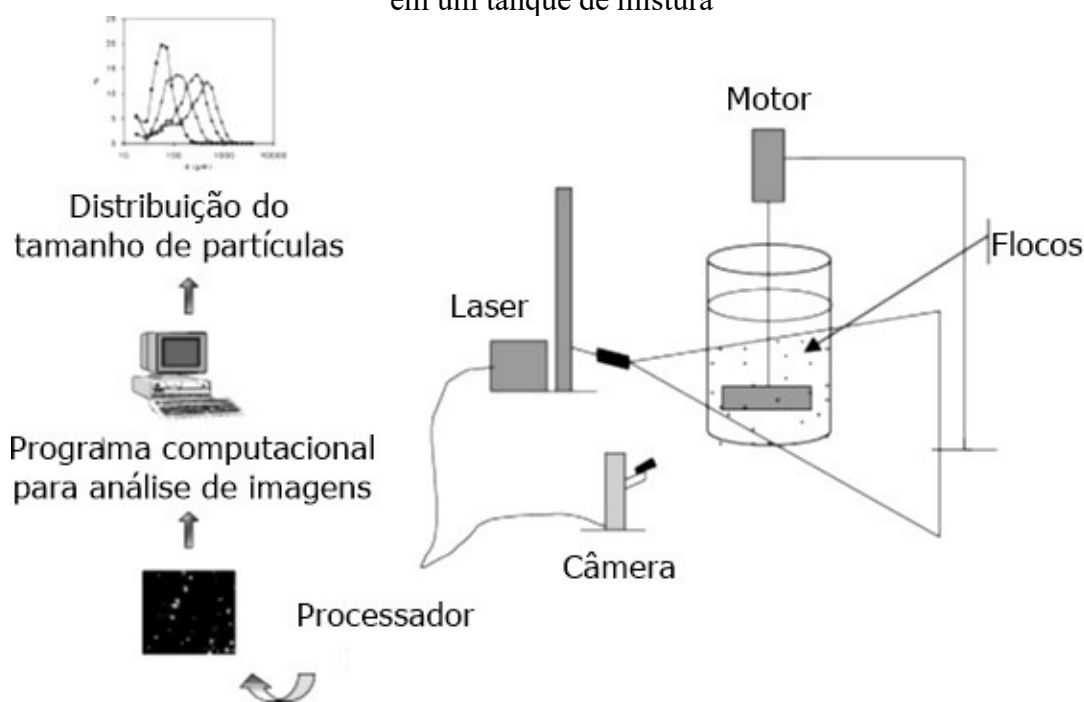
3.8 Trabalhos com emprego da técnica de análise de imagens de partículas

Na área de saneamento, a técnica de análise de imagem tem sido uma das mais empregadas na medição de tamanho de partículas e parâmetros morfológicos. Neste contexto, esta seção apresenta diversos trabalhos com avaliação de partículas floculentas por meio de análise digital de imagem com seus respectivos objetivos, técnicas e equipamentos utilizados.

Bouyer et al. (2005) utilizou a análise de imagens para estudar a distribuição do tamanho de partículas e sua relação com fenômenos hidrodinâmicos e físico-químicos em um tanque de

mistura em estado estático em termos de taxas de colisões, eficiência de agregação, e ruptura dos flocos. De modo geral, a análise consistiu na aquisição de imagens dos flocos no tanque, utilizando um plano luminoso com auxílio de um *laser* para visualização dos mesmos e uma câmera digital para a captura, posicionada perpendicularmente ao plano de luz. Em seguida, foi realizada a etapa de processamento digital utilizando programas computacionais específicos para extração e cálculo de informações pertinentes (procedimento experimental esquematizado na Figura 22).

Figura 22 - Ilustração das etapas para aquisição e processamento de imagens obtidas de flocos em um tanque de mistura



Fonte: Adaptado de Bouyer et al. (2005)

A técnica de análise de imagens conhecida como PIV (*Particle Image Velocimetry*) corresponde a um sistema não intrusivo de aquisição que permite a visualização do fluxo com técnica de rastreamento da partícula com auxílio de um *laser* para iluminação e uma vídeo-câmera *high-speed* e programa computacional para processamento de informações é utilizada em diversos estudos, como por exemplo, o de Xiao et al. (2011), que investigaram a dinâmica da floculação através da caracterização da DTP e estrutura morfológica (baseada na dimensão fractal calculada pelo perímetro do floco) empregando distintos coagulantes em águas com características diferentes. Os resultados indicaram que logo após a adição do coagulante químico, obteve-se um elevado valor de dimensão fractal, ao passo que posteriormente à quebra dos flocos, este parâmetro foi reduzido. Além disso, com a refloculação, houve recuperação parcial da estrutura fractal. Esta mesma técnica também foi utilizada nos estudos de Zhong et

al. (2011) para investigação da mudança estrutural durante a formação de flocos de caulinita formados pelos coagulantes sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) e cloreto férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e avaliação da influência de diferentes concentrações de ácido húmico na força do floco, estrutura e velocidade de sedimentação, além da comparação da DTP no estágio estacionário durante o crescimento, quebra e recrescimento dos agregados.

Em um estudo realizado por Wu et al. (2016), a técnica de análise de imagens também foi empregada para a medição da dimensão fractal bidimensional com base na área do floco, juntamente com a dimensão fractal de flocos de ácido húmico formados a partir do emprego de diferentes tipos de agentes coagulantes para as respectivas dosagens ótimas. Uma amostra das partículas foi coletada dos jarros e cuidadosamente colocada sobre uma lâmina de vidro com água para a aquisição de imagens utilizando uma câmera digital, seguida da análise de imagens utilizando o *Image-Pro Plus* 6.0 para obtenção do comprimento característico e área projetada.

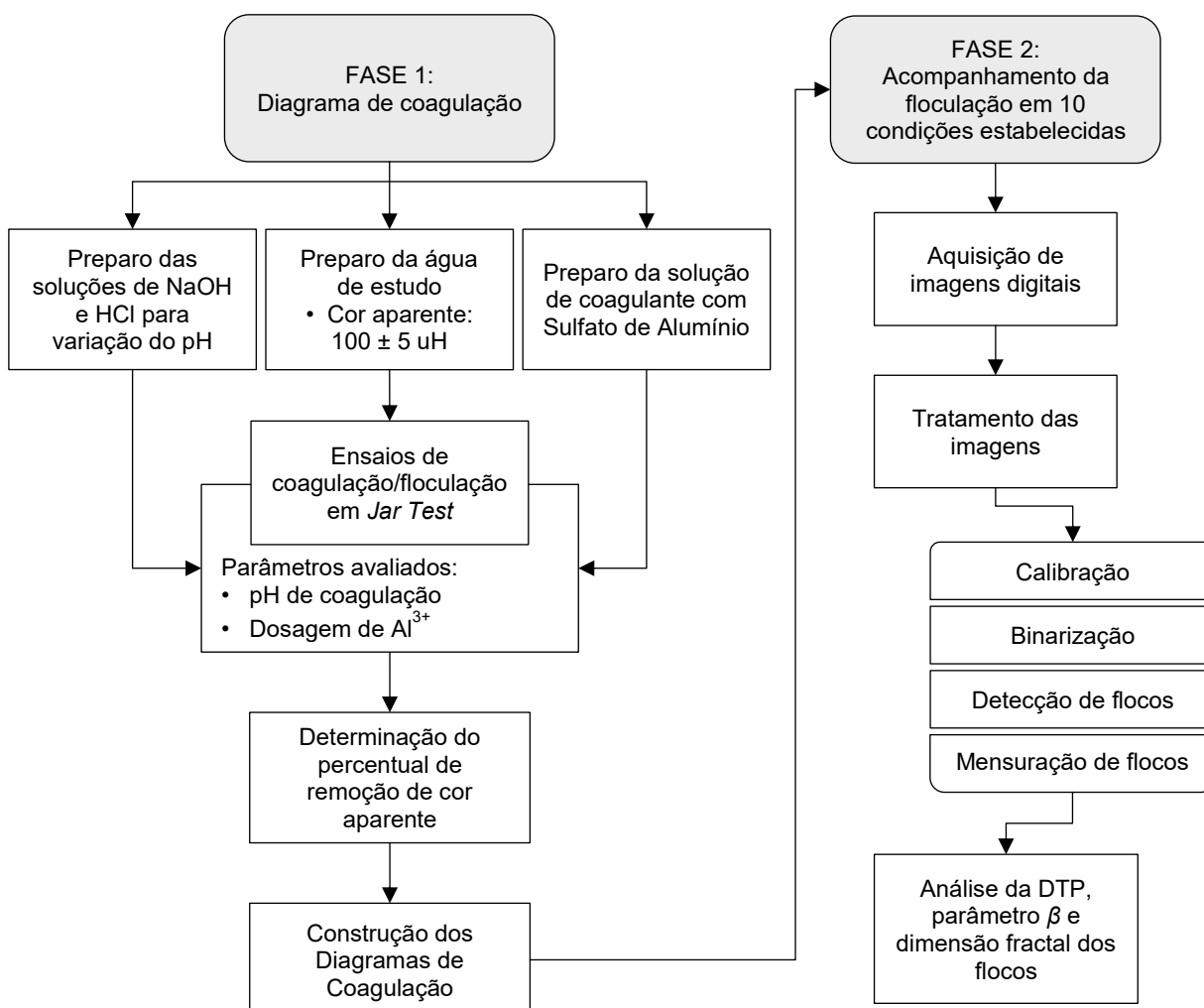
Vandamme et al. (2014) investigou as características dos flocos durante a floculação de microalgas *Chlorella vulgaris* para cinco agentes coagulantes. De forma resumida, as amostras dos particulados foram retiradas após a sedimentação e diluída 10 vezes, e, em seguida, analisados com auxílio de um microscópio de zoom estéreo. Imagens dos agregados foram capturadas utilizando uma câmera, as quais foram processadas no *ImageJ*, objetivando a determinação do diâmetro de Feret para cada floco, e posterior análise da distribuição de tamanho das partículas.

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os equipamentos, programas computacionais, materiais e metodologia utilizada para a execução desta pesquisa. O fluxograma da Figura 23 apresenta as etapas desenvolvidas para a obtenção dos resultados.

Figura 23 - Fluxograma das etapas de estudo



Fonte: Autora (2018)

4.1 Produtos químicos

O sulfato de alumínio comercial ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 16 \text{H}_2\text{O}$), da marca LABSYNTH Produtos para Laboratórios Ltda (lote S35A6), foi empregado como coagulante químico, preparando-se uma solução com concentração de $46,7 \text{ g l}^{-1}$, de modo que em cada 1,0 ml de solução, contivesse 2,0 mg de alumínio. Assim, ao ser adicionado 1,0 ml de sulfato de alumínio em 2 l da água de estudo, uma concentração de $1,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} foi obtida, evitando possíveis erros de conversão de volume a ser adicionado ao jarro durante a execução dos ensaios.

Foi utilizado ácido húmico comercial, da marca *Sigma-Aldrich* (lote BCBR8432V), para conferir cor à água, bem como soluções estoques para variação do pH da água de estudo: ácido clorídrico (HCl), como acidificante, a 0,1 M e hidróxido de sódio (NaOH), como alcalinizante, nas molaridades de 0,1 M, 0,5 M e 1,0 M. Neste caso, uma vez que a adição de sulfato de alumínio reduz o pH da água, concentrações maiores de base foram utilizadas objetivando a adição de um menor volume de base à água para que o pH desejado seja alcançado.

4.2 Equipamentos

Foram utilizados os seguintes equipamentos para a execução dos ensaios, medição e estudo dos parâmetros:

- a) deionizador de água, para remoção de compostos minerais dissolvidos na água de estudo, padronizando-a para a execução dos ensaios;
- b) pHmetro digital de bancada, modelo PHS-3E, da marca EVEN, com precisão de 0,01 pH, para medição do pH;
- c) espectrofotômetro, modelo DR 5000 UV-Vis, da marca HACH, para a medição de cor aparente;
- d) ponteiro *laser*, utilizado como fonte de iluminação para o estabelecimento de um plano de luz, evidenciando as partículas formadas durante a captura das imagens;
- e) câmera fotográfica digital D5500, da marca Nikon, para aquisição das imagens dos flocos formados no processo de floculação;

- f) reatores estáticos de bancada (*Jar Test*), da marca NOVA ÉTICA, modelo 218/6 LDB com seis jarros, cada um com capacidade de 2 l, provido de eixos com paletas movimentadas com rotações de variação entre 15 rpm e 600 rpm;
- g) programas computacionais: *JPEG Crops* para recorte das imagens capturadas; *ImageJ* 1.51, para tratamento das imagens; *Camera Control Pro 2.0* (CCP 2.0), utilizado no controle da câmera e disparo do obturador durante a aquisição de imagens; *Surfer 10*, para interpolação de dados experimentais e elaboração do diagrama de coagulação; e planilhas eletrônicas para tratamento de dados e construção de gráficos;
- h) equipamentos diversos: agitador magnético, cronômetro digital, balança eletrônica digital com precisão de 0,0001 g, vidrarias variadas e copos descartáveis com capacidade de 50 ml para coleta das amostras, reservatório em PVC com capacidade para 250 l para acondicionamento da água de estudo, tripé para a câmera fotográfica e suporte para fixação do ponteiro *laser*.

4.3 Preparação da água de estudo

Inicialmente, a água oriunda da rede de abastecimento de Uberlândia foi submetida à purificação por deionização, removendo cátions e ânions dissociados na água, de modo a padronizá-la durante a execução dos ensaios.

Foi preparada uma solução-mãe de ácido húmico 4%, misturando-se $4,0 \pm 0,002$ g em 100 ml de água deionizada, seguida de uma agitação por um período de 15 minutos. Após um período mínimo de 1:30 h para sedimentação de partículas insolúveis, a solução passou por um processo de filtração simples para remoção das partículas que ainda permaneceram suspensas.

A sintetização da água de estudo foi realizada seguindo a metodologia descrita por Lima (2014), que realizou estudos a partir de água bruta com matéria orgânica dissolvida, obtida pela adição de ácido húmico comercial. A solução-mãe foi cuidadosa e gradativamente adicionada à água deionizada para o incremento de cor, de modo a conseguir cor aparente de 100 ± 5 uH, determinada por espectrofotometria, utilizando-se o método 120 (comprimento de onda de 455 nm) do espectrofotômetro UV-Vis DR 5000 da marca Hach, conforme o procedimento descrito pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1999). Ao todo, para a condução dos experimentos realizados nas duas fases da pesquisa (construção dos diagramas de coagulação, avaliação da cinética de floculação em diversas condições e análise da ruptura

e recrescimento dos flocos por análise de imagens), foram necessários 830 l da água de estudo, armazenada em reservatório com capacidade para 250 l.

O pH inicial das amostras de água bruta, medido no início de cada experimento, variou de 6,62 a $8,21 \pm 0,1$ e a temperatura, de $22,8 \text{ }^\circ\text{C}$ a $26,9 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Os valores absolutos para estes parâmetros podem ser consultados no Apêndice A, onde estão tabelados todos os resultados de cada ensaio realizado.

4.4 Ensaios de coagulação e floculação

Estes ensaios objetivaram a elaboração de diagramas de coagulação, bem como a observação de quaisquer alterações da qualidade da água durante o experimento (eficiência na formação de partículas floculentas), para que, posteriormente, a DTP e características morfológicas dos flocos fossem analisadas sob diferentes regiões de coagulação, ou seja, em diferentes pares de valores de dosagem de coagulante e pH de coagulação que visualmente possam apresentar distintos mecanismos de coagulação.

As operações de coagulação e floculação foram simuladas no equipamento de bancada *Jar Test*, o qual possui um painel digital para o ajuste manual da rotação das paletas. As condições padrão estabelecidas para a execução dos ensaios foram as seguintes: gradiente médio de velocidade de mistura rápida (G_{mr}) de 600 s^{-1} , tempo de mistura rápida (T_{mr}) de 10 s, gradiente médio de velocidade de floculação (G_f) de 20 s^{-1} , e tempo de floculação (T_f) de 20 min.

Para a obtenção do diagrama de coagulação, foram realizados 386 ensaios, necessários para a variação de 29 dosagens de alumínio: $0,25 \text{ mg.l}^{-1}$; $0,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $0,75 \text{ mg.l}^{-1}$; $1,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $1,25 \text{ mg.l}^{-1}$; $1,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $2,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $2,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $3,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $3,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $4,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $4,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $5,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $5,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $6,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $6,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $7,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $7,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $8,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $8,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $9,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $9,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $10,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $10,5 \text{ mg.l}^{-1}$; $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $12,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $13,0 \text{ mg.l}^{-1}$; $14,0 \text{ mg.l}^{-1}$; e $15,0 \text{ mg.l}^{-1}$. Para cada batelada, ou seja, um ensaio com seis jarros, manteve-se a dosagem do coagulante em todos os jarros, variando apenas o pH através da adição de HCl ou NaOH em distintos volumes para a obtenção dos valores de pH desejados, varrendo uma faixa de 4,0 a 9,0, com variação de 0,5 em 0,5. Dessa forma, foram necessárias no mínimo 2 bateladas para cada dosagem analisada, de modo a preencher as possíveis lacunas de valores de pH.

Os ensaios foram realizados com a seguinte sequência de procedimentos:

- a) foram colocados em cada um dos 6 jarros, 2 l da água de estudo com cor aparente fixada em 100 ± 5 uH, medidos com auxílio de uma proveta;
- b) colocaram-se os volumes distintos de acidificante (HCl) ou alcalinizante (NaOH) nas 6 cubetas traseiras do *Jar Test*, conforme pH desejado;
- c) colocaram-se os volumes de solução de coagulante correspondentes às dosagens de alumínio nas 6 cubetas frontais do *Jar Test*;
- d) com as paletas abaixadas, o equipamento foi ligado com a rotação correspondente ao G_{mr} de 600 s^{-1} e o cronômetro foi acionado. Dessa forma, foi adicionado o volume correspondente ao acidificante ou alcalinizante aos jarros, homogeneizando a água antes da adição do coagulante por um período de 10 s;
- e) passados os 10 s iniciais, foram adicionados as dosagens de coagulante aos jarros, com o respectivo G_{mr} e com auxílio do cronômetro, contabilizou-se o T_{mr} de 10 s. Ao final da mistura rápida, amostras de todos os jarros foram coletadas por meio de tubos coletores localizados a 7,0 cm da lâmina superficial de água, para conferir os respectivos pH de coagulação;
- f) após o tempo estabelecido para a mistura rápida, a rotação do *Jar Test* foi reduzida para o valor correspondente ao G_f de 20 s^{-1} , durante T_f de 20 min;
- g) ao final da floculação, o aparelho foi desligado, as paletas foram erguidas e o cronômetro foi reinicializado, a fim de inicializar as coletas de amostras nos tempos preestabelecidos, correspondentes às velocidades de sedimentação (V_s): $V_{s1} = 5,0 \text{ cm.min}^{-1}$, $V_{s2} = 2,5 \text{ cm.min}^{-1}$ e $V_{s3} = 1,0 \text{ cm.min}^{-1}$, determinadas com base nas taxas de aplicação superficial aplicada em decantadores de ETAs, que são da ordem de 1,0 a 5,0 cm.min^{-1} . O tempo necessário para as coletas foi calculado pela razão entre a altura da lâmina da superfície da água (7,0 cm) e a V_s desejada;
 - a. primeiramente, foram coletadas as amostras dos jarros que representam a primeira velocidade de sedimentação ($V_{s1} = 5,0 \text{ cm.min}^{-1}$), após decorrido o tempo de sedimentação (T_s) de 1,4 min;
 - b. com T_s de 2,8 min, foram coletadas as amostras que representam a segunda velocidade de sedimentação ($V_{s2} = 2,5 \text{ cm.min}^{-1}$);
 - c. finalmente, foram coletadas as amostras que representam a terceira velocidade de sedimentação ($V_{s3} = 1,0 \text{ cm.min}^{-1}$), com 7 min de sedimentação;
- h) determinou-se a cor aparente remanescente das amostras coletadas sob diferentes taxas de sedimentação por espectrofotometria, para a construção dos diagramas de coagulação.

De forma mais resumida, constam-se na Tabela 6, os parâmetros físicos adotados para esta etapa do estudo.

Tabela 6 - Parâmetros físicos adotados na realização dos ensaios para construção dos diagramas de coagulação

Etapa	Parâmetros físicos	Valores
Mistura Rápida	T_{mr}	10 s
	G_{mr}	600 s^{-1}
Floculação	T_f	20 min
	G_f	20 s^{-1}
Sedimentação	V_{s1}	$5,0 \text{ cm.min}^{-1}$
	V_{s2}	$2,5 \text{ cm.min}^{-1}$
	V_{s3}	$1,0 \text{ cm.min}^{-1}$

Fonte: Autora (2018)

4.4.1 Determinação do percentual de remoção de cor aparente

Por meio das leituras de residual remanescente de cor aparente, foram calculados seus respectivos percentuais de remoção (R), conforme a Equação 14 (WU et al., 2016; MA et al., 2017).

$$R (\%) = \left(1 - \frac{\text{Cor aparente final}}{\text{Cor aparente inicial}} \right) \times 100 \quad (14)$$

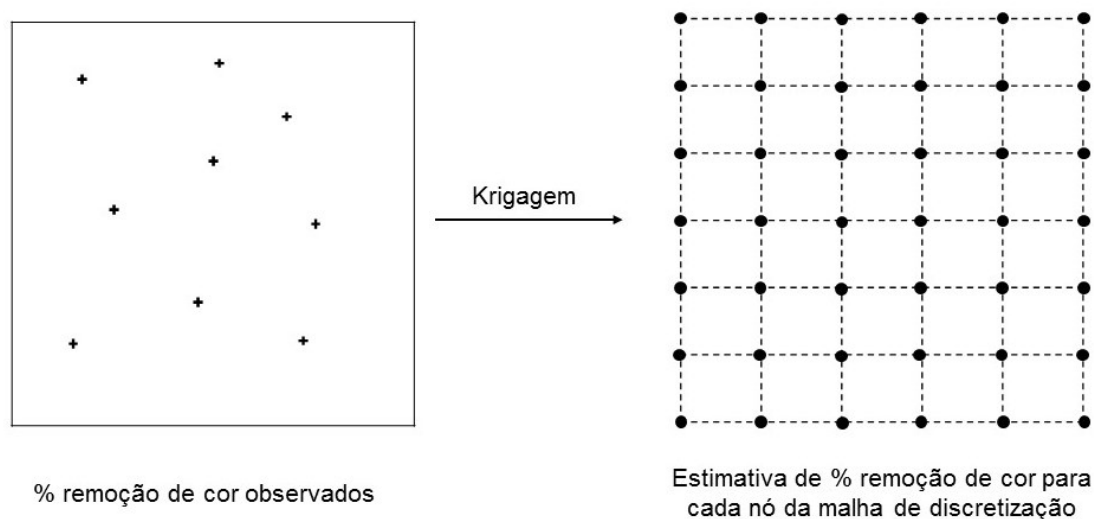
4.5 Traçado dos diagramas de coagulação

Os registros das leituras de pH de coagulação, dosagem de coagulante e os respectivos percentuais de remoção cor aparente foram tabulados em planilhas eletrônicas no *Microsoft Excel* e, posteriormente, transferidos para o programa computacional *Surfer 10*, para a interpolação dos dados amostrados em laboratório, visando a estimativa de percentuais em pontos não amostrados e assim, sendo possível traçar as curvas de mesma eficiência de remoção, denominado diagrama de coagulação.

Para tal finalidade, uma planilha de trabalho foi criada inicialmente, através da opção “*Worksheet*”, localizada em “*New*”, do menu “*File*”. Após a alocação dos dados obtidos na planilha, o arquivo foi salvo na extensão “*dat*”. Em seguida, para a criação do diagrama pelo

Surfer 10, foi necessário o “*Gridding*” do arquivo gerado anteriormente, transformando-o para a extensão “*grd*”. Este procedimento foi realizado a partir do menu “*Grid*”, na opção “*Data*”, selecionando o arquivo “*dat*”. A seleção das colunas correspondentes às opções *X*, *Y* e *Z*, na opção “*Data Columns*” foram, respectivamente: pH de coagulação, dosagem de coagulante e percentuais de remoção de cor para cada uma das 3 velocidades de sedimentação estudadas. Em “*Gridding Method*”, foi selecionado o método de regressão de *Kriging* (Krigagem) como modelo matemático para a interpolação espacial e estimativa dos percentuais médios de cor residual, visto que o mesmo se apresentou mais adequado a representação das isolinhas de percentual de remoção que os demais métodos que o *Surfer* dispõe. Este modelo assume que há correlações entre valores observados de uma determinada população e abrange um conjunto de métodos, sendo a Krigagem Simples e Krigagem Ordinária as mais usuais. No presente trabalho, foi utilizada a Krigagem Ordinária, que pressupõe que as médias locais não são necessariamente próximas da média dos dados como um todo. Assim, a estimativa para determinar um valor médio em uma região não amostrada é feita a partir de pontos vizinhos. A Figura 24 ilustra a estimativa de percentuais de remoção de cor para cada nó contido na malha de discretização após a interpolação de resultados obtidos experimentalmente.

Figura 24 - Interpolação de dados experimentais e nós de uma malha de discretização



Fonte: Autora (2018)

Posteriormente, na opção “*Grid Line Geometry*”, foram definidos os limites mínimos e máximos do eixo *X* (pH de coagulação), iguais a 4 e 9, respectivamente, bem como do eixo *Y* (dosagem de coagulante), iguais a 0,25 mg.l⁻¹ e 15,0 mg.l⁻¹.

Uma vez obtido o arquivo “*grd*”, plotou-se os diagramas de coagulação para cada uma das velocidades de sedimentação, através do menu “*Map*” e a opção “*Contour Map*”, com curvas

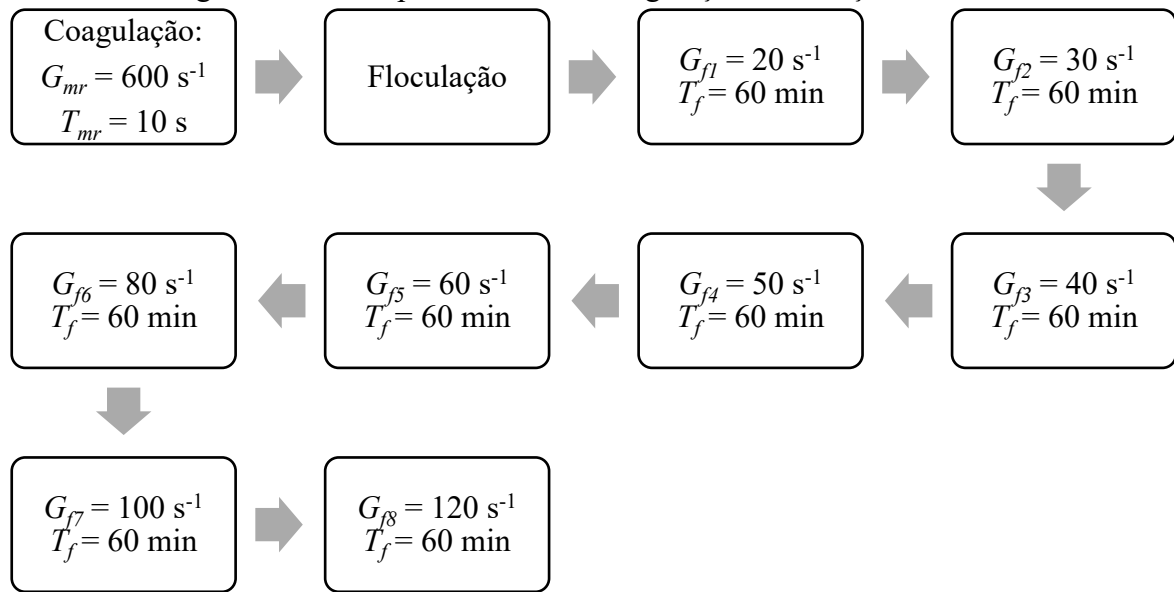
de mesmo percentual de remoção, espaçadas em 20%. Além disso, foram gerados outros dois gráficos de pontos, um contendo alguns pontos amostrais de remoção de cor, e outro contendo todos os pontos onde verificou-se alteração da qualidade da água. Os mesmos foram plotados através do menu “Map”, opção “Post Map”, e posteriormente sobrepostos aos diagramas de coagulação, através da opção “Overlay Maps”.

4.6 Acompanhamento da floculação por meio da aquisição de imagens

Nesta etapa do trabalho, a dinâmica de formação dos flocos foi avaliada sob 10 condições em distintas regiões do diagrama de coagulação, escolhidos a partir da observação de alterações visíveis da massa líquida de água durante a execução dos experimentos da primeira fase, mesmo em condições onde a eficiência na remoção de cor aparente da água foi baixa ou até mesmo nula, abrangendo diferentes pares de valores de pH e dosagem de alumínio. Esta análise foi realizada empregando-se a técnica de análise digital de imagem e visa avaliar evolução temporal da DTP, determinar o parâmetro representativo da distribuição de tamanho e características morfológicas das partículas com base na dimensão fractal.

Conforme esquematizado na Figura 25, os experimentos consistiram na simulação da etapa de coagulação pela adição da dosagem de alumínio e acidificante/alcalinizante, a qual foi submetida a um gradiente de velocidade médio de mistura rápida (G_{mr}) de 600 s^{-1} , por um tempo de mistura rápida (T_{mr}) de 10 s. Posteriormente, as características dos flocos foram avaliadas em oito gradientes médio de velocidade durante a floculação em um mesmo jarro, iniciando-se com $G_{f1} = 20 \text{ s}^{-1}$, aumentando gradativamente para $G_{f2} = 30 \text{ s}^{-1}$, $G_{f3} = 40 \text{ s}^{-1}$, $G_{f4} = 50 \text{ s}^{-1}$, $G_{f5} = 60 \text{ s}^{-1}$, $G_{f6} = 80 \text{ s}^{-1}$, $G_{f7} = 100 \text{ s}^{-1}$, e $G_{f8} = 120 \text{ s}^{-1}$, mantendo-se para cada taxa de cisalhamento, um tempo de floculação (T_f) de 60 min, suficiente para atingir o estágio estacionário, ou seja, situação em que a DTP é equivalente ao balanço entre a taxa de crescimento e ruptura dos flocos (SPICER; PRATSINIS, 1996). Durante a floculação, foram obtidas 40 imagens durante os segundos iniciais, nos tempos de 1 min, 3 min, 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 25 min, 30 min, 40 min, 50 min e 60 min para cada um dos gradientes de velocidade médio estudados, totalizando 8 h de acompanhamento e captura de imagens. Este procedimento foi realizado 10 vezes, correspondente a cada ponto escolhido.

Figura 25 - Acompanhamento da coagulação e formação de flocos



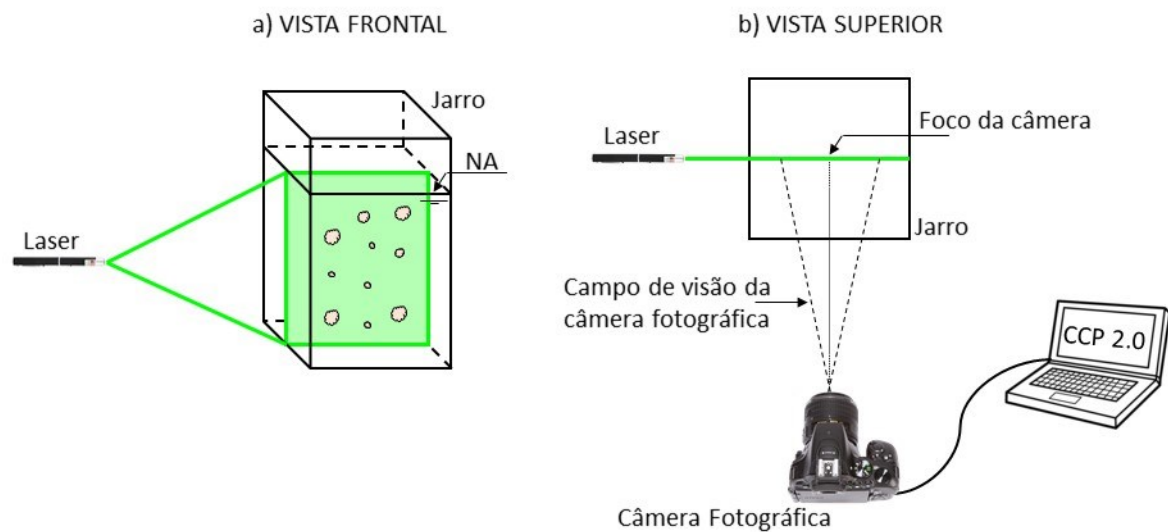
Fonte: Autora (2018)

4.7 Aquisição de imagens digitais

As análises das partículas floculentas foram realizadas a partir da aquisição e processamento de imagens, empregando-se uma técnica não intrusiva e não destrutiva com auxílio de uma câmera, cujo princípio de funcionamento é a aquisição de imagens dos flocos *in situ*, ou seja, no interior do jarro de acrílico, em diferentes condições operacionais sem a necessidade de extração de amostras, evitando possíveis alterações nas características morfológicas, como ocorrem em métodos intrusivos, como por exemplo, microscopia e granulometria a *laser* (BOUYER et al., 2005; MORUZZI; REALI, 2010).

A metodologia baseia-se na constituição de um plano de luz incidindo no jarro para visualização dos flocos, conforme ilustrado na Figura 26(a), seguida da captura das imagens dos flocos utilizando uma câmera fotográfica digital, esquematizado na Figura 26(b), e finalmente, o processamento das mesmas através do *ImageJ* 1.51, um programa computacional de uso livre para análise de imagens. Nas subseções seguintes, a instalação do aparato experimental em bancada e procedimentos para aquisição e tratamento das imagens são descritos detalhadamente.

Figura 26 - (a) Vista frontal, ilustrando o plano de luz para visualização dos flocos e (b) esquematização do aparato experimental em bancada para aquisição de imagens



Fonte: Autora (2018)

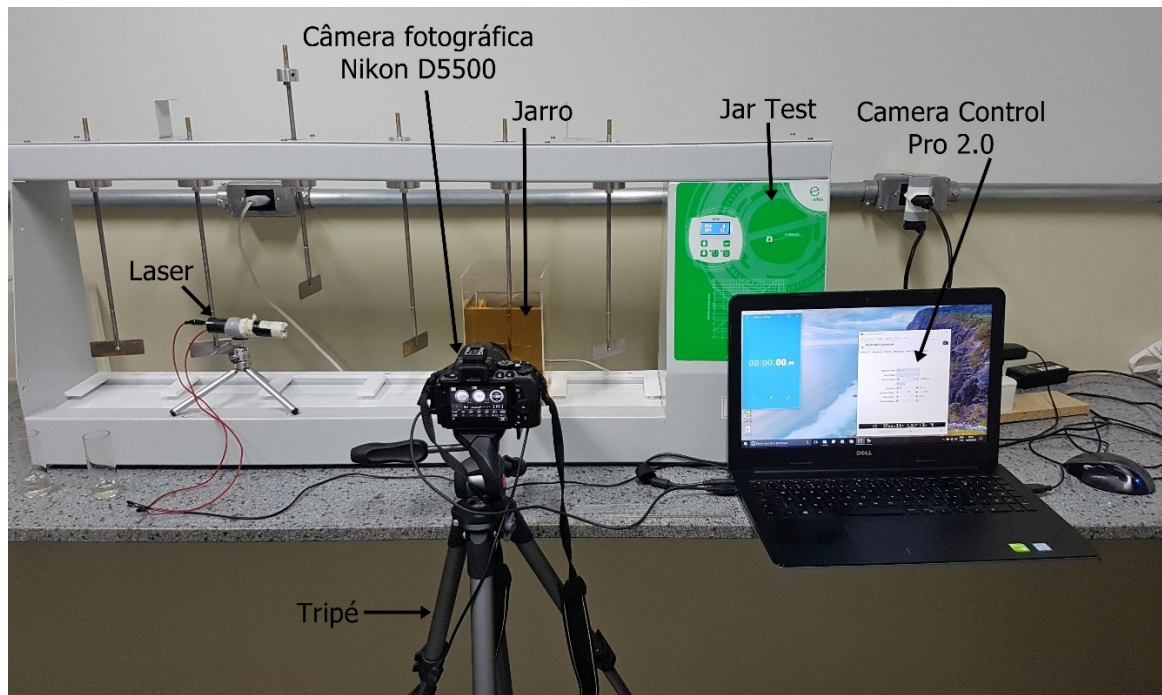
4.7.1 Instalações experimentais

A montagem dos equipamentos experimentais foi realizada baseando-se estudos de Moruzzi (2005), Moreno (2014), Oliveira et al. (2015a, 2015b) e Moruzzi et al. (2017). Para tanto, foi constituído um plano de luz, capaz de atravessar o jarro de acrílico, utilizando uma fonte de *laser* com potência nominal de 98.000 mW, comprimento de onda verde de 532 nm e espessura de 2 mm, adaptado com um bastão de vidro cilíndrico para a projeção de um feixe de luz planar, fixado em um suporte, para a obtenção de contraste e definição de uma posição espacial para a obtenção das imagens.

As imagens foram adquiridas por meio de uma câmera fotográfica digital Nikon D5500 de 24.2 MPixel, que, dentre suas especificações, apresenta resolução máxima de 6000 x 4000 pixels (unidades elementares), tamanho do pixel de 3,92 μm , velocidade máxima de disparo contínuo com resolução total de até 5 qps (em formato de arquivo JPEG e NEF/RAW de 12 bits) e 4 qps (NEF/RAW de 14 bits), ajuste de foco manual e automático, velocidade máxima do obturador de 1/4000 s (250 μs).

Para a captura de imagens durante a floculação, a câmera fotográfica foi posicionada em frente ao jarro de acrílico e perpendicularmente ao plano do *laser*, conectada a um computador para ser gerenciada pelo programa computacional *Camera Control Pro 2.0* (CCP 2.0), conforme instalação mostrada na Figura 27.

Figura 27 - Instalação experimental para aquisição de imagens digitais em escala de bancada, composto de equipamento *Jar Test* para a realização dos ensaios de coagulação/floculação, *laser*, câmera Nikon D5500 e computador com CCP 2.0



Fonte: Autora (2018)

4.7.2 Procedimentos para aquisição de imagens das partículas

Inicialmente, limpou-se a parede do jarro de acrílico convenientemente, de modo a minimizar perturbações externas nas imagens obtidas e em seguida, foram adicionados 2 l de água no mesmo. A câmera fotográfica Nikon D5500 foi fixada no tripé, posicionada em frente ao jarro com distância de aproximadamente 11,2 cm entre a lente e a parede frontal do jarro, possibilitando a captura de imagens no foco, e a fonte do plano luminoso (*laser*) foi disposta perpendicularmente à câmera e, em seguida, ligada e posicionada a cerca de 0,6 cm da parede do jarro para o estabelecimento manual do foco da câmera, evidenciando o brilho das partículas que passassem por este, tornando-as mais nítidas em virtude da iluminação e atenuando possíveis interferências caracterizadas por distorções em virtude da presença de pontos não pertinentes aos flocos. É imprescindível a inalterabilidade do aparato experimental, de modo que os resultados não sofram possíveis influências pela modificação óptica.

Após os equipamentos devidamente posicionados, o campo de visão foi definido de forma que uma amostra dos flocos formados representasse toda a sua população, utilizando a resolução máxima da câmera de 6000 x 4000 *pixels*, possibilitando maior detalhamento da imagem.

Segundo Junker (2006), um dos grandes problemas da aquisição de imagens é a captura de fotos claras em movimento, eliminando interferência nas medições. Assim, a habilidade de distinguir objetos de interesse (partículas floculentas) do plano de fundo é um fator essencial para evitar a sobreposição, omissão de partículas, rastros e imagens deformadas. Levando isto em consideração, anteriormente à aquisição de imagens das partículas, foi realizado um teste para otimização dos seguintes parâmetros: abertura do obturador (número F); compensação de exposição; sensibilidade ISO; velocidade de captura do obturador, evitando rastros ou deformações nas imagens; e frequência de disparo da câmera, para o estabelecimento de uma amostra de imagens representativa da população de flocos. A melhor configuração adotada de cada um dos parâmetros para a execução dos ensaios é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7 - Configurações da câmera fotográfica para aquisição de imagens dos flocos formados durante a floculação

Parâmetro	Valor utilizado
Abertura do obturador	F 3.5
Compensação de exposição	+1 1/3 EV
Sensibilidade ISO	12.800
Velocidade de captura do obturador	1/3200 s (312,5 μ s)
Frequência de disparo	4 qps
Distância focal	18 mm
Resolução	6000 x 4000 <i>pixels</i>

Fonte: Autora (2018)

Ao início de cada ensaio, foi obtida uma imagem para calibração, necessária para a conversão das medidas de *pixels* em milímetros, visando o conhecimento da distância entre dois pontos. Para tal finalidade, utilizou-se uma régua graduada em centímetros como referência de medida, posicionada no interior do jarro à frente à câmera e assim, o *laser* foi ligado, possibilitando o ajuste da régua de modo a coincidir com o plano luminoso, perpendicularmente à aquisição de imagens. Em seguida, o foco da câmera foi ajustado manualmente fixando-o na régua de calibração, e uma imagem da mesma foi fotografada. Por fim, a régua foi retirada sem alterar o foco para que as partículas fossem capturadas no mesmo plano focal.

Ao longo dos segundos iniciais de cada tempo de floculação analisado, foram adquiridas 40 imagens, a uma frequência de 4 imagens por segundo, acionando o disparo da câmera fotográfica pelo programa de gerenciamento CCP 2.0. As mesmas foram transferidas e salvas automaticamente no computador, contabilizando 440 imagens para gradiente de velocidade

médio avaliado. Durante a obtenção de imagens, procurou-se evitar qualquer interferência de luminosidade no ambiente, de modo que a única fonte fosse o plano luminoso gerado pelo *laser*. O mesmo procedimento foi realizado para todos os ensaios de coagulação/floculação pré-definidos, totalizando 35.200 imagens digitais.

4.8 Tratamento das imagens

Após a aquisição e estocagem das imagens obtidas, as mesmas foram recortadas na mesma posição e tamanho utilizando o programa computacional *JPEG Crops Beta 0.7.5*, de modo que somente a região de maior nitidez na imagem original fosse mantida na imagem reestruturada. Este processo foi necessário para a obtenção de uma amostra homogênea dos flocos no interior do jarro. Ressalta-se que este mesmo procedimento foi executado igualmente para as imagens de calibração, uma vez que para o programa de tratamento em questão, é importante que o tamanho desta imagem seja o mesmo das imagens adquiridas para o tratamento, evitando o comprometimento da calibração.

Em seguida, as imagens foram tratadas por meio do programa computacional *ImageJ 1.51*, um processador e analisador de imagens desenvolvido na linguagem de programação Java para ser utilizado no processamento e análise de imagens no ramo da medicina, podendo ser obtido a partir do *site* da *National Institutes of Health*, do Governo Federal dos Estados Unidos, operando perfeitamente nas plataformas Windows, Linux e Mac OS X. Neste trabalho, o mesmo foi utilizado para o processo de binarização, detecção de feições e mensuração dos parâmetros para a caracterização dos flocos formados durante a floculação.

Ao final do tratamento, foram obtidas planilhas eletrônicas contendo informações acerca do número de partículas por imagem capturada, bem como os seguintes parâmetros característicos: área, diâmetro equivalente e diâmetros máximo e mínimo, necessários para as análises de interesse. Os parâmetros obtidos em cada tempo de floculação foram tabulados e operados estatisticamente em planilhas eletrônicas para elaboração do histograma das classes de DTP, determinação do parâmetro representativo da distribuição dos flocos e avaliação das estruturas morfológicas dos mesmos com base na dimensão fractal.

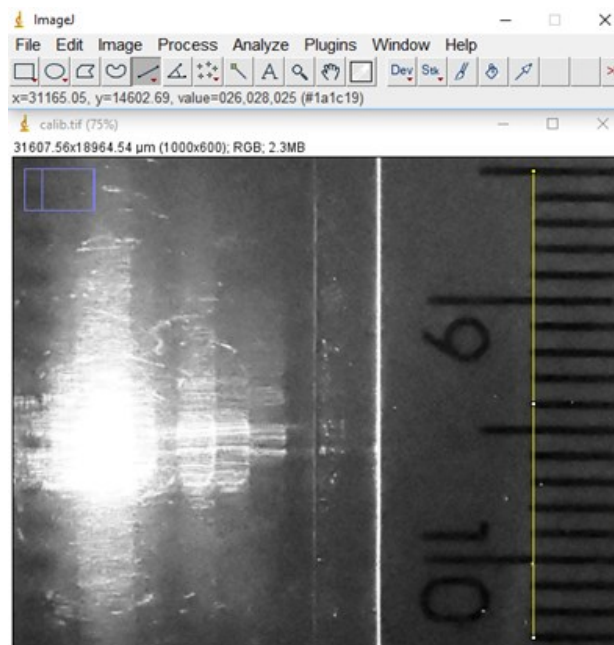
Os procedimentos padronizados para a calibração, tratamento da imagens capturadas e análise de resultados são descritos detalhadamente nas seções 4.8.1 a 4.8.3.

4.8.1 Calibração

Anteriormente ao tratamento de cada conjunto de imagens, realizou-se a calibração do sistema através da imagem de calibração obtida previamente a obtenção de cada bateria de ensaios, informando o tamanho correspondente a uma distância entre dois pontos. Esta etapa foi de fundamental importância na determinação da DTP e dimensão fractal por análise de imagem. Devido à nitidez suficiente para a delimitação das bordas, não foi necessária a binarização desta imagem.

O procedimento consistiu na abertura do arquivo imagem da régua a ser calibrada e através da ferramenta *Straight*, uma linha foi inserida para a medição da distância conhecida entre dois pontos na imagem, conforme a Figura 28.

Figura 28 - Abertura do arquivo imagem da régua utilizada como sistema de referência de medida

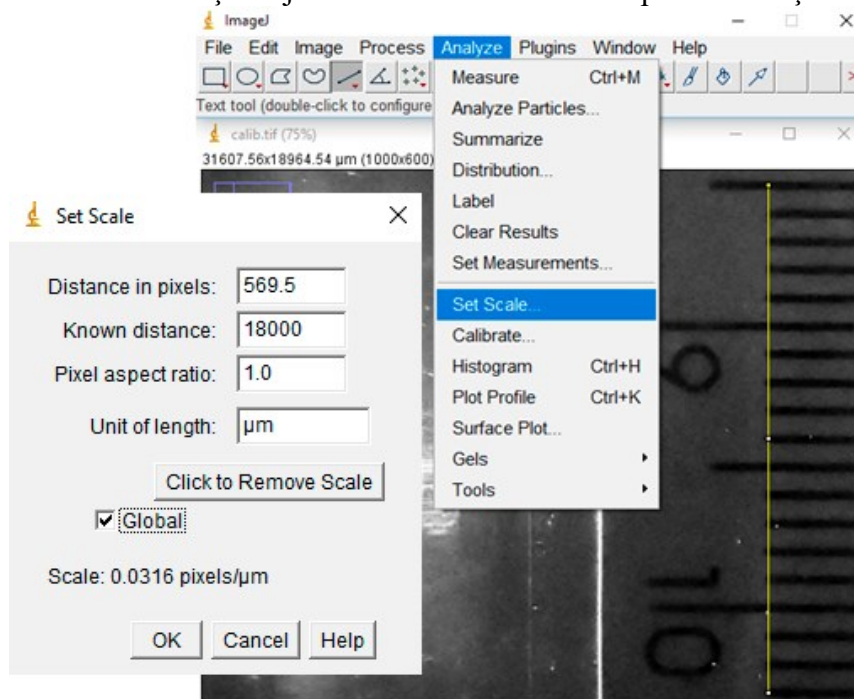


Fonte: Autora (2018)

Em seguida, a função para calibrar a escala foi acessada através da função *Set Scale*, no menu *Analyze* e na janela “*Set Scale*”, a distância conhecida medida na régua foi inserida no campo “*Known distance*” em micrômetros. A unidade de medida correspondente foi inserida no campo “*Unit of length*”, e desta forma, foi possível calcular a quantidade de *pixels* por micrômetros que existe na imagem em questão. Por fim, a opção “*Global*” foi marcada para que esta calibração fosse aplicada em todas as imagens dos flocos (Figura 29).

A imagem de calibração foi salva no formato “tif”, que permite o salvamento das informações da calibração diretamente nos metadados do arquivo. Assim, todas as imagens obtidas nas mesmas condições que a imagem de calibração puderam ser medidas através da escolha do arquivo correspondente sem a necessidade de repetir a operação.

Figura 29 - Acesso à função e janela “Set Scale” utilizada para calibração da imagem



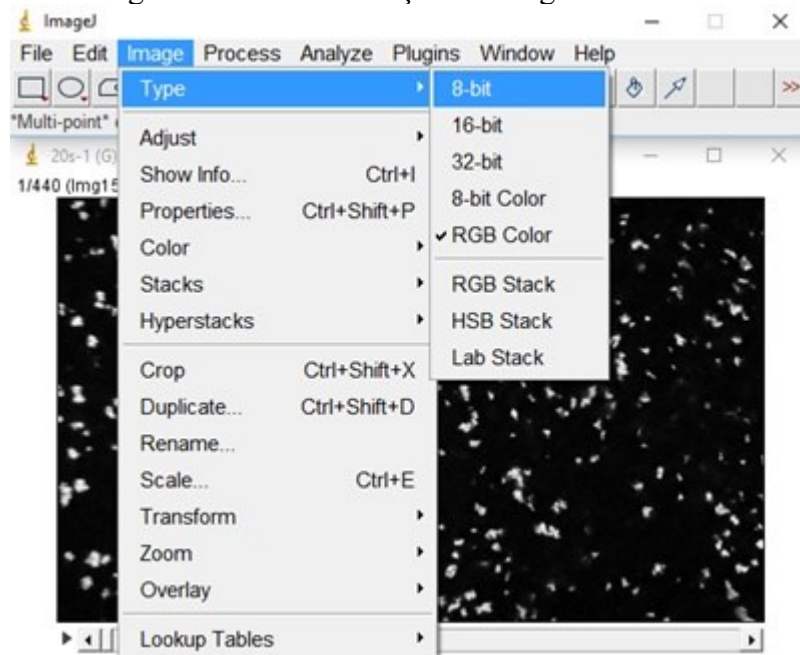
Fonte: Autora (2018)

4.8.2 Tratamento das imagens e obtenção de tamanhos

O tratamento das imagens foi constituído pelas seguintes etapas: transformação da imagem em escala de cinza; binarização manual da imagem, convertendo-a em uma imagem de 1 bit; segmentação e detecção dos objetos e finalmente, a obtenção de tamanhos.

O procedimento consistiu inicialmente com a importação do conjunto de imagens obtidas no intervalo de tempo entre 1 min e 60 min, totalizando 440 imagens, correspondentes a todas as imagens de um determinado gradiente de velocidade médio de floculação, através da opção “Image Sequence” no menu “File”→“Import”. Em seguida, as imagens foram transformadas de 24 bits para 8 bits, isto é, convertidas em imagens contendo *pixels* em escala de cinza, por meio do processo mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Transformação da imagem em 8 bits



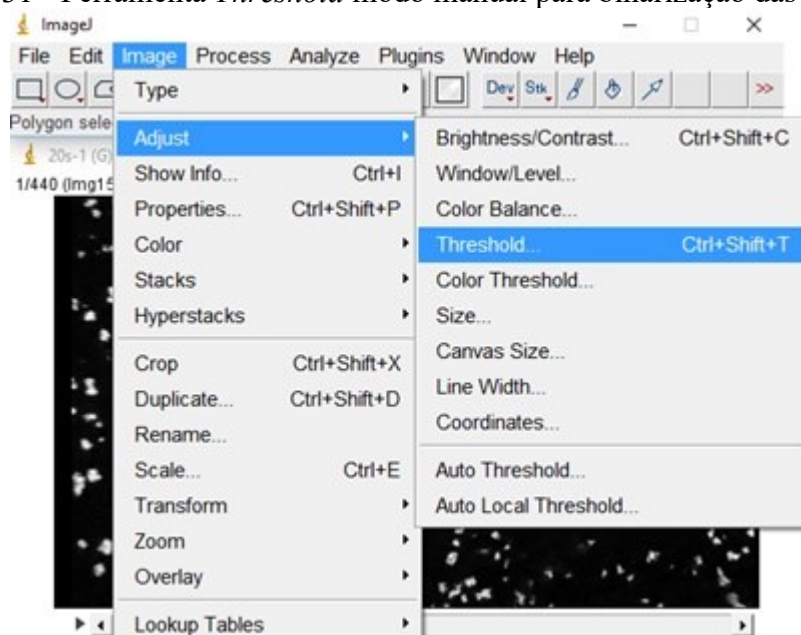
Fonte: Autora (2018)

A etapa seguinte consistiu na binarização das imagens, que, segundo Morgan (2008), é um método utilizado na transformação de imagens em escala de cinza em uma imagem binária. Em outras palavras, esta técnica objetiva a segmentação das imagens através de um valor de limiar em regiões classificadas por *pixels* brancos, que representam os agregados, de valor igual a 1, e pretos, representando o fundo, de valor igual a 0, de modo a eliminar interferências de pontos não associados às partículas de interesse. Este procedimento foi realizado por meio da ferramenta “*Threshold*”, localizada no menu “*Image*”→“*Adjust*”, conforme a Figura 31. A janela “*Threshold*” dispõe de um histograma de intensidade, variando de 0 a 255, onde o limiar de binarização foi escolhido manualmente em função do número de flocos que apareciam na imagem e comparando visualmente com a imagem de origem (Figura 32).

É importante ressaltar para cada conjunto de 3.520 imagens correspondentes aos respectivos pontos analisados do diagrama, o limiar foi definido de forma independente. Em outras palavras, a etapa de binarização foi realizada de forma específica em cada grupo de imagens de cada ensaio realizado, já que as condições permaneceram as mesmas no decorrer de cada ensaio.

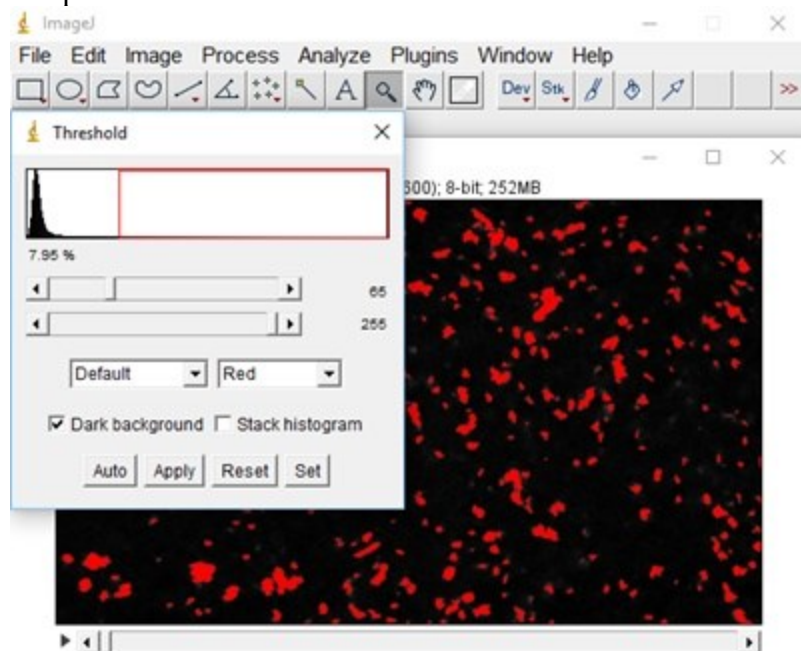
Após a definição do limiar, clicou-se em “*Apply*” e na janela “*Convert Stack to Binary*”, aberta na sequência foi selecionado o método padrão de binarização do programa. Além disso, de modo a se converter o plano de fundo em preto e os objetos em brancos, a opção “*Black Background (of binary masks)*” foi selecionada (Figura 33).

Figura 31 - Ferramenta *Threshold* modo manual para binarização das imagens



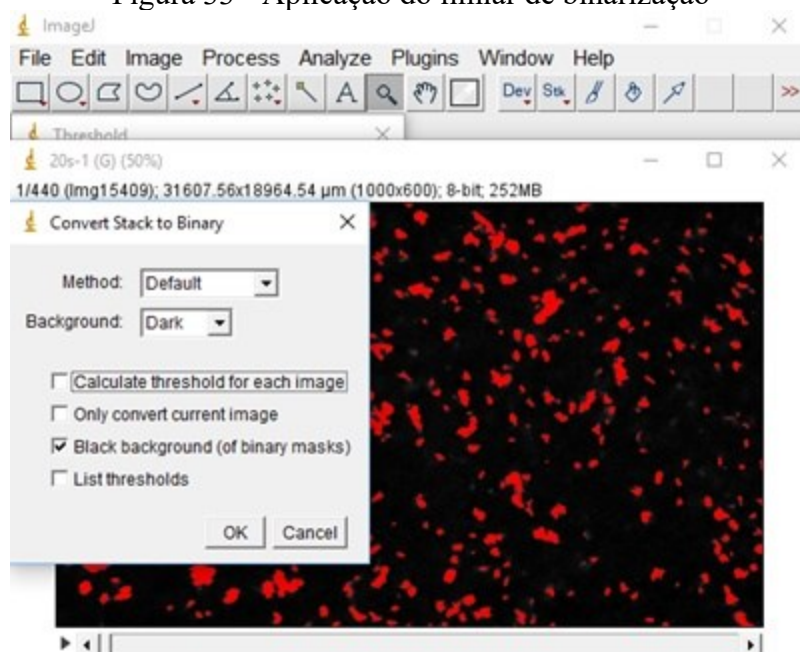
Fonte: Autora (2018)

Figura 32 - Escolha do limiar de binarização através do histograma de intensidade e aparecimento dos flocos de acordo com o limiar adotado



Fonte: Autora (2018)

Figura 33 - Aplicação do limiar de binarização



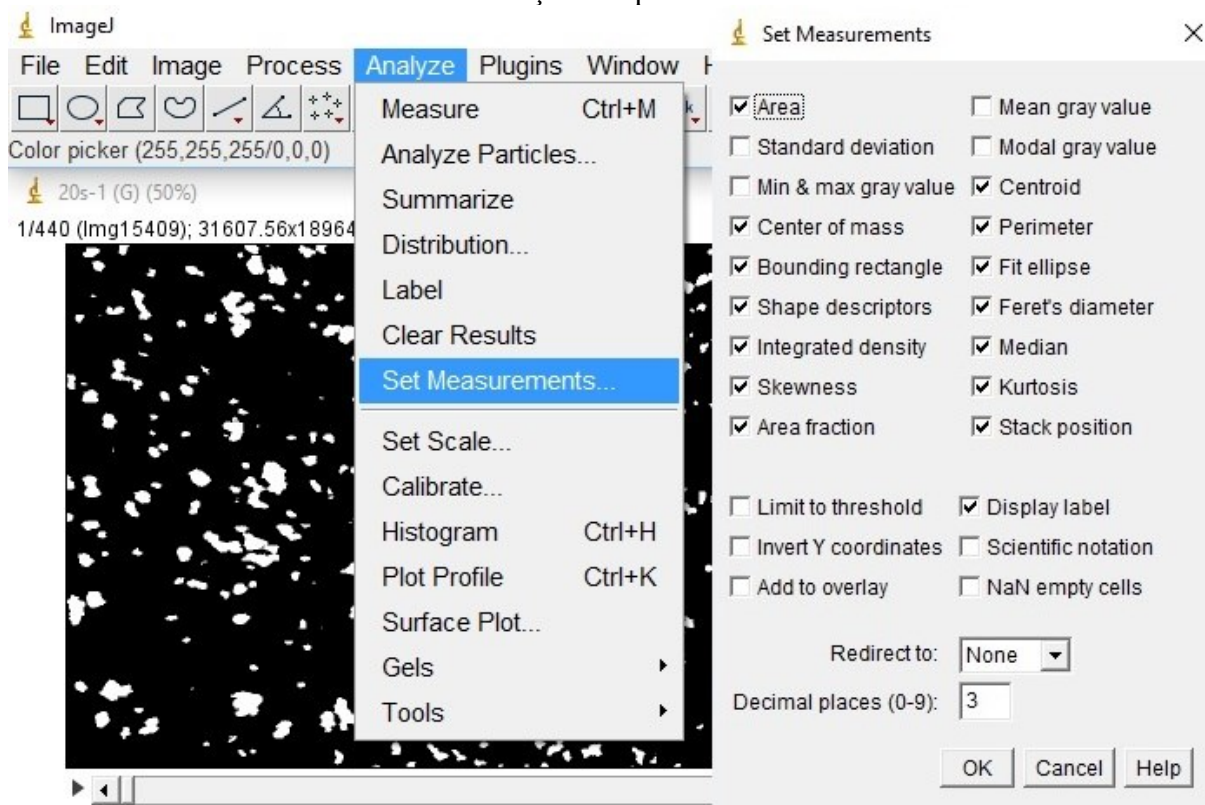
Fonte: Autora (2018)

A partir das imagens binarizadas, iniciou-se a detecção das feições e obtenção das medições das partículas. Para tal finalidade, foram selecionados os parâmetros de interesse através da função “*Set Measurements*”, no menu “*Analyze*”. A janela com os parâmetros possíveis de ser extraídos pelo programa disponibiliza uma série de atributos, como área, centroide, centro de massa, perímetro, curtose, diâmetros, dentre outros (Figura 34). No caso deste trabalho, foram extraídos os seguintes parâmetros: área superficial do floco, para o cálculo do diâmetro equivalente, diâmetro mínimo e diâmetro máximo dos flocos individualizados e identificados em cada imagem capturada. De acordo com Li et al. (2007), este parâmetro se refere ao comprimento da maior reta que une dois pontos do limite do floco e que passa pelo centroide do mesmo.

Feita a seleção dos atributos de interesse, utilizou-se a função “*Analyze Particles*”, no menu “*Analyze*” (Figura 35), para iniciar a detecção, contagem, identificação e medição dos objetos. Nesta etapa, foi selecionada a opção “*Overlay Masks*” para visualização dos objetos delineados, preenchidos e numerados, conforme mostrado na Figura 36.

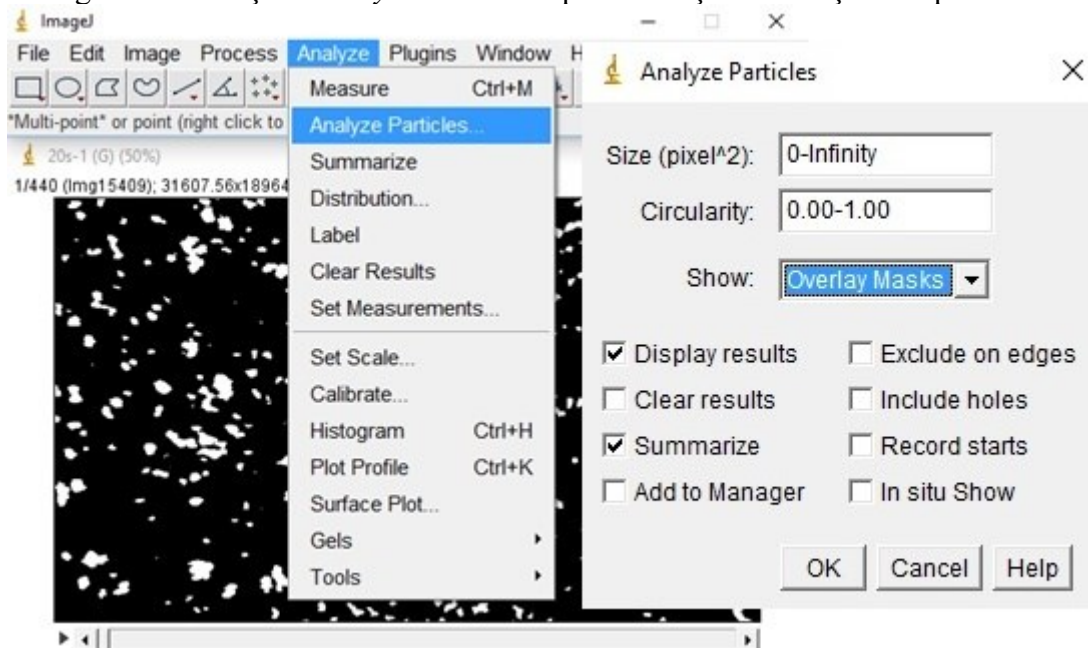
Para cada conjunto de imagens referentes a cada gradiente de velocidade médio de floculação analisado, os procedimentos de tratamento descritos foram repetidos. Além disso, a cada vez que o programa foi iniciado, a etapa de calibração ou leitura do arquivo de calibração feita previamente foi efetuada.

Figura 34 - Seleção da função “Set Measurements” e janela contendo os parâmetros de medição das partículas



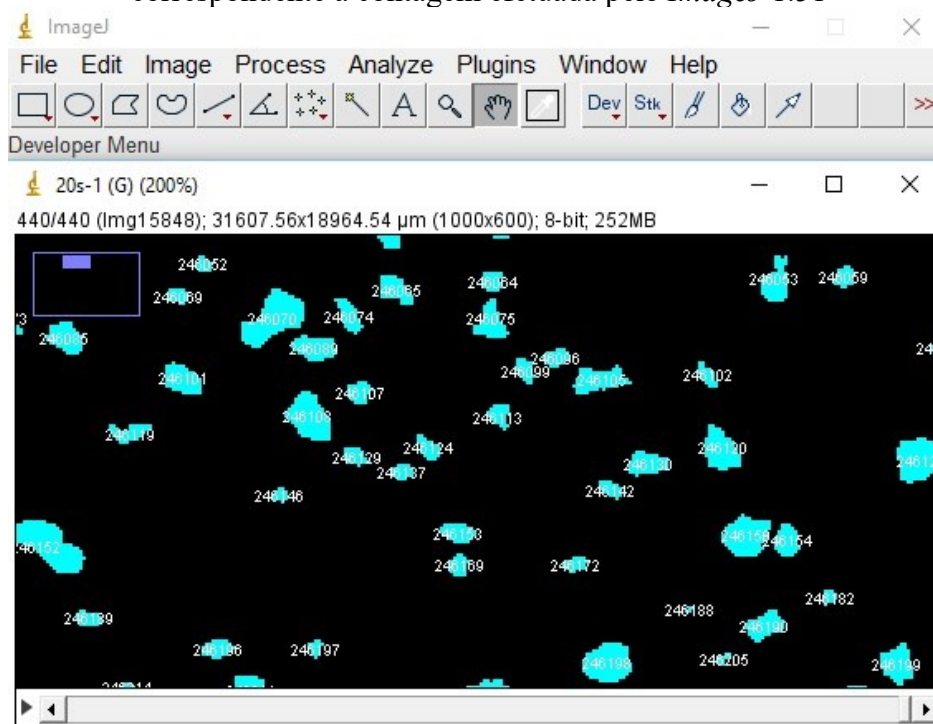
Fonte: Autora (2018)

Figura 35 - Função “Analyze Particles” para detecção e medição das partículas



Fonte: Autora (2018)

Figura 36 - Delimitação e preenchimento da área de cada objeto detectado e o número correspondente a contagem efetuada pelo *ImageJ* 1.51



Fonte: Autora (2018)

Ao final da análise das imagens no programa, os resultados foram apresentados em duas janelas independentes, uma correspondente ao número de imagens e a quantidade de flocos detectados em cada uma, além de outros atributos, como a soma da área de todos os objetos e soma dos perímetros, intitulada como “*Summary*”, e a planilha “*Results*”, que apresentam os parâmetros característicos de interesse para cada objeto detectado. Ambas as planilhas foram armazenadas no formato “xls”.

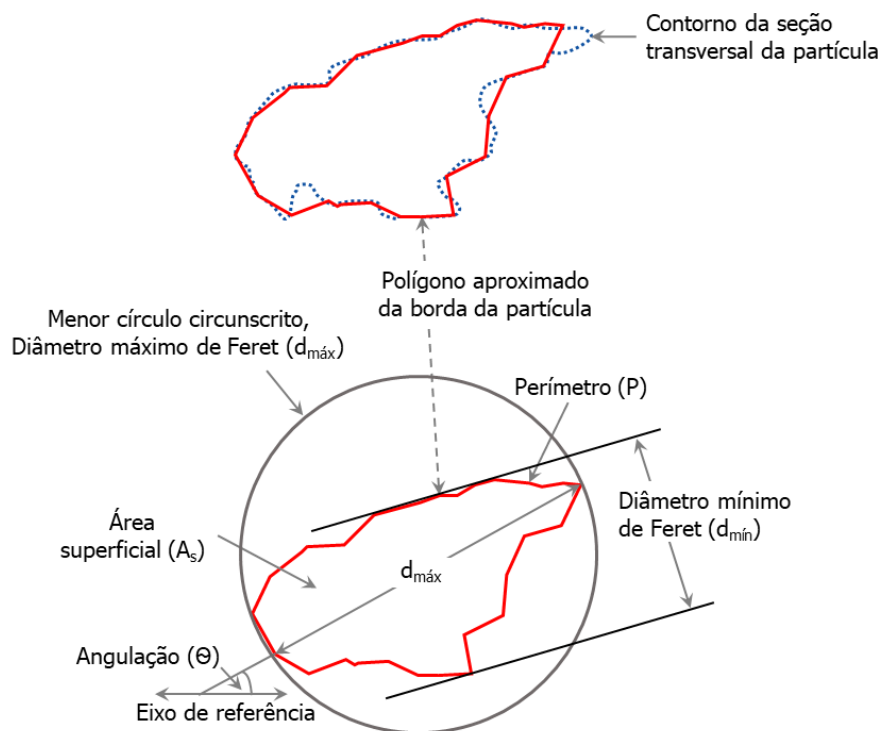
Pelo fato das imagens terem sido tratadas em conjunto de 440 imagens, abrangendo os 11 tempos de floculação, foi necessária a realização da separação dos resultados dos objetos identificados em cada tempo de floculação antes de iniciar a análise dos parâmetros característicos. Para esta finalidade, um comando macro foi criado no *Microsoft Excel*, automatizando o procedimento de transferência de dados entre a planilha gerada ao final do tratamento das imagens pelo *ImageJ* 1.51 e as planilhas correspondentes a todos os tempos de floculação analisados.

4.8.3 Análise de imagens

Os dados obtidos e organizados separadamente em cada tempo de floculação foram transferidos para uma planilha eletrônica, onde foram colocados em ordem crescente, apresentando a identificação dos flocos detectados, os diâmetros máximo e mínimo, contabilizados em mm, bem como a área superficial dos flocos (A_s), contabilizada em mm², parâmetro necessário para a obtenção do diâmetro equivalente de Feret (d_F). O valor de d_F , conforme ilustrado na Figura 37, corresponde à média da distância entre duas linhas paralelas tangentes à projeção do floco, equivalente ao diâmetro de um círculo com mesma área superficial e foi determinado pela Equação 15 (JUNKER, 2006).

$$d_F = \left(\frac{4 \cdot A_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Figura 37 - Parâmetros geométricos da seção transversal de uma partícula



Fonte: Adaptado de Yepes et al. (2009)

4.8.3.1 Determinação da distribuição do tamanho de partículas

A análise da distribuição do tamanho de partículas (DTP) foi realizada por meio da distribuição de frequência com base no diâmetro equivalente das partículas, obtido pela Equação 15. Os

dados foram classificados em 15 classes de tamanho, e, para tal finalidade, foi determinada primeiramente a amplitude dos dados (A_T) do conjunto de partículas para aquele tempo de floculação que apresentou o maior diâmetro equivalente para um determinado G_f , de modo que toda a população amostral de partículas fosse incluída na análise. De acordo com a Equação 16, a amplitude de dados corresponde à diferença entre o diâmetro equivalente máximo ($d_{F_{máx}}$) e o diâmetro equivalente mínimo ($d_{F_{mín}}$).

$$A_T = d_{F_{máx}} - d_{F_{mín}} \quad (16)$$

Em seguida, foi determinada a amplitude da classe (A_C), conforme a Equação 17:

$$A_C = \frac{A_T}{NC} \quad (17)$$

Em que NC é o número de classes.

Finalmente, determinaram-se os limites inferiores e superiores de cada classe de tamanho. Na Classe 1, o limite inferior foi igual ao diâmetro equivalente mínimo, enquanto o superior foi a soma do limite inferior e da amplitude de classe. Para a Classe 2, o limite inferior foi igual ao superior da primeira classe, ao passo que a soma deste com a amplitude de classe resultou no limite superior da segunda classe. O processo foi repetido até a Classe 15, sendo o limite superior desta última classe correspondente ao diâmetro equivalente máximo de todos os tempos de floculação para o gradiente de velocidade estudado.

Realizado o cálculo dos intervalos de cada classe de tamanho, calculou-se as frequências absoluta, relativa e relativa acumulada das partículas para cada tempo de floculação, possibilitando a construção dos gráficos de DTP, que são histogramas de frequência relativa da ocorrência dos agregados quanto as faixas de tamanho.

4.8.3.2 Obtenção e definição de β como parâmetro característico da DTP

Finalizado o procedimento para a determinação das frequências de partículas por faixa de tamanho, descrito na seção 4.8.3.1, o conjunto de dados foi ajustado para uma função contínua de distribuição de tamanho, cuja forma apresenta-se através da Equação 13, apresentada na seção 3.6.2. Deste modo, a DTP foi expressa pelos parâmetros β e A , tidos como representativos para a distribuição de tamanho de partículas, que podem ser extraídos

diretamente da linearização dos resultados obtidos no tratamento das imagens por meio da Equação 13, aplicando-se *Log* em ambos os lados da equação, obtendo a Equação 18:

$$\text{Log} \left[\frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \right] = -\beta \text{Log}(d_p) + \text{Log}A \quad (18)$$

O coeficiente *A* representa o número de dados avaliados e quanto maior o seu valor, maior a quantidade de flocos em cada classe de tamanho analisada. Já o coeficiente β representa a inclinação da reta da distribuição de tamanho de partículas para o gráfico log-log da Equação 18, sendo uma medida da quantidade relativa de partículas em cada classe de tamanho. O valor negativo de β indica que a reta é decrescente, podendo ser mais ou menos acentuada conforme seus valores. Em outras palavras, quanto maior o valor de β , em módulo, maior será a inclinação da reta e, portanto, indica um predomínio de partículas pequenas para as faixas de classificação e vice-versa.

A construção deste gráfico foi realizada a partir da determinação dos termos ΔN , d_p e $\Delta(d_p)$, com base na frequência absoluta contabilizada em cada uma das 15 classes de tamanho estabelecidas no estudo. O ΔN foi calculado pela diferença entre a frequência absoluta de flocos na classe $n - 1$ e n ; o valor de d_p corresponde à média geométrica dos diâmetros inferior e superior de cada classe; e $\Delta(d_p)$ é a variação da média geométrica da classe $n - 1$ para a classe n . Assim, é possível plotar o gráfico $\log \left[\frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \right] \times \log(d_p)$ e adicionar uma linha de tendência linear, cujos coeficientes angular e linear correspondem aos parâmetros β e *A*, respectivamente.

Neste estudo, a obtenção do parâmetro β foi utilizado na análise auxiliar da DTP na avaliação do alcance do patamar de estabilização. Para tal finalidade, os valores obtidos foram dispostos graficamente ao longo do tempo total de floculação, considerando todos os gradientes de velocidade estudados.

4.8.3.3 Determinação da dimensão fractal

A estrutura morfológica dos flocos foi caracterizada utilizando o conceito de dimensão fractal (D_f). Para sua determinação, adotou-se o diâmetro máximo do floco como comprimento característico em virtude de uma sensibilidade considerável em relação ao tamanho do agregado se comparado aos diâmetros médios. Conforme descrito na seção 3.6.1, uma dimensão fractal pode ser descrita pela relação entre a área, uma medida de tamanho característica e a dimensão

fractal de área, conforme a Equação 11. A relação entre a área superficial (A_s) de um floco com seu diâmetro máximo ($d_{m\acute{a}x}$) utilizada neste trabalho se baseia na Equação 19.

$$A_s = k d_{m\acute{a}x}^{D_f} \quad (19)$$

Onde k é uma constante de ajuste e o valor de D_f varia de 1 a 2. Baseando nos trabalhos de Chakraborti, Atkinson e Van Benschoten (2000) e Li et al. (2007), a dimensão fractal pode ser calculada pela análise da regressão do logaritmo da área superficial e o logaritmo do diâmetro máximo. Portanto, através da linearização da Equação 19, obtém-se a Equação 20.

$$\log A_s = \log k + D_f \log d_{m\acute{a}x} \quad (20)$$

A dimensão fractal, calculada globalmente para toda a população de flocos de cada tempo e em cada gradiente de velocidade médio de floculação é representada pelo coeficiente de inclinação da reta que melhor se ajusta à distribuição da nuvem de pontos. Neste trabalho, o cálculo foi repetido para todos os minutos de floculação das dez condições físico-químicas estudadas.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

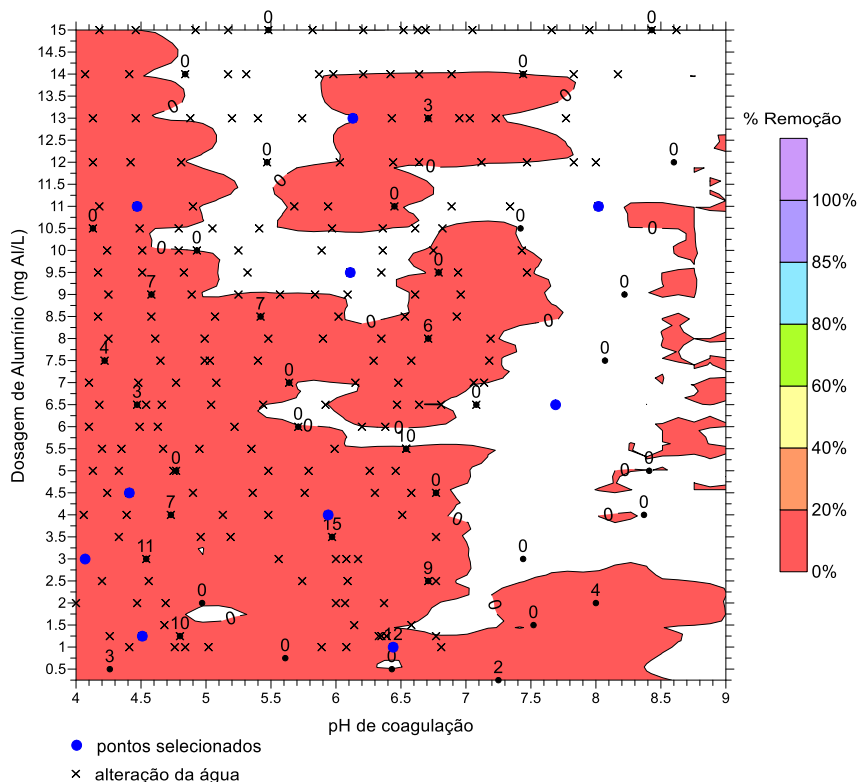
Neste capítulo são apresentados, primeiramente, os resultados referentes à primeira etapa do trabalho, que consistiu na elaboração do diagrama de coagulação, crucial para a seleção dos pontos em distintos pares de valores pH de coagulação e dosagem de coagulante. Posteriormente, são abordados os resultados da segunda etapa da pesquisa, compreendida pelo acompanhamento do processo de floculação, conforme a metodologia descrita na seção 4.6. A avaliação consistiu na determinação e análise da distribuição de tamanho por meio da frequência relativa de flocos em classes de tamanho, na evolução temporal dos diâmetros equivalentes médios, na avaliação do parâmetro β como representativo da DTP e, finalmente, na análise morfológica das partículas por meio da determinação da dimensão fractal para todos os gradientes médios de velocidade na floculação e para cada os 10 pontos selecionados no diagrama de coagulação.

5.1 Diagramas de Coagulação

Nas Figuras 38, 39 e 40 são apresentados, respectivamente, os resultados dos diagramas de coagulação construídos a partir dos resultados de percentuais de remoção de cor aparente para as velocidades de sedimentação de $5,0 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, $2,5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e $1,0 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ em função do par de valores de pH de coagulação e dosagem de alumínio, em $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

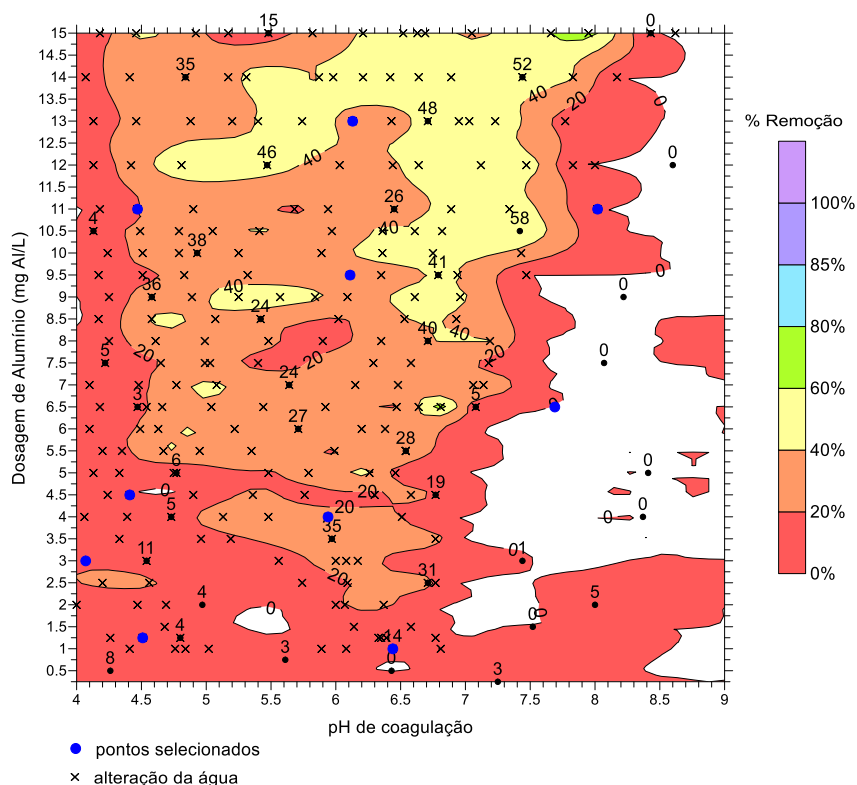
Verifica-se que os flocos formados durante a coagulação e floculação da água de estudo são de difícil sedimentação, visto que o percentual de remoção de cor aparente para as velocidades de sedimentação de $5,0 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ (Figura 38) e $2,5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ (Figura 39) são inferiores a 20% e 60%, respectivamente.

Figura 38 - Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio em termos de percentual de remoção de cor aparente para velocidade de sedimentação de 5,0 cm.min⁻¹



Fonte: Autora (2018)

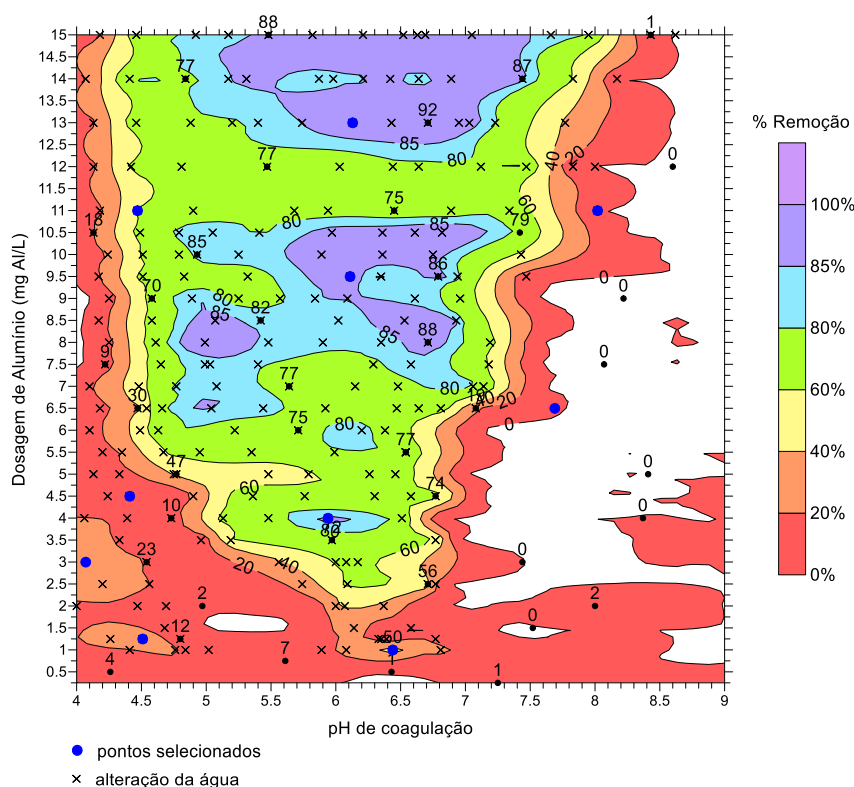
Figura 39 - Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio em termos de percentual de remoção de cor aparente para velocidade de sedimentação de 2,5 cm.min⁻¹



Fonte: Autora (2018)

Por outro lado, o diagrama de coagulação para a taxa de sedimentação de $1,0 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ apresentou regiões com melhores desempenhos, com percentuais de remoção superiores a 85%, conforme a Figura 40. Apesar do desempenho de remoção de cor constituir em uma região ampla, o ponto ótimo pode ser definido para um valor de pH igual a 6,0 e dosagem de coagulante de $4,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, visto que necessita de uma dosagem de alumínio inferior às demais regiões.

Figura 40 - Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio em termos de percentual de remoção de cor aparente para velocidade de sedimentação de $1,0 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$



Fonte: Autora (2018)

À medida que aumenta a dosagem de alumínio, observa-se que a eficiência de floculação ocorre em uma faixa mais ampla de pH. As condições químicas das principais regiões da curva com valores percentuais de remoção de cor aparente em 80%, observadas na Figura 40, situam-se nos seguintes intervalos de valores: pH entre 4,75 e 7,25 e dosagens de alumínio de $6,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a $11,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$; e na faixa de pH entre 4,75 e 7,75 e dosagens de alumínio de $12,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a $15,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, havendo tendência de continuidade da região sob concentrações de coagulante superiores à esta. Nestas regiões, o mecanismo de coagulação atuante é, possivelmente, o de varredura, em virtude da observação de grandes flocos formados durante a execução dos ensaios. Geralmente, este mecanismo é dominante em faixas de pH mais básicos e dosagens mais elevadas de coagulante, responsável pela formação de precipitados de alumínio, apresentando

densidade suficiente para permitir a sedimentação em decantadores, sendo, portanto, o mecanismo utilizado em tecnologias convencionais no tratamento de água, que inclui as etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração, conforme já explicitado anteriormente (DI BERNARDO, 2008).

Um segundo mecanismo de coagulação importante neste estudo é a adsorção e neutralização de cargas, que prevalece sob condições de pH mais ácidos e dosagens de coagulante mais baixas (EDWARDS; AMIRTHARAJAH, 1985). Provavelmente, este foi o mecanismo atuante na redução de cor em duas regiões próximas, apresentando limite superior: uma com pH na faixa de 4,0 a 4,75 e dosagem de alumínio de 1,0 a 1,5 mg.l⁻¹ e a segunda com pH entre 4,0 e 4,5 e dosagens de 2,0 a 4,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺.

Apesar da elaboração de curvas de mesmo percentual de remoção de cor aparente, foram observadas situações de pequenas alterações na massa de água sem que, obrigatoriamente, resultassem em boas eficiências de remoção. Nos diagramas de coagulação construídos para as três velocidades de sedimentação, foram apontadas estas perturbações. Esta informação encontra-se também no Apêndice A, com observações detalhadas para todas as análises. É nestas situações em que o presente estudo se fundamenta. Em outras palavras, as análises posteriores têm como finalidade a avaliação da hipótese básica de que a taxa de sedimentação dos flocos esteja relacionada com as características morfológicas, bem como a distribuição de tamanho das partículas, através da aquisição, tratamento e análise das imagens dos flocos.

Dessa forma, para a análise dos parâmetros durante a floculação, foram selecionados 10 pontos cujas condições químicas resultaram em alterações na qualidade da água, conforme destacados nas Figuras 38 a 40, sendo um correspondente ao ponto de dosagem ótima (pH de coagulação de 5,94 e dosagem de alumínio de 4,0 mg.l⁻¹), e os demais em diferentes regiões do diagrama de coagulação, possibilitando a verificação de tais condições na análise de DTP e diâmetro fractal dos agregados, bem como a análise comparativa dos resultados e interferência da configuração química nas características das partículas. São listadas na Tabela 8, as informações de tais pontos quanto ao pH de coagulação, dosagem de coagulante e percentual de remoção de cor aparente nas 3 velocidades de sedimentação.

Os três primeiros pontos (Tabela 8), foram selecionados em uma faixa de pH aproximada (cerca de 6,0), entretanto, com diferentes dosagens de coagulante, objetivando assim, a investigação das características morfológicas e propriedades dos flocos que justificam um percentual de remoção próximo, mesmo sob concentrações maiores de coagulante. Da mesma forma, foram

selecionados pontos em pH mais ácido e mais básico, visando analisar também o efeito deste parâmetro sobre a eficiência de coagulação e floculação de águas com cor elevada, bem como as características morfológicas dos flocos e distribuição de tamanho de partículas (DTP).

Tabela 8 - Pontos do diagrama de coagulação selecionados para avaliação da DTP e características morfológicas dos flocos

Ponto	pH de coagulação	Sulfato de Alumínio (mg.l ⁻¹)	Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)	Remoção (%)		
				$V_{s1} = 5,0$ cm.min ⁻¹	$V_{s2} = 2,0$ cm.min ⁻¹	$V_{s3} = 1,0$ cm.min ⁻¹
1	6,11	221,86	9,5	0	27	89
2*	5,94	93,42	4,0	14	24	87
3	6,13	303,60	13,0	0	31	91
4	7,69	151,80	6,5	0	20	70
5	8,02	256,89	11,0	0	0	0
6	4,47	256,89	11,0	3	21	64
7	6,44	23,35	1,0	12	14	50
8	4,51	29,19	1,25	14	11	30
9	4,41	105,09	4,5	0	0	6,9
10	4,07	70,06	3,0	14	19	23

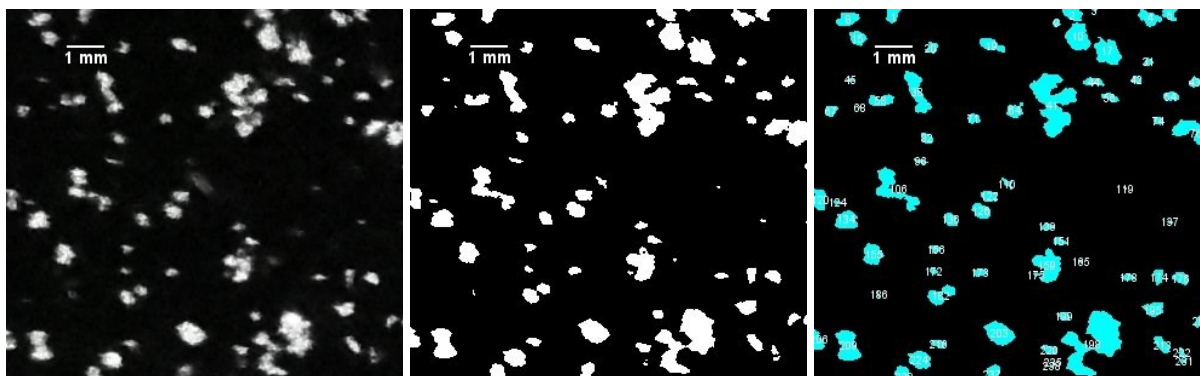
* Condição ótima

Fonte: Autora (2018)

5.2 Aquisição e tratamento das imagens digitais

É exemplificado na Figura 41(a), uma imagem dos flocos adquirida em 24 bits, antes do tratamento. É possível observar que o *laser* destaca os flocos contidos no plano luminoso. Quaisquer diferenças no brilho e borda das partículas são corrigidas através do processamento digital das imagens pelo *ImageJ* 1.51, definindo um limiar de binarização de modo a destacar apenas as partículas que se encontram no referido plano de luz, conforme exemplo de matriz binarizada ilustrado na Figura 41(b). Realizado o tratamento do conjunto de imagens adquiridas em cada condição de floculação, foi efetuada a etapa de identificação dos objetos, bem como a contagem e medição dos parâmetros para caracterização das partículas, conforme já descrito na seção 4.8.2. A Figura 41(c) ilustra a detecção e identificação das partículas pelo programa.

Figura 41 - a) imagem dos flocos em 24 bits; b) matriz binarizada; c) matriz em processo de contagem e medição pelo programa computacional *ImageJ* 1.51



Fonte: Autora (2018)

5.3 Avaliação de características dos flocos

5.3.1 Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP)

A Tabela 9 exemplifica o ordenamento das 15 faixas de tamanho das partículas em função do diâmetro equivalente de Feret (d_F), em milímetros, permitindo a análise da distribuição das partículas em cada uma das frações, bem como a obtenção da quantidade total de partículas (OLIVEIRA et al., 2015b). Ressalta-se que para a inclusão de todas as partículas identificadas na análise, a determinação de tais faixas foi realizada com base no limite inferior mínimo e no limite superior máximo da população amostral como um todo, considerando todos os tempos de floculação de um determinado gradiente de velocidade médio. Portanto, os limites mostrados na Tabela 9 são de cunho ilustrativo, visto que a amplitude de classe variou para cada taxa de cisalhamento e em cada um dos pontos estudados.

Tabela 9 - Distribuição das faixas de tamanho das partículas formadas nas condições químicas referentes ao Ponto 1 do diagrama de coagulação, sob G_f de 20 s^{-1}

(continua)

Classe	Limite inferior (mm)	Limite superior (mm)
1	0,0357	0,1316
2	0,1316	0,2275
3	0,2275	0,3234
4	0,3234	0,4193
5	0,4193	0,5152
6	0,5152	0,6111
7	0,6111	0,7071

Tabela 9 - Distribuição das faixas de tamanho das partículas formadas nas condições químicas referentes ao Ponto 1 do diagrama de coagulação, sob G_f de 20 s^{-1}

(conclusão)		
Classe	Limite inferior (mm)	Limite superior (mm)
8	0,7071	0,8030
9	0,8030	0,8989
10	0,8989	0,9948
11	0,9948	1,0907
12	1,0907	1,1866
13	1,1866	1,2825
14	1,2825	1,3785
15	1,3785	1,4744

Fonte: Autora (2018)

As Figuras 42 a 51 mostram a evolução da DTP ao longo do tempo de floculação em função da proporção de flocos presentes em cada uma das classes de tamanho para cada gradiente de velocidade médio e para todas as condições químicas de coagulação analisadas. Apenas as 8 primeiras faixas de tamanho foram apresentadas nas figuras, visto que a frequência relativa a partir da Classe 9 foi consideravelmente baixa.

Nos primeiros minutos de floculação da primeira taxa de cisalhamento ($G_f = 20 \text{ s}^{-1}$) avaliada para a condição do Ponto 1 (Figura 42), cujo par pH de coagulação x dosagem de alumínio foi de 6,11 e $9,5 \text{ mg.l}^{-1}$, apesar da quantidade de flocos ser maior para a Classe 3 (0,23 mm a 0,32 mm), é possível observar que houve também formação de flocos relativamente maiores nos primeiros minutos de floculação (a partir da Classe 5) e que, no decorrer do tempo, a proporção destes são reduzidos, provavelmente devido à ruptura, distribuindo-se para faixas de tamanho menores, indicado pelo aumento da frequência de partículas distribuídas nas Classes 2 e 3, ou seja, com diâmetro equivalente de até 0,32 mm. Após este momento, a DTP apresentou apenas pequenas variações, indicando o alcance do equilíbrio do crescimento e ruptura dos flocos e a ocorrência do patamar de estabilização.

A DTP para o Ponto 3 (Figura 44) foi semelhante à do Ponto 1 (Figura 42), visto que apresenta praticamente o mesmo pH de coagulação, diferindo somente na dosagem de alumínio, igual a $13,0 \text{ mg.l}^{-1}$. Apesar da dosagem de coagulante ser maior neste caso, os agregados estão distribuídos em maiores quantidades para as Classes 2 e 3, compreendidas entre 0,13 e 0,33 mm, sugerindo-se que tal aumento na dosagem não interfere na DTP para o gradiente de

floculação G_f de 20 s^{-1} . Além disso, é provável que ambos os pontos compreendem a região de mecanismo de varredura, conforme o diagrama de coagulação mostrado na Figura 40.

O Ponto 2 (Figura 43), cujas condições de coagulação consistiram em pH igual a 5,94 e dosagem de coagulante de $4,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} , são comparáveis às distribuições de tamanhos dos agregados formados nas condições dos Pontos 1 e 3, pelo fato de ser efetuado em faixas de pH próximas. Nota-se que nos minutos iniciais, sobretudo em 1 min e 2 min de flocculação, a distribuição de partículas foi mais frequente principalmente nas duas primeiras faixas de tamanho (diâmetro de até 0,18 mm). Este mesmo comportamento foi observado na condição do Ponto 7, em que a coagulação da água foi realizada em pH de 6,44 e $1,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} , sugerindo portanto, que o processo de agregação das partículas em torna-se mais lento à medida que diminui a dosagem de alumínio. Apesar da maior demanda no tempo de flocculação, o estágio estacionário foi estabelecido em aproximadamente 10 min em ambos os pontos, sendo que a maior quantidade de flocos do Ponto 2 foi entre 0,18 mm e 0,40 mm, compreendendo as classes 3 a 5, enquanto que o Ponto 7 apresentou maior frequência nas classes 4 e 5, contendo flocos com diâmetro entre 0,18 mm e 0,28 mm, e, portanto, estão conforme o esperado, já que a aplicação e dosagens mais baixas tendem a acarretar em flocos de tamanho menores.

Em condições de pH de coagulação mais básicos, a agregação de partículas também ocorre nos minutos iniciais de flocculação, observado pelos resultados oriundos das condições do Ponto 4 (pH de coagulação de 7,69 e $6,5 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} , conforme a Figura 45) e Ponto 5 (pH de coagulação de 8,02 e $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} , conforme a Figura 46). Enquanto que para o gradiente de velocidade de 20 s^{-1} , as partículas formadas na condição do Ponto 4 apresentou frequências relativas distribuídas com percentual próximo ao longo das 6 primeiras faixas de tamanho, abrangendo flocos com diâmetro equivalente de até 0,54 mm e atingindo o estágio estacionário em cerca de 15 min de flocculação, as partículas do Ponto 5 estão distribuídas em maior quantidade para as primeiras 5 faixas de tamanho, compreendendo flocos com até 0,48 mm, atingindo o equilíbrio entre agregação e ruptura em aproximadamente 20 min de flocculação.

Por fim, os resultados da DTP nas regiões do diagrama com pH de coagulação mais ácido, isto é, referente aos Pontos 6 (Figura 47), 8 (Figura 49), 9 (Figura 50) e 10 (Figura 51), mostraram que aos minutos iniciais de flocculação para a taxa cisalhante $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, houve predominância de partículas de pequenos diâmetros, distribuídas nas primeiras duas faixas de tamanho. Além disso, quando comparado com a flocculação de regiões com maiores pH de coagulação, o

crescimento dos flocos ocorre de maneira gradual, demandando maior tempo de mistura lenta para a obtenção de partículas distribuídas em classes de maiores diâmetros.

A análise das partículas capturadas para o Ponto 6 (pH de coagulação de 4,47 e coagulante com dosagem de $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}), por exemplo, indicou que durante os 3 min iniciais, as partículas estavam distribuídas majoritariamente nas Classes 1 e 2 (até 0,17 mm) e na Classe 3 em menor quantidade (de 0,17 mm a 0,24 mm). A partir de então, houve agregação das mesmas, indicada pelo aumento do diâmetro dos agregados a partir de 5 min. Posteriormente, notou-se uma distribuição semelhante em todas as faixas de tamanho, inclusive nas de maior diâmetro em $T_f = 10$ min, entretanto, a frequência de flocos nas maiores faixas foi reduzida em virtude de sua quebra, aumentando conseqüentemente a quantidade de flocos nas classes de tamanho intermediárias, conforme mostrado na Figura 47. Por outro lado, a floculação na condição do Ponto 5 (Figura 46), também realizada com dosagem de $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} , mas com pH de 8,02, apresentou distribuição de partículas de maiores classes de tamanho nos primeiros minutos.

Visto que a avaliação da floculação dos Pontos 6, 8 e 9 foi na mesma faixa de pH de coagulação (4,47, 4,51 e 4,41, respectivamente), é possível verificar a influência da dosagem de coagulante na DTP. No Ponto 8 (Figura 49), cuja dosagem aplicada foi igual a $1,25 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} , verificou-se a predominância de partículas com diâmetro de até 0,16 mm durante os 10 min iniciais de mistura lenta com $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, distribuídas nas primeiras três classes de tamanho. Após este momento, ocorreu a agregação destas, indicada pelo aumento da frequência relativa em faixas de maiores diâmetros, seguida pelo equilíbrio entre o crescimento e ruptura dos flocos em aproximadamente 30 min. Por outro lado, a maior abundância de partículas com menores diâmetros para a condição de dosagem de $4,5 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} , referente ao Ponto 9 (Figura 50), foi observada somente durante os 5 min iniciais. A partir de 8 min de floculação, houve redução da frequência destas partículas menores em virtude da agregação, seguida pelo alcance do estágio estacionário por volta de 15 min de floculação. Finalmente, a floculação realizada com dosagem de $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} , referente ao Ponto 6 (Figura 47), favoreceu a formação de flocos de maior diâmetro a partir de $T_f = 5$ min, atingindo o equilíbrio em cerca de 20 min.

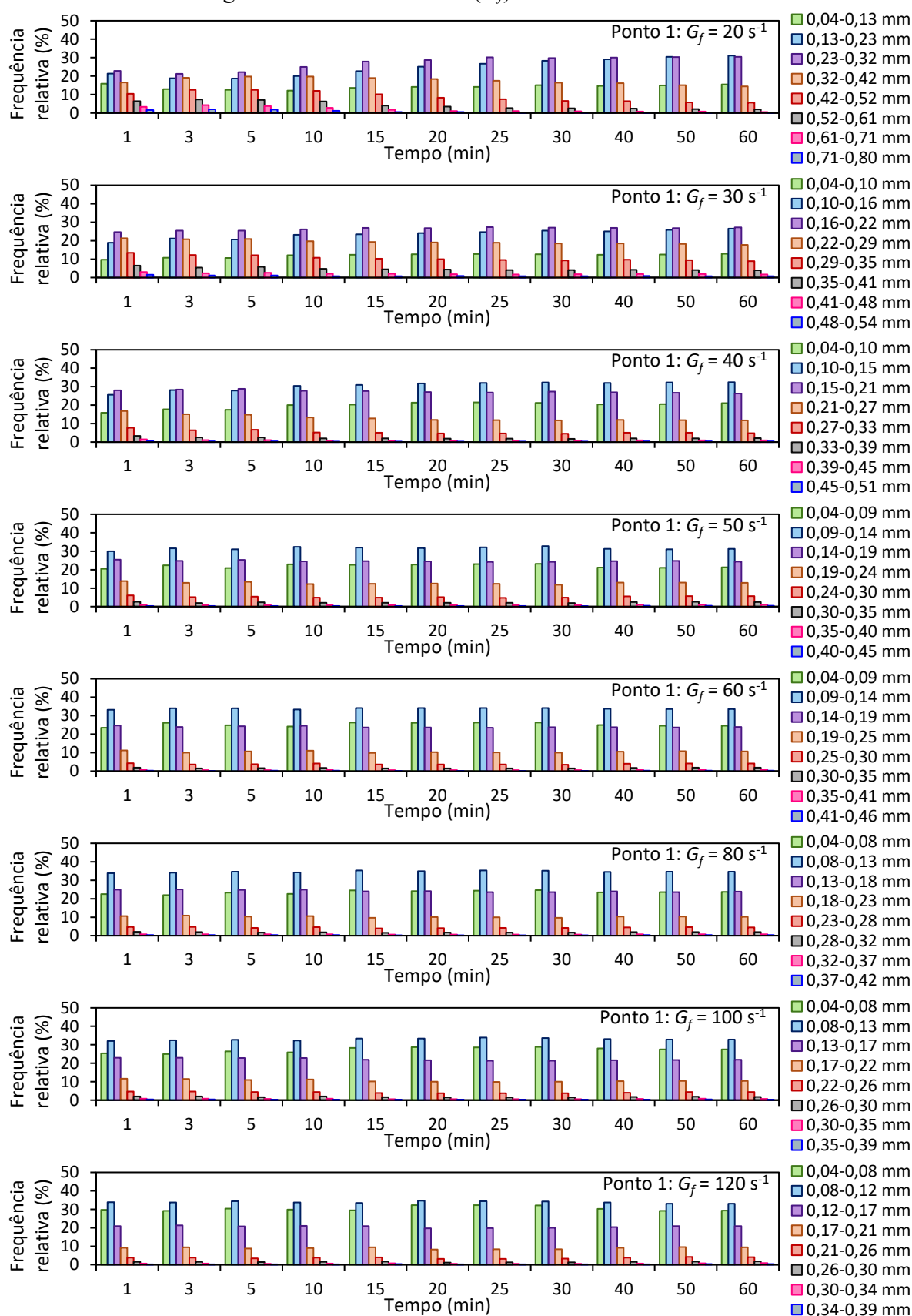
Deste modo, conclui-se que sob pH de coagulação mais ácido, a aplicação de maiores dosagens de alumínio acarreta na formação de flocos maiores em um menor tempo de floculação. Além disso, o equilíbrio entre o crescimento e ruptura é alcançado mais rapidamente.

Para os demais gradientes de velocidade, observa-se que DTP ao longo do tempo não sofre alterações significativas quando comparadas com as alterações no G_f de 20 s^{-1} , visto que se trata de um ensaio em jarro único. Em outras palavras, as partículas obtidas nas taxas de cisalhamento superiores a 30 s^{-1} já foram coaguladas e floculadas por gradientes inferiores até o patamar de estabilização ser estabelecido, dado pelo $T_f = 60 \text{ min}$. Existem modificações observadas nos histogramas devido ao aumento gradual da intensidade de mistura, que promove a ruptura dos flocos, entretanto, o patamar de estabilização é alcançado mais rapidamente para todas as regiões do diagrama de coagulação abordadas neste estudo.

Em todos os pontos, a frequência relativa foi maior nas primeiras faixas de tamanho sob maiores energias de floculação, ou seja, quanto maior o gradiente de velocidade, maior o grau de achatamento do histograma da DTP. Isto ocorre em virtude da ruptura dos agregados ser mais significativa com o aumento da energia imposta no sistema.

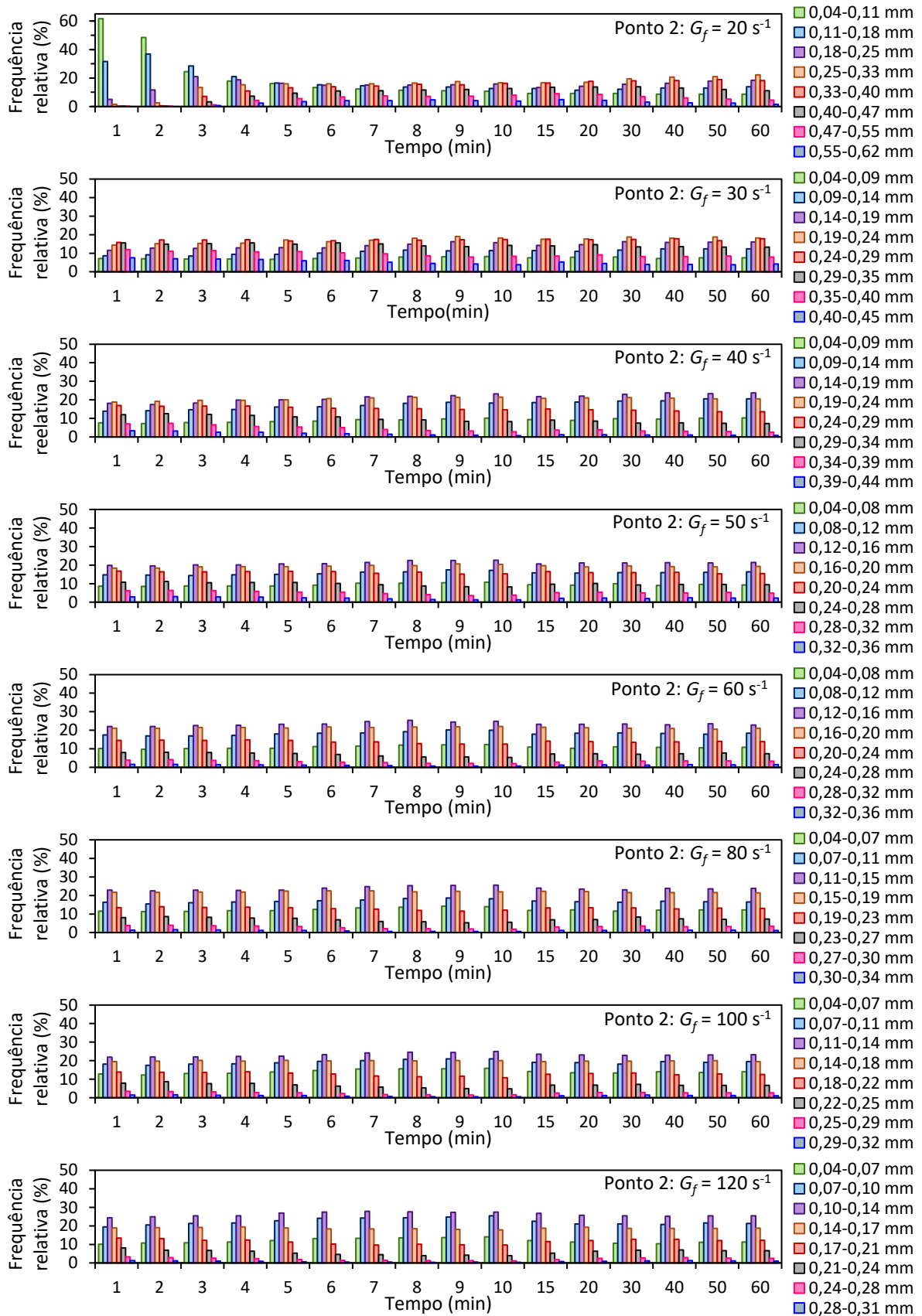
Spicer e Prantsinis (1995) estudaram a evolução da estrutura e distribuição de tamanho de agregados durante a floculação utilizando sulfato de alumínio e obtiveram resultados coerentes com os encontrados neste trabalho, concluindo que o aumento da taxa de cisalhamento reduz a largura da curva de DTP, além de reduzir o tamanho do floco e limitar o crescimento, transferindo toda a distribuição de tamanho em partículas menores. Ademais, os autores concluíram que o patamar de estabilização é alcançado de forma mais rápida para maiores gradientes de velocidade.

Figura 42 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 1 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,11 e 9,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s⁻¹ a 120 s⁻¹



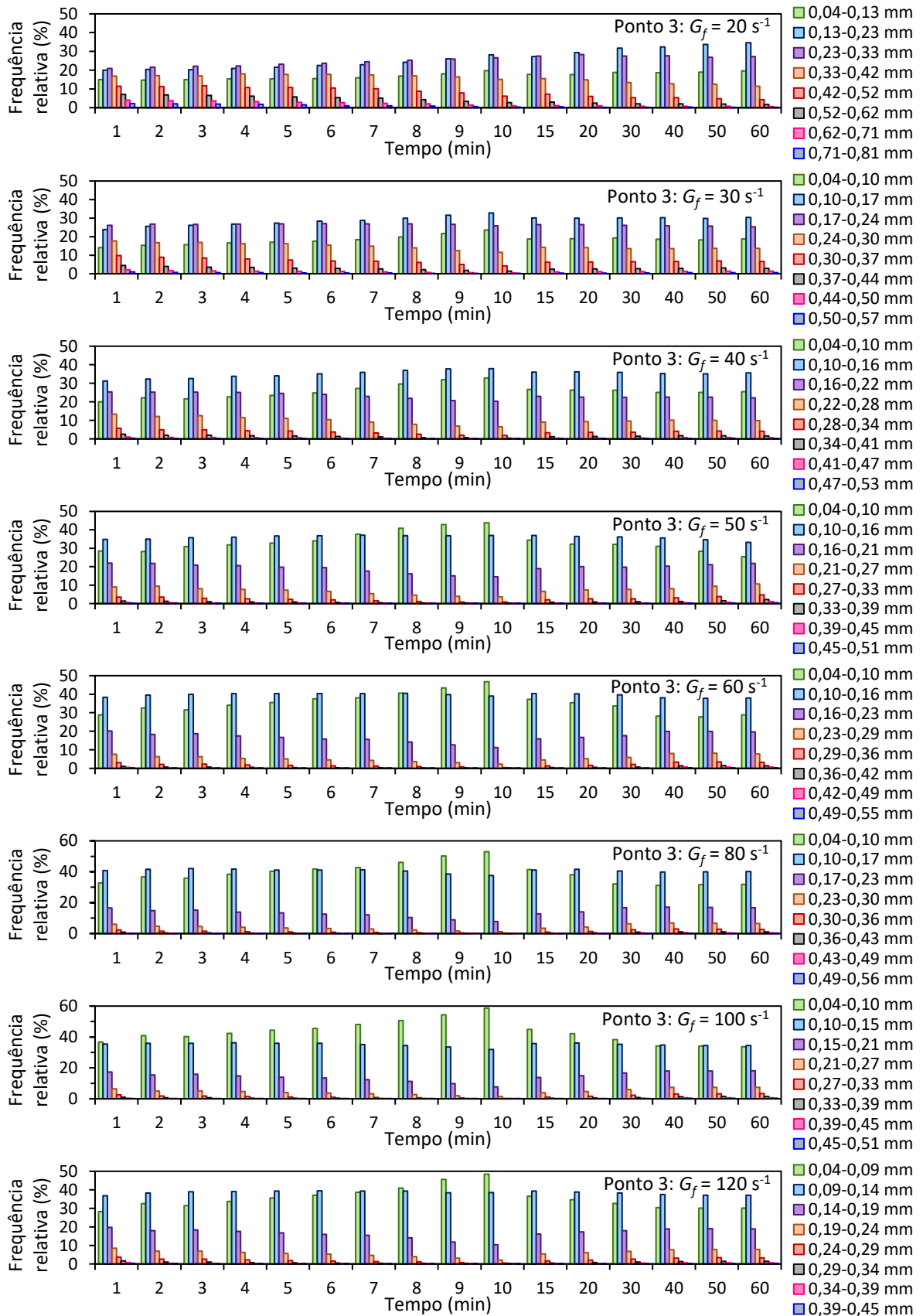
Fonte: Autora (2018)

Figura 43 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 2 do Diagrama de Coagulação (pH de 5,14 e 4,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s⁻¹ a 120 s⁻¹



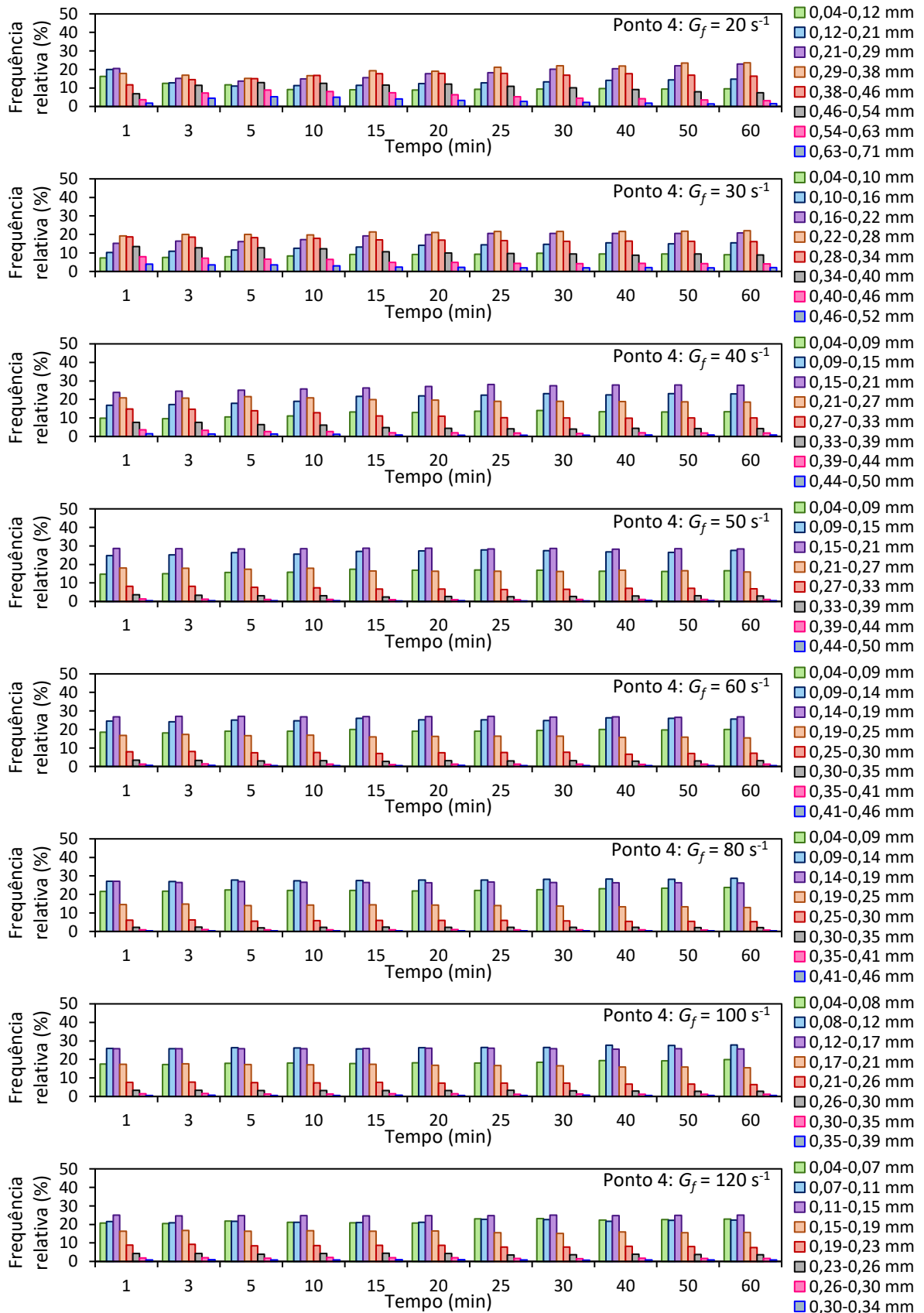
Fonte: Autora (2018)

Figura 44 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 3 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,13 e 13,0 mg.l⁻¹ Al³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s⁻¹ a 120 s⁻¹



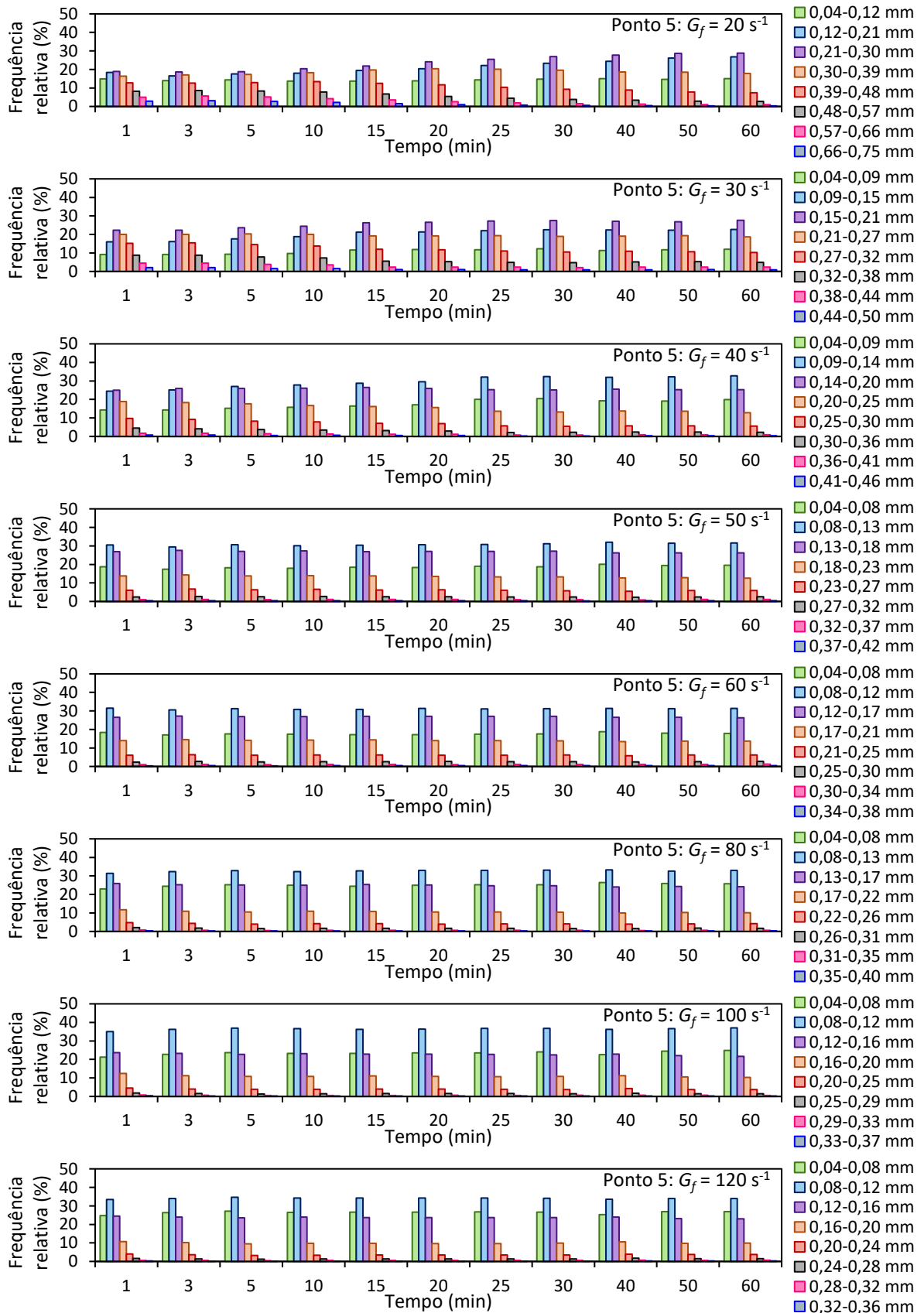
Fonte: Autora (2018)

Figura 45 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 4 do Diagrama de Coagulação (pH de 7,69 e 6,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s⁻¹ a 120 s⁻¹



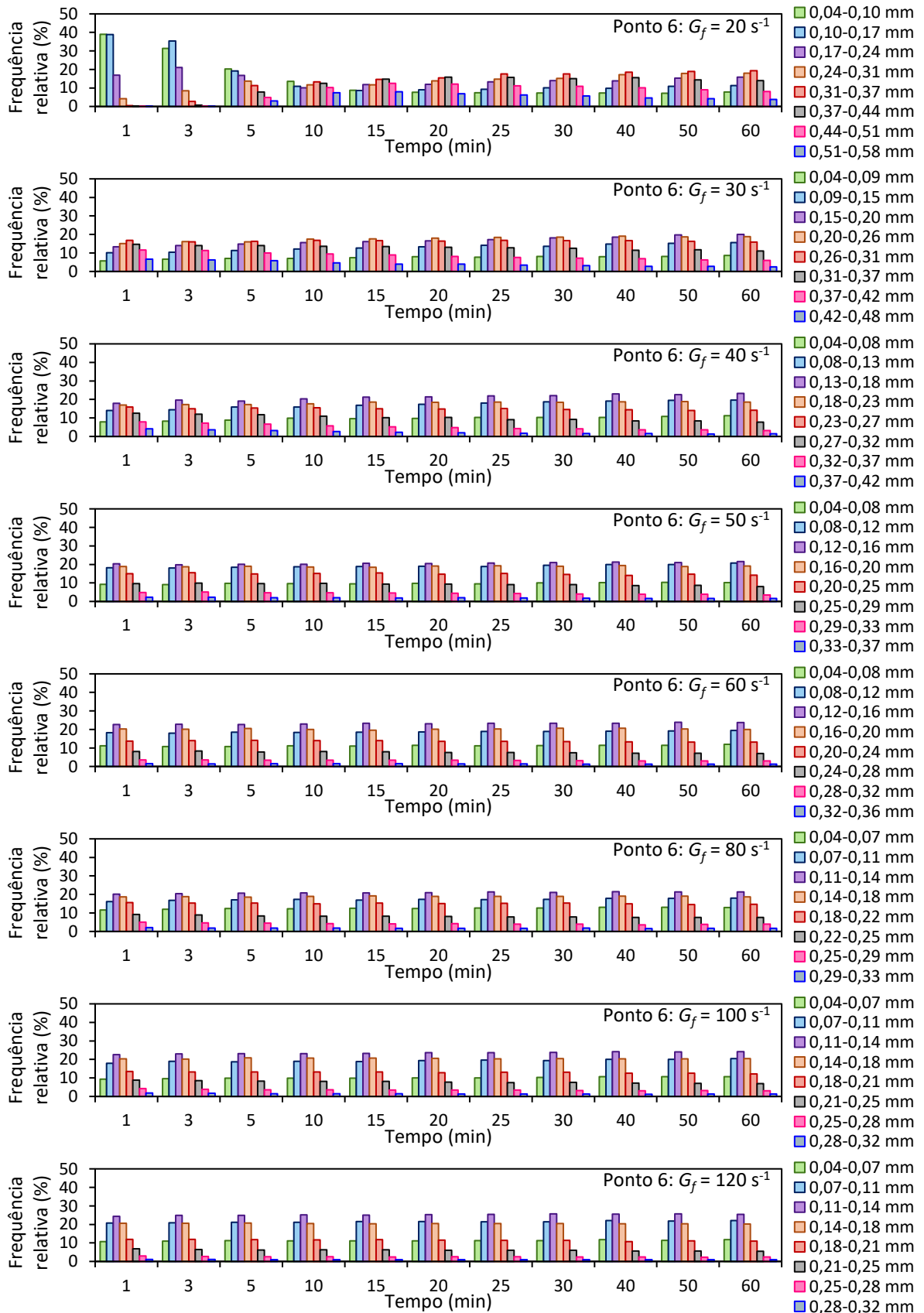
Fonte: Autora (2018)

Figura 46 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 5 do Diagrama de Coagulação (pH de 8,02 e 11,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s⁻¹ a 120 s⁻¹



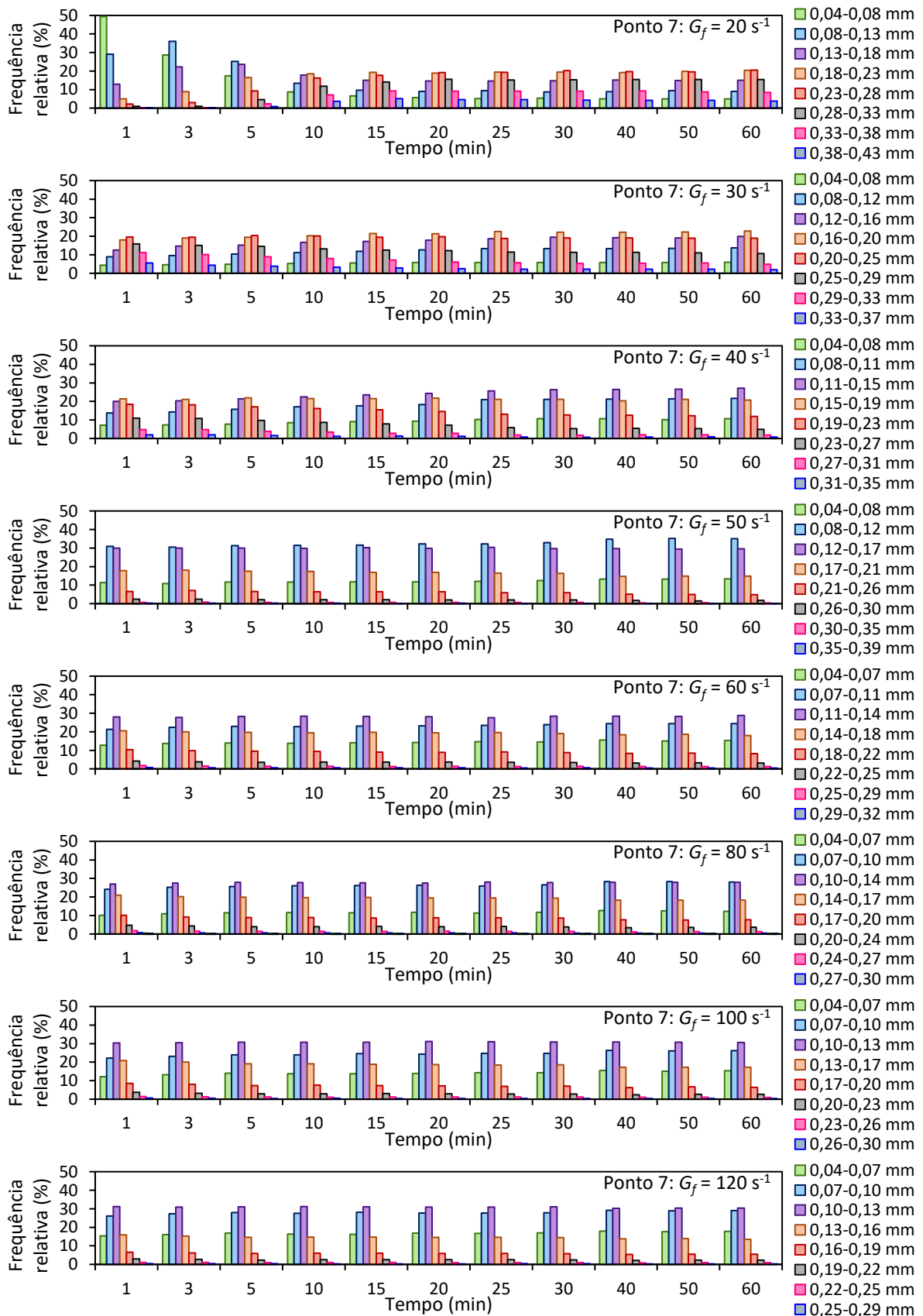
Fonte: Autora (2018)

Figura 47 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 6 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,47 e 11,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s⁻¹ a 120 s⁻¹



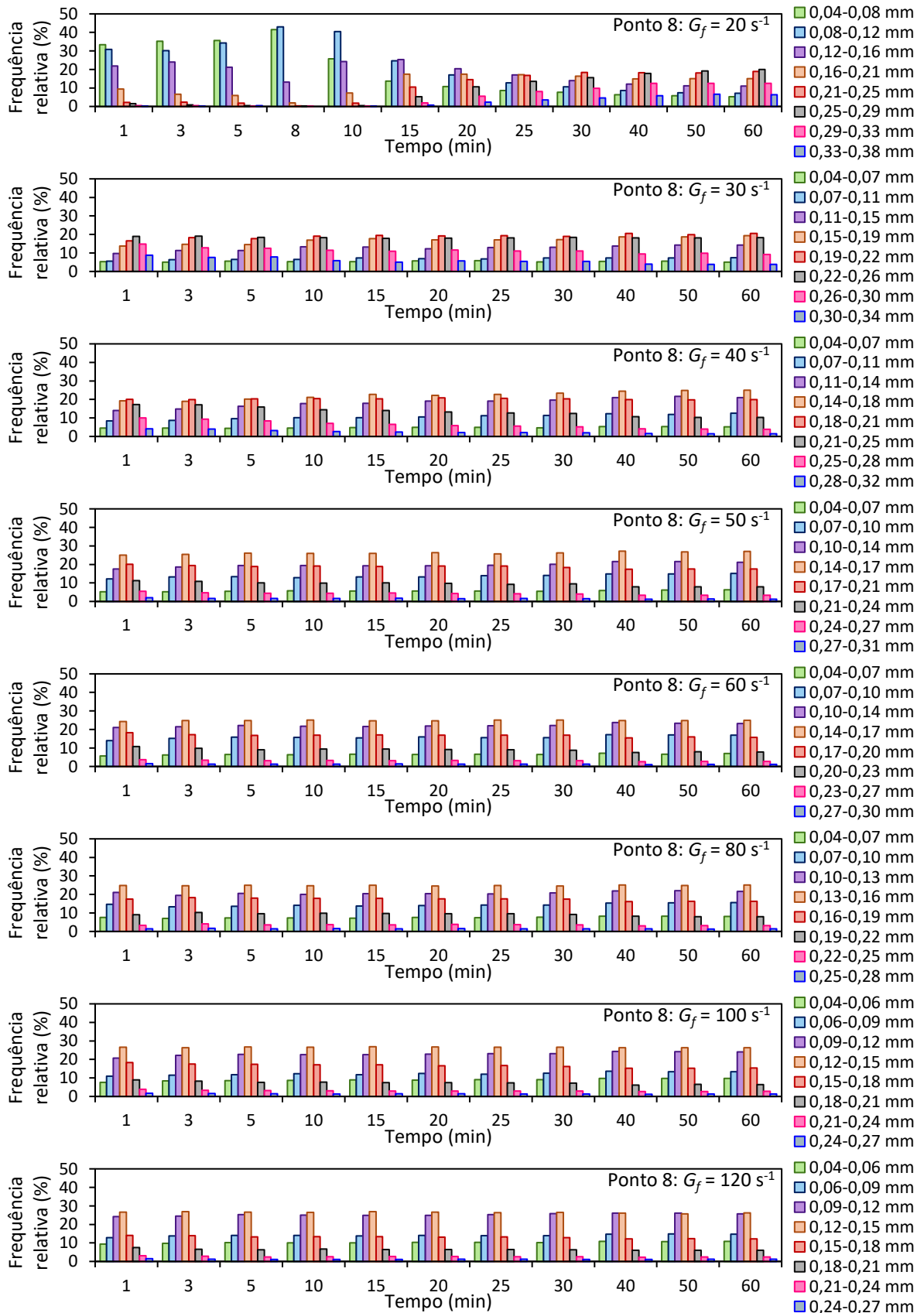
Fonte: Autora (2018)

Figura 48 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 7 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,44 e $1,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s^{-1} a 120 s^{-1}



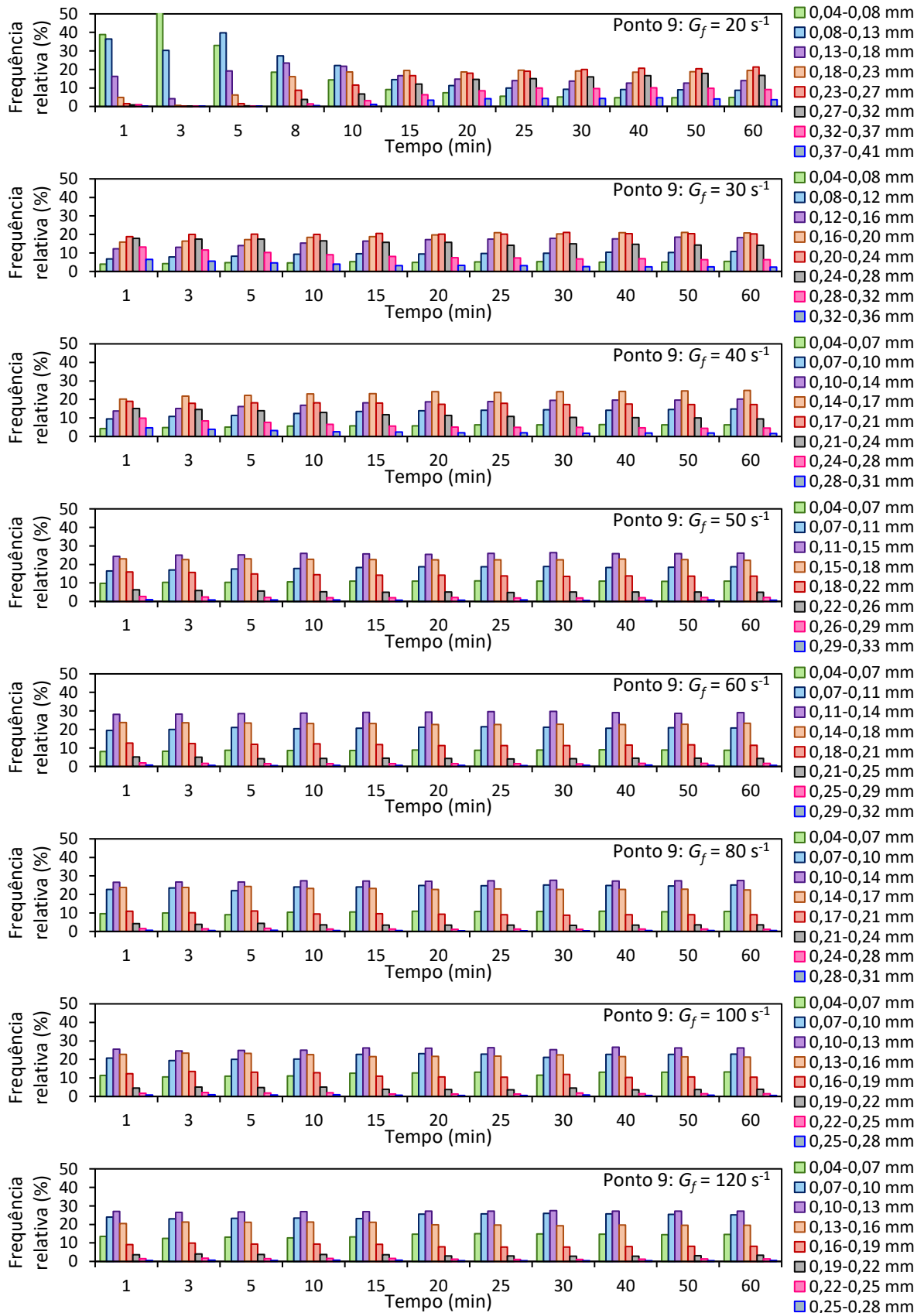
Fonte: Autora (2018)

Figura 49 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 8 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,51 e $1,25 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s^{-1} a 120 s^{-1}



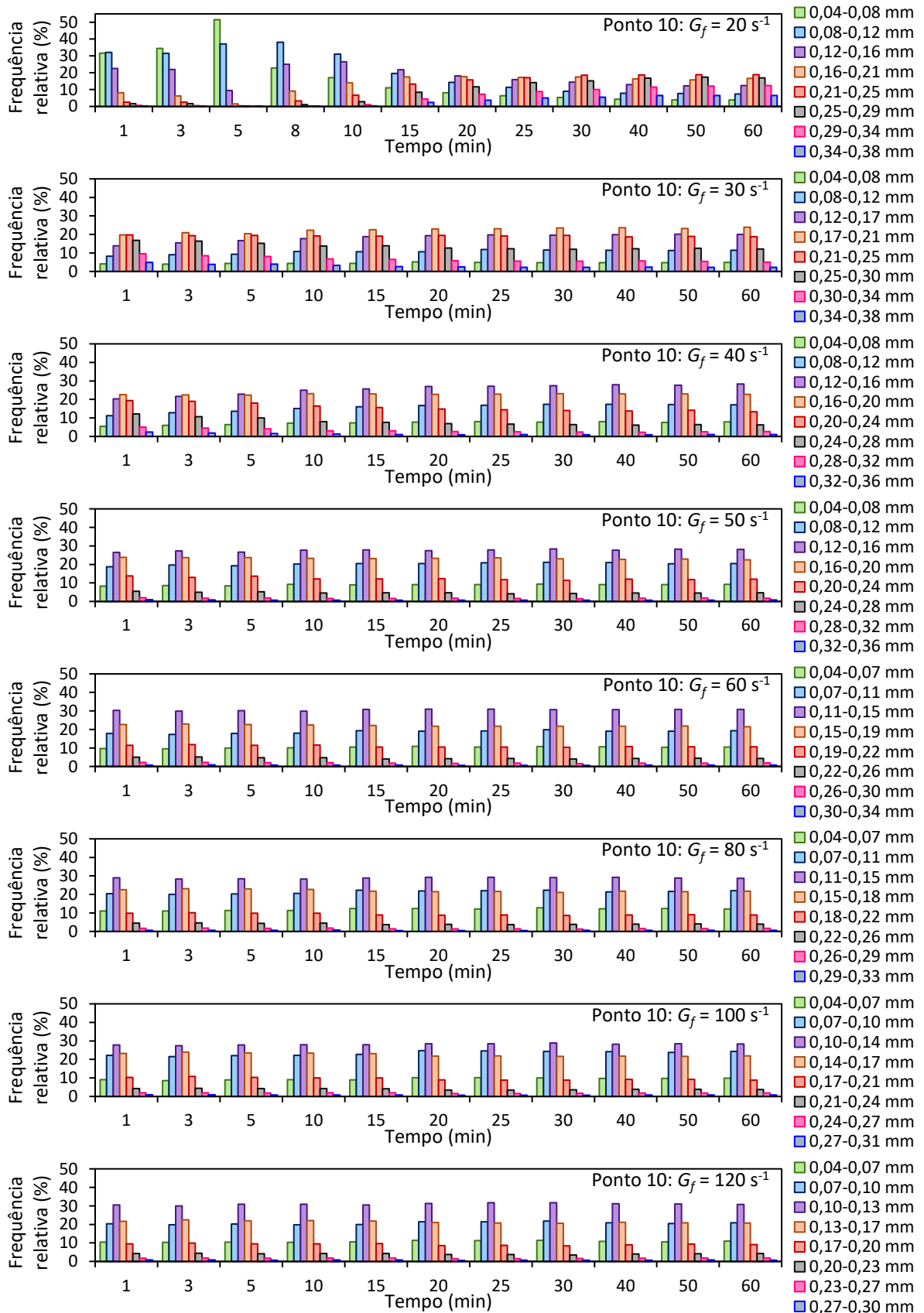
Fonte: Autora (2018)

Figura 50 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 9 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,41 e 4,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s⁻¹ a 120 s⁻¹



Fonte: Autora (2018)

Figura 51 - Evolução da DTP ao longo do tempo de floculação (T_f), dividida em faixas de tamanho para o Ponto 10 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,07 e 3,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺), com gradientes de velocidade (G_f) de 20 s⁻¹ a 120 s⁻¹

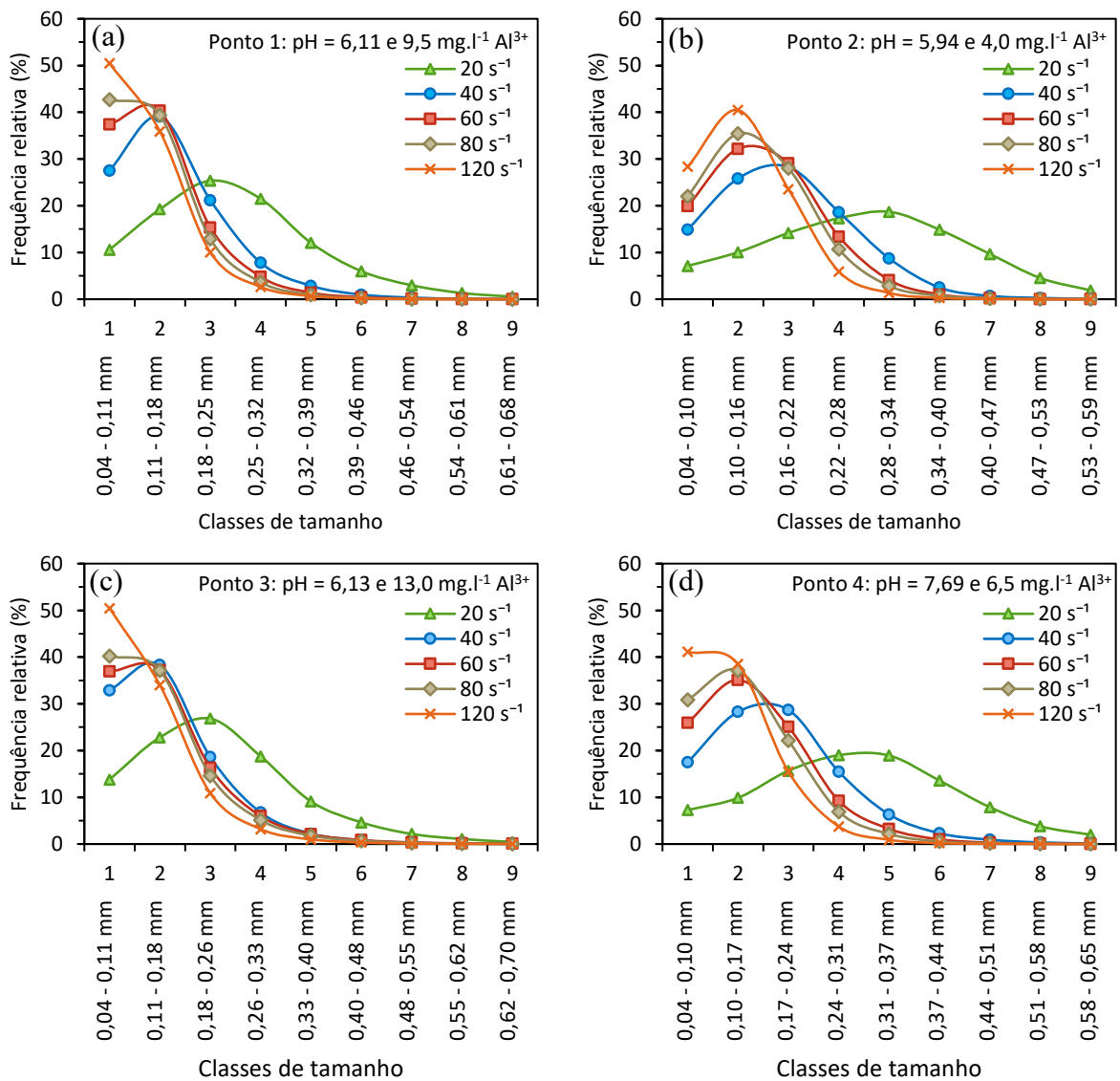


Fonte: Autora (2018)

As Figuras 52 e 53 apresentam a distribuição do tamanho dos agregados das 9 primeiras classes de tamanho para todos os gradientes de velocidade de todos os pontos avaliados.

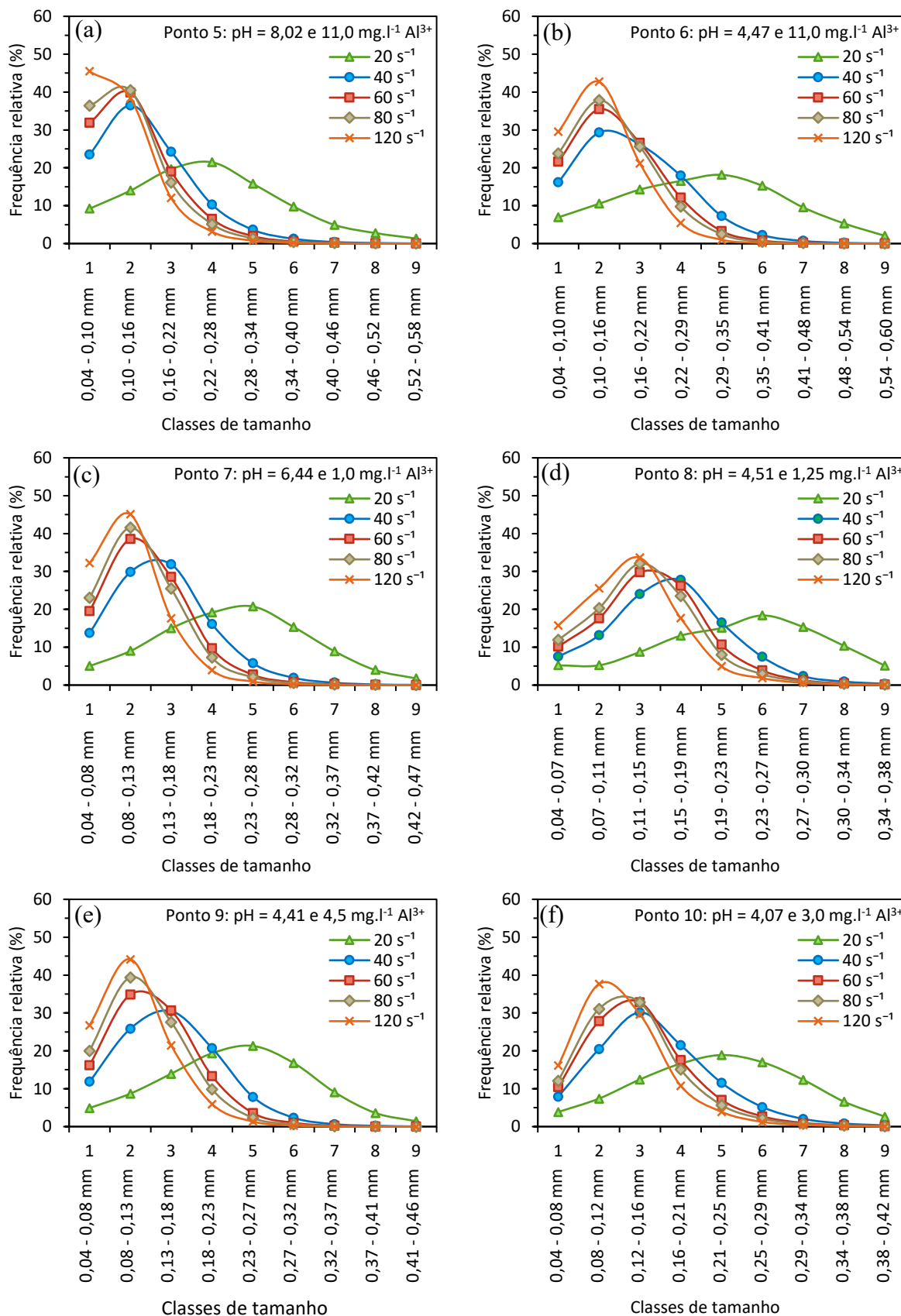
À medida que aumenta a taxa de cisalhamento, há redução da frequência relativa de partículas em faixas de maiores diâmetros dada pelo estreitamento da curva de DTP. Em outras palavras, ocorre a ruptura dos agregados pelo aumento da turbulência no sistema, aumentando o número de partículas nas menores faixas de tamanho.

Figura 52 - DTP para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, 40 s^{-1} , 60 s^{-1} , 80 s^{-1} e 120 s^{-1} , com $T_f = 60 \text{ min}$, nas seguintes condições: Ponto 1 (a), Ponto 2 (b), Ponto 3 (c), e Ponto 4 (d)



Fonte: Autora (2018)

Figura 53 - DTP para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, 40 s^{-1} , 60 s^{-1} , 80 s^{-1} e 120 s^{-1} , com $T_f = 60 \text{ min}$, nas seguintes condições: Ponto 5 (a), Ponto 6 (b), Ponto 7 (c), Ponto 8 (d), Ponto 9 (e) e Ponto 10 (f)



Fonte: Autora (2018)

Observa-se que o aumento da força hidrodinâmica acarreta em uma distribuição mais homogênea do tamanho dos flocos. Sob menores taxas de cisalhamento na floculação, a altura do pico é reduzida, resultante da formação de agregados consideravelmente grandes, mas também agregados de menores diâmetros. Em outras palavras, existe maior variabilidade do tamanho dos flocos formados nestas condições. No gradiente de velocidade médio $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ na condição do Ponto 1, por exemplo, houve a maior variabilidade no tamanho de flocos formados (cerca de 0,04 mm até 0,54 mm), quando comparado com os demais valores de G_f .

Por outro lado, sob maiores intensidades de mistura, a distribuição do tamanho dos agregados é mais estreita (redução das faixas de tamanho), abrangendo as menores classes. Para exemplificar, a faixa diâmetro dos agregados foi de 0,04 mm a aproximadamente 0,32 mm, em um $G_f = 120 \text{ s}^{-1}$ na condição do Ponto 1. Além disso, a DTP torna-se praticamente idêntica às taxas de cisalhamento superiores a 60 s^{-1} em todas as condições químicas de coagulação. Os resultados encontrados neste trabalho estão coerentes com outros autores, como Sun et al. (2011) e Bubakova, Pivokonsky e Filip (2013).

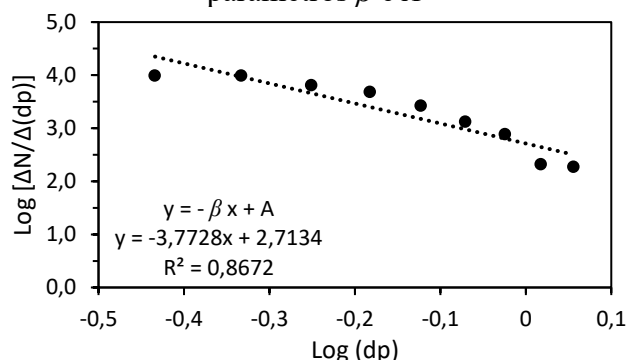
5.3.2 Evolução do diâmetro equivalente médio e parâmetro característico da função de distribuição de tamanho (β)

Nesta seção são abordados os resultados da evolução temporal dos diâmetros equivalentes de Feret médios dos flocos, em todas as taxas de cisalhamento e em todas as condições químicas de coagulação, além da evolução do parâmetro representativo da forma de distribuição do tamanho das partículas (β), utilizado neste estudo como um parâmetro auxiliar na análise da DTP e no alcance do estágio estacionário.

A Figura 54 exemplifica o ajuste linear para a Equação 13, em que o expoente da equação corresponde ao parâmetro β , representativo da distribuição de partículas por faixa de tamanho, conforme explicado anteriormente.

Para a construção da linha de tendência, verificou-se que nas situações onde uma faixa de tamanho possui frequência de flocos maior que a faixa anterior, ΔN assume valor negativo, incapacitando a obtenção de um valor real para a expressão $\log \left[\frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \right]$. Deste modo, havendo a necessidade de eliminar a influência deste erro na determinação do parâmetro β , optou-se por desconsiderar as faixas em que ocorre aumento da frequência dos flocos e considerar a partir das classes que possuem comportamento decrescente de frequência de partículas.

Figura 54 - Exemplo de função contínua linearizada que permite a determinação dos parâmetros β e A

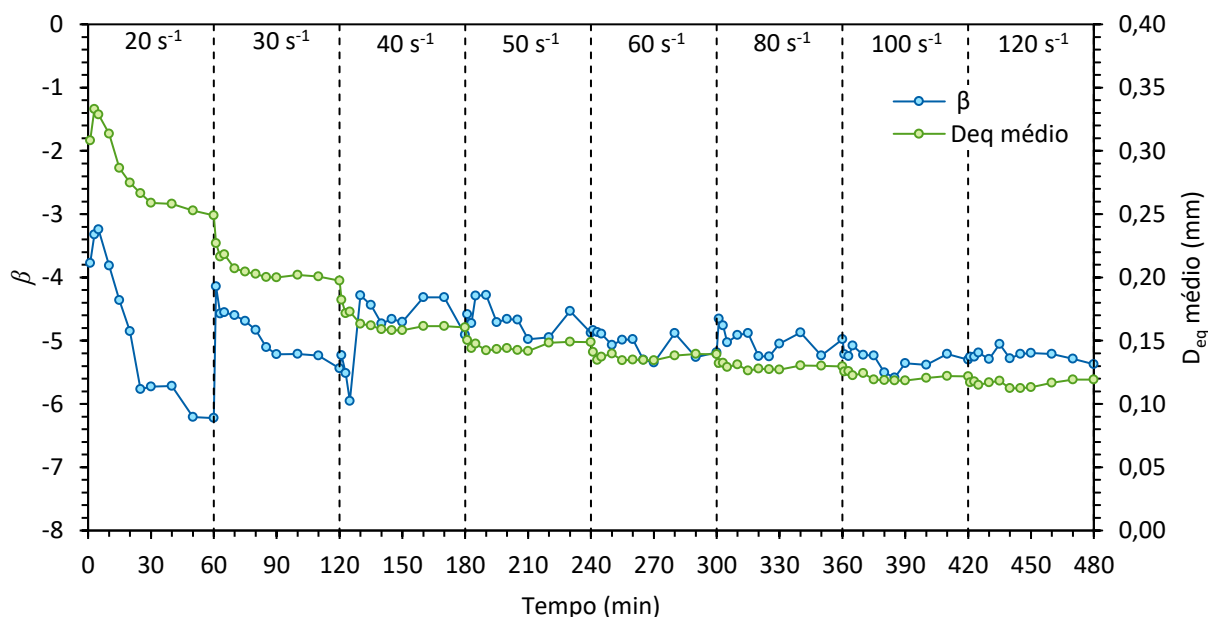


Fonte: Autora (2018)

No presente trabalho, o estudo de β foi utilizado como parâmetro auxiliar na análise da DTP na avaliação do alcance do patamar de estabilização. Quanto maior a inclinação da linha de ajuste, ilustrada na Figura 54, ou seja, quanto maior for o coeficiente de inclinação da equação da reta, maior a ocorrência de agregados de menor diâmetro. Em outras palavras, menores valores de β implicam em uma maior ocorrência de partículas em faixas de tamanho menores, ao passo que maiores valores de β indicam uma maior concentração de partículas em maiores faixas de tamanhos.

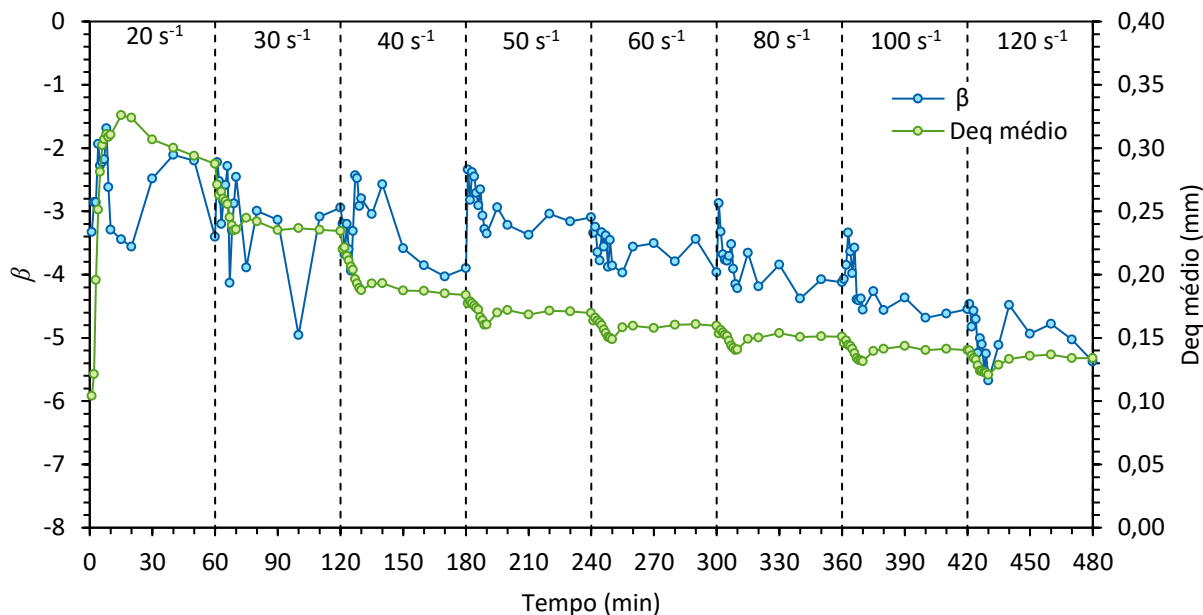
Nas Figuras 55 a 64 são apresentados graficamente a evolução do parâmetro β e do diâmetro equivalente de Feret médio (D_{eq}) ao longo do tempo, englobando todos os gradientes de velocidade médio de floculação, para as 10 condições de coagulação estudadas (Tabela 8).

Figura 55 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 1 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,11 e dosagem de Al^{3+} de $9,5 \text{ mg.l}^{-1}$)



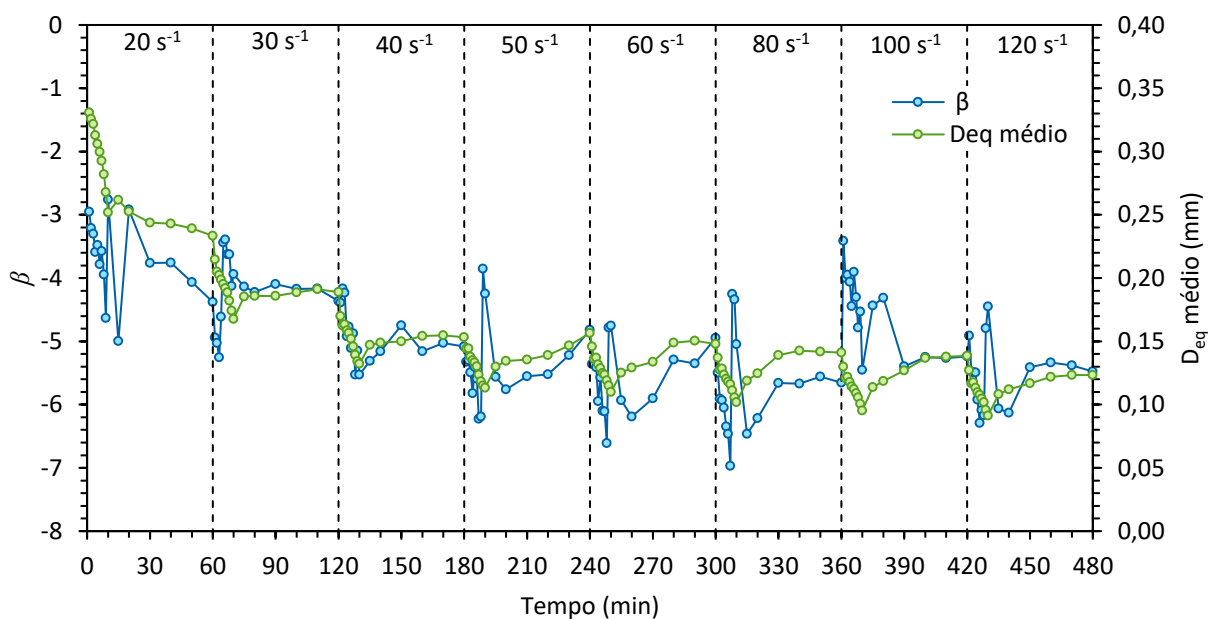
Fonte: Autora (2018)

Figura 56 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 2 do Diagrama de Coagulação (pH de 5,14 e dosagem de Al^{3+} de 4,0 mg.l⁻¹)



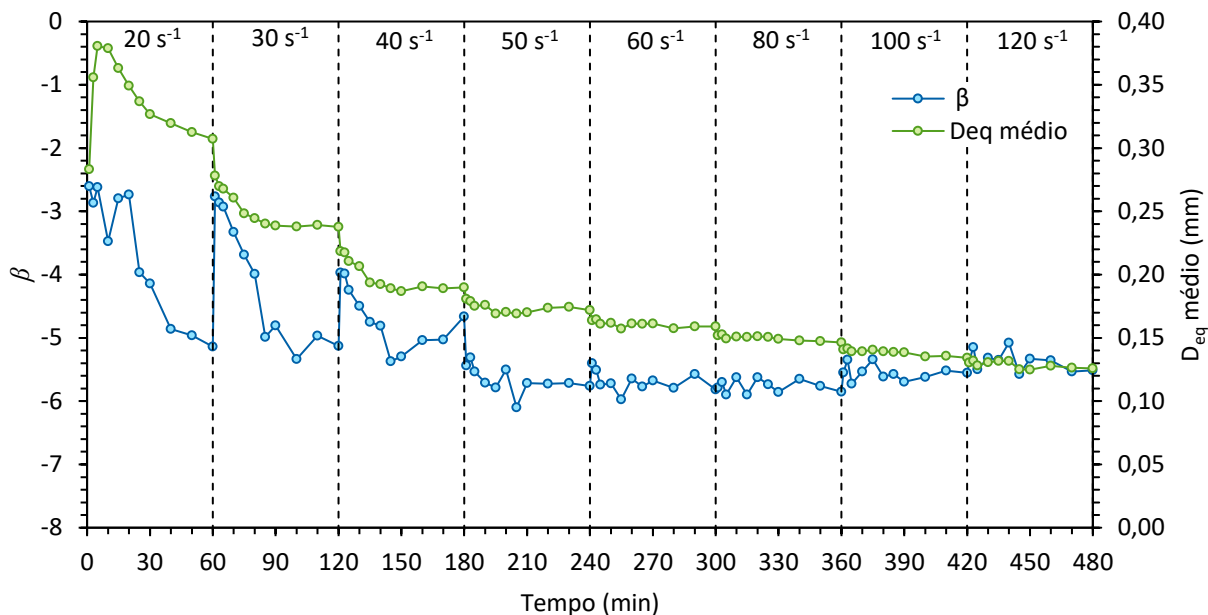
Fonte: Autora (2018)

Figura 57 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 3 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,13 e dosagem de Al^{3+} de 13,0 mg.l⁻¹)



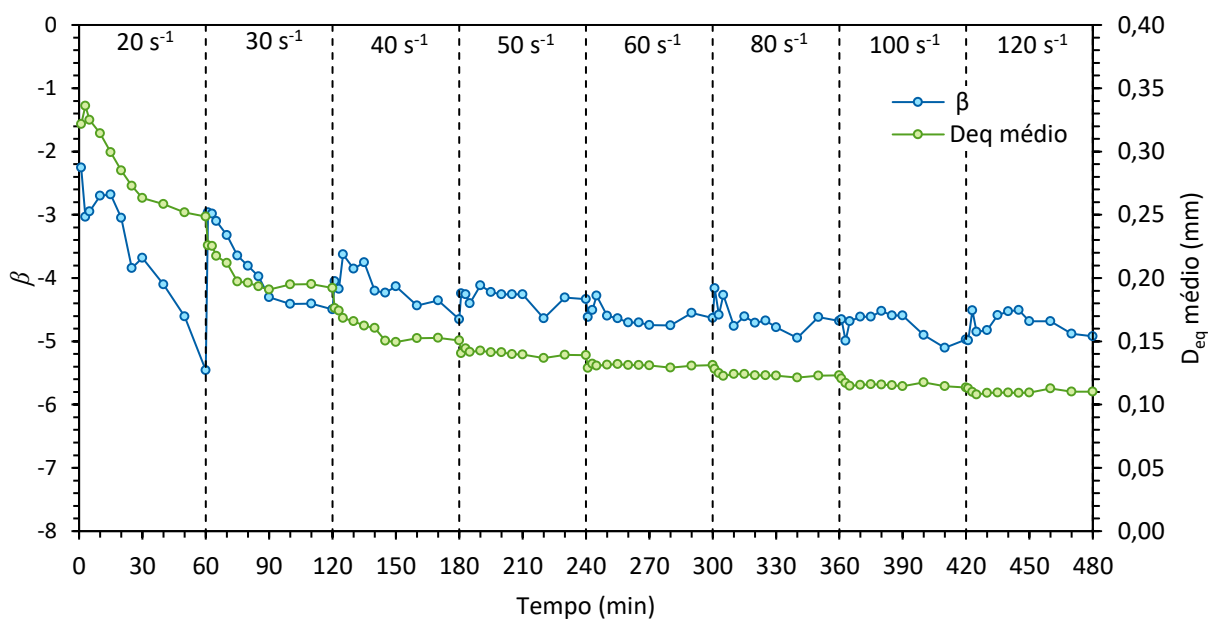
Fonte: Autora (2018)

Figura 58 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 4 do Diagrama de Coagulação (pH de 7,69 e dosagem de Al^{3+} de 6,5 $mg.l^{-1}$)



Fonte: Autora (2018)

Figura 59 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 5 do Diagrama de Coagulação (pH de 8,02 e dosagem de Al^{3+} de 11,0 $mg.l^{-1}$)



Fonte: Autora (2018)

Figura 60 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 6 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,47 e dosagem de Al^{3+} de $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$)

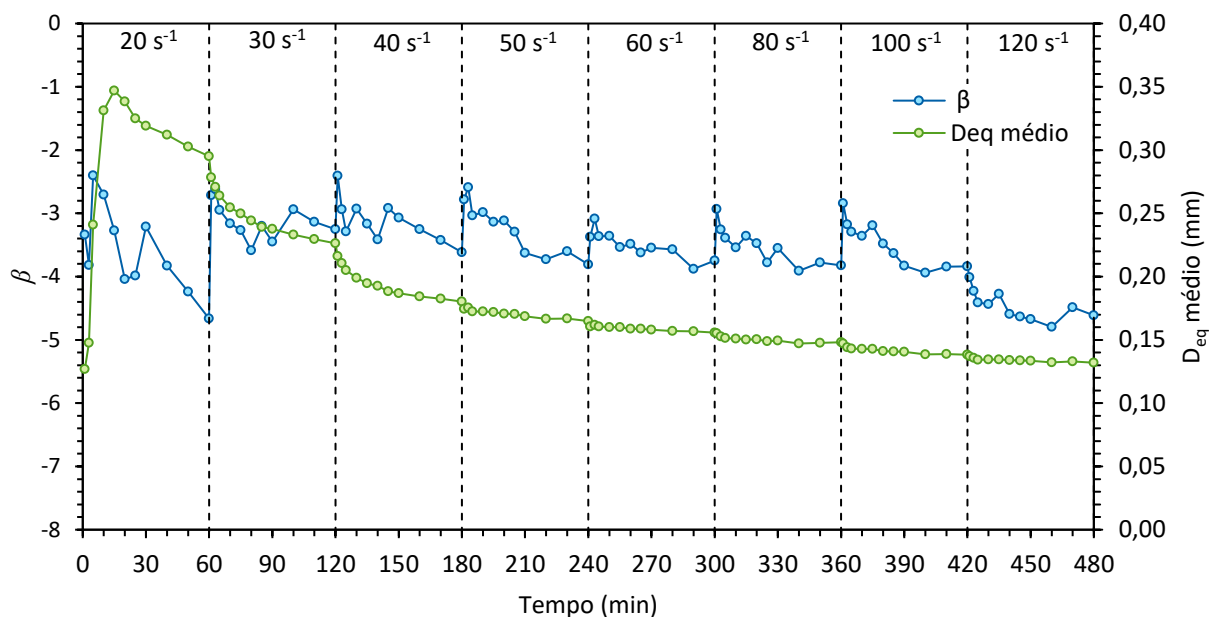


Figura 61 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 7 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,44 e dosagem de Al^{3+} de $1,0 \text{ mg.l}^{-1}$)

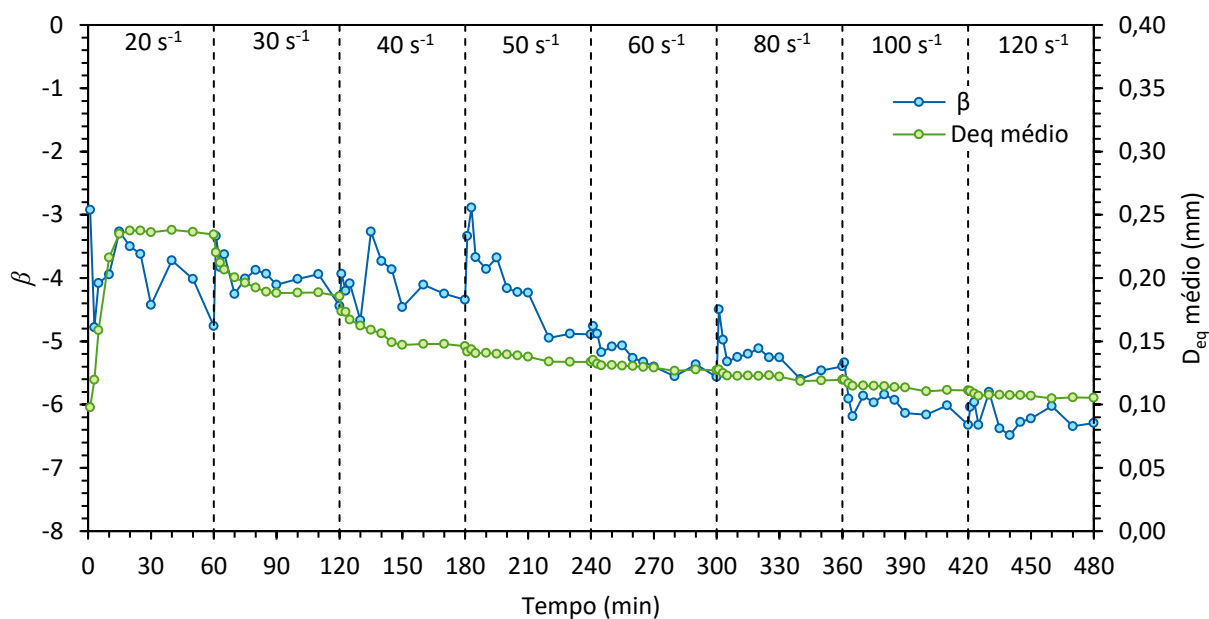
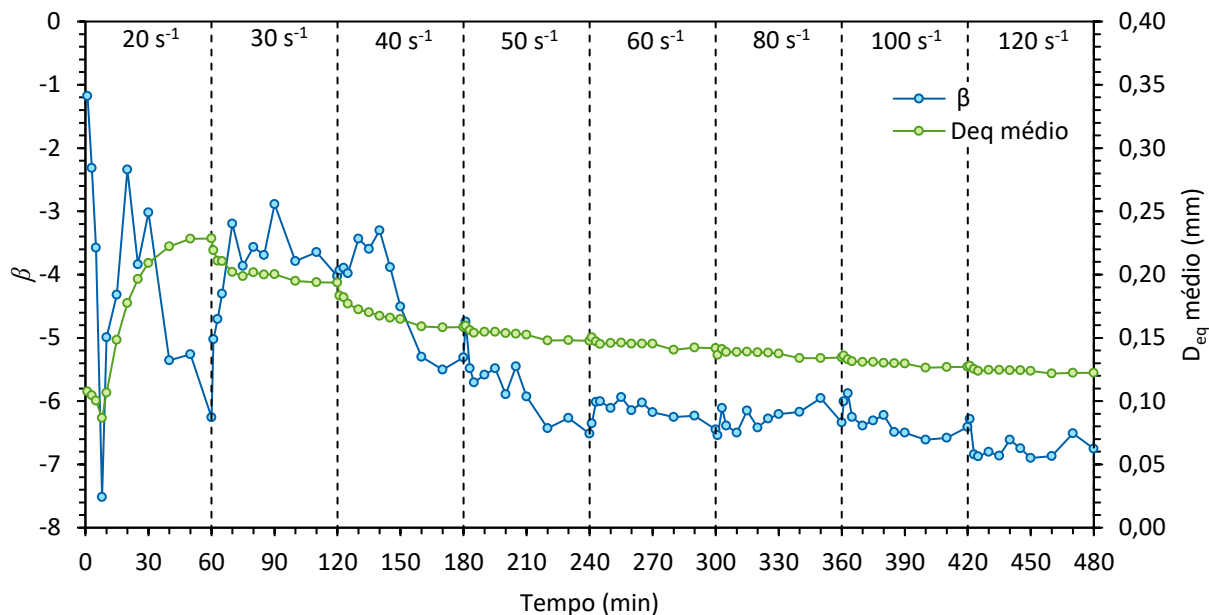
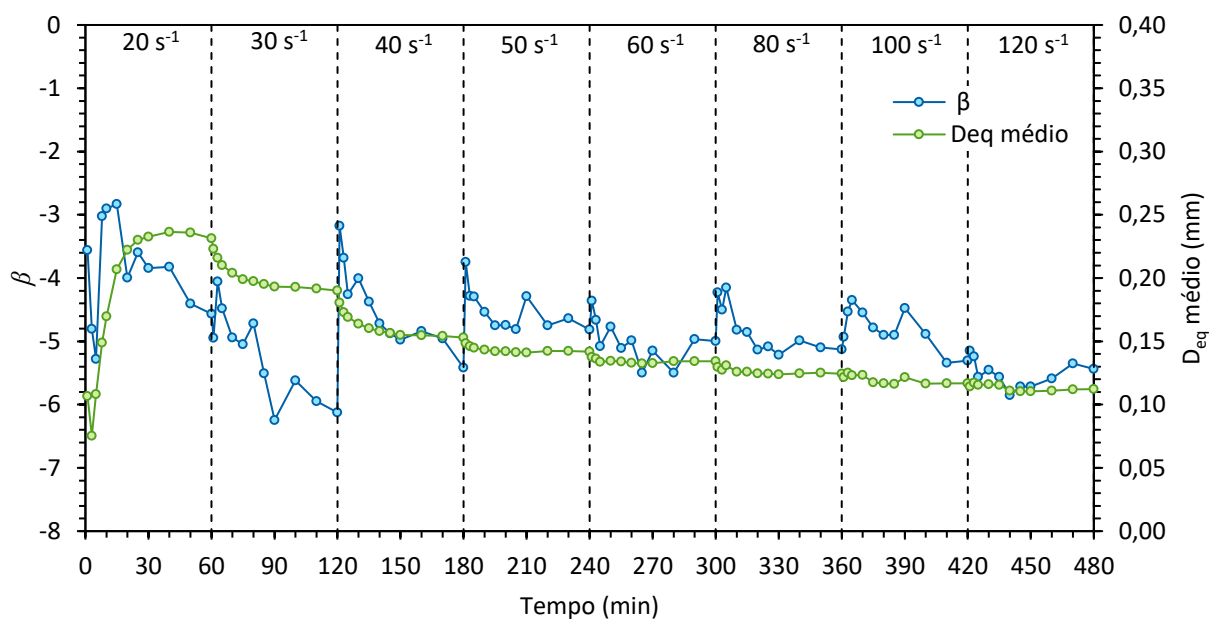


Figura 62 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 8 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,51 e dosagem de Al^{3+} de $1,25\text{ mg.l}^{-1}$)



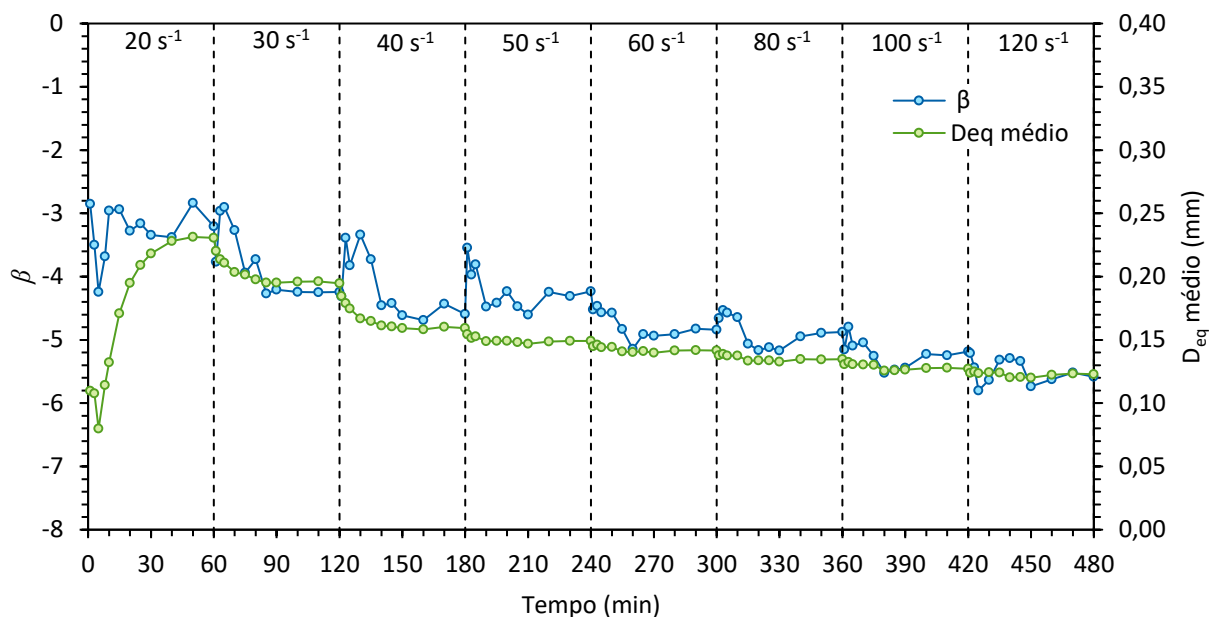
Fonte: Autora (2018)

Figura 63 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 9 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,41 e dosagem de Al^{3+} de $4,5\text{ mg.l}^{-1}$)



Fonte: Autora (2018)

Figura 64 - Evolução temporal do parâmetro β e do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio para o Ponto 10 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,07 e dosagem de Al^{3+} de $3,0 \text{ mg.l}^{-1}$)



Fonte: Autora (2018)

A partir da análise gráfica dos resultados, verifica-se que o comportamento do diâmetro equivalente médio foi semelhante em todas as condições químicas de coagulação, onde a formação de flocos maiores foi favorecida pelo gradiente de velocidade de 20 s^{-1} , tendendo a ser prejudicada à medida que aumenta a intensidade de mistura. O tamanho dos agregados é significativamente dependente da taxa de cisalhamento aplicada no sistema (em termos de gradiente de mistura), pois o aumento da mesma promove o aumento da ruptura dos flocos, resultando em agregados de menor diâmetro no estágio estacionário, usualmente assumido para representar o balanço dinâmico entre a agregação e ruptura induzida pela força de cisalhamento. Esta relação está de acordo com resultados observados em outros estudos, como o de Spicer e Pratsinis (1996), Serra, Colomer e Logan (2008) e Wang et al. (2011).

De modo geral, os resultados do parâmetro β mostraram uma tendência em apresentar valores menores à medida que aumenta a energia no sistema (expressa por meio do G_f), capaz de interferir na dinâmica da distribuição do tamanho de partículas (DTP), onde é possível observar uma maior concentração de flocos nas faixas de menor tamanho. Assim, verifica-se que os resultados estão coerentes com a evolução da DTP por faixas de tamanho ao longo do tempo de floculação, discutidos na seção 5.3.1. Este resultado indica, portanto, que o aumento gradual da taxa de cisalhamento no sistema promove o efeito de ruptura das partículas, acarretando no predomínio de partículas de menores diâmetros equivalentes. Além disso, observou-se uma

relação inversa entre o gradiente médio de velocidade de flocação e a alteração da dinâmica do parâmetro β , que é menor sob maiores valores de G_f .

Os valores de β resultaram em maior oscilação ao longo do tempo para condições gradientes de velocidade mais baixos, ao passo que nas condições de G_f mais altos, os valores são praticamente estáveis ao longo do tempo, sugerindo que houve alcance da estabilização deste parâmetro em valores consideravelmente inferiores, dado pelo estado estacionário (ocorrência do equilíbrio dinâmico da flocação), indicando que os maiores flocos foram obtidos para condições de menor agitação.

Apesar da coerência dos valores de β com os valores obtidos para tamanho dos flocos com base no diâmetro equivalente médio, determinados comportamentos dos diâmetros incapazes de ser explicados por este parâmetro. Isto se deve ao fato de a DTP não apresentar comportamento monotônico e unimodal, situação em que β é representativo.

Aos minutos iniciais de flocação para o primeiro G_f aplicado (20 s^{-1}), foi observado um aumento do diâmetro equivalente para as condições químicas dos pontos 2, 6, 7, 8, 9 e 10, conforme as Figuras 56 e 60 a 64. Em outras palavras, a força de cisalhamento aumenta as colisões de partículas e o crescimento nos estágios iniciais da flocação. Entretanto, com o crescimento dos agregados, a ruptura torna-se mais significativa à medida que aumenta a faixa de tamanho dos flocos suscetíveis à quebra promovida pelo aumento da turbulência no sistema pelo aumento do gradiente de velocidade. Tal comportamento é consistente com outros autores, como Parker et al. (1972) e Buvakova, Pivokonsky e Filip (2013).

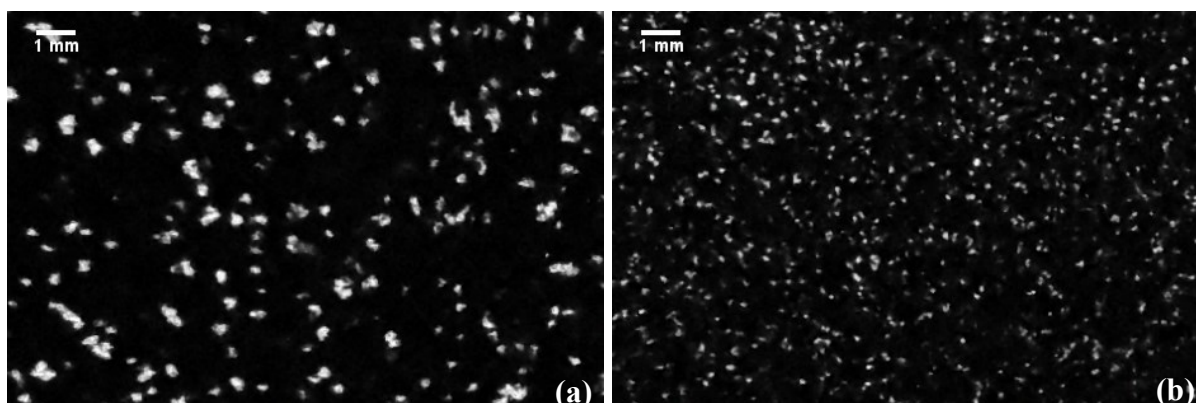
Segundo Argaman (1971), a quebra dos flocos devido ao aumento do gradiente de velocidade médio na flocação altera as características de distribuição espacial das partículas, conforme observado na Figura 65, que ilustra os efeitos evidentes na distribuição dos agregados formados com G_f de 20 s^{-1} e 60 s^{-1} , respectivamente.

Tomou-se alguns pontos que permitiram a realização de uma análise comparativa da evolução do diâmetro das partículas e do parâmetro representativo da distribuição de tamanho (β) quanto à dosagem de alumínio e ao pH de coagulação.

Através dos resultados obtidos nos Pontos 3 (Figura 57) e 7 (Figura 61), é possível verificar a influência da dosagem de alumínio na dinâmica de flocação, visto que o pH de coagulação nestas condições são próximos entre si (6,13 e 6,44, respectivamente) e a dosagem de coagulante com diferença considerável, de $13,0 \text{ mg.l}^{-1}$ para o Ponto 3 e $1,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} para

o Ponto 7. Observa-se que os flocos formados nas condições do Ponto 3 apresentaram maiores diâmetros em $T_f = 1$ min, decrescendo ao longo do tempo, enquanto que no Ponto 7, o diâmetro equivalente dos flocos aumentou nos primeiros 15 min de floculação, atingindo o estágio estacionário após este tempo. Entretanto, de acordo com a comparação gráfica de ambas as condições mostrada na Figura 66(a), não houve diferença do diâmetro equivalente médio no estado estacionário ($T_f = 60$ min), mesmo havendo formação de agregados maiores nos primeiros minutos de floculação. Assim, conclui-se que dosagens maiores de coagulante na faixa de pH de coagulação analisada acarretam na formação de grandes agregados em um curto período de tempo, ao passo que partículas submetidas a dosagens mais baixas tendem a se agregar gradativamente, atingindo distribuição espacial de partículas semelhantes.

Figura 65 - Exemplo de imagens obtidas de flocos formados sob $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ (a) e $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ (b), com $T_f = 60$ min



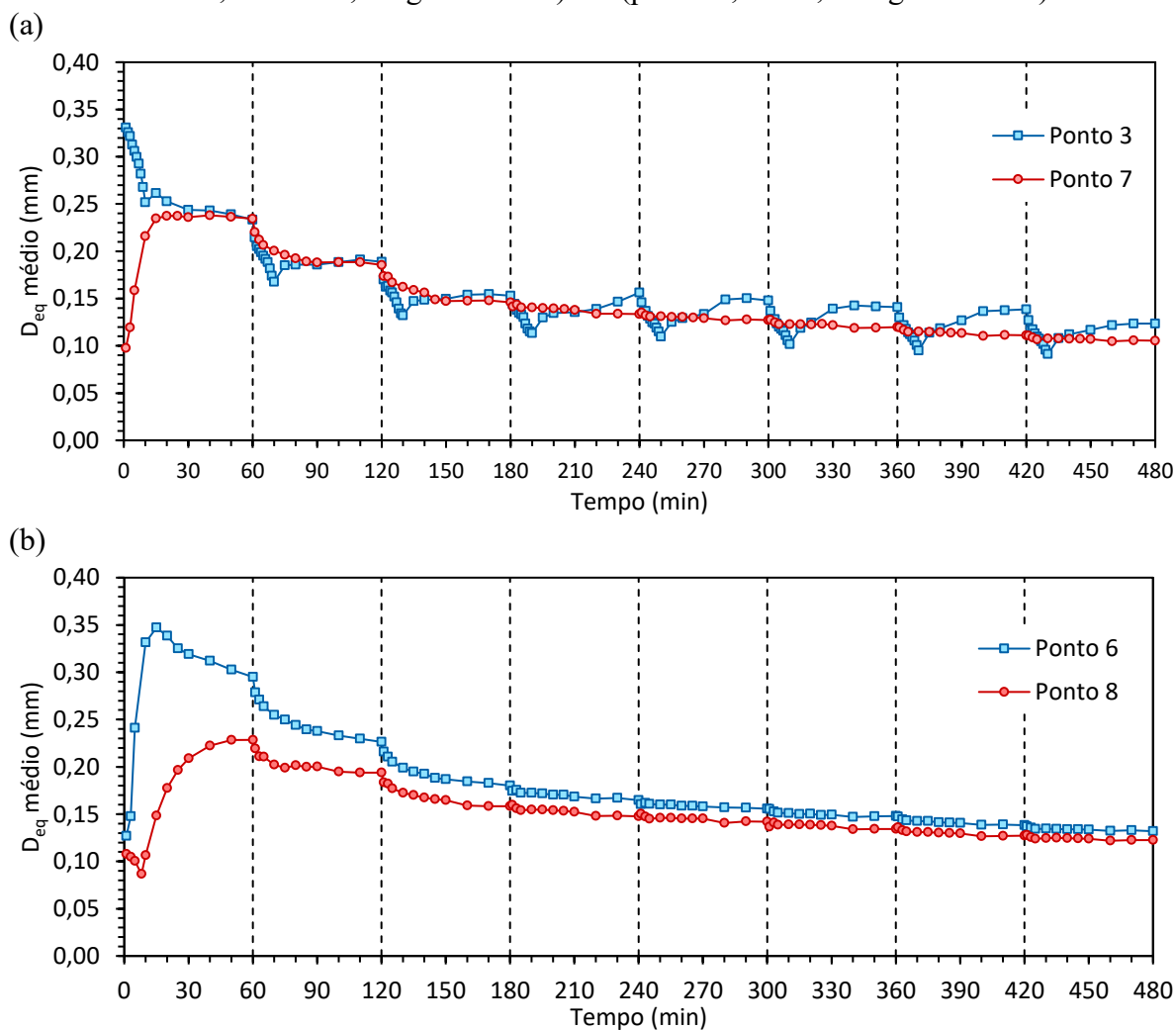
Fonte: Autora (2018)

A influência da dosagem de alumínio também pode ser observada em pH de coagulação mais ácido (aproximadamente 4,5), através dos resultados dos pontos 6 (Figura 60) e 8 (Figura 62), onde a floculação foi conduzida respectivamente com $11,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} e $1,25 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} . Para esta região de pH, notou-se que maiores dosagens de alumínio produzem flocos com maiores diâmetros, principalmente para taxas de cisalhamento menores (20 s^{-1} e 30 s^{-1}), conforme mostrado na Figura 66(b). Spicer e Pratsinis (1996) verificou a mesma relação do aumento da dosagem de sulfato de alumínio no diâmetro médio dos agregados e afirma que a formação de flocos maiores está relacionada a este aumento.

Os resultados obtidos para os valores de β dos Pontos 6 e 8 corroboram com a análise do tamanho dos agregados, visto que após o alcance da estabilização deste parâmetro, considerado a partir do gradiente médio de velocidade de 50 s^{-1} (T_f a partir de 181 min), a média obtida do

valor de β , em módulo, para as condições de floculação do Ponto 6 foi de 3,65, enquanto que a média para o Ponto 8 foi de 6,25.

Figura 66 - Comparação da evolução temporal do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio entre os pontos: a) 3 (pH de 6,13 e 13,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺) e 7 (pH de 6,44 e 1,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺); b) 6 (pH de 4,47de e 11,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺) e 8 (pH de 4,51 e 1,25 mg.l⁻¹ de Al³⁺)



Fonte: Autora (2018)

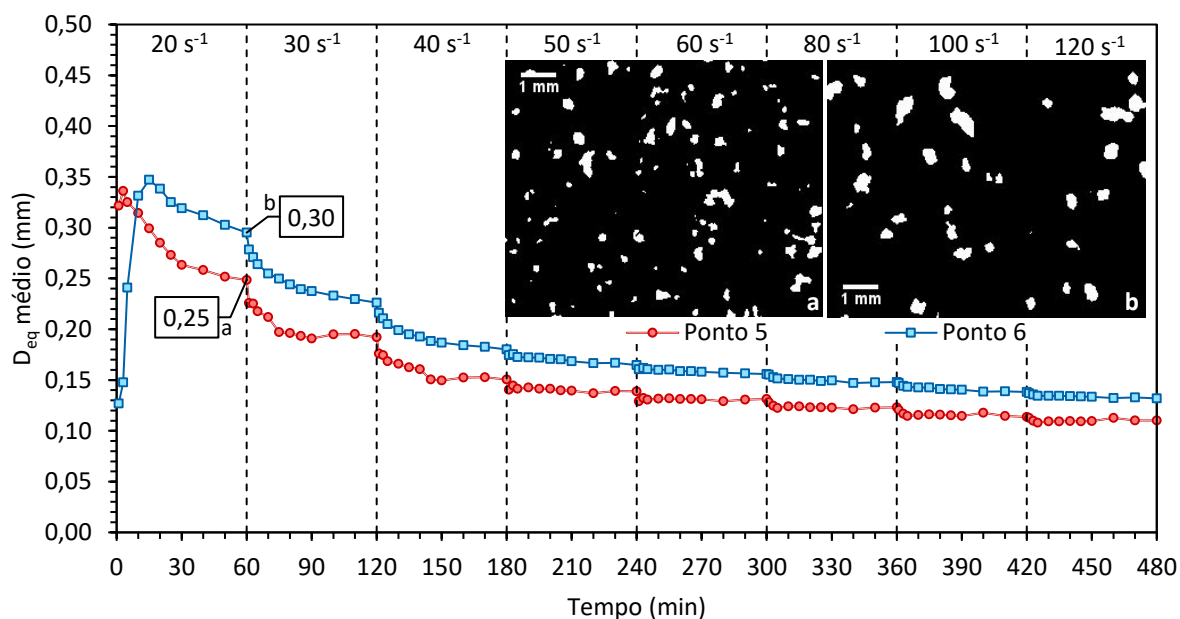
É possível verificar o efeito do pH de coagulação no tamanho dos flocos por meio dos resultados obtidos para os Pontos 5 e 6, já que em ambas as condições, a água foi floculada com dosagem de 11,0 mg.l⁻¹ de alumínio. Enquanto que nas condições do Ponto 5 (pH de coagulação de 8,02), o diâmetro equivalente médio das partículas no início da floculação foi de 0,32 mm, com tendência decrescente ao longo do tempo, os flocos formados nas condições do Ponto 6 (pH de coagulação de 4,47) aumentaram o diâmetro gradativamente até os primeiros 15 min de floculação, e somente após este intervalo, houve decréscimo do diâmetro dos flocos. A partir de 15 min, observou-se que os diâmetros equivalentes médios dos flocos formados no Ponto 6 foram maiores que os do Ponto 5, conforme mostrado na Figura 67. Deste modo, afirma-se que

a floculação da água com ácido húmico sob pH de coagulação mais ácido forma agregados de maiores tamanhos quando comparado com pH alcalino.

Sun et al. (2011) avaliaram o efeito do pH nas características dos flocos de solução contendo ácido húmico e verificaram que o tamanho do floco decresce com o aumento do pH. Segundo os autores, este fenômeno pode ser atribuído ao mecanismo de coagulação.

Da mesma forma, a avaliação da evolução do parâmetro β ao longo do tempo também evidenciou a prevalência de flocos menores para a condição de floculação do Ponto 5, guardando certa coerência com a evolução dos valores de diâmetros equivalentes médios obtidos, sugerindo que este parâmetro seja representativo da DTP.

Figura 67 - Comparação da evolução temporal do diâmetro equivalente (D_{eq}) médio entre os pontos 5 (pH de 8,02 e 11,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺) e 6 (pH de 4,47 e 11,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺)



Fonte: Autora (2018)

Ao aumentar o gradiente de velocidade na floculação de 20 s⁻¹ para 30 s⁻¹, prevaleceu-se o efeito de ruptura dos flocos nos primeiros minutos em todas as 10 condições de coagulação estudadas, atingindo o patamar de estabilização em aproximadamente 80 min desde o início do experimento, ou seja, T_f igual a 20 min para o gradiente de 30 s⁻¹. Entretanto, este patamar foi atingido com tamanho de flocos consideravelmente inferiores em relação aos flocos produzidos sob G_f de 20 s⁻¹, ou seja, as partículas se quebram sob situações de maior energia e não são reagregadas ao longo do tempo de floculação.

A partir da análise direta da DTP com a aquisição, processamento do conjunto de imagens e extração de atributos de interesse, foi possível verificar o desempenho da floculação, bem como

aprimorar a concepção dos fenômenos associados à esta etapa do tratamento de água. A avaliação possibilita até mesmo que projetos de ETAs sejam aprimorados com auxílios de equipamentos de monitoramento instalados nos flocladores, abrindo uma janela para que o processo seja controlado minuciosamente, tal como o abordado no estudo de Moruzzi et al. (2015), capaz de monitorar de forma contínua a etapa de floclação.

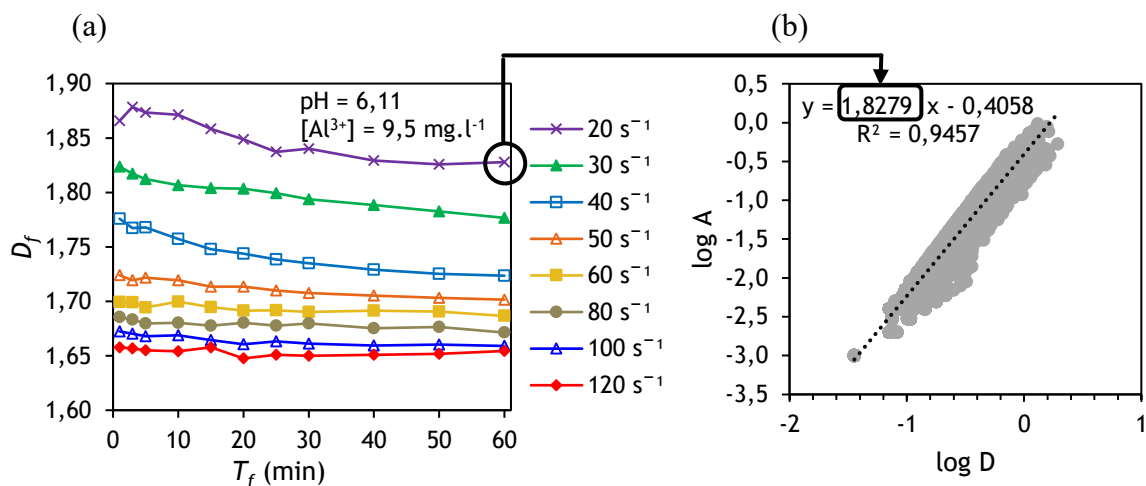
5.3.3 Dimensão Fractal

Conforme descrito anteriormente, o conceito de dimensão fractal foi empregado no acompanhamento das estruturas morfológicas dos agregados. A Figura 68b ilustra em detalhe a determinação do diâmetro fractal bidimensional D_f de uma amostra coagulada a pH de 6,11, utilizando dosagem de alumínio igual a $9,5 \text{ mg l}^{-1}$, no tempo de floclação $T_f = 60 \text{ min}$ e gradiente de floclação $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, a partir da análise de regressão linear baseada na Equação 19, representada pela inclinação da reta de ajuste.

Enfatiza-se que o coeficiente de correlação (R^2) das regressões de todas as regressões lineares para determinação da dimensão fractal variou de 0,69 e 0,97, indicando uma boa correlação entre $\log A_s$ e $\log d_{m\acute{a}x}$.

As evoluções do diâmetro fractal ao longo do tempo em diferentes gradientes de mistura na floclação são mostradas nas Figuras 68 a 77, considerando isoladamente os 10 pontos do diagrama de coagulação.

Figura 68 - Diâmetro fractal de partículas formadas em diferentes G_f adotados em função de T_f . (a) evolução temporal de D_f para o Ponto 1 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,11 e dosagem de Al^{3+} de $9,5 \text{ mg.l}^{-1}$) e (b) exemplo de determinação de D_f



Fonte: Autora (2018)

Figura 69 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 2 do Diagrama de Coagulação (pH de 5,14 e dosagem de Al^{3+} de $4,0 \text{ mg.l}^{-1}$)

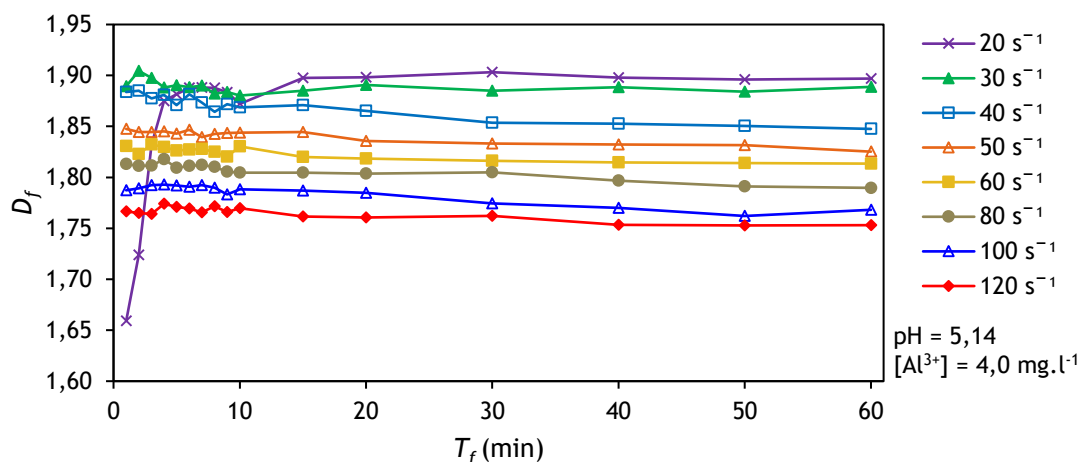


Figura 70 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 3 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,13 e dosagem de Al^{3+} de $13,0 \text{ mg.l}^{-1}$)

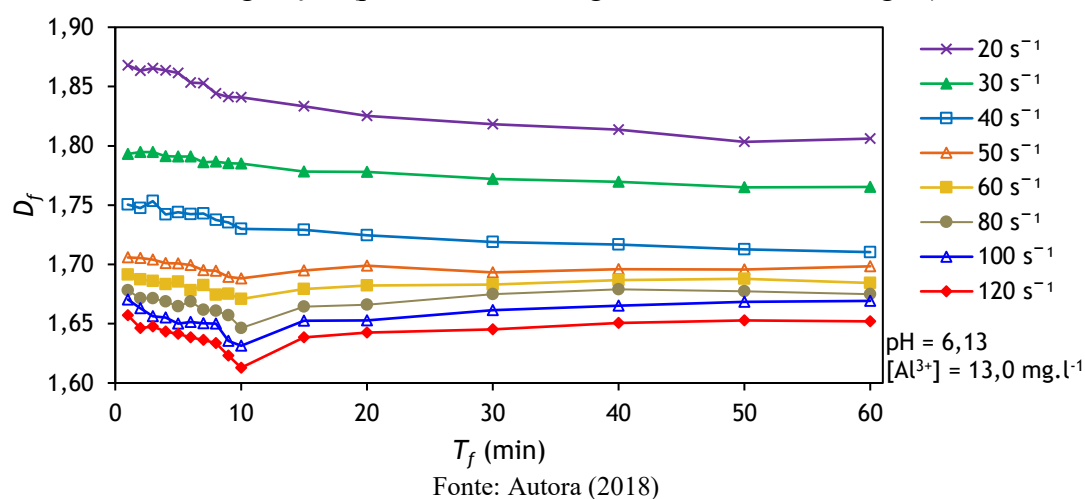


Figura 71 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 4 do Diagrama de Coagulação (pH de 7,69 e dosagem de Al^{3+} de $6,5 \text{ mg.l}^{-1}$)

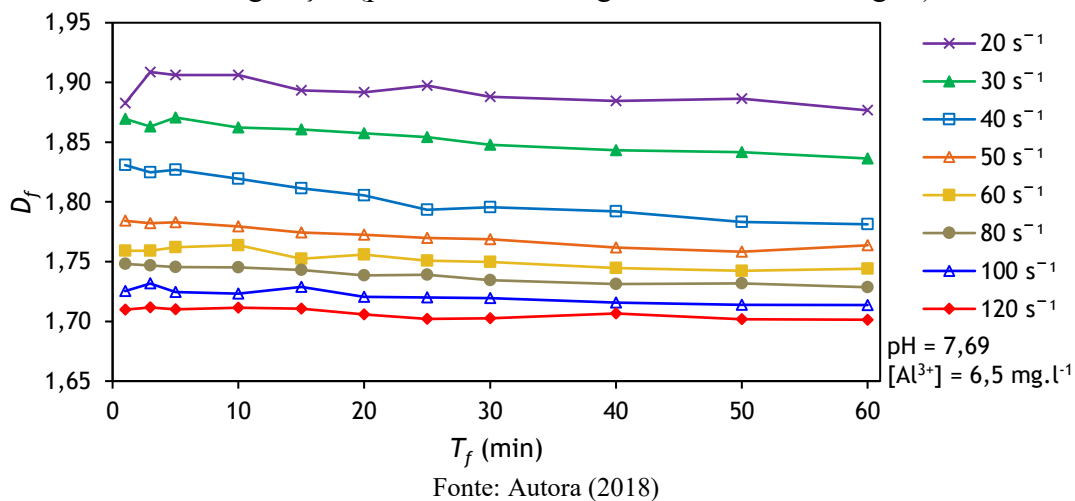


Figura 72 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 5 do Diagrama de Coagulação (pH de 8,02 e dosagem de Al^{3+} de 11,0 mg.l⁻¹)

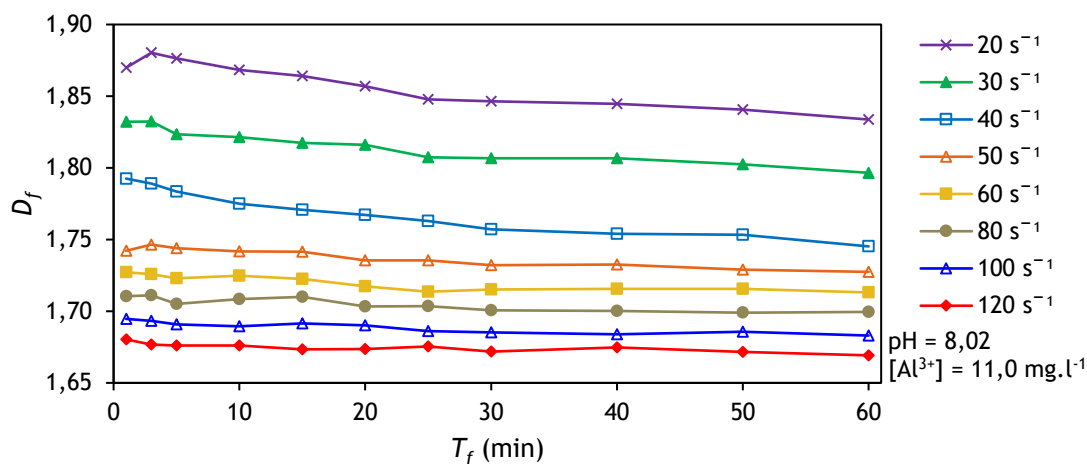


Figura 73 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 6 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,47 e dosagem de Al^{3+} de 11,0 mg.l⁻¹)

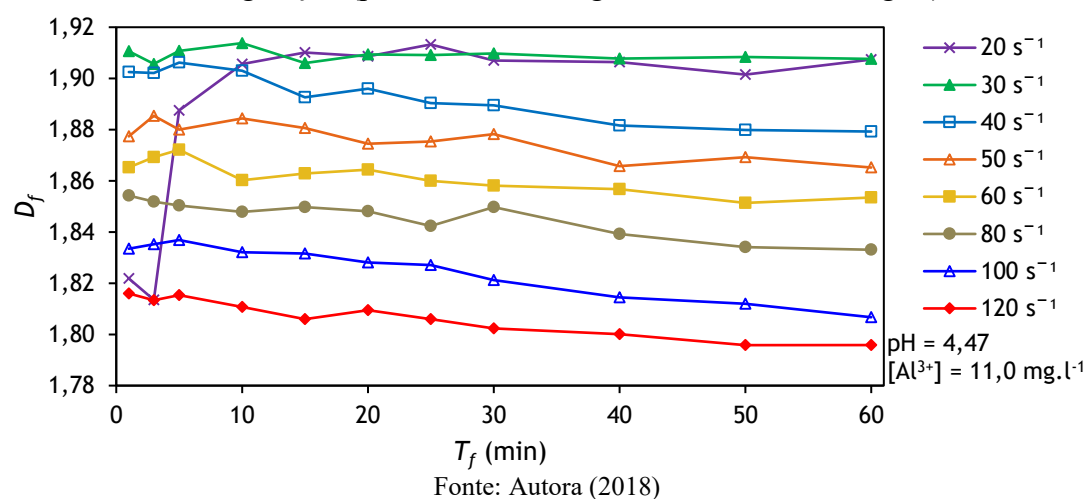


Figura 74 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 7 do Diagrama de Coagulação (pH de 6,44 e dosagem de Al^{3+} de 1,0 mg.l⁻¹)

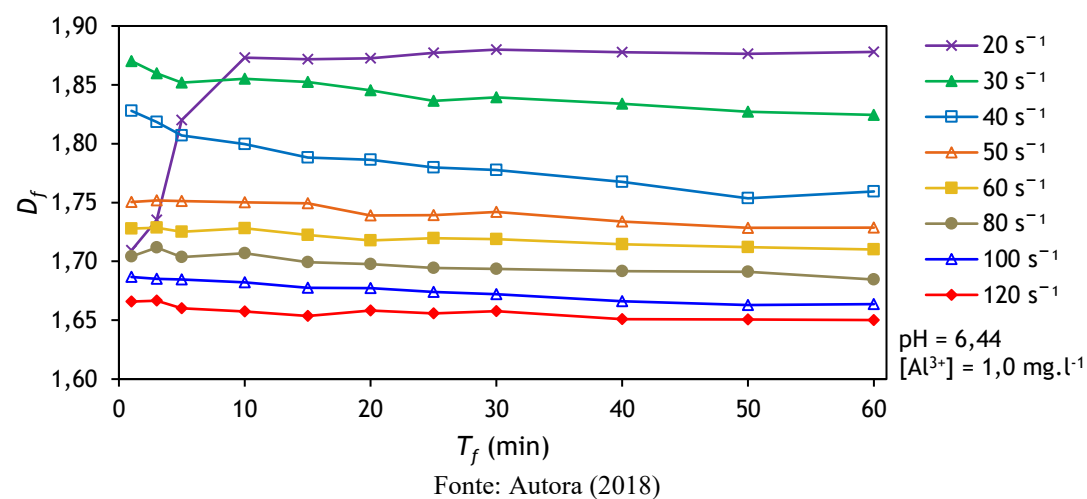


Figura 75 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 8 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,51 e dosagem de Al^{3+} de 1,25 $mg.l^{-1}$)

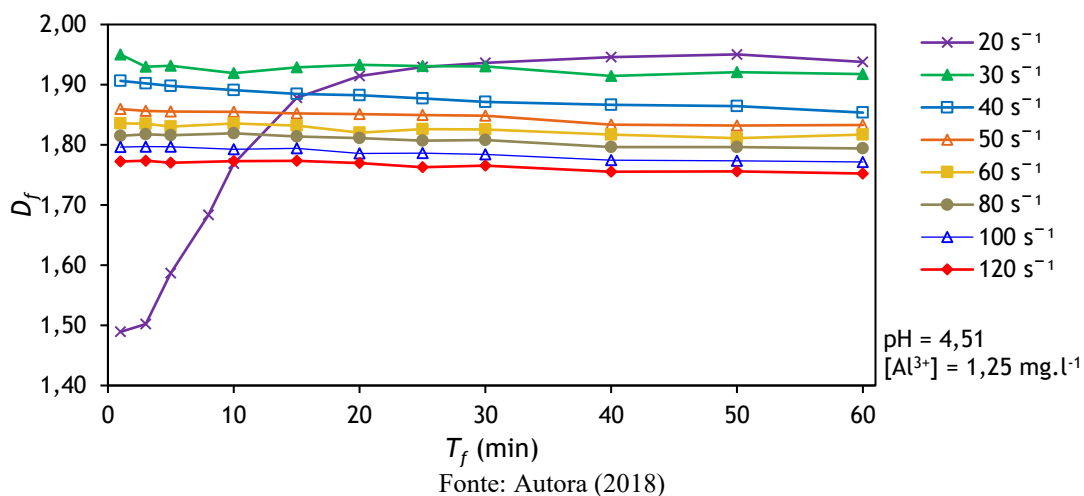


Figura 76 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 9 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,41 e dosagem de Al^{3+} de 4,5 $mg.l^{-1}$)

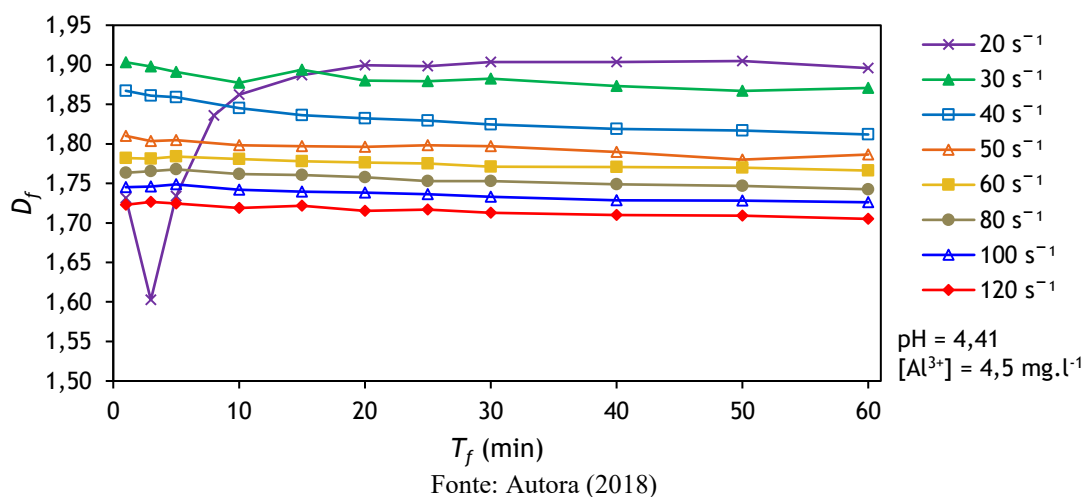
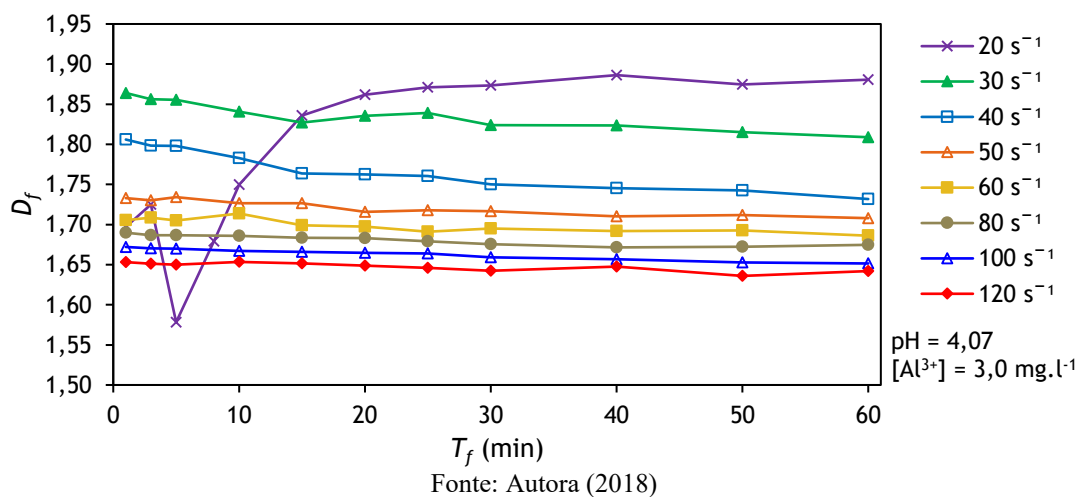


Figura 77 - Evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para o Ponto 10 do Diagrama de Coagulação (pH de 4,07 e dosagem de Al^{3+} de 3,0 $mg.l^{-1}$)



Os valores de D_f foram encontrados no intervalo de 1,49 a 1,95 considerando todas as condições avaliadas, e estão de acordo com resultados encontrados por Chang, Liu e Zhang (2005), Li et al. (2007) e Moruzzi et al. (2017). A Figura 78 mostra a evolução da dimensão fractal plotada na forma de curvas de níveis no programa *Surfer* 10, para melhor visualização e comparação deste parâmetro em todas as regiões do diagrama de coagulação estudadas.

Diversos autores, como Liu et al. (2011), Buvakova, Pivokonsky e Filip (2013) e Xu et al. (2016a) afirmam que agregados com maiores valores de dimensão fractal geralmente possuem estruturas mais compactas, ou seja, mais densas e mais próximas da forma circular, ao passo que menores valores de dimensão fractal indicam flocos de estruturas mais lineares, irregulares, altamente ramificadas, contendo espaços (poros) e com menor densidade, dificultado a sedimentabilidade dos mesmos.

Em todas as condições químicas analisadas, houve decréscimo no valor de dimensão fractal à medida que aumenta o gradiente médio de velocidade de floculação (Figuras 68 a 77). Deste modo, afirma-se que, quando a taxa de cisalhamento é aplicada em baixa intensidade, os flocos são formados com estruturas mais compactas, resultando em um alto valor de D_f . Tais estruturas, segundo Li et al. (2007), é indicativo de que as partículas primárias podem ter ligações entre si, ou que a força de repulsão entre estes agregados é minimizada. Em contrapartida, os flocos de morfologia mais ramificada são formados sob taxas de cisalhamento de maior intensidade, possuindo menor D_f . Embora os resultados do presente trabalho sejam contraditórios com os de outros estudos, como de Li et al. (2006), que verificaram um aumento no valor de D_f com o aumento do gradiente de velocidade de floculação no sistema, diversos autores também relataram uma relação inversa entre D_f e Gf , como Huang (1993), Oliveira et al. (2015b) e Moruzzi et al. (2017), que avaliaram as características morfológicas e DTP de flocos formados durante a floculação de água preparada com caulinita em diferentes gradientes de velocidade e tempos de floculação.

Moruzzi et al. (2017) analisaram a evolução temporal da dimensão fractal bidimensional dos flocos formados em uma série de testes de floculação em gradientes de velocidade de 20 s^{-1} e 60 s^{-1} , para água com turbidez elevada utilizando sulfato de alumínio, medidas por análise de imagens capturadas por uma câmera com resolução de $840 \times 640 \text{ pixels}$, com tamanho de *pixel* de $30 \text{ }\mu\text{m}$, utilizando o mesmo procedimento experimental deste estudo. O par de valores dosagem de alumínio e pH de coagulação empregado foi o correspondente à condição ótima do diagrama de coagulação e floculação, com $2,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+} e pH de 7,5. A partir dos resultados encontrados, foi verificado maiores valores de D_f para a menor taxa de cisalhamento investigada

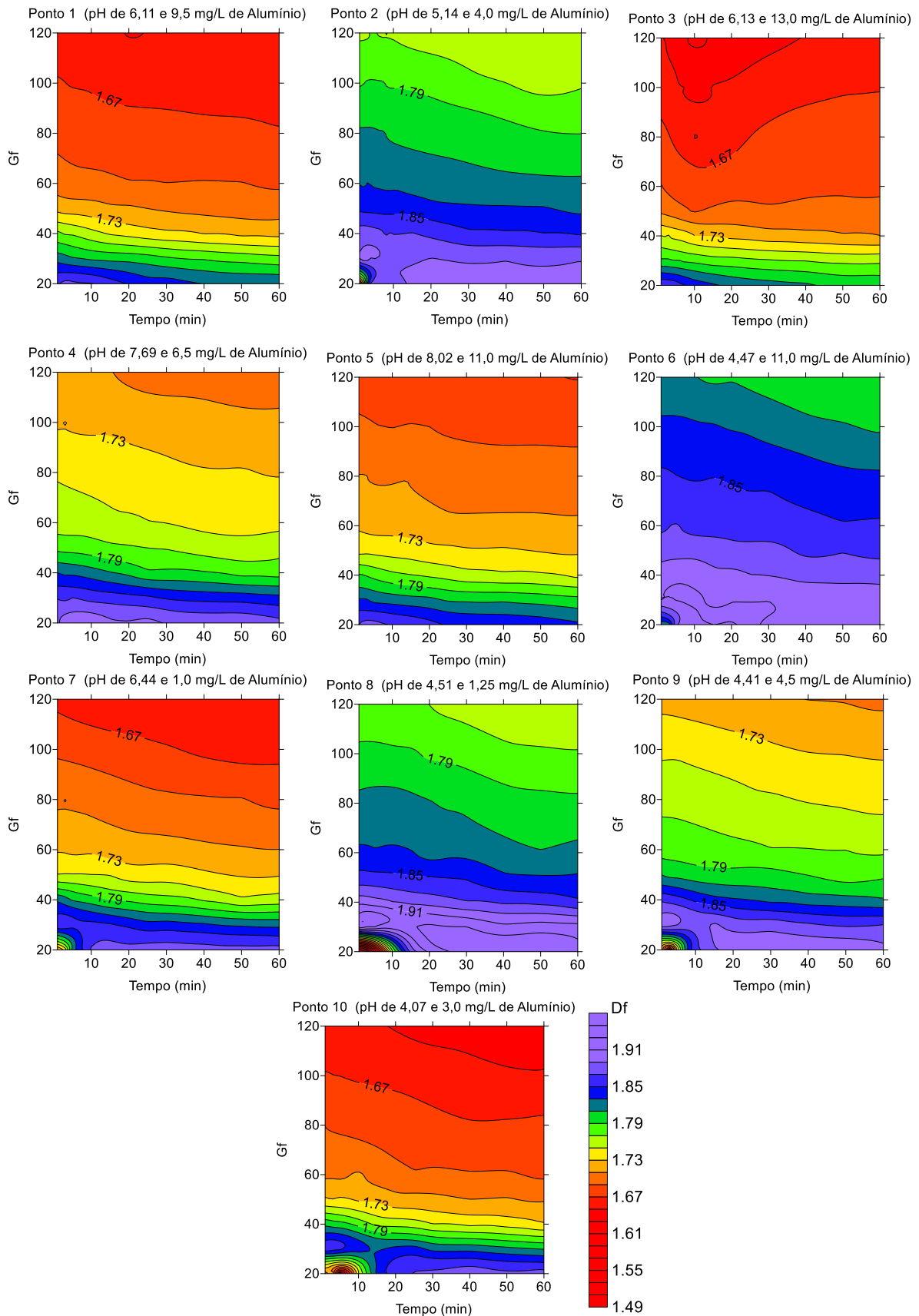
($G_f = 20 \text{ s}^{-1}$). Apesar das imagens serem capturadas com resolução maior no presente estudo (6000 x 4000 *pixels* e tamanho de *pixel* de 3,92 μm), a relação entre a dimensão fractal e o gradiente de velocidade foi a mesma encontrada pelos autores. Assim, a resolução das imagens obtidas não interfere na obtenção da dimensão fractal.

Uma possível explicação para o decréscimo de D_f com o aumento de G_f é a ocorrência de um mecanismo semelhante à agregação de um grupo de partículas em baixos G_f devido à quantidade significativa de partículas primárias ou aglomerados relativamente pequenos, capazes de se comportar como partículas isoladas, favorecendo a estabilização de partículas em grandes grupos de precipitados de alumínio (MORUZZI et al., 2017). As mesmas podem se aderir a estes precipitados, formando agregados com estruturas mais regulares, ou seja, valores mais altos de D_f .

O diâmetro fractal também decresce temporalmente, com exceção dos minutos iniciais de floculação para o primeiro gradiente de velocidade avaliado ($G_f = 20 \text{ s}^{-1}$) nos pontos 2, 6, 7, 8, 9 e 10. Presume-se que, com o decréscimo no valor de D_f , há aumento do efeito erosivo nos flocos à medida que aumenta o tempo e a taxa de cisalhamento, e, portanto, o número de partículas menos compactas é maior. Segundo Jarvis et al. (2005), dois mecanismos podem atuar na quebra de flocos: erosão superficial e fragmentação em larga escala, conforme esquematizado na Figura 14 da sessão 3.5.2, no Capítulo 3. A ruptura de agregados que possuem menores valores de dimensão fractal ocorre, preferencialmente, pelo mecanismo de fragmentação, onde ocorre a divisão dos flocos em pedaços de tamanhos comparáveis, ao passo que flocos compactos com altos valores de D_f se quebram pela lapidação superficial do floco principal (CHEKLI et al., 2017).

Nota-se um aumento gradual da evolução da dimensão fractal nos minutos iniciais de floculação para os pontos 2, 6, 7, 8, 9 e 10, atingindo a estabilidade em cerca de 20 minutos. As condições químicas de coagulação dos pontos 2 e 7 estão situadas em pH em torno de 6 e 6,5, e dosagens de alumínio baixas. Já as condições dos pontos 8, 9 e 10 situam-se em baixas dosagens de alumínio e pH mais ácido (na faixa de 4,0 a 4,5). Por fim, o ponto 6, apesar de ter elevada dosagem de coagulante, o pH foi mais ácido (próximo de 4,5). Desta forma, pode-se concluir que o comportamento observado está relacionado com o mecanismo de coagulação, que provavelmente é o de adsorção e neutralização de cargas.

Figura 78 - Curvas de níveis da evolução temporal de D_f em diferentes G_f adotados para as 10 condições químicas avaliadas

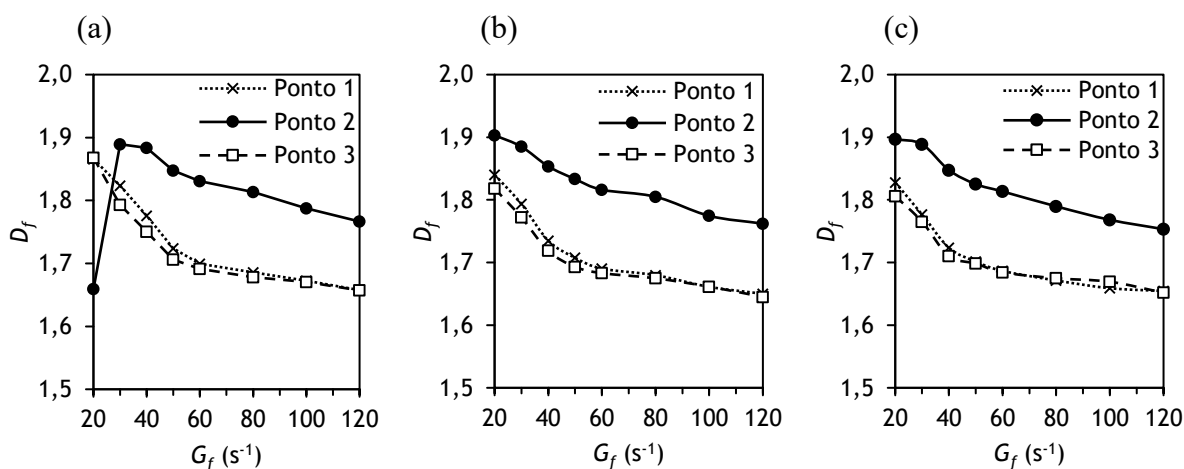


Fonte: Autora (2018)

O ponto 8 (pH de 4,51 e dosagem de Al^{3+} de $1,25 \text{ mg.l}^{-1}$), cujo provável mecanismo de coagulação foi de adsorção e neutralização de cargas, apresentou o menor valor de D_f nos minutos iniciais de floculação para o gradiente médio de velocidade de 20 s^{-1} , tendo um $D_f = 1,49$ em $T_f = 1 \text{ min}$ (Figura 75). Deste modo, presume-se que, inicialmente, os flocos formados nesta condição química possuem estruturas menos densas e mais lineares. Esta característica possivelmente está relacionada à dosagem de coagulante, que, segundo Yang et al. (2013), é muito baixa para induzir uma floculação rápida e suficiente.

Ao comparar os resultados de dimensão fractal do Ponto 2 (pH de 5,94 e dosagem de Al^{3+} de $4,0 \text{ mg.l}^{-1}$) com o Ponto 1 (pH de 6,11 e dosagem de Al^{3+} de $9,5 \text{ mg.l}^{-1}$) e Ponto 3 (pH de 6,13 e dosagem de Al^{3+} de $13,0 \text{ mg.l}^{-1}$), mostrados nas Figuras 68 a 70, é possível avaliar o efeito da dosagem de coagulante na morfologia do floco, visto que o pH de coagulação de ambas as situações são próximos. Nota-se que, independente do gradiente médio de velocidade aplicado, o valor de D_f é inferior para dosagens de alumínio mais altas, conforme a Figura 79. Este resultado mostra uma tendência dos agregados se desenvolverem de forma mais ramificada à medida que aumenta a dosagem do coagulante. Provavelmente, as diferentes estruturas dos agregados são atribuíveis aos distintos mecanismos de coagulação, pois enquanto a dosagem de coagulante não atinge o ponto excessivo, a formação de flocos depende principalmente do mecanismo de adsorção e neutralização de cargas, enquanto que o excesso do mesmo envolve o mecanismo de varredura, acarretando no decréscimo de suas dimensões fractais (CHANG et al., 2005).

Figura 79 - Variação de D_f em resposta aos diferentes G_f avaliados para o Ponto 1 (pH de 6,11 e $9,5 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}), Ponto 2 (pH de 5,94 e $4,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}) e Ponto 3 (pH de 6,13 e $13,0 \text{ mg.l}^{-1}$ de Al^{3+}) nos tempos de floculação de 1 min (a); 30 min (b) e 60 min (c)



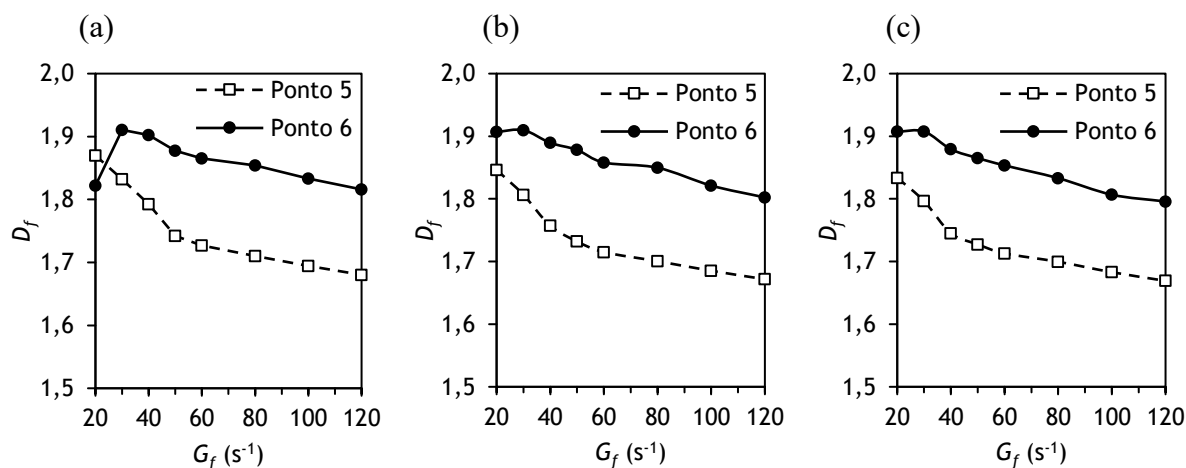
Fonte: Autora (2018)

Esta relação também foi observada por Wang et al. (2009), que analisaram a dimensão fractal de flocos formados por diferentes dosagens de cloreto poli-férrico (PFCl) utilizado como agente coagulante na floculação de água preparada com ácido húmico, observando agregados com estruturas mais abertas e ramificadas nas condições de maiores concentrações de PFCl.

Chang et al. (2005) também utilizaram a tecnologia de análise de imagens no estudo da dimensão fractal dos flocos formados utilizando diferentes dosagens de cloreto de polialumínio (PAC) para floculação de água caracterizada por baixa turbidez, alto teor de algas e micropoluentes. Os autores verificaram um aumento gradual na dimensão fractal com o aumento da dosagem de PAC, porém, uma queda acentuada foi observada no ponto de dosagem mais alta, resultante da dosagem excessiva de coagulante, indicando que a morfologia dos agregados próxima da forma circular foi modificada para uma mais linear com o aumento da dosagem de PAC. Assim sendo, é possível afirmar que a dimensão fractal pode ser utilizada como um parâmetro de identificação na previsão da variação estrutural dos agregados.

Ademais, os resultados obtidos através dos pontos 5 (pH de 8,02 e 11,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺) e 6 (pH de 4,47 e 11,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺), indicados respectivamente nas Figuras 72 e 73, possibilitam a análise do efeito do pH de coagulação no valor de D_f , uma vez que a dosagem de Al³⁺ foi a mesma em ambas as condições. Os flocos formados em pH mais ácido (Ponto 6) possuem maior D_f , ou seja, as estruturas morfológicas dos mesmos são mais próximas da forma circular e mais compactas quando comparados com os agregados formados na condição do Ponto 5, em pH alcalino, conforme a Figura 80.

Figura 80 - Variação de D_f em resposta aos diferentes G_f avaliados para o Ponto 5 (pH de 8,02 e 11,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺) e Ponto 6 (pH de 4,47 e 11,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺) nos tempos de floculação de 1 min (a); 30 min (b) e 60 min (c)



Fonte: Autora (2018)

A relação observada está em conformidade com os resultados obtidos por Sun et al. (2011), que avaliaram as características dos flocos de ácido húmico utilizando cloreto de alumínio poliférrico (PFAC-PD) como agente coagulante sob diferentes pH e gradientes de velocidade de floculação.

Ao correlacionar a morfologia dos flocos com o percentual de remoção de cor obtido no ensaio de coagulação/floculação (Tabela 8), em que apresentou 0% e 64% de remoção nas condições dos pontos 5 e 6, respectivamente, é possível confirmar a afirmação de autores como Liu et al. (2011) e Xu et al. (2016a), de que agregados mais compactos possuem melhor sedimentabilidade.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

As técnicas de análises de imagens digitais podem ser amplamente empregadas em diversas pesquisas, sendo importantes ferramentas em diversas áreas do conhecimento, como no caso da presente pesquisa. A aplicação do método não intrusivo de captura de imagens foi adequada e se mostrou eficaz para a extração de informações sobre as partículas evidenciadas no plano de luz estabelecido, formadas sob diversas configurações químicas, contribuindo para o entendimento científico e tecnológico do processo de floculação de água com cor elevada, conforme as conclusões específicas:

1. A análise da distribuição de partículas em faixas de tamanho mostrou que o mecanismo de coagulação, condicionado pelo par de valores pH de coagulação e dosagem de alumínio aplicada, interferem na evolução temporal da DTP;
2. Em regiões compreendidas pelo mecanismo de coagulação por varredura (pH em torno de 6,0 a 6,5 e altas dosagens de alumínio), constatou-se uma rápida agregação de partículas, indicada pela quantidade considerável de flocos contidos em faixas de maior tamanho nos minutos iniciais de floculação, ao passo o crescimento e formação de maiores agregados ocorreu mais lentamente nas regiões cujo provável mecanismo de coagulação é o de neutralização de cargas, prevalecida sob pH mais ácidos e dosagens de coagulante mais baixas;
3. Independente do mecanismo de coagulação atuante, o aumento gradual da intensidade de mistura promove a ruptura dos flocos, acarretando na distribuição mais concentrada nas menores faixas de tamanho, sendo observado pelo aumento no grau de achatamento do histograma da DTP. No entanto, para gradientes de floculação superiores a 60 s^{-1} , a distribuição de partículas é praticamente inalterada;

4. O parâmetro β pode ser utilizado na representatividade da distribuição do tamanho de partículas, visto que a análise do mesmo levou a conclusões consistentes e semelhantes com a DTP. Existe uma relação inversa entre a elevação do gradiente médio de velocidade na floculação e a alteração na dinâmica de β , indicativo da ocorrência de ruptura dos agregados;
5. Os resultados obtidos para a dimensão fractal tenderam a se estabilizar entre valores de 1,49 a 1,95. Foi observada uma relação inversa entre a taxa de cisalhamento aplicada ao sistema e a dimensão fractal, isto é, o aumento no gradiente de velocidade promove flocos com morfologia mais ramificada e menos compactas;
6. Observou-se uma tendência de menores valores de dimensão fractal para dosagens mais altas de alumínio a partir dos resultados comparativos em mesma faixa de pH. Portanto, os precipitados de hidróxidos de alumínio possivelmente são capazes de determinar estruturas mais lineares e ramificadas. Além disso, a análise comparativa do pH sob mesma dosagem de alumínio indicou a formação de flocos mais compactos em pH mais ácido;
7. A evolução temporal da dimensão fractal bidimensional nos minutos iniciais provavelmente são atribuíveis ao mecanismo de coagulação, uma vez que houve um aumento gradual de D_f no início da floculação em regiões cujo mecanismo é, possivelmente, o de neutralização de cargas. Além disso, o valor de D_f mais baixo foi observado justamente na região com pH de 4,51 e dosagem de 1,25 mg.l⁻¹ de Al³⁺, indicando a formação de estruturas mais lineares.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. **Avaliação do desempenho de sedimentação e sua relação com distribuição do tamanho de partículas (DTP) e com agregados fractal**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2017.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. Washington: APHA, 1999. 1325 p.

AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K. M. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. **Journal American Water Works Association**, v. 74, n. 4, p. 210-216, apr. 1982.
<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1982.tb04890.x>

AMIRTHARAJAH, A.; EDWARDS, G. A. Removing color caused by humic acids. **Journal American Water Works Association**, v. 77, n. 3, p. 50-57, mar. 1985.
<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1985.tb05508.x>

AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C. R. Coagulation Processes: Destabilization, Mixing, and Flocculation. In: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. 4. ed. New York: McGraw-Hill. 1990. p. 269-365.

AMJAD, H.; KHAN, Z.; TARABARA, V. V. Fractal structure and permeability of membrane cake layers: Effect of coagulation–flocculation and settling as pretreatment steps. **Separation and Purification Technology**, v. 143, p. 40-51, mar. 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.01.020>

ARGAMAN, Y.; KAUFMAN, W. J. Turbulence and flocculation. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, v. 96, n. AS 2, p. 223-241, apr. 1970.

ARGAMAN, Y. A. Pilot-plant studies of flocculation. **Journal American Water Works Association**, v. 63, n. 12, p. 775-777, dec. 1971.
<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1971.tb02612.x>

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Técnica de abastecimento e tratamento de água**. 2 ed. São Paulo: CETESB, 1977. v. 2.

BLACK, A. P.; WILLEMS, D. G. Electrophoretic studies of coagulation for removal of organic color. **Journal American Water Works Association**, v. 53, n. 5, p. 589-604, may. 1961.
<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1961.tb00699.x>

BLACK, A. P. et al. Stoichiometry of coagulation of color-causing organic compounds with ferric sulfate. **Journal American Water Works Association**, v. 55, n. 10, p. 1347-1366, oct. 1963. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1963.tb01151.x>

BOUYER, D.; LINÉ, A.; DO-QUANG, Z. Experimental analysis of floc size distribution under different hydrodynamics in a mixing tank. **AIChE Journal**, v. 50, n. 9, p. 2064-2081, sep. 2004. <https://doi.org/10.1002/aic.10242>

BOUYER, D. et al. Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 292, n. 2, p. 413-428, dec. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.06.011>

BRAKALOV, L. B. A connection between the orthokinetic coagulation capture efficiency of aggregates and their maximum size. **Chemical Engineering Science**, v. 42, n. 10, p. 2373-2383, jan. 1987. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(87\)80111-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(87)80111-2)

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 4. ed. Brasília: FUNASA, 2015. 612 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade de água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Portaria n. 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Lex: Diário Oficial da União**, Brasília, p. 39-46, dez. 2011.

BRATBY, J. R.; MILLER, M. W.; MARAIS, G. R. Design of flocculation systems from batch test data. **Water S.A.**, v. 3, n. 4, p. 173-182, oct. 1977.

BRATBY, J. R. Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. **Journal American Water Works Association**, v. 73, n. 6, p. 318-325, jun. 1981. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1981.tb04721.x>

BRETT, C. M. A.; BRETT, A. M. O. **Electrochemistry: Principles, Methods, and Applications**. 1. ed. New York: Oxford University Press, 1993. 427 p.

BUBAKOVA, P.; PIVOKONSKY, M.; FILIP, P. Effect of shear rate on aggregate size and structure in the process of aggregation and at steady state. **Powder Technology**, v. 235, p. 540-549, feb. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.11.014>

BÜLL, J. C. **Determinação da força e recrescimento do floco de águas de abastecimento**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2017.

BÜLL, J. C.; SILVA, P. A. G; MORUZZI, R. B. **Determinação da força do floco e da refloculação de águas de abastecimento**. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 27., 2016, Rio Claro. **Anais...** Rio Claro, SP: UNESP, 2016. p. 1.

CAMPOS, S. X. **Influência das substâncias húmicas de diferentes massas molares na coagulação, floculação e sedimentação no tratamento de água**. 2004. 128 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CHAKRABORTI, R. K.; ATKINSON, J. F.; VAN BENSCHOTEN, J. E. Characterization of alum floc by image analysis. **Environmental Science and Technology**, v. 34, n. 18, p. 3969-3976, aug. 2000. <https://doi.org/10.1021/es990818o>

CHANG, Y; LIU, Q. J.; ZHANG, J. S. Flocculation control study based on fractal theory. **Journal of Zhejiang University-Science**, v. 6, n. 10, p. 1038-1044, oct. 2005. <https://doi.org/10.1631/jzus.2005.B1038>

CHEKLI, L. et al. Performance of titanium salts compared to conventional FeCl₃ for the removal of algal organic matter (AOM) in synthetic seawater: Coagulation performance, organic fraction removal and floc characteristics. **Journal of Environmental Management**, v. 201, p. 28-36, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.025>

CONSTANTINO, L. T. **Água com substâncias húmicas aquáticas coagulada com sulfato de alumínio e cloreto férrico**. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

CRITTENDEN, J. C. et al. **MWH's Water Treatment: Principles and Design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. 1920 p. <https://doi.org/10.1002/9781118131473>

DE JULIO, M. et al. Emprego do reagente de fenton como agente coagulante na remoção de substâncias húmicas de água por meio da flotação por ar dissolvido e filtração. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.11, n.3, p.260-268, jul./set. 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522006000300009>

DE QUEIROZ, J. E. R.; GOMES, H. M. Introdução ao Processamento Digital de Imagens. **Revista de Informática Teórica e Aplicada**, v. 13, n. 2, p. 11-42, 2006.

DI BERNARDO, L. Tratamento de águas de abastecimento de cor elevada. **Revista DAE**, n.133, p. 61-65, jun. 1983.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. Di B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005. v. 2, 1984 p.

DI BERNARDO, A. S. **Influência das condições de aplicação de polímeros catiônicos na eficiência da floculação**. 2000. 207 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

DI BERNARDO, L.; BOTARI, A.; PAZ, L. P. S. Uso de modelação matemática para projeto de câmaras mecanizadas de floculação em série em estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 82-90, jan./mar. 2005. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000100010>

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. São Carlos: LDIBE LTDA, 2008. v. 1, 878 p.

DINGER, D. Medidas de pontos isoeletricos sem o uso de analisador de potencial zeta. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 3, p. 23-24, mai./jun. 2006.

DUTRA, R. H. A. **Obtenção dos parâmetros cinéticos da floculação com utilização de técnica de análise por imagem**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ECKENFELDER, W. W. **Industrial water pollution control**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1989. 400 p.

EDWARDS, G. A.; AMIRTHARAJAH, A. Removing color caused by humic acids. **American Water Works Association**, v. 77, n. 3, p. 50-57, mar. 1985.
<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1985.tb05508.x>

ERHAYEM, M.; SOHN, M. Stability studies for titanium dioxide nanoparticles upon adsorption of Suwannee River humic and fulvic acids and natural organic matter. **Science of The Total Environment**, v. 468-469, n. 15, p. 249-257, jan. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.038>

ESQUEF, I. A. **Técnicas de entropia em processamento de imagens**. 2002. 127 f. Dissertação (Mestrado em Instrumentação Científica) – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2002.

FLAING, W.; HEUDSPACHER, H.; RIETZ, E. Chemical composition and physical properties of humic substances. In: GIESEKING, J. E. **Soil components: Organic components**. New York: Springer-Verlag, 1975. v. 1, p. 1-211.

FRANCO, E. S. **Avaliação da influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estações de tratamento de água**. 2009. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GARDNER, K. H.; THEIS, T. L.; YOUNG, T. C. Colloid aggregation: numerical solution and measurements. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 141, n. 2, p. 237-252, nov. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00383-5](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00383-5)

GONÇALVEZ, L. S. M. **Evolução do diâmetro fractal de agregados formados a partir de água com baixa turbidez**. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

GONG, X. et al. Study of the adsorption of Cr(VI) by tannic acid immobilised powdered activated carbon from micro-polluted water in the presence of dissolved humic acid. **Bioresource Technology**, v. 141, p. 145-151, aug, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.166>

GREGORY, J. E.; NOKES, C. J.; FENTON, E. Optimising natural organic matter removal from low turbidity waters by controlled pH adjustment of aluminium coagulation. **Water Research**, v. 31, n. 12, p. 2949-2958, dec. 1997.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00154-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00154-1)

GREGORY, J. The density of particle aggregates. **Water Science and Technology**, v. 36, n. 4, p. 1-13, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00452-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00452-6)

GREGORY, J. Monitoring particle aggregation processes. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 147-148, p. 109-123, mar./jun. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.003>

HALL, E. S.; PACKHAM, R. F. Coagulation of organic color with hydrolyzing coagulants. **American Water Works Association**, v. 57, n. 9, p. 1149-1166, sep. 1965. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1965.tb01506.x>

HAN, Y. et al. Aggregation and dissolution of ZnO nanoparticles synthesized by different methods: Influence of ionic strength and humic acid. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 451, n. 1, p. 7-15, mar. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.03.030>

HAY, D. T.; HOGG, R. Agglomerate breakage in polymer-flocculated suspensions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 116, n. 1, p. 256-268, mar. 1987. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(87\)90119-6](https://doi.org/10.1016/0021-9797(87)90119-6)

HE, W. et al. Characteristic analysis on temporal evolution of floc size and structure in low-shear flow. **Water Research**, v. 46, n. 2, p. 509-520, feb. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.040>

HUANG, H. Porosity-size relationship of drilling mud flocs: fractal structure. **Clays and Clay minerals**, v. 41, p. 373-373, 1993. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1993.0410314>

HUANG, X. et al. Polyacrylamide as coagulant aid with polytitanium sulfate in humic acid-kaolin water treatment: Effect of dosage and dose method. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 64, p. 173-179, jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.04.011>

JAFELICCI JUNIOR, M.; VARANDA, L. C. O mundo dos colóides. **Química nova na escola**, n. 9, p. 9-13, mai. 1999.

JARVIS, P. et al. A review of floc strength and breakage. **Water Research**, v. 39, p. 3121-3137, jul. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.022>

JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; PARSONS, S. A. Breakage, regrowth, and fractal nature of natural organic matter flocs. **Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 7, p. 2307-2314, apr. 2005a. <https://doi.org/10.1021/es048854x>

JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; PARSONS, S. A. Measuring floc structural characteristics. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 4, n. 1-2, p. 1-18, may. 2005b. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-7092-1>

JIANG, Q.; LOGAN, B. E. Fractal dimensions of aggregates determined from steady-state size distributions. **Environmental Science and Technology**, v. 25, n. 12, p. 2031-2038, dec. 1991. <https://doi.org/10.1021/es00024a007>

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, sep. 2006. <https://doi.org/10.1007/s00449-006-0070-3>

KIM, J. H. et al. The effect of re-aggregated floc by additional coagulant on membrane. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 44, n. 5, p. 802-807, sep. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.01.026>

KIM, H. et al. Comparative analysis of image binarization methods for crack identification in concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 99, p. 53-61, sep. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.018>

KIM, S. H.; MOON, B. H.; LEE, H. I. Effects of pH and dosage on pollutant removal and floc structure during coagulation. **Microchemical Journal**, v. 68, n. 2-3, p. 197-203, mar. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0026-265X\(00\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0026-265X(00)00146-6)

KOBLER, D.; BOLLER, M. Particle removal in different filtration systems for tertiary wastewater treatment - A comparison. **Water Science and Technology**, v. 36, n. 4, p. 259-267, dec. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00442-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00442-3)

LAWLER, D. F. Particle size distribution in treatment processes: Theory and practice. **Water Science and Technology**, v. 36, n. 4, p. 15-23, aug. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00414-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00414-9)

LI, A. et al. Characteristic transformation of humic acid during photoelectrocatalysis process and its subsequent disinfection byproduct formation potential. **Water Research**, v. 45, p. 6131-3140, sep. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.09.012>

LI, T. et al. Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms. **Powder Technology**, v. 168, n. 2, p. 104-110, oct. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.07.003>

LI, T. et al. The strength and fractal dimension characteristics of alum-kaolin flocs. **International Journal of Mineral Processing**, v. 82, n. 1, p. 23-29, feb. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.012>

LI, T. et al. Characterization of the Flocculation Process from the Evolution of Particle Size Distributions. **Journal of Environmental Engineering**, v. 134, n. 5, p. 369-375, may. 2008.

LICSKÓ, I. Realistic coagulation mechanisms in the use of aluminium and iron (III) salts. **Water Science and Technology**, v. 36, n. 4, p. 103-110, dec. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00426-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00426-5)

LIMA, G. M. **Desenvolvimento de correlação de formação de ácidos haloacéticos em água contendo substância húmica oxidada com cloro**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2014.

LIU, Ting et al. Effect of two-stage coagulant addition on coagulation-ultrafiltration process for treatment of humic-rich water. **Water Research**, v. 45, n. 14, p. 4260-4268, aug. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.05.037>

LOGAN, B. E.; KILPS, J. R. Fractal dimensions of aggregates formed in different fluid mechanical environments. **Water Research**, v. 29, n. 2, p. 443-453, feb. 1995.

[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00186-B](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00186-B)

MA, J. et al. Flocculation performance of cationic polyacrylamide with high cationic degree in humic acid synthetic water treatment and effect of kaolin particles. **Separation and Purification Technology**, v. 181, n. 30, p. 201-212, jun. 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.03.027>

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. 307 p.

MASLIYAH, J. H.; BHATTACHARJEE, S. **Electrokinetic and colloid transport phenomena**. 1 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 736 p.

<https://doi.org/10.1002/0471799742>

MENDES, Y. C. **Evolução da Distribuição do Tamanho de Partículas na floculação de água de baixa turbidez**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MORENO, P.; MORUZZI, R. B.; CONCEIÇÃO, F.T. Investigação da aplicação da lama vermelha 'red mud' na mistura rápida como nucleador de flocos visando sua remoção por sedimentação. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE AIDIS, 28., 2013, Tegucigalpa. **Anais...** Tegucigalpa, HN: AIDIS, 2013.

MORENO, P. **Emprego de técnica dedicada de análise de imagem na avaliação do produto GT no desempenho da floculação**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2014.

MORENO, P. et al. Investigação do efeito do Número de Camp (NC) na distribuição de tamanho de partículas (DTP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2015.

MORENO, P. et al. Aplicação de lama vermelha como nucleador de floco. **Hydro**, v. 12, p. 46-48, 2016.

MORGAN, J. **Técnicas de segmentação de imagens na geração de programas para máquinas de comando numérico**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

MORUZZI, R. B. et al. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, p. 291- 300, out./dez. 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 ultra-sônica e técnica de análise por imagem**. 2005. 240 f. 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 da distribuição do tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 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 a non-intrusive image analysis system and tracer tests. **Water Science and Technology**, v. 61, n. 1, p. 253-262, jan. 2010. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.784>

MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, S. C. Mathematical modeling and analysis of the flocculation process in chambers in series. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 36, n. 3, p. 357-363, mar. 2013. <https://doi.org/10.1007/s00449-012-0791-4>

MORUZZI, R. B. et al. Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração. **Revista DAE**, n. 200, p. 25-36, fev. 2015. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016144959>

MORUZZI, R. B. et al. Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição do tamanho de partículas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 817-824, out./dez. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016144959>

MORUZZI, R. B. et al. Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions. **Science of the Total Environment**, v.609, p. 807-814, dec. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.194>

NAN, J. et al. Fractal growth characteristics of flocs in flocculation process in water treatment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND ENVIRONMENT TECHNOLOGY, 9., 2009, Guilin. **Anais...** Guilin: IEEE, 2009. p. 582-588. <https://doi.org/10.1109/ICEET.2009.379>

NAN, J.; LI, H. Y.; HE, W. P. Fractal dimension of floc growth in micro-coagulation stage I: using to forecast water quality of settled water. **Advanced Materials Research**, v. 243-249, p. 4831-4834, may. 2011.

NARKIS, N.; REBHUN, M. The mechanism of flocculation processes in the presence of humic substances. **Journal American Water Works Association**, v. 67, n. 2, p. 101-108, feb. 1975. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1975.tb02169.x>

O'MELIA, C. R. Aquasols: the behavior of small particles in aquatic systems. **Environmental Science and Technology**, v. 14, n. 9, p. 1052-1060, sep. 1980. <https://doi.org/10.1021/es60169a601>

OLIVEIRA, A. L. et al. Avaliação da melhor distribuição de tamanho de partículas para a sedimentação mantendo-se fixo o número de Camp. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 34., 2014, Monterrey. **Anais...** Monterrey: AIDIS, 2014. p. 1.

OLIVEIRA, A. L. et al. Análise da distribuição do tamanho de partículas em função do tempo de floculação. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28., 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2015a.

OLIVEIRA, A. L. et al. Avaliação de parâmetros representativos da distribuição de tamanho de partículas presentes em coleções hídricas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 1084-1092, out./dez. 2015b. <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. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 36, p. 16721-16732, 2016. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1081833>

PARKER, D. S.; KAUFMAN, W. J.; JENKINS, D. Floc breakup in turbulent flocculation processes. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, v. 98, n. 1, p. 79-99, 1972.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. 216 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PENG, S. J.; WILLIAMS, R. A. Direct measurement of floc breakage in flowing suspensions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 166, p. 321-332, mar. 1994. <https://doi.org/10.1006/jcis.1994.1302>

PICCININI, C. A. **Estudo do comportamento eletroforético e reológico de argilas em meio aquoso para processamento eletroforético de barbotinas**. 2013. 81 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RATNAWEERA, H.; GJESSING, E.; OUG, E. Influence of physical-chemical characteristics of natural organic matter (NOM) on coagulation properties: An analysis of eight Norwegian water sources. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 9, p. 89-95, nov. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00644-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00644-7)

REN, P. et al. Analysis of floc morphology in a continuous-flow flocculation and sedimentation reactor. **Journal of Environmental Sciences**, v. 52, p. 268-275, feb. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.04.007>

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009. 340 p.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H. **Substâncias húmicas aquáticas: Interação com espécies metálicas**. São Paulo: UNESP, 2003. 126 p.

RUSS, J. C. **The Image Processing Handbook**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 1998. 800 p.

SANTOS, H. R. et al. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 291-300, out./dez. 2004. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522004000400005>

- SCHNITZER, M. Humic Substances: Chemistry and Reactions. **Developments in Soil Science**, v. 8, p. 1-64, dec. 1978. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70016-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70016-3)
- SCHULTEN, H. R.; SCHNITZER, M. A state of the art structural concept for humic substances. **Naturwissenschaften**, v. 80, p. 29-30, jan. 1993. <https://doi.org/10.1007/BF01139754>
- SERRA, T.; COLOMER, J. C.; LOGAN, B. E. Efficiency of different shear devices on flocculation. **Water Research**, v. 42, n. 4, p. 1113-1121, feb. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.08.027>
- SILVA, A. F. T. **Avaliação da Distribuição Total de Partículas (DTP) em água com alta cor aparente por ácido húmico empregando técnica de análise de imagens**. 2017. 15 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- SILVA, P. A. G. **Força e dimensão fractal para floco de caulinita coagulado com sal de alumínio aplicado ao tratamento de água para abastecimento**. 2016. 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**. 2017. 39 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.
- SMOLUCHOWSKI, M. V. Versuch einer mathematischen theorie der koagulation kinetik kolloider Lösungen. **Zeitschrift fuer physikalische Chemie**, v. 92, p. 129-168, 1917.
- SNOEYINK, V.L.; JENKINS, D. **Water chemistry**. New York: John Wiley & Sons. 1980. 480 p.
- SPICER, P. T.; PRATSINIS, S. E. Shear-induced flocculation: the evolution of floc structure and the shape of the size distribution at steady state. **Water Research**, v. 30, n. 5, p. 1049-1056, may. 1996. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00253-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00253-7)
- SUN, C. et al. Effect of pH and shear force on flocs characteristics for humic acid removal using polyferric aluminum chloride–organic polymer dual-coagulants. **Desalination**, v. 281, p. 243-247, aug. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.065>
- SZE, A. et al. Zeta-potential measurement using the Smoluchowski equation and the slope of the current-time relationship in electroosmotic flow. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 261, p. 402-410, jan. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00142-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00142-5)
- TANG, P.; GREENWOOD, J.; RAPER, J. A. A model to describe the settling behavior of fractal aggregates. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 247, n. 1, p. 210-219, mar. 2002. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.8028>
- THOMAS, D. N.; JUDD, S. J.; FAWCETT, N. Flocculation modelling: A review. **Water Research**, v. 33, n. 7, p. 1579-1592, may. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00392-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00392-3)

VAHEDI, A.; GORCZYCA, B. Predicting the settling velocity of flocs formed in water treatment using multiple fractal dimensions. **Water Research**, v. 46, n. 13, p. 4188-4194, sep. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.031>

VALENCIA, J. A. **Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua**. Lima: CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). Série técnica n. 13. 1973. 558 p.

VANDAMME, D. et al. Floc characteristics of *Chlorella vulgaris*: influence of flocculation mode and presence of organic matter. **Bioresource Technology**, v. 151, p. 383-387, jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.112>

VOLTAN, P. E. N. **Avaliação da ruptura e do recrescimento de flocos na eficiência de sedimentação em água com turbidez elevada**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

WAITE, T. D. Measurement and implications of floc structure in water and wastewater treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 151, n. 1, p. 27-41, jun.1999. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00634-7](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00634-7)

WANG, D. et al. Characterization of floc structure and strength: Role of changing shear rates under various coagulation mechanisms. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 379, n. 1, p. 36-42, apr. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.048>

WANG, Y. et al. Fractal analysis of polyferric chloride-humic acid (PFC-HA) flocs in different topological spaces. **Journal of Environmental Sciences**, v. 21, n. 1, p. 41-48, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60009-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60009-7)

WEBER-SHIRK, M. L.; LION, L. W. Fractal models for floc density, sedimentation velocity, and floc volume fraction for high pecelet number reactors. **Environmental Engineering Science**, v. 32, n. 12, p. 978-982, sep. 2015. <https://doi.org/10.1089/ees.2015.0302>

WEISNER, M. R. Kinetics of aggregate formation in rapid mix. **Water Research**, v. 26, n. 3, p. 379-387, mar. 1992. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(92\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0043-1354(92)90035-3)

WU, H. et al. Evaluation of chain architectures and charge properties of various starch-based flocculants for flocculation of humic acid from water. **Water Research**, v. 96, p. 126-135, jun. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.055>

XIAO, F. et al. PIV characterization of flocculation dynamics and floc structure in water treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 379, n. 1, p. 27-35, apr. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.053>

XU, H. et al. Enhanced removal for humic-acid (HA) and coagulation process using carbon nanotubes (CNTs)/polyaluminium chloride (PACl) composites coagulants. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 490, p. 189-199, nov. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.11.047>

XU, Y. et al. The impact of recycling alum-humic-floc (AHF) on the removal of natural organic materials (NOM): Behavior of coagulation and adsorption. **Chemical Engineering Journal**, v. 284, p. 1049-1057, jan. 2016a. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.069>

XU, Y. et al. Effect of reused alum-humic-flocs on coagulation performance and floc characteristics formed by aluminum salt coagulants in humic-acid water. **Chemical Engineering Journal**, v. 287, p. 225-232, mar. 2016b. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.017>

YANG, Z. et al. A new method for calculation of flocculation kinetics combining Smoluchowski model with fractal theory. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 423, p. 11-19, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.01.058>

YAO, M.; NAN, J.; CHEN, T. Effect of particle size distribution on turbidity under various water quality levels during flocculation processes. **Desalination**, v. 354, n. 1, p. 116-124, dec. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.09.029>

YEPES, H. et al. Classification of the porosity in thermally treated coals using a system of computer aided microscopy. **Boletín de Ciencias de la Tierra**, n. 25, p. 81-92, jan./jun. 2009.

YU, W.; GREGORY, J.; CAMPOS, L. The effect of additional coagulant on the re-growth of alum-kaolin flocs. **Separation and Purification Technology**, v. 74, n. 3, p. 305-309, sep. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.06.020>

YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. Breakage and re-formation of alum flocs. **Environmental Engineering Science**, v. 19, n. 4, p. 229-236, 2002. <https://doi.org/10.1089/109287502760271544>

YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. The reversibility of floc breakage. **International Journal of Mineral Processing**, v. 73, p. 251-259, feb. 2004. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00077-2)

ZHAO, Y. Q. Correlations between floc physical properties and optimum polymer dosage in alum sludge conditioning and dewatering. **Chemical Engineering Journal**, v. 92, n. 1-3, p. 227-235, apr. 2003. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00253-X](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00253-X)

ZHONG, R. et al. Effects of humic acid on physical and hydrodynamic properties of kaolin flocs by particle image velocimetry. **Water Research**, v. 45, n. 13, p. 3981-3990, jul. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.05.006>

APÊNDICE A

RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO

Tabela A.1 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 0,25 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
0,25	Água bruta			T _{s1} =1,4 min	T _{s2} =2,8 min		T _{s3} =7,0 min			
pH	Cor aparente (uH)		HCl	NaOH	Mola- ridade	V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹		
7,52	99	22,8	0,2		12M	4,11	89	92	99	
8,21	101	24,7	7,0		0,1M	4,41	86	87	85	
8,21	101	24,7	6,0		0,1M	4,76	87	90	87	
7,52	99	22,8	0,1		12M	5,03	99	99	98	
8,21	101	24,7	5,0		0,1M	5,10	96	89	90	
7,52	99	22,8	3,0		0,1M	6,97	95	97	98	
7,52	99	22,8	2,0		0,1M	7,08	99	99	99	
7,52	99	22,8	1,0		0,1M	7,25	97	96	98	
7,52	99	22,8	-	-	-	7,29	99	99	101	
7,52	99	22,8		1,0	0,1M	7,30	97	99	97	
7,52	99	22,8		2,0	0,1M	7,32	99	100	100	
8,21	101	24,7		1,0	0,1M	7,31	99	97	99	
8,21	101	24,7		3,0	0,1M	7,39	98	99	97	
8,21	101	24,7		4,0	0,1M	7,53	99	97	98	
8,21	101	24,7		5,0	0,5M	9,54	116	111	109	
8,21	101	24,7		6,0	0,5M	9,92	121	109	113	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.2 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 0,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
0,5			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
Água bruta							min	min	min	
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹		
7,63	100	26,3	6,0		0,1M	4,26	97	92	96	
7,63	100	26,3	5,0		0,1M	4,56	93	97	93	
8,04	100	25,7	5,0		0,1M	5,00	93	89	92	
8,04	100	25,7	4,5		0,1M	5,30	97	93	93	
8,04	100	25,7	4,0		0,1M	5,38	98	98	93	
8,04	100	25,7	3,0		0,1M	5,61	94	98	94	
8,04	100	25,7	1,5		0,1M	5,92	102	102	97	
8,04	100	25,7	-	-	-	6,17	92	92	96	
7,63	100	26,3	1,0		0,1M	6,26	105	103	100	
7,63	100	26,3	-	-	-	6,43	107	107	99	
7,63	100	26,3		0,5	0,1M	6,47	105	102	98	
7,52	101	24,7		1,0	0,1M	8,33	104	108	100	
7,52	101	24,7		3,0	0,5M	9,57	125	119	116	
7,52	101	24,7		5,0	0,5M	9,94	127	119	118	
7,52	101	24,7		6,0	0,5M	9,98	125	118	120	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.3 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 0,75 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
0,75			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
Água bruta							min	min	min	
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹		
7,29	100	25,8	6,0		0,1M	4,17	98	95	95	
7,63	100	26,3	5,0		0,1M	4,62	92	94	86	X
7,29	100	25,8	3,5		0,1M	4,86	99	92	82	X
7,29	100	25,8	1,0		0,1M	5,61	101	97	93	X
7,29	100	25,8	-	-	-	6,14	102	99	85	X
7,29	100	25,8		1,0	0,1M	6,41	100	100	79	X
7,29	100	25,8		3,5	0,1M	6,70	107	107	105	
6,78	100	26,5		2,0	0,1M	6,78	97	90	86	X
6,78	100	26,5		4,0	0,1M	7,07	93	94	92	X
6,78	100	26,5		6,0	0,1M	7,61	97	99	94	X
7,29	100	26,3		6,5	0,1M	8,42	107	112	106	X
7,29	100	26,3		9,0	0,1M	9,15	110	110	110	X
7,29	100	26,3		11,5	0,1M	9,50	110	110	108	X
7,29	100	26,3		13,0	0,1M	9,60	115	109	110	X

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.4 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 1,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
1,0			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
Água bruta							min	min	min	
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹		
7,29	100	26,3	6,0		0,1M	4,41	89	85	81	X
6,78	100	26,5	5,0		0,1M	4,76	86	82	75	X
7,29	100	26,3	3,0		0,1M	4,84	95	94	87	X
6,78	100	26,5	3,0		0,1M	5,02	83	94	81	X
6,78	100	26,5	1,0		0,1M	5,66	92	101	92	
6,78	100	25,1	-	-	-	5,89	88	95	91	X
6,78	100	25,1		1,0	0,1M	6,08	100	79	71	X
6,54	100	24,5		0,8	0,5M	6,44	88	86	50	X
6,78	100	25,1		3,5	0,1M	6,81	97	79	75	X
6,78	100	25,1		5,0	0,1M	7,10	93	95	88	
6,78	100	25,1		6,5	0,1M	7,41	94	94	98	
6,78	100	25,9		1,5	0,5M	7,52	103	99	99	
6,78	100	25,1		8,0	0,1M	7,86	98	95	98	
6,78	100	25,9		2,5	0,5M	8,56	105	103	106	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.5 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 1,25 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
1,25			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
Água bruta							min	min	min	
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹		
6,78	100	25,9	6,0		0,1M	4,26	85	79	70	X
6,78	100	25,9	4,5		0,1M	4,51	86	89	70	X
6,78	100	25,9	3,0		0,1M	4,80	90	96	88	X
6,78	100	25,9	1,5		0,1M	5,06	93	95	96	
7,88	100	24,6		0,5	0,5M	6,33	100	102	85	X
7,88	100	24,6		1,0	0,1M	6,35	100	102	87	X
7,88	100	24,6	-	-	-	6,39	101	105	94	X
7,88	100	24,6		1,0	0,5M	6,77	103	103	84	X
7,88	100	24,6		1,5	0,5M	7,00	105	106	106	
7,88	100	24,6		2,0	0,5M	7,47	104	98	102	
7,88	100	24,6		3,0	0,5M	8,70	109	111	108	
7,88	100	24,6		4,5	0,5M	9,45	110	108	113	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.6 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 1,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
1,5			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
Água bruta							min	min	min	
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹		
7,41	99	25,5	6,3		0,1M	3,93	86	85	83	X
7,41	99	25,5	2,5		0,1M	4,68	96	88	87	X
7,41	99	25,5	1,0		0,1M	4,97	101	98	102	
7,41	99	25,5		1,0	0,1M	5,73	108	101	106	
7,41	99	25,5		1,0	0,5M	6,14	86	77	67	X
7,41	99	25,5		2,5	0,5M	6,42	102	110	109	
7,41	99	25,5		3,0	0,1M	6,58	101	92	72	X
7,41	99	25,5		6,0	0,1M	7,26	105	107	104	
7,46	101	25,5		7,2	0,1M	7,52	104	107	106	
7,41	99	25,5		9,0	0,1M	7,90	95	99	101	
7,41	99	25,5		3,0	0,5M	8,45	102	105	107	
7,41	99	25,5		3,5	0,5M	8,77	108	108	107	
7,41	99	25,5		4,0	0,5M	8,96	116	112	107	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.7 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 2,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
2,0			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
Água bruta							min	min	min	
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹		
7,46	101	25,4	6,0		0,1M	4,00	91	92	84	X
7,46	101	25,4	3,0		0,1M	4,47	98	97	85	X
7,46	101	25,4	1,0		0,1M	4,69	105	103	99	X
6,92	100	25,7			-	4,84	98	97	104	
6,92	100	25,7		1,0	0,1M	4,97	105	96	98	
6,92	100	25,7		3,5	0,1M	5,51	98	105	94	
6,92	100	25,7		1,0	0,5M	5,84	97	97	101	
6,92	100	25,7		6,0	0,1M	6,00	85	73	57	X
6,92	100	25,7		1,5	0,5M	6,07	89	82	55	X
6,92	100	25,7		2,0	0,5M	6,37	93	75	64	X
6,92	100	25,7		2,5	0,5M	6,71	102	101	102	
6,92	100	25,7		2,7	0,5M	7,25	102	102	99	
6,92	100	25,7		3,0	0,5M	7,62	95	100	99	
6,92	100	25,7		3,5	0,5M	8,00	96	95	98	
6,92	100	25,7		4,5	0,5M	8,94	105	109	104	
6,92	100	25,7		5,5	0,5M	9,39	104	106	105	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.8 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 2,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
pH	Cor aparente (uH)						min	min	min	
						V _{s1} =5,0	V _{s2} =2,5	V _{s3} =1,0		
						cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹		
6,92	100	25,7	5,5		0,1M	4,20	80	77	68	X
6,92	100	25,7	2,5		0,1M	4,56	87	73	78	X
6,92	100	25,7		1,0	0,1M	4,80	99	99	95	
6,92	100	25,7		3,5	0,1M	5,07	96	99	102	
6,92	100	25,7		6,0	0,1M	5,74	85	84	73	X
6,92	100	25,7		8,5	0,1M	6,09	90	81	36	X
6,62	100	26,2		2,3	0,5M	6,71	91	69	44	X
6,62	100	26,2		2,7	0,5M	6,77	93	82	83	X
6,62	100	26,2		3,0	0,5M	6,87	103	99	100	
6,62	100	26,2		3,5	0,5M	7,49	103	100	105	
6,62	100	26,2		4,0	0,5M	8,04	100	99	103	
6,62	100	26,2		4,5	0,5M	8,13	99	104	102	
6,62	100	26,2		5,0	0,5M	8,44	100	97	100	
6,62	100	26,2		6,0	0,5M	9,32	107	106	105	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.9 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 3,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
pH	Cor aparente (uH)						min	min	min	
						V _{s1} =5,0	V _{s2} =2,5	V _{s3} =1,0		
						cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹		
6,62	100	26,2	6,0		0,1M	4,07	86	81	77	X
6,62	100	26,2	3,0		0,1M	4,54	89	89	77	X
6,62	100	26,2	-	-	-	4,62	103	97	98	
6,62	100	26,2		3,5	0,1M	4,77	99	100	100	
6,62	100	26,2		7,0	0,1M	5,56	102	91	64	X
6,62	100	26,2		2,0	0,5M	6,08	90	83	31	X
6,62	100	26,2		2,5	0,5M	6,00	78	73	40	X
6,62	100	26,2		3,0	0,5M	6,17	93	67	35	X
6,62	100	26,2		3,5	0,5M	6,49	102	91	52	
7,46	100	25,6		4,0	0,5M	7,46	105	103	105	
6,62	100	26,2		4,5	0,5M	7,44	111	99	105	
7,46	100	25,6		5,0	0,5M	8,34	105	103	101	
6,62	100	26,2		5,5	0,5M	8,31	103	108	102	
6,62	100	26,2		6,0	0,5M	8,78	106	106	105	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.10 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 3,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		3,5		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta			HCl	NaOH	Mola- ridade	<i>T</i> _{s1} =1,4		<i>T</i> _{s2} =2,8	<i>T</i> _{s3} =7,0		
pH	Cor aparente (uH)	T (°C)				min		min	min		
							<i>V</i> _{s1} =5,0	<i>V</i> _{s2} =2,5	<i>V</i> _{s3} =1,0		
							cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹		
7,46	100	25,6	6,0		0,1M	3,91	84	86	73	X	
7,46	100	25,6	3,0		0,1M	4,33	93	89	81	X	
7,46	100	25,6		4,0	0,1M	7,73	102	104	106		
7,46	100	25,6		7,5	0,1M	4,96	103	93	97	X	
7,46	100	25,6		2,5	0,5M	5,19	94	84	40	X	
7,46	100	25,6		3,5	0,5M	5,97	85	65	28	X	
7,46	100	25,6		4,0	0,5M	6,77	95	69	34	X	
7,46	100	25,6		4,5	0,5M	6,92	106	105	105		
7,46	100	25,6		5,0	0,5M	7,48	107	105	103		
7,46	100	25,6		5,5	0,5M	7,95	104	104	103		
7,46	100	25,6		6,0	0,5M	8,37	104	107	100		
7,46	100	25,6		6,4	0,5M	8,55	102	107	99		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.11 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 4,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		4,0		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta			HCl	NaOH	Mola- ridade	<i>T</i> _{s1} =1,4		<i>T</i> _{s2} =2,8	<i>T</i> _{s3} =7,0		
pH	Cor aparente (uH)	T (°C)				min		min	min		
							<i>V</i> _{s1} =5,0	<i>V</i> _{s2} =2,5	<i>V</i> _{s3} =1,0		
							cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹		
7,46	100	25,6	5,5		0,1M	4,06	81	85	79	X	
7,46	100	25,6	2,5		0,1M	4,39	89	90	81	X	
7,46	100	25,6		2,0	0,5M	4,73	93	95	90	X	
7,46	100	25,6		3,0	0,5M	5,13	79	61	33	X	
7,46	100	25,6		3,5	0,5M	5,48	83	67	24	X	
7,46	100	25,6		4,0	0,5M	5,94	86	76	13	X	
7,46	100	25,6		4,5	0,5M	6,51	84	79	23	X	
7,46	100	25,6		5,0	0,5M	6,79	108	105	107		
7,46	100	25,6		5,5	0,5M	7,33	104	104	107		
7,46	100	25,6		6,0	0,5M	7,95	110	108	106		
7,45	102	26,3		6,3	0,5M	8,17	107	107	107		
7,45	102	26,3		6,7	0,5M	8,37	104	107	106		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.12 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 4,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		4,5		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta			HCl	NaOH	Mola- ridade	<i>T_{s1}</i> =1,4		<i>T_{s2}</i> =2,8	<i>T_{s3}</i> =7,0		
pH	Cor aparente (uH)	T (°C)							<i>V_{s1}</i> =5,0 cm.min ⁻¹	<i>V_{s2}</i> =2,5 cm.min ⁻¹	<i>V_{s3}</i> =1,0 cm.min ⁻¹
7,45	102	26,3	6,0		0,1M	4,24	98	97	95	X	
7,45	102	26,3	4,0		0,1M	4,41	102	103	95	X	
7,45	102	26,3		1,5	0,5M	4,72	110	111	105		
7,45	102	26,3		2,5	0,5M	4,90	99	101	79	X	
7,45	102	26,3		3,5	0,5M	5,36	105	77	18	X	
7,45	102	26,3		4,0	0,5M	5,76	97	89	35	X	
7,45	102	26,3		4,2	0,5M	6,30	101	86	38	X	
7,45	102	26,3		4,5	0,5M	6,58	98	75	39	X	
7,45	102	26,3		5,5	0,5M	6,77	110	83	27	X	
7,45	102	26,3		6,2	0,5M	7,10	118	117	112		
7,45	102	26,3		6,5	0,5M	7,77	110	113	113		
7,45	102	26,3		7,0	0,5M	8,13	107	110	113		
7,45	102	26,3		7,3	0,5M	8,23	115	113	113		
7,45	102	26,3		7,6	0,5M	8,40	114	110	111		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.13 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 5,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		5,0		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta			HCl	NaOH	Mola- ridade	<i>T_{s1}</i> =1,4		<i>T_{s2}</i> =2,8	<i>T_{s3}</i> =7,0		
pH	Cor aparente (uH)	T (°C)							<i>V_{s1}</i> =5,0 cm.min ⁻¹	<i>V_{s2}</i> =2,5 cm.min ⁻¹	<i>V_{s3}</i> =1,0 cm.min ⁻¹
7,45	100	26,3	6,5		0,1M	4,13	98	88	90	X	
7,45	100	26,3	4,5		0,1M	4,33	92	92	88	X	
6,91	100	25,2		3,0	0,5M	4,75	97	96	59	X	
7,45	100	26,3		3,0	0,5M	4,77	101	94	53	X	
7,45	100	26,3		4,0	0,5M	5,48	98	82	57	X	
6,91	100	25,2		3,5	0,5M	5,79	98	74	41	X	
7,45	100	26,3		5,0	0,5M	6,26	98	51	41	X	
7,45	100	26,3		5,5	0,5M	6,46	96	88	24	X	
7,45	100	26,3		6,5	0,5M	6,99	110	106	104		
7,45	100	26,3		7,0	0,5M	7,55	104	105	104		
7,45	100	26,3		7,5	0,5M	7,91	105	104	102		
7,45	100	26,3		8,0	0,5M	8,22	105	102	104		
7,45	100	26,3		8,5	0,5M	8,41	104	101	101		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.14 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 5,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
5,5			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
Água bruta							min	min	min	
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹		
7,45	100	26,3	6,5		0,1M	4,20	92	87	87	X
7,45	100	26,3	4,0		0,1M	4,35	97	87	80	X
7,45	100	26,3		4,0	0,5M	4,67	96	55	38	X
7,45	100	26,3		5,0	0,5M	4,95	86	70	34	X
7,45	100	26,3		5,5	0,5M	5,35	85	58	27	X
7,07	100	26,7		6,0	0,5M	5,99	102	84	21	X
7,07	100	26,7		6,5	0,5M	6,54	104	68	23	X
7,07	100	26,7		7,0	0,5M	6,54	98	68	26	X
7,07	100	26,7		7,5	0,5M	6,54	90	72	23	X
7,07	100	26,7		8,5	0,5M	7,25	116	117	115	
7,07	100	26,7		9,5	0,5M	7,44	119	116	114	
7,07	100	26,7		10,5	0,5M	8,17	112	112	112	
7,07	100	26,7		11,0	0,5M	8,38	109	109	112	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.15 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 6,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		T (°C)	Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
6,0			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
Água bruta							min	min	min	
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹		
7,30	100	26,9	6,5		0,1M	4,1	95	97	88	X
7,30	100	26,9		1,0	1,0M	4,49	88	79	52	X
7,30	100	26,9		1,5	1,0M	4,63	101	62	23	X
7,30	100	26,9		2,0	1,0M	5,22	99	64	28	X
6,91	100	26,4		2,1	1,0M	5,71	105	73	25	X
7,30	100	26,9		2,5	1,0M	6,20	100	61	15	X
7,30	100	26,9		3,0	1,0M	6,38	106	62	26	X
7,30	100	26,9		3,1	1,0M	7,07	112	112	110	
7,30	100	26,9		3,3	1,0M	7,57	110	110	110	
7,30	100	26,9		3,5	1,0M	7,85	112	110	109	
7,30	100	26,9		4,0	1,0M	8,43	106	107	106	
7,30	100	26,9		4,2	1,0M	8,68	102	106	110	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.16 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 6,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		6,5		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu- -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta			HCl	NaOH	Mola- ridade	<i>T_{s1}</i> =1,4		<i>T_{s2}</i> =2,8	<i>T_{s3}</i> =7,0		
pH	Cor aparente (uH)	T (°C)				min		min	min		
			<i>V_{s1}</i> =5,0	<i>V_{s2}</i> =2,5	<i>V_{s3}</i> =1,0	cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹			
7,30	100	26,9	6,5		0,1M	4,18	94	93	84	X	
7,30	100	26,9		0,5	1,0M	4,47	97	97	70	X	
7,30	100	26,9		1,0	1,0M	4,54	98	80	40	X	
7,30	100	26,9		1,5	1,0M	4,66	96	62	20	X	
7,30	100	26,9		2,0	1,0M	5,04	98	62	15	X	
7,30	100	26,9		2,3	1,0M	5,44	100	69	17	X	
7,30	100	26,9		2,6	1,0M	5,92	101	80	25	X	
7,30	100	26,9		3,0	1,0M	6,47	98	82	28	X	
6,91	100	26,4		3,1	1,0M	6,64	108	61	27	X	
6,91	100	25,2		3,2	1,0M	6,81	102	29	28	X	
6,91	100	26,4		3,5	1,0M	7,08	108	95	81	X	
6,91	100	26,4		3,4	1,0M	7,69	111	80	30	X	
6,91	100	26,4		3,9	1,0M	8,29	106	112	111		
6,91	100	26,4		3,7	1,0M	8,40	113	112	109		
6,91	100	26,4		4,1	1,0M	8,40	110	109	111		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.17 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 7,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		7,0		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu- -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta			HCl	NaOH	Mola- ridade	<i>T_{s1}</i> =1,4		<i>T_{s2}</i> =2,8	<i>T_{s3}</i> =7,0		
pH	Cor aparente (uH)	T (°C)				min		min	min		
			<i>V_{s1}</i> =5,0	<i>V_{s2}</i> =2,5	<i>V_{s3}</i> =1,0	cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹			
7,30	100	26,9	6,5		0,1M	4,10	95	94	82	X	
7,30	100	26,9		1,0	1,0M	4,48	100	87	47	X	
7,30	100	26,9		2,0	1,0M	4,77	97	63	16	X	
7,30	100	26,9		2,3	1,0M	5,08	90	57	19	X	
6,91	100	26,4		2,5	1,0M	5,64	108	76	23	X	
6,91	100	26,4		2,7	1,0M	6,15	110	76	28	X	
6,91	100	26,4		3,1	1,0M	6,48	107	69	25	X	
6,91	100	26,4		3,5	1,0M	7,14	106	55	22	X	
7,15	100	25,8		3,7	1,0M	7,06	103	81	17	X	
7,15	100	25,8		3,8	1,0M	7,58	110	114	112		
7,15	100	25,8		3,9	1,0M	7,95	111	110	111		
7,15	100	25,8		4,1	1,0M	8,38	105	105	107		
7,15	100	25,8		4,3	1,0M	8,63	107	107	106		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.18 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 7,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)			Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu- -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
pH	Cor aparente (uH)	T (°C)					min	min	min	
						V _{s1} =5,0	V _{s2} =2,5	V _{s3} =1,0		
						cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹		
7,15	100	25,8	6,5		0,1M	4,22	96	95	91	X
7,15	100	25,8		1,5	1,0M	4,65	101	81	24	X
7,15	100	25,8		2,3	1,0M	4,99	95	56	20	X
7,15	100	25,8		2,5	1,0M	5,03	95	72	17	X
7,42	100	25,2		2,7	1,0M	5,40	106	86	20	X
7,42	100	25,2		3,2	1,0M	6,29	95	63	22	X
7,42	100	25,2		3,5	1,0M	6,58	89	68	15	X
7,42	100	25,2		3,8	1,0M	7,18	107	85	40	X
7,42	100	25,2		4,0	1,0M	7,54	105	110	107	
7,42	100	25,2		4,2	1,0M	8,07	109	110	106	
7,42	100	25,2		4,5	1,0M	8,53	107	104	105	
7,42	100	25,2		4,8	1,0M	8,74	104	102	100	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.19 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 8,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)			Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu- -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta			HCl	NaOH	Mola- ridade		T _{s1} =1,4	T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0	
pH	Cor aparente (uH)	T (°C)					min	min	min	
						V _{s1} =5,0	V _{s2} =2,5	V _{s3} =1,0		
						cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹	cm.min ⁻¹		
7,15	100	25,8	6,8		0,1M	4,25	91	90	86	X
7,15	100	25,8		1,5	1,0M	4,61	90	64	25	X
7,15	100	25,8		2,5	1,0M	4,99	99	64	8	X
7,15	100	25,8		2,8	1,0M	5,48	95	77	17	X
7,42	100	25,2		3,2	1,0M	5,90	105	87	19	X
7,42	100	25,2		3,5	1,0M	6,35	99	73	19	X
7,42	100	25,2		3,8	1,0M	6,71	94	60	12	X
7,64	100	24,9		4,0	1,0M	7,19	106	59	31	X
7,42	100	25,2		4,2	1,0M	7,57	111	111	109	
7,42	100	25,2		4,5	1,0M	8,17	109	109	106	
7,42	100	25,2		4,8	1,0M	8,58	100	105	107	
7,42	100	25,2		5,3	1,0M	8,86	104	97	102	

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.20 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 8,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		8,5		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta		T (°C)	HCl	NaOH	Mola- ridade	<i>T_{s1}</i> =1,4		<i>T_{s2}</i> =2,8	<i>T_{s3}</i> =7,0		
pH	Cor aparente (uH)					<i>V_{s1}</i> =5,0 cm.min ⁻¹	<i>V_{s2}</i> =2,5 cm.min ⁻¹	<i>V_{s3}</i> =1,0 cm.min ⁻¹			
7,64	100	24,9	7,0		0,1M	4,17	97	97	91	X	
7,64	100	24,9		1,5	1,0M	4,58	99	56	31	X	
7,64	100	24,9		2,7	1,0M	5,07	105	66	12	X	
7,64	100	24,9		3,0	1,0M	5,42	93	76	18	X	
7,64	100	24,9		3,4	1,0M	6,02	103	83	18	X	
7,64	100	24,9		3,8	1,0M	6,53	107	60	12	X	
7,64	100	24,9		4,2	1,0M	6,93	111	62	13	X	
7,64	100	24,9		4,0	1,0M	7,77	113	113	115		
7,64	100	24,9		4,5	1,0M	7,98	118	115	111		
7,64	100	24,9		4,8	1,0M	8,48	107	109	114		
7,64	100	24,9		5,3	1,0M	8,78	105	106	102		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.21 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 9,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		9,0		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta		T (°C)	HCl	NaOH	Mola- ridade	<i>T_{s1}</i> =1,4		<i>T_{s2}</i> =2,8	<i>T_{s3}</i> =7,0		
pH	Cor aparente (uH)					<i>V_{s1}</i> =5,0 cm.min ⁻¹	<i>V_{s2}</i> =2,5 cm.min ⁻¹	<i>V_{s3}</i> =1,0 cm.min ⁻¹			
7,64	100	24,9	7,0		0,1M	4,25	93	96	92	X	
7,64	100	24,9		1,5	1,0M	4,58	93	64	30	X	
7,64	100	24,9		2,7	1,0M	4,89	104	73	13	X	
6,97	100	25,2		3,0	1,0M	5,25	102	39	25	X	
6,97	100	25,2		3,4	1,0M	5,57	109	52	21	X	
6,97	100	25,2		3,6	1,0M	5,84	106	56	15	X	
6,97	100	25,2		3,8	1,0M	6,09	106	68	15	X	
6,97	100	25,2		4,2	1,0M	6,61	103	52	17	X	
6,97	100	25,2		4,4	1,0M	6,96	96	55	26	X	
6,97	100	25,2		4,7	1,0M	7,54	109	106	111		
6,97	100	25,2		5,0	1,0M	8,22	112	109	105		
6,97	100	25,2		5,2	1,0M	8,37	105	105	103		
6,97	100	25,2		5,5	1,0M	8,65	101	104	105		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.22 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 9,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		9,5		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta		T (°C)	HCl	NaOH	Mola- ridade	T _{s1} =1,4		T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0		
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹			
6,97	100	25,2	7,5		0,1M	4,17	90	84	83	X	
6,97	100	25,2		1,5	1,0M	4,51	89	87	33	X	
6,97	100	25,2		2,9	1,0M	4,83	99	72	27	X	
6,97	100	25,2		3,4	1,0M	5,32	101	75	24	X	
7,38	100	26,5		3,5	1,0M	6,11	103	73	11	X	
6,97	100	25,2		4,2	1,0M	6,35	104	73	22	X	
7,38	100	26,5		4,0	1,0M	6,79	105	59	14	X	
7,38	100	26,5		4,4	1,0M	6,94	95	58	16	X	
7,38	100	26,5		4,7	1,0M	7,47	117	102	93	X	
7,38	100	26,5		5,0	1,0M	8,14	110	115	105		
7,38	100	26,5		5,4	1,0M	8,56	109	106	104		
7,38	100	26,5		5,7	1,0M	8,78	103	105	104		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.23 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 10,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		10,0		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta		T (°C)	HCl	NaOH	Mola- ridade	T _{s1} =1,4		T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0		
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹			
7,38	100	26,5	7,0		0,1M	4,24	92	91	81	X	
7,38	100	26,5		1,5	1,0M	4,51	109	73	35	X	
7,38	100	26,5		2,9	1,0M	4,79	114	57	28	X	
7,38	100	26,5		3,1	1,0M	4,93	111	62	15	X	
7,38	100	26,5		3,5	1,0M	5,25	111	80	19	X	
7,38	100	26,5		4,0	1,0M	5,89	103	67	11	X	
7,38	100	26,5		4,5	1,0M	6,36	106	49	13	X	
7,38	100	26,5		4,7	1,0M	6,75	111	53	13	X	
7,38	100	26,5		5,0	1,0M	7,43	109	65	42	X	
7,66	100	25,9		5,4	1,0M	8,45	118	116	114		
7,66	100	25,9		5,7	1,0M	8,67	119	114	113		
7,66	100	25,9		6,0	1,0M	8,88	107	111	110		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.24 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 10,5 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		10,5		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta		T (°C)	HCl	NaOH	Mola- ridade	T _{s1} =1,4		T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0		
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹			
7,66	100	25,9	7,5		0,1M	4,13	100	96	82	X	
7,66	100	25,9		1,5	1,0M	4,49	105	72	32	X	
7,66	100	25,9		2,9	1,0M	4,79	106	79	18	X	
7,66	100	25,9		3,5	1,0M	5,05	104	72	16	X	
7,66	100	25,9		3,8	1,0M	5,41	110	55	21	X	
7,66	100	25,9		4,2	1,0M	5,97	103	80	12	X	
7,66	100	25,9		4,6	1,0M	6,36	113	55	12	X	
7,66	100	25,9		4,8	1,0M	6,61	118	60	11	X	
7,66	100	25,9		5,0	1,0M	6,82	106	44	10	X	
7,66	100	25,9		5,3	1,0M	7,42	109	42	21		
7,66	100	25,9		5,6	1,0M	8,19	111	116	113		
7,66	100	25,9		5,8	1,0M	8,49	111	114	113		
7,66	100	25,9		6,1	1,0M	8,66	110	111	110		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.25 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 11,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		11,0		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta		T (°C)	HCl	NaOH	Mola- ridade	T _{s1} =1,4		T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0		
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹			
7,66	100	25,9	7,5		0,1M	4,18	99	98	87	X	
6,91	100	25,2		1,5	1,0M	4,47	97	79	36	X	
6,91	100	25,2		3,5	1,0M	4,90	109	77	27	X	
6,91	100	25,2		3,9	1,0M	5,68	102	85	23	X	
6,91	100	25,2		4,3	1,0M	5,94	99	68	23	X	
6,91	100	25,2		4,8	1,0M	6,45	107	74	25	X	
6,91	100	25,2		5,2	1,0M	6,89	106	53	25	X	
6,91	100	25,2		5,4	1,0M	7,34	107	46	23	X	
6,91	100	25,2		5,6	1,0M	8,02	119	113	109	X	
6,91	100	25,2		5,8	1,0M	8,29	114	114	112		
6,91	100	25,2		6,3	1,0M	8,69	107	110	110		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.26 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 12,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		12,0		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta		T (°C)	HCl	NaOH	Mola- ridade	T _{s1} =1,4		T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0		
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹			
6,91	100	25,2	7,5		0,1M	4,13	94	91	86	X	
6,91	100	25,2		1,5	1,0M	4,42	97	72	33	X	
6,91	100	25,2		3,6	1,0M	4,81	106	45	28	X	
6,91	100	25,2		4,4	1,0M	5,47	113	54	23	X	
6,91	100	25,2		4,9	1,0M	6,03	104	66	28	X	
6,91	100	25,2		5,3	1,0M	6,44	109	61	21	X	
6,91	100	25,2		5,5	1,0M	6,64	103	57	22	X	
6,91	100	25,2		5,8	1,0M	7,12	104	42	22	X	
7,09	100	26,6		5,8	1,0M	7,47	106	45	19	X	
6,91	100	25,2		6,0	1,0M	7,83	113	115	112	X	
6,91	100	25,2		6,1	1,0M	8,00	111	114	108	X	
6,91	100	25,2		6,5	1,0M	8,41	113	114	113		
6,91	100	25,2		6,8	1,0M	8,60	111	106	108		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.27 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 13,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		13,0		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta		T (°C)	HCl	NaOH	Mola- ridade	T _{s1} =1,4		T _{s2} =2,8	T _{s3} =7,0		
pH	Cor aparente (uH)					V _{s1} =5,0 cm.min ⁻¹	V _{s2} =2,5 cm.min ⁻¹	V _{s3} =1,0 cm.min ⁻¹			
6,91	100	25,2	7,5		0,1M	4,13	92	87	85	X	
7,09	100	26,6		2,0	1,0M	4,46	101	76	24	X	
7,09	100	26,6		4,0	1,0M	4,88	103	60	22	X	
7,09	100	26,6		4,5	1,0M	5,20	109	83	21	X	
7,09	100	26,6		4,6	1,0M	5,40	107	54	19	X	
7,09	100	26,6		5,0	1,0M	5,74	110	44	15	X	
7,09	100	26,6		5,3	1,0M	6,13	112	69	9	X	
7,09	100	26,6		5,5	1,0M	6,43	109	70	13	X	
7,09	100	26,6		5,8	1,0M	6,71	97	52	8	X	
7,09	100	26,6		6,0	1,0M	6,95	104	43	11	X	
7,09	100	26,6		6,2	1,0M	7,03	111	62	13	X	
7,32	100	26,5		6,2	1,0M	7,23	113	44	18	X	
7,32	100	26,5		6,5	1,0M	7,77	110	90	63	X	
7,32	100	26,5		7,0	1,0M	8,49	115	117	113		
7,32	100	26,5		7,5	1,0M	8,80	111	110	111		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.28 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 14,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		14,0		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu- -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta		T (°C)	HCl	NaOH	Mola- ridade	<i>T_{s1}</i> =1,4		<i>T_{s2}</i> =2,8	<i>T_{s3}</i> =7,0		
pH	Cor aparente (uH)					<i>V_{s1}</i> =5,0 cm.min ⁻¹	<i>V_{s2}</i> =2,5 cm.min ⁻¹	<i>V_{s3}</i> =1,0 cm.min ⁻¹			
7,32	100	26,5	7,5		0,1M	4,07	97	86	84	X	
7,32	100	26,5		2,0	1,0M	4,41	101	72	18	X	
7,32	100	26,5		4,5	1,0M	4,84	110	65	23	X	
7,32	100	26,5		4,9	1,0M	5,17	112	83	15	X	
7,32	100	26,5		5,0	1,0M	5,31	105	45	14	X	
7,32	100	26,5		5,3	1,0M	5,98	107	53	15	X	
7,32	100	26,5		5,8	1,0M	6,21	109	54	16	X	
7,32	100	26,5		6,0	1,0M	6,42	112	46	12	X	
7,32	100	26,5		6,3	1,0M	6,64	111	55	19	X	
7,32	100	26,5		6,5	1,0M	6,89	106	53	10	X	
7,32	100	26,5		6,7	1,0M	7,44	105	48	13	X	
7,32	100	26,5		6,9	1,0M	7,83	110	57	37	X	
7,32	100	26,5		7,2	1,0M	8,17	118	112	109	X	
7,32	100	26,5		7,5	1,0M	8,51	109	116	114		
7,32	100	26,5		7,8	1,0M	8,64	115	116	113		

Fonte: Autora (2018)

Tabela A.29 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com dosagem de 15,0 mg.l⁻¹ de Al³⁺ para construção do diagrama de coagulação

Dosagem de Al ³⁺ (mg.l ⁻¹)		15,0		Acidificante e Alcalinizante			pH de coagu- -lação	Cor aparente (uH)			Alte- ração da água
Água bruta		T (°C)	HCl	NaOH	Mola- ridade	<i>T_{s1}</i> =1,4		<i>T_{s2}</i> =2,8	<i>T_{s3}</i> =7,0		
pH	Cor aparente (uH)					<i>V_{s1}</i> =5,0 cm.min ⁻¹	<i>V_{s2}</i> =2,5 cm.min ⁻¹	<i>V_{s3}</i> =1,0 cm.min ⁻¹			
7,32	100	26,5	7,0		0,1M	4,18	93	94	87	X	
7,32	100	26,5		2,5	1,0M	4,46	107	51	24	X	
7,32	100	26,5		4,8	1,0M	4,92	112	75	19	X	
7,32	100	26,5		5,2	1,0M	5,48	116	85	12	X	
6,96	100	26,4		5,5	1,0M	5,82	118	76	11	X	
6,96	100	26,4		5,9	1,0M	6,21	111	58	15	X	
6,96	100	26,4		6,3	1,0M	6,52	116	44	9	X	
6,96	100	26,4		6,5	1,0M	6,63	111	70	6	X	
6,96	100	26,4		6,7	1,0M	6,69	122	46	14	X	
6,96	100	26,4		6,9	1,0M	7,05	116	67	15	X	
6,96	100	26,4		7,2	1,0M	7,66	117	40	16	X	
6,96	100	26,4		7,4	1,0M	7,95	116	29	20	X	
6,96	100	26,4		7,7	1,0M	8,43	120	122	99	X	
6,96	100	26,4		8,0	1,0M	8,62	120	117	122	X	

Fonte: Autora (2018)