

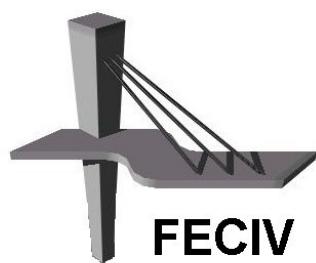


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DETERMINAÇÃO DE RELAÇÃO ENTRE
PARÂMETROS REPRESENTATIVOS DA
DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS
(DTP), DIMENSÃO FRACTAL (D_f) E O ÍNDICE DE
FLOCULAÇÃO (IF) OBTIDO POR MEIO DO
EQUIPAMENTO DE ANÁLISE DE DISPERSÃO
FOTOMÉTRICA (PDA)**

SABRINA DE OLIVEIRA ANÍCIO



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



Sabrina de Oliveira Anício

**DETERMINAÇÃO DE RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS
REPRESENTATIVOS DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO
DE PARTÍCULAS (DTP), DIMENSÃO FRACTAL (D_f) E O
ÍNDICE DE FLOCUAÇÃO (IF) OBTIDO POR MEIO DO
EQUIPAMENTO DE ANÁLISE DE DISPERSÃO
FOTOMÉTRICA (PDA)**

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: André Luiz de Oliveira

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A597 Anicio, Sabrina de Oliveira, 1994-
2019 Determinação de relação entre parâmetros representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP), Dimensão Fractal (Df) e o Índice de Floculação (IF) obtido por meio do equipamento de Análise de Dispersão Fotométrica (PDA) [recurso eletrônico] / Sabrina de Oliveira Anicio. - 2019.

Orientador: André Luiz de Oliveira.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2415>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

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

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

| | | | | | |
|------------------------------------|---|-----------------|----------|-----------------------|-----------|
| Programa de Pós-Graduação em: | Engenharia Civil | | | | |
| Defesa de: | Dissertação de Mestrado Acadêmico, 246, PPGEC | | | | |
| Data: | 19 de setembro de 2019 | Hora de início: | 14h 0min | Hora de encerramento: | 16h 30min |
| Matrícula do Discente: | 11722ECV004 | | | | |
| Nome do Discente: | Sabrina de Oliveira Anício | | | | |
| Título do Trabalho: | Correlação entre parâmetros representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP), dimensão fractal (Df) e o Índice de Flocação (IF) obtido por meio do equipamento de Análise de Dispersão Fotométrica (PDA) | | | | |
| Área de concentração: | Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental | | | | |
| Linha de pesquisa: | Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental | | | | |
| Projeto de Pesquisa de vinculação: | Tratamento convencional e avançado de água de abastecimento e resíduária | | | | |

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 Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Fábio Augusto do Amaral – IQ/UFU, Rodrigo Braga Moruzzi – IGCE/UNESP e André Luiz de Oliveira - FECIV/UFU orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. André Luiz de Oliveira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz 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. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Augusto do Amaral, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/09/2019, às 09:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **RODRIGO BRAGA MORUZZI, Usuário Externo**, em 27/09/2019, às 10:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1538148** e o código CRC **55C4D297**.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo apoio e força em todos os momentos.

À minha mãe Conceição, meu pai José Márcio e meus irmãos Bruna, José Márcio e Fernanda, pelo amor incondicional, o apoio e a compreensão de sempre.

À Hellen pelo companheirismo, amor e pelo suporte que tem me dado.

Ao meu orientador André, por toda a paciência, dedicação, e pela inspiração, tanto enquanto pesquisador como enquanto professor.

À Verônica, por toda a ajuda e parceria durante a fase experimental da pesquisa.

À técnica Aline, pela paciência e ajuda prestada no laboratório de saneamento.

À todos os professores e técnicos administrativos da FECIV.

À Capes pela concessão da bolsa de Mestrado.

"Não é possível refazer este país,
democratizá-lo, humanizá-lo, torná-lo
sério, com adolescentes brincando de
matar gente, ofendendo a vida, destruindo
o sonho, inviabilizando o amor. Se a
educação sozinha não transformar a
sociedade, sem ela tampouco a sociedade
muda. (Paulo Freire)

Anício, S. O. Determinação de relação entre parâmetros representativos da Distribuição de Tamanho de partículas (DTP), Dimensão fractal (D_f) e o Índice de Floculação (IF) obtido por meio do equipamento de análise de dispersão fotométrica (*PDA*). 94 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

RESUMO

As etapas de coagulação e floculação são cruciais para o tratamento convencional de água, uma vez que as características dos flocos formados são determinantes para os processos de separação subsequentes. Dessa forma, o estudo das características desses flocos é importante para a melhoria dos processos. Neste sentido, este estudo teve como objetivo a obtenção de parâmetros de Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) e Dimensão fractal (D_f) e relacioná-los com o Índice de Floculação (IF), obtido a partir do equipamento “*Photometric Dispersion Analyser*” (*PDA*), projetando a determinação dos primeiros utilizando o IF como parâmetro de cálculo. Os ensaios foram conduzidos em equipamento de bancada *Jartest* para diversas condições padronizadas de coagulação/floculação para água com turbidez de 10, 50 e 100 UNT. Os parâmetros DTP e D_f foram obtidos por meio de aquisição de imagens digitais as quais foram aplicadas técnicas de processamentos e análise a partir da utilização do software *Image J*, enquanto o IF foi obtido por meio do equipamento *PDA*. Os dados foram relacionados utilizando-se o software *R* por meio de regressões lineares e não lineares, sendo feita também a análise ANOVA para avaliação da significância estatística das equações modeladas. Ao final do estudo, concluiu-se que algumas das equações obtidas podem ser utilizadas como forma de obtenção dos parâmetros de DTP para os coagulantes Sulfato de Alumínio e Policloreto de Alumínio, destacando-se as equações que visam determinar o valor do parâmetro característico da DTP (β_1) calculado por meio do diâmetro equivalente dos flocos.

Palavras-chave: Relação – Distribuição de tamanho de partículas – Dimensão fractal.

Anício, S. O. Determination of relation between Particle Size Distribution parameters (PSD), Fractal Dimension (D_f) and the Flocculation Index (FI) obtained by the Photometric Dispersion Analyzer (PDA). 94 p. Master Thesis, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

ABSTRACT

Coagulation and flocculation steps are crucial for conventional water treatment once the characteristics of the formed flakes are important for the subsequent separation processes. Thus, the study of the characteristics of these flakes is important to enhance the process. In these terms, this study aimed to obtain Particle Size Distribution (PSD) and Fractal Dimension (D_f) parameters and relate them with the Flocculation Index (FI), obtained from the Photometric Dispersion Analyzer. (PDA), projecting the determination of the PSD parameters and D_f using the FI as the calculation parameter. The tests were conducted on a Jartest bench equipment for several standard coagulation/flocculation conditions for 10, 50 and 100 NTU turbidity water. The PSD and D_f parameters were obtained through digital image acquisition which were applied processing techniques and analysis using Image J software, while the FI was obtained through the PDA equipment. Data were related using the software R through linear and nonlinear regressions, and ANOVA analysis was also performed to evaluate the statistical significance of the modeled equations. At the end of the study, it was concluded that some of the obtained equations can be used as a tool to obtain the PSD parameters for the Aluminum Sulfate and Aluminum Polychloride coagulants, highlighting the equations that aim to determine the value of the characteristic parameter of the PSD (β_1) calculated by means of the equivalent diameter of the flakes.

Key-word: Relation – Particle size distribution – Fractal dimension.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

- α – Parâmetro de forma da função gama
 α_{Deq} – Parâmetro de forma da função gama calculado a partir do diâmetro equivalente
 $\alpha_{\text{Área}}$ – Parâmetro de forma da função gama calculado a partir da área
 α_{Feret} – Parâmetro de forma da função gama calculado a partir do diâmetro de Feret
 β_1 – Parâmetro representativo da DTP
 β_1_{Deq} – Parâmetro representativo da DTP calculado a partir do diâmetro equivalente
 $\beta_1_{\text{Área}}$ – Parâmetro representativo da DTP calculado a partir da área
 β_1_{Feret} – Parâmetro representativo da DTP calculado a partir do diâmetro de Feret
 β_2 – Parâmetro de escala da função gama
 β_2_{Deq} – Parâmetro de escala da função gama calculado a partir diâmetro equivalente
 $\beta_2_{\text{Área}}$ – Parâmetro de escala da função gama calculado a partir da área
 β_2_{Feret} – Parâmetro de escala da função gama calculado a partir do diâmetro de Feret
 D_f – Dimensão fractal
 dp – Média geométrica dos diâmetros inferior e superior de cada classe
 DTP – Distribuição de Tamanho de Partículas
 Δdp – Variação de dp
 ETA – Estação de Tratamento de Água
 Γ – Função gama
 IF – Índice de Floculação
 mg – Miligramas
 ml – Mililitros
 ΔN – Variação incremental no número de partículas
 pH – Potencial hidrogeniônico
 R^2 – Coeficiente de determinação
 UNT – Unidade Nefelométrica de Turbidez

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| 2. OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 Objetivo geral..... | 16 |
| 2.1 Objetivos específicos..... | 16 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 3.1 Processos de separação entre partículas sólidas e líquidos..... | 17 |
| 3.1.1 Coagulação..... | 18 |
| <i>3.1.1.1 Coagulantes químicos.....</i> | 19 |
| 3.1.2 Floculação | 20 |
| 3.2 Propriedades dos flocos..... | 21 |
| 3.3 Influência do gradiente médio de velocidade | 25 |
| 3.4 Monitoramento contínuo da floculação..... | 28 |
| 3.5 Análises estatísticas | 33 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 36 |
| 4.1 Considerações Iniciais | 36 |
| 4.2 Preparação das soluções e água de estudo | 36 |
| 4.3 Equipamentos | 37 |
| 4.4 Procedimentos de execução dos ensaios | 38 |
| 4.5 Tratamento das imagens | 40 |
| 4.6 Definição da DTP | 43 |
| 4.6.1 Definição do parâmetro β_1 | 44 |
| 4.6.2 Definição dos parâmetros α e β_2 da distribuição gama | 44 |
| 4.7 Determinação da dimensão fractal | 45 |

| | |
|--|----|
| 4.8 Determinação das relações..... | 45 |
| 4.8.1 Determinação por meio do software R | 46 |
| 4.9 Validação dos resultados..... | 47 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 49 |
| 5.1 Evolução dos parâmetros..... | 49 |
| 5.1.1 Cloreto Férrico | 49 |
| 5.1.2 Policloreto de Alumínio | 52 |
| 5.1.2 Sulfato de Alumínio | 54 |
| 5.2 Relações obtidas para o IF utilizando-se o Cloreto Férrico como coagulante ... | 57 |
| 5.2.1 Parâmetros β_1 e D_f | 57 |
| 5.2.1.1 Parâmetro β_1 Deq em função de IF..... | 59 |
| 5.2.1.2 Parâmetro β_1 Área em função de IF..... | 59 |
| 5.2.1.3 Parâmetro β_1 Feret em função de IF | 59 |
| 5.2.1.4 Parâmetro D_f em função de IF | 60 |
| 5.2.2 Parâmetros α e β_2 | 60 |
| 5.2.2.1 Parâmetros α Deq e β_2 Deq..... | 60 |
| 5.2.2.2 Parâmetros α Área e β_2 Área..... | 62 |
| 5.2.2.3 Parâmetros α Feret e β_2 Feret | 64 |
| 5.3 Relações para o IF utilizando-se Policloreto de Alumínio como coagulante..... | 66 |
| 5.3.1 Parâmetros β_1 e D_f | 66 |
| 5.3.1.1 Parâmetro β_1 Deq em função de IF..... | 68 |
| 5.3.1.2 Parâmetro β_1 Área em função de IF..... | 69 |
| 5.3.1.3 Parâmetro β_1 Feret em função de IF | 69 |
| 5.3.1.4 Parâmetro D_f em função de IF | 69 |
| 5.3.2 Parâmetros α e β_2 | 70 |
| 5.3.2.1 Parâmetros α Deq e β_2 Deq..... | 70 |
| 5.3.2.2 Parâmetros α Área e β_2 Área..... | 72 |
| 5.3.2.3 Parâmetros α Feret e β_2 Feret | 74 |
| 5.4 Relações obtidas para o IF utilizando-se o Sulfato de Alumínio como coagulante..... | 75 |
| 5.4.1 Parâmetros β_1 e D_f | 75 |

| | |
|---|-----------|
| <i>5.4.1.1 Parâmetro β_1 Deq em função de IF.....</i> | 78 |
| <i>5.4.1.2 Parâmetro β_1 Área em função de IF.....</i> | 78 |
| <i>5.4.1.3 Parâmetro β_1 Feret em função de IF.....</i> | 79 |
| <i>5.4.1.4 Parâmetro D_f em função de IF</i> | 79 |
| 5.4.2 Parâmetros α e β_2..... | 79 |
| <i>5.4.2.1 Parâmetros α Deq e β_2 Deq.....</i> | 79 |
| <i>5.4.2.2 Parâmetros α Área e β_2 Área.....</i> | 81 |
| <i>5.4.2.3 Parâmetros α Feret e β_2 Feret.....</i> | 83 |
| 5.5 Comportamento dos dados de β_1 e D_f | 85 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 87 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Variações de RMS em um fluido | 32 |
| Figura 2: Esquema de montagem dos equipamentos | 38 |
| Figura 3: Exemplo de imagem obtida durante os experimentos | 40 |
| Figura 4: Exemplo de imagem recortada (detalhe da Figura 3) utilizando-se o JPEGCrops | 41 |
| Figura 5: Calibração das imagens pelo software ImageJ | 42 |
| Figura 6: Binarização das imagens | 43 |
| Figura 7: Exemplo de sinal emitido pelo <i>PDA 3000</i> | 46 |
| Figura 8: Evolução dos parâmetros β_1 e da D_f durante a floculação com Cloreto Férrico como coagulante | 50 |
| Figura 9: Evolução do IF ao longo da floculação com Cloreto Férrico como coagulante .. | 51 |
| Figura 10: Evolução dos parâmetros β_1 e da D_f no desenvolvimento da floculação com Policloreto de Alumínio como coagulante | 52 |
| Figura 11: Evolução do IF no desenvolvimento da floculação com Policloreto de Alumínio como coagulante | 53 |
| Figura 12: Evolução dos parâmetros β_1 e da D_f no desenvolvimento da floculação com Sulfato de Alumínio como coagulante | 55 |
| Figura 13: Evolução do IF ao longo da floculação para o Sulfato de Alumínio | 56 |
| Figura 14: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros β_1 Deq, β_1 Área, β_1 Feret e D_f com Cloreto Férrico como coagulante..... | 57 |
| Figura 15: Gráficos de comparação entre valores dos parâmetros medidos nos ensaios de validação e calculados por meio das regressões obtidas | 58 |
| Figura 16: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Deq e β_2 Deq para o Cloreto Férrico..... | 60 |
| Figura 17: Gráficos de comparação entre valores dos parâmetros medidos nos ensaios de validação e calculados por meio das regressões obtidas | 61 |
| Figura 18: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Área e β_2 Área para o Cloreto Férrico..... | 62 |
| Figura 19: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das equações de regressão obtidas para os experimentos de validação..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 20: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Feret e β_2 Feret para o Cloreto Férrico..... | 64 |
| Figura 21: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação | 65 |
| Figura 22: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros β_1 Deq, β_1 Área, β_1 Feret e D_f para o Policloreto de Alumínio..... | 66 |
| Figura 23: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação | 68 |
| Figura 24: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Deq e β_2 Deq para o Policloreto de Alumínio | 70 |
| Figura 25: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação | 71 |
| Figura 26: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Área e β_2 Área para o Policloreto de Alumínio | 72 |
| Figura 27: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação | 73 |
| Figura 28: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Feret e β_2 Feret para o Policloreto de Alumínio | 74 |
| Figura 29: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação | 75 |
| Figura 30: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros β_1 Deq, β_1 Área, β_1 Feret e D_f com Sulfato de Alumínio como coagulante | 76 |
| Figura 31: Gráficos de comparação entre valores dos parâmetros medidos nos ensaios de validação e calculados por meio das regressões obtidas | 77 |
| Figura 32: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Deq e β_2 Deq para o Sulfato de Alumínio..... | 80 |
| Figura 33: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação | 81 |
| Figura 34: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Área e β_2 Área para o Sulfato de Alumínio | 82 |
| Figura 35: Gráficos de comparação entre valores dos parâmetros medidos nos ensaios de validação e calculados por meio das regressões obtidas | 83 |

| | |
|--|----|
| Figura 36: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Feret e β_2 Feret para o Sulfato de Alumínio | 84 |
| Figura 37: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Dosagem de coagulante x pH de coagulação | 39 |
| Tabela 2: Dosagens de coagulantes e valores de turbidez..... | 48 |
| Tabela 3: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 14..... | 58 |
| Tabela 4: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 16..... | 61 |
| Tabela 5: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 18..... | 63 |
| Tabela 6: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 20..... | 65 |
| Tabela 7: Parâmetros obtidos pela regressão e análise ANOVA dos dados da Figura 22 .. | 67 |
| Tabela 8: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 24..... | 71 |
| Tabela 9: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 26..... | 73 |
| Tabela 10: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 28..... | 74 |
| Tabela 11: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 30..... | 77 |
| Tabela 12: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 32..... | 80 |
| Tabela 13: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 34..... | 82 |
| Tabela 14: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 36..... | 84 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O saneamento faz parte de uma série de medidas que objetiva proporcionar à população de uma determinada região melhores condições ambientais, prevenindo doenças e beneficiando a qualidade de vida. O tratamento de água é uma das medidas constituintes do saneamento básico, que objetiva o fornecimento de água potável para o consumo populacional.

O processo convencional de tratamento de água engloba uma série de etapas que vão desde a captação da água nos cursos d'água, e envolve, principalmente, os processos de coagulação, floculação, decantação, filtração e cloração. Neste tipo de sistema, as etapas de coagulação e floculação são consideradas as mais importantes, das quais depende o sucesso das etapas subsequentes.

Dessa forma, estudos relacionados aos fatores que influenciam essas duas etapas do tratamento são importantes para a otimização dos processos. O tratamento de imagens obtidas durante essas etapas vem sendo utilizado como forma de acompanhar a evolução e comportamento dos flocos produzidos, por meio da DTP e D_f . Além da análise dos dados obtidos por meio do processamento das imagens, o índice de floculação (IF) apresenta-se também como um meio de se analisar a evolução dessas partículas ao longo do período de floculação. O IF, obtido de forma simples por meio do *PDA*, apresenta valores que acompanham diretamente o desenvolvimento do tamanho médio dos flocos formados durante a floculação ao longo do tempo.

Neste sentido, a premissa desse trabalho é que as equações de relação obtidas a partir da DTP e D_f com o IF, para um conjunto de dados decorrentes de ensaios padronizados de coagulação/floculação, permitem a estimativa de parâmetros da DTP e D_f a partir do IF obtido de conjuntos de dados distintos dos que originaram as equações de relação. Espera-se, assim, o acompanhamento e conhecimento destes parâmetros em tempo real da evolução da floculação.

Esse trabalho é dividido em seis capítulos, organizados como se segue:

- Capítulo 1: é apresentado uma breve introdução, explicitando de forma sucinta do que se trata o estudo;
- Capítulo 2: apresentação dos objetivos gerais e específicos;
- Capítulo 3: revisão bibliográfica dos estudos utilizados como base para a pesquisa;
- Capítulo 4: exposição e discussão acerca dos resultados obtidos;
- Capítulo 5: conclusão final.

CAPÍTULO 2

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar equações de relação de parâmetros de distribuição de tamanho e morfologia de flocos obtidos por técnica de aquisição e análise de imagens, com o índice de flocação (IF) obtido por meio do equipamento *PDA*, durante simulação do processo de flocação em equipamento de bancada.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- Obter equações de relação dos parâmetros de DTP e valores de D_f com o IF;
- Verificar se as equações de relação podem estimar os parâmetros da DTP e D_f de um conjunto de dados distintos dos utilizados para obtenção destas equações.

CAPÍTULO 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos de separação entre partículas sólidas e líquidos

A separação entre líquidos e partículas sólidas é uma etapa de grande importância nos processos de tratamento da água. As características do fluido exercem influência direta nessas operações (MORUZZI et al., 2017).

A variedade de substâncias presentes na água é resultado de interações biológicas, hidrológicas e geológicas, parte destas substâncias é composta por matéria orgânica de atividades biológicas, como aquelas realizadas por algas e pela vida microbiana, quanto por introdução no corpo d'água (SILLANPAA et al., 2018).

Segundo Li et al. (2008) as partículas presentes na água se apresentam em grande quantidade e variados tamanhos, desde coloides até aglomerados de milímetros. Serra e Casamitjana (1998) afirmam que as alterações nas características de partículas podem ocorrer de forma natural em lagos e oceanos que passam por processos de agregação e ruptura, tendo, portanto, mudanças de tamanho, densidade e morfologia. Entretanto, melhorar as condições dos processos de coagulação e floculação é interessante do ponto de vista do sistema de tratamento. A grande quantidade de partículas coloidais presentes nos cursos de água naturais geralmente requer, para sua remoção, adição de coagulantes de modo que haja formação de flocos possibilitando sua remoção por processos físicos/químicos como sedimentação e filtração (SPICER e PRATSINIS, 1996a; BOUYER, LINÉ e DO-QUANG, 2004). Esses flocos são formados durante a coagulação e a floculação (MORUZZI et al., 2017), processos que constituem a parte principal de sistemas de tratamento da água (BOYER, LINÉ e DO-QUANG, 2004).

Estes processos são extremamente importantes pois deles dependem o êxito das etapas posteriores que constituem o tratamento da água (OLIVEIRA et al., 2015a; MORUZZI et

al., 2016). O gradiente médio de velocidade, o tempo de mistura e a dosagem de coagulante são alguns dos parâmetros relacionados a esses processos e que interferem na qualidade da água produzida (CHENG et al., 2010). Na coagulação, após a adição de produtos químicos, a suspensão é submetida a intensa agitação, com o propósito de dispersar o produto de forma homogênea, e em seguida, na floculação, segue-se um período mais longo de agitação lenta. (YUKSELEN e GREGORY, 2002). Na coagulação ocorre a desestabilização das partículas, que, entrando em contato umas com as outras tem tendência inicial a terem seu tamanho aumentado de forma rápida. Na floculação os agregados aumentam de tamanho e tornam-se mais suscetíveis à ruptura, o que, depois de certo tempo, favorece o estado pseudo-estável de tamanho (XU, et al., 2011).

3.1.1 Coagulação

No tratamento de água o processo de coagulação é responsável pela desestabilização das partículas (MORUZZI et al., 2017; BOUYER, LINÉ e DO-QUANG, 2014) a partir da introdução de agente coagulante em unidade de mistura rápida com gradiente médio de mistura na ordem de 800s^{-1} (MORUZZI et al., 2016). A coagulação pode ser definida como um processo físico-químico que neutraliza as cargas elétricas da superfície das partículas e reduz o potencial de repulsão da dupla camada elétrica existente nos coloides. Assim, essas micropartículas se aglomeram em partículas de maiores tamanhos (SILLANPAA et al., 2018). O desempenho desse processo tem relação direta com as características da superfície das partículas (LI et al., 2008).

O processo de agregação é importante de modo que as características das partículas produzidas podem ser controladas por esse processo. Nesse procedimento, partículas menores (da ordem de nanômetros a micrômetros) se juntam em *clusters* maiores (com tamanhos de micrômetros a milímetros). Alguns parâmetros se mostram importantes com relação à essa etapa, entre esses o meio em que se encontra o fluxo, o volume de partículas sólidas e a dosagem de coagulantes (SOOS et al., 2007).

O processo de agregação em fluxos onde há turbulência pode ocorrer devido a inúmeros mecanismos físicos, entre eles a sedimentação diferenciada, valores instantâneos locais dos gradientes de velocidade do fluido e o movimento Browniano (os pares de aglomerados se

colidem por sua difusão mútua). A taxa de agregação sofre influência de fatores tais como as tensões de cisalhamento, características e dimensões das partículas primárias (partículas presentes na água bruta), a composição da porção líquida da suspensão e as condições de fluxo do meio (SOOS et al., 2007).

Xu et al. (2011) apontam que na coagulação há um baixo crescimento do floco havendo, portanto, necessidade da floculação quando são desejados flocos de maiores dimensões.

3.1.1.1 Coagulantes químicos

De acordo com Bouyer, Liné e Do-Quang (2004) definir a dosagem de coagulante é uma tarefa de extrema importância. Isso porque uma dosagem elevada pode gerar preocupações com a saúde daqueles que ingerem a água tratada, além de maiores custos. Por outro lado, uma dosagem abaixo do necessário pode gerar um processo ineficiente, prejudicando, portanto, as etapas posteriores do tratamento.

É notório o uso extensivo de coagulantes a base de sais de metais hidrolisados, que, formando várias espécies catiônicas, causam redução de carga ao serem adsorvidas pelas partículas que possuem carga superficial negativa (LI et al., 2006). Snodgrass, Clark e O'Melia (1984) afirmam que sais de alumínio são muito usados como coagulantes nos processos de remoção de cor e turbidez da água. De acordo com Li et al. (2007), o coagulante mais adotado nesses processos é o sulfato de alumínio. Isso porque, além de seu baixo custo, o produto demonstra eficácia em vários tipos de água.

Esses produtos agem nas partículas de forma a diminuir sua carga superficial, contribuindo assim para que haja colisões entre os agregados, gerando combinações e, portanto, flocos maiores (VAHEDI e GORCZYCA, 2012). Um aumento na concentração de coagulante gera um consequente aumento na taxa de floculação, até um determinado limite (YUKSELEN e GREGORY, 2002).

Li et al. (2008) afirmam que águas com presença de matéria orgânica requerem maior dosagem de coagulante para que aconteça a neutralização das cargas de suas partículas.

3.1.2 Floculação

A floculação representa grande importância nos processos de tratamento da água, isso porque as propriedades dos flocos formados nesse processo estão vinculadas às características da água a ser tratada, dos produtos e técnicas utilizadas. O controle do tratamento de águas de abastecimento tem foco importante na floculação, momento de alteração das características de quantidade, forma, área e massa dos flocos, responsáveis pela separação das partículas sólidas da porção líquida (MORUZZI, OLIVEIRA e De JULIO, 2015; MORUZZI et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2015a).

A floculação se dá por meio de mistura lenta, geralmente com um gradiente médio de velocidade abaixo de 80s^{-1} . As partículas interagem devido ao seu movimento desordenado, causado por 3 principais fatores, sendo eles as interações pericinéticas (energia térmica), interações ortocinéticas (gradientes médios de velocidade) e sedimentação diferencial (velocidades de sedimentação distintas das partículas). No tratamento de águas de abastecimento, as partículas apresentam dimensões que permitem desprezar as interações pericinéticas. Assim, a interação das partículas é majoritariamente governada pelas interações ortocinéticas e pela sedimentação diferencial (MORUZZI et al., 2016).

O tempo de floculação é um parâmetro de grande importância. Conforme Cheng et al. (2010), tempos de floculação elevados podem levar à ruptura de flocos maiores. Por outro lado, baixos tempos de floculação podem ser ineficientes para a formação dos flocos. Em geral, com maiores tempos de floculação aliados à menores gradientes médios de velocidade são produzidos flocos maiores, mas em menor quantidade, em contrapartida, menores tempos de floculação e maiores gradientes médios de velocidade geram flocos de tamanhos menores, mas em maior quantidade (MORUZZI et al., 2016).

Li et al. (2008) realizaram um experimento com o objetivo de caracterizar a evolução do processo de floculação observando que os agregados têm tendência de crescer com o decorrer do tempo. A DTP geralmente se apresenta unimodal, com pico de concentração de partículas em determinada faixa de tamanho cuja posição se desloca de tamanhos menores para tamanhos maiores.

O processo de floculação também tende a ser mais lento em suspensões que contém matéria orgânica do que em suspensões que não contém, isso porque a presença da matéria orgânica reduz a eficiência de desestabilização das partículas. Assim, portanto, suspensões que contém matéria orgânica requerem maiores dosagens de coagulantes (LI et al., 2008).

3.2 Propriedades dos flocos

As propriedades dos flocos, tais como tamanho, estrutura e resistência, são características que influenciam diretamente os processos de tratamento de água que empregam separação de fases e purificação (LI et al., 2006; LI et al., 2007; YUKSELEN e GREGORY, 2002). Li et al. (2007) descrevem as dimensões fractais como sendo também umas das mais importantes propriedades dos agregados.

A análise do tamanho dos agregados é uma forma de se avaliar o desenvolvimento do processo de floculação, uma vez que os agregados tendem a aumentar seu tamanho durante esse processo (MORUZZI et al., 2017).

Cheng et al. (2010) afirma que o diâmetro dos flocos depende de um balanceamento existente entre os processos de agregação e de ruptura na floculação, influenciados pelas forças de cisalhamento atuantes na suspensão. Quando o tamanho dos flocos aumenta a tendência é de seu número diminuir. Li et al. (2006) afirmam ainda que à medida que cresce o gradiente médio de velocidade, diminui o tamanho do floco.

Segundo Jin, Wang e Chai (2007), sob determinadas condições, o valor máximo a que se pode chegar o diâmetro dos flocos é ditado por duas forças, sendo elas a força de ligação da partícula e a força de ruptura exercida do fluido para o floco. É comum para descrever o desenvolvimento da floculação o diâmetro de Feret, que segundo Werner, Thienel e Kustermann (2013) é a máxima distância entre os limites da partícula perpendicular à direção medida. Entretanto, a geometria euclidiana não é adequada para descrever adequadamente a forma do floco que apresenta, na realidade, geometria fractal (dimensão fractal).

O conceito de dimensão fractal é definido por Gregory (1989) apud Hendricks (2010) como:

Um corpo sólido tridimensional tem uma massa, que depende da terceira potência do comprimento de algumas características (como o diâmetro de uma esfera), de modo que um gráfico log-log da massa contra o tamanho deveria dar uma linha reta com uma inclinação de três. Quando esses gráficos são feitos para agregados, entretanto, menores declives são encontrados, com valores não integrais. A inclinação dessa linha é conhecida como dimensão fractal. Num espaço tridimensional, D_f deve apresentar valores entre 1 e 3, menores valores representando agregados lineares e maiores valores representando agregados uniformes, considerando densidade e porosidade.

Dizer que um floco tem estrutura fractal significa dizer que as propriedades desse agregado (tais como massa, volume, densidade, entre outros) são proporcionais ao seu tamanho (SERRA e CASAMITJANA, 1998). Em geral, agregados cujo formato tende a ser mais circular possuem maiores dimensões fractais, aproximando-se da geometria euclidiana. Essas dimensões têm comportamento variável conforme se sucede o processo de floculação (MORUZZI et al., 2017). Li et al. (2007) afirmam que fractais de massa podem ser descritos pela relação existente entre sua massa, uma medida do seu tamanho, e a dimensão fractal D_f .

Segundo Li et al. (2006), ao contrário do tamanho dos flocos, a dimensão fractal tem tendência de aumentar com o aumento do gradiente médio de velocidade (e consequentemente, das tensões de cisalhamento). Assim, flocos mais densos, formados em altas taxas de cisalhamento, apresentam altas dimensões fractais. Os autores afirmam que as dimensões fractais têm influência da resistência dos flocos.

Spicer e Pratsinis (1996a) observaram que flocos com menores dimensões fractais possuem formatos mais esparsas, porosas e irregulares. Segundo Huang (1994), a dimensão fractal representa a efetividade de partículas menores de completar o espaço como uma função do tamanho do floco. Isso significa que quanto maior a dimensão fractal, mais uniforme se apresenta a estrutura do floco.

O modo de agregação dos flocos determina sua dimensão fractal. Ou seja, agregados podem ter o mesmo tamanho, mas estruturas diferentes devido aos diferentes arranjos das partículas

durante a agregação. Grandes agregados tendem a ter maiores faixas de dimensão fractal, uma vez que os fatores que controlam a formação dos agregados se tornam mais complexos à medida que o tamanho dos flocos aumenta (VAHEDI e GORCZYCA, 2012).

Jin, Wang e Chai (2007) afirmam que a dimensão fractal pode ser obtida por meio do coeficiente angular de uma reta obtida pela relação log x log entre a área do flocos e uma máxima dimensão conhecida, como por exemplo, o diâmetro máximo.

Em geral, as partículas presentes nas águas a serem tratadas apresentam estruturas em três dimensões, diferentes características físicas e químicas, além de formato irregular (OLIVEIRA et al., 2015b). Mudanças em sua forma e tamanhos são de extrema importância, uma vez que representam parâmetros para análise da eficiência do processo de tratamento (OLIVEIRA et al., 2015a).

A estrutura dos flocos tem grande influência na remoção das partículas nos processos posteriores, uma vez que essa estrutura está diretamente relacionada ao seu tamanho e densidade (SPICER e PRATSINIS, 1996a).

Dependendo do grau de compactação e do tamanho dos agregados, eles podem ter sua estrutura alterada pelos processos de fragmentação e reestruturação, que acontecem após os processos iniciais de agregação. Flocos de estrutura mais compacta são formados a partir da reestruturação desses ao longo dos processos (MORUZZI et al., 2017).

Os diferentes tipos de mecanismos de agregação podem contribuir para a compreensão do comportamento estrutural dos flocos. Diferentes arranjos estruturais e tamanhos de D_f são obtidos por meio de mecanismos de reestruturação em agregados de maiores tamanhos (MORUZZI et al., 2017).

Agregados com maiores dimensões fractais apresentam estruturas mais compactas. Em contrapartida, agregados com menores dimensões fractais são portadores de estruturas mais esparsas (LI et al., 2008; LI et al., 2006). Estruturas mais compactas são aquelas em que as partículas primárias possuem maiores forças de atração entre si, ou menores forças de repulsão (LI et al., 2008).

Comparativamente, maiores dosagens de coagulante e menores taxas de cisalhamento estão relacionadas à maior resistência à ruptura e a produção de flocos com estruturas mais abertas, resultado do aumento da força de ligação entre as partículas que constituem o floco (SPICER e PRATSINIS, 1996a).

De acordo com He et al. (2012) e Jarvis et al. (2005) o conceito de resistência dos flocos é um parâmetro operacional muito importante nos processos de separação de partículas sólidas da água. Segundo Bouyer, Liné e Do-Quang (2004), ela depende em primeira instância das conjunturas físico-químicas dos flocos. Li et al. (2006) afirmam que esse parâmetro está relacionado à força existente entre os agregados que os compõem. Aumento dessa resistência indica aumento do tamanho dos flocos, devido ao equilíbrio estabelecido entre os processos de crescimento e ruptura.

As unidades contidas em um sistema de tratamento de água são projetadas de forma a melhorar a eficiência dos processos. Uma das formas disso acontecer é minimizando a taxa de ruptura dos flocos, sendo, portanto, a resistência dos flocos um crucial na garantia do sucesso do tratamento (JIN, WANG e CHAI, 2007).

Yukselen e Gregory (2002) sugerem que a resistência dos flocos deve estar relacionada à natureza da interação entre os agregados que os compõem e à densidade do floco. Essas características são abordadas de forma empírica, pela análise do tamanho máximo do floco, limitado pelas tensões de cisalhamento existentes. Segundo Li et al. (2006), são as condições hidráulicas que determinam a resistência dos flocos, sendo determinada pelo processo de formação dos agregados, como afirmam Jarvis et al. (2005) e He et al. (2012).

Jin, Wang e Chai (2007) destacam que quando se fixa as condições de coagulação e flocação, a força de ligação dos flocos se mantém constante. Em contrapartida, a força de ruptura cresce à medida que o gradiente médio de velocidade é aumentado, apresentando uma relação próxima à proporcional entre as duas taxas de crescimento.

3.3 Influência do gradiente médio de velocidade

Quanto maior o valor do gradiente médio de velocidade, a tendência é de que o tamanho dos flocos seja menor. Além disso, flocos formados em altas tensões de cisalhamento apresentam maior força de ligação entre suas partículas, uma vez que seu tamanho é resultado do balanço entre crescimento e ruptura. Ou seja, maiores gradientes de velocidade resultam em menores flocos de maior força. Por outro lado, flocos com maiores dimensões fractais são observados em maiores gradientes de velocidade (LI et, al., 2007).

Segundo Spicer e Pratsinis (1996b), quanto maior o gradiente médio de velocidade, maior se apresenta a taxa de floculação. Por outro lado, maior é também a taxa de fragmentação, o que leva a flocos menores no estágio de equilíbrio dinâmico.

Spicer e Pratsinis (1996a) definem o estado de equilíbrio dinâmico como a competição entre os processos de coagulação e fragmentação. Dessa forma, a força relativa de cada um desses processos é que determina quando e como o floco atinge esse estado. Segundo Jarvis et al. (2005) e Bouyer, Liné e Do-Quang (2014), é o balanceamento estabelecido entre os processos de agregação e as forças de ruptura que resulta no tamanho do floco. Assim, para uma dada taxa de cisalhamento, em algum momento o floco atinge o estado de equilíbrio dinâmico (ou estado estacionário).

Em um determinado momento do processo de floculação, os agregados se tornam grandes o suficiente a ponto dos efeitos hidrodinâmicos não mais permitirem que outros agregados se aproximem e sejam afetados pelas forças de atração de Van der Waals. Nesse ponto, a eficiência da colisão começa a decrescer tendendo a zero, uma vez que os agregados atingiram um tamanho crítico (SOOS et al., 2007).

Segundo Oliveira et al. (2015a), durante os primeiros momentos de formação dos flocos, o processo de agregação é mais forte que o de desagregação. A partir do crescimento dos flocos, a desagregação passa a ser mais forte que a agregação. Spicer e Pratsinis (1996a) afirmam que, inicialmente, a combinação das partículas tende a ser dominante, portanto, o crescimento dos flocos é o processo mais importante. De acordo com Soos et al. (2007), à

medida que o floco aumenta seu tamanho, o processo de ruptura passa a exercer um papel de maior importância, levando ao estado estável.

De acordo com Serra e Casamitjana (1998), as partículas, no primeiro momento, têm seu tamanho aumentado pela coagulação, formando flocos de tamanhos maiores e estruturas assimétricas. Posteriormente, as tensões de cisalhamento tendem a romper esses flocos. Quando esse processo de ruptura consegue equilibrar o de agregação, o floco atinge o estado estacionário.

O estado de equilíbrio do floco é regido pelas condições de cisalhamento/tensão existentes no meio (JIN, WANG e CHAI, 2007; JARVIS et al., 2005). Assim, os flocos devem apresentar resistências a essas forças para que não se rompam em partículas menores (JIN, WANG e CHAI, 2007). Portanto, as características dos agregados e as taxas de cisalhamento são os fatores que controlam o momento em que o estado de equilíbrio dinâmico é atingido (MORUZZI et al., 2017).

De acordo com Oliveira et al. (2015a), o grau de estabilidade dos flocos formados é uma medida que depende da facilidade dessas partículas de se romperem, sendo esse aspecto relacionado tanto à sua força, quanto ao número de vínculos que mantém os flocos unidos. Jin, Wang e Chai (2007) descrevem, por exemplo, que uma forma de se obter a força de ruptura dos flocos é fluir o floco em um tubo e aumentar gradativamente a velocidade da água. Isso faz com que a força de cisalhamento aumente, até atingir a condição crítica, onde há a separação dos flocos.

Spicer e Pratsinis (1996a) consideraram que um floco atingiu o estado de equilíbrio quando não há mais alterações em sua DTP. Em seus experimentos, os autores notaram que ao aumentar a dosagem do coagulante, flocos maiores e mais fortes eram obtidos (pois aumentava a força de ligação entre as partículas primárias), além do alcance mais rápido do estado de equilíbrio. Por outro lado, ao aumentar as taxas de cisalhamento, notaram que o tamanho dos flocos em seu estado de equilíbrio diminuía, uma vez que as taxas de ruptura se tornavam maiores.

Uma forma de se atingir o estado de equilíbrio de forma mais rápida, é utilizando maiores gradientes de velocidade, o que gera maiores tensões de cisalhamento. Isso acelera o processo de agregação, mas produz flocos de menores tamanhos (SERRA e CASAMITJANA, 1998).

Segundo Yukselen e Gregory (2002), flocos submetidos a altas tensões de cisalhamento ficam propensos a sofrer ruptura. Percebe-se uma região de constante tamanho do floco, momento de equilíbrio entre crescimento e ruptura. A ruptura depende de dois fatores, força do floco e taxas de cisalhamento. Além disso, esse processo pode ocorrer de duas maneiras. A primeira é pela divisão do floco em fragmentos de tamanho similar. A segunda é a perda de pequenas partículas da superfície, por um processo de erosão. Jarvis et al. (2005) chamam o primeiro processo de fragmentação de larga escala, e o segundo de erosão superficial.

À medida que se aumentam as taxas de cisalhamento, flocos maiores podem surgir devido ao incremento das colisões. Entretanto, também aumentam as possibilidades de ruptura dos flocos, diminuindo assim a taxa de crescimento. No desenvolvimento da floculação, a agregação entre agrupamentos de partículas começa a se tornar importante, resultando em flocos mais fractais, mais alongados e de superfície mais rugosa. Entretanto, a produção de estruturas mais irregulares é controlada pelos processos de ruptura, levando os flocos a atingirem o estado estacionário (HE et al., 2012).

Spicer e Pratsinis (1996^a) observaram que baixas dosagens de coagulante favorecerem formação de flocos com ligações fracas, suscetíveis à quebra e, com o aumento da dosagem flocos mais resistentes foram produzidos.

Bouyer, Liné e Do-Quang (2004) descrevem duas formas diferentes de se estimar a ruptura dos flocos. Em uma, admite-se que o floco seja um meio heterogêneo, composto de numerosas partículas primárias. Em outra, admite-se que o floco seja um meio contínuo. Assim, no primeiro caso o floco se rompe quando as forças hidrodinâmicas superam a força de coesão de cada partícula primária. No segundo caso, isso acontece quando as forças hidrodinâmicas superam a força de coesão existente entre as partículas.

Os autores observaram que a reversibilidade está relacionada ao tamanho inicial dos flocos. Os autores analisaram a evolução do tamanho durante três estágios, sendo que no primeiro, o gradiente médio de velocidade adotado foi aumentado gradualmente, partindo-se de 5s^{-1} e atingindo o valor de 300s^{-1} . No segundo estágio, esse gradiente foi reduzido a 5s^{-1} , retornando ao gradiente médio de velocidade de 300s^{-1} no terceiro estágio. O que eles descrevem é que durante o primeiro estágio, o tamanho médio dos flocos decresce com o aumento gradual do gradiente médio de velocidade. Em seguida, no segundo estágio, esse valor médio tende a aumentar com a diminuição da velocidade. Por fim, no terceiro estágio, o tamanho médio dos flocos diminuiu novamente, conforme o aumento do gradiente médio de velocidade. Ou seja, existe um fenômeno de reversibilidade entre os processos de agregação/ruptura dos flocos. Segundo He et al. (2012), o que controla o desenvolvimento do tamanho e da estrutura dos flocos são justamente esses processos de agregação/ruptura/reagregação.

3.4 Monitoramento contínuo da floculação

Existem muitas técnicas de acompanhamento da evolução do processo de floculação durante o tempo de floculação. Essas técnicas podem ser classificadas em dois grupos. O primeiro grupo engloba as medidas de partículas únicas, entre eles o contador Coulter, que mensura o volume das partículas; a reflectância de feixe focalizado, determina a distribuição do comprimento da corda e a combinação de análises microscópicas e de imagens. O segundo grupo engloba procedimentos como a dispersão de luz e a espectroscopia de som, que mensura in situ as quantidades médias da população (SOOS et al., 2007).

A digitalização de imagens engloba o segundo grupo e é um processo de uso extenso na monitoração de flocos. Nesse procedimento, imagens *pseudocolor* são transformadas em imagens em preto e branco (ou binárias). Após a binarização é possível analisar características dos flocos, como forma, relação de aspecto, diâmetro, comprimento, perímetro e área (SERRA e CASAMITJANA, 1998). Como exemplo de utilização desta técnica, citam-se os processos de coagulação/ floculação simulados no equipamento *Jartest* cuja evolução dos flocos é acompanhada por câmera de alta resolução com foco em plano de luz estabelecido por laser. As imagens dos flocos são obtidas pela câmera e enviadas para um computador, processadas, posteriormente por programas computacionais específicos.

Segundo Moruzzi et al. (2016), a análise e o desempenho dos processos de floculação/coagulação são influenciados por medidas como a turbidez, a velocidade de sedimentação e o número de Camp (GT, produto do gradiente médio de velocidade pelo tempo de floculação). De acordo com Oliveira et al. (2015a) e Moruzzi, Oliveira e Julio (2015) deve-se evitar o uso desses meios de medida (chamados de medidas indiretas), pois informações a respeito da eficiência dos processos de floculação são suprimidas. Moruzzi et al. (2016) afirmam que esses fatores podem ser utilizados como forma de controlar o processo, não sendo indicados para sua análise, sendo essa feita de forma mais eficiente por meio de medida direta e independente, como a DTP. Segundo Oliveira et al. (2015b) a DTP pode ser definida com base no número, massa, diâmetro, área superficial e/ ou volume das partículas. A DTP de uma suspensão pode ser representada de inúmeras maneiras, dependendo do parâmetro escolhido. Essa escolha depende do tipo de processo a ser descrito e precisa estar em acordo com o que governa o processo ou a operação investigada.

Li et al. (2008) defendem que a determinação da DTP, quando comparada a análises levando em conta a turbidez, se apresenta como uma melhor ferramenta técnica para a caracterização das dinâmicas do processo de coagulação.

Além dos processos de tratamentos de água, a determinação da DTP também tem importância no que diz respeito a outros âmbitos, tais como diagramação da qualidade dos cursos de água e controle e modelagem de componentes de sistemas de drenagem urbana, fornecendo informações acerca da estrutura das partículas presentes na água (OLIVEIRA et al., 2015b).

A utilização da DTP como meio de avaliação direta constitui-se de interessante método na avaliação dedicada dos processos de floculação (MORUZZI et al., 2016). Sua determinação auxilia na compreensão e no equacionamento que visam separação de fases em processos de tratamento de água (OLIVEIRA et al., 2015b). Bouyer, Liné e Do-Quang (2004) afirmam que a DTP é definida conforme o equilíbrio estabelecido entre a aglomeração e a ruptura dos flocos, que depende da força dos agregados e da tensão cisalhante.

De acordo com Li et al. (2008), a determinação da DTP de forma exata encontra obstáculos, principalmente em sistemas que utilizam sais de alumínio como produto coagulante, cujos flocos formados são mais propensos à sofrerem ruptura, devido à sua fragilidade.

De acordo com Crittenden et al. (2005), a distribuição da frequência do número de partículas pode ser definida pela Equação (1).

$$F(dp) = \frac{dN}{d(dp)} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde $F(dp)$ representa distribuição da frequência do número de partículas, dN a concentração do número de partículas relacionada à variação incremental dos seus diâmetros e $d(dp)$ essa variação incremental dos diâmetros.

Essa frequência diminui conforme os diâmetros das partículas aumentam. Essa relação pode ser expressa pela Equação (2).

$$\frac{dN}{d(dp)} = A(dp)^{-\beta_1} \cong \frac{\Delta N}{\Delta dp} \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo A o coeficiente da equação de potência, dp o diâmetro da partícula e β_1 o coeficiente de inclinação da equação de potência. Na Equação (3) tem-se a Equação (2) linearizada.

$$\log \left[\frac{\Delta N}{\Delta dp} \right] = -\beta_1 * \log(dp) + \log A \quad \text{Equação (3)}$$

Segundo Oliveira et al. (2015b), o parâmetro β_1 é um representativo da DTP e pode contribuir para se analisar a distribuição de tamanho dos flocos. Um valor negativo, por exemplo, indica maior hegemonia de partículas de menores dimensões. Nesse caso, quanto maior o valor absoluto de β_1 , maior é a hegemonia dessas partículas.

Segundo Tse et al. (2011), a utilização de funções de distribuição conhecidas para adequação dos dados experimentais é uma alternativa interessante por tornar os métodos de análise mais robustos. A função de densidade de probabilidade gama é uma dessas distribuições e fornece uma forma flexível de adequação, com poucos parâmetros de ajuste e que pode ser utilizada para inúmeros tipos de distribuição. A função gama é definida pela Equação (4).

$$f(x, \alpha, \beta_2) = x^{\alpha-1} * \frac{e^{-\frac{x}{\beta_2}}}{\alpha^{\beta_2} \Gamma(\alpha)}$$
Equação (4)

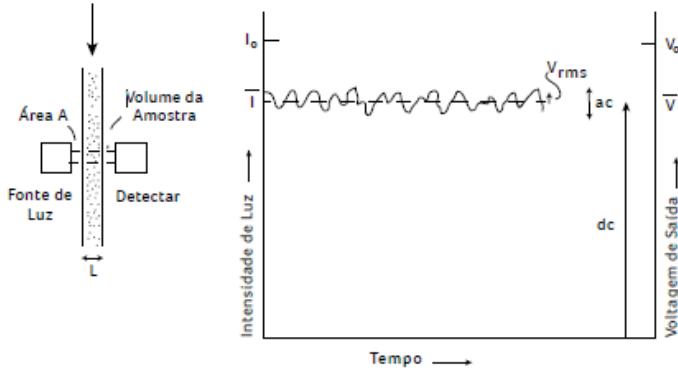
Na qual: α é o parâmetro de forma, β_2 o parâmetro de escala (número real e positivo), x a variável de interesse e Γ a função gama, apresentada pela Equação (5).

$$\Gamma = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$
Equação (5)

Além do acompanhamento da floculação por medidas diretas e a representação da evolução do tamanho dos flocos por meio de alguma função de distribuição de tamanho existem técnicas que permitem estimar indiretamente e em tempo real a evolução da floculação. Cita-se para este caso o equipamento *Photometric Dispersion Analyser (PDA)* que mede as variações de turbidez de uma suspensão coloidal móvel e monitora sua taxa de agregação / dissociação em termos de uma relação de estabilidade por meio da intensidade média da luz que é transmitida (DC) e a flutuação do componente (RMS) (YUKSELEN e GREGORY, 2002).

Moruzzi, Oliveira e Julio (2015) descrevem o monitoramento dos processos de floculação por meio do *PDA*. Segundo os autores, um feixe de luz é aplicado através da suspensão e é então captado por um fotodetector. A partir daí os resultados se apresentam de duas formas, caracterizados por uma componente estável (DC) e uma parte flutuante (AC). A medida DC depende da turbidez do fluido e representa a intensidade do feixe de luz que é transmitido. A luz que é transmitida apresenta sinais com flutuações, que são oriundas de variações causadas pela constituição da amostra no feixe de luz. A heterogeneidade da suspensão é a causadora dessas variações, que por sua vez, são ditadas pela distribuição de Poisson. Assim, a raiz quadrada do valor médio representa o desvio padrão do valor médio. O RMS (valor médio da raiz quadrada) do sinal está correlacionado à raiz quadrada da concentração das partículas. A Figura 1 mostra um gráfico que indica de que forma o valor de RMS flutua em uma dispersão.

Figura 1: Variações de RMS em um fluido



Fonte: Gregory (1985).

A razão R, em situação convencionais, é uma medida adimensional resultado da divisão do valor de RMS por DC, que está relacionada à concentração e tamanho das partículas e ao volume da amostra iluminada pelo feixe de luz. Esse mesmo valor de R, denominado Índice de Floculação (IF), em casos gerais de suspensões heterodispersas, é calculado por meio da Equação (6) (MORUZZI, OLIVEIRA e JULIO, 2015).

$$R = \left(\frac{L}{A}\right)^{\frac{1}{2}} * (\sum N_i C_i^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação (6)}$$

Na qual: L é o comprimento do caminho óptico, A a área da seção transversal do feixe, N a quantidade de partículas por unidade volumétrica e C a seção transversal da dispersão da partícula.

Portanto, a razão entre o valor quadrático médio e a intensidade da luz é representada pelo valor de IF, sendo esse um indicador da agregação das partículas. (JIN, WANG e CHAI, 2007; JARVIS et al., 2005). Li et al. (2007) afirmam que a determinação do IF por meio do PDA é uma forma muito confiável de análise da evolução do tamanho dos agregados.

Yuksehen e Gregory (2002) afirmam que a taxa de floculação pode ser analisada por meio do valor de IF, uma vez que com o aumento no tamanho dos flocos, existe aumento também desse valor. Por outro lado, diminuição de IF sugere que há ruptura dos flocos. Li et al. (2007) concluíram que baixos valores de taxas de cisalhamento produzem maiores flocos

com maiores valores de IF. Quanto maior o valor de IF, maior é o tamanho dos agregados. De acordo com Jin, Wang e Chai (2007), mudando-se o gradiente médio de velocidade com o objetivo de aumentar as forças de cisalhamento nos flocos, a ruptura crítica dos flocos pode ser monitorada utilizando-se o *PDA*. A razão da raiz quadrada média do sinal emitido é aproximadamente proporcional à dimensão das partículas (CHENG et al., 2010; SERRA e CASAMITJANA, 1998).

3.5 Análises estatísticas

Larson e Farber (2010) afirmam que a análise de variância é uma técnica de teste de hipótese que permite fazer comparações entre médias de populações. A análise de variância é também chamada de *ANOVA (Analysis of Variance)*.

A *ANOVA* pode ser utilizada para avaliar a significância de uma regressão, servindo como maneira de se decidir se um equacionamento é ou não aplicável à situação avaliada.

Cada observação em um experimento pode ser decomposta segundo a Equação (7).

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}, \text{ com } i = 1, \dots, I \text{ e } j = 1, \dots, J \quad \text{Equação (7)}$$

Onde Y_{ij} é a observação do i -ésimo tratamento na j -ésima unidade experimental; μ é o efeito constante (média geral); τ_i é o efeito do i -ésimo tratamento e ε_{ij} é o erro associado ao i -ésimo tratamento na j -ésima unidade experimental.

Na análise dos experimentos há a necessidade de se verificar se há diferenças entre as médias dos tratamentos. Isso é feito testando as seguintes hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_I \\ H_1: \mu_i \neq \mu_{i'} \text{ para pelo menos um par } (i, i'), \text{ com } i \neq i' \end{cases}$$

Se a hipótese nula H_0 for verdadeira, todos os tratamentos terão uma média comum μ .

Magalhães (2004) define que, nesse caso, o tratamento não é considerado eficaz. Caso a hipótese H_1 seja verdadeira, atesta-se que existe relação entre a variável independente e a dependente. Ou seja, analisando-se por exemplo, um modelo de regressão linear, cuja formulação pode ser descrita de acordo com a Equação (8):

$$y = a + bx$$

Equação (8)

Se a hipótese H_0 for verdadeira, o valor de b é nulo, ou seja, a variável independente x não é relevante para se determinar a variável dependente y . Por outro lado, se essa hipótese H_0 for rejeitada, tem-se que o modelo de regressão linear é viável para determinar os valores da variável x em função de y .

O teste da hipótese H_0 pode ser feito utilizando-se a tabela da análise de variância. Essa tabela pode ser obtida por meio de programas computacionais específicos, tais como o software gratuito *R*, que permite cálculos estatísticos e gráficos. Deve-se admitir uma probabilidade máxima permissível para que se cometa o erro de se rejeitar uma hipótese nula quando esta é, na verdade, verdadeira. Esta probabilidade máxima permissível é denominada nível de significância e representada por α . Comumente, os três níveis de significância utilizados são de 0,10, 0,05 e 0,001 (LARSON e FERBER, 2010).

Ferreira e Patino (2015) afirmam que, em grande parte dos experimentos, o valor de corte adotado para que se rejeite a hipótese nula é de 0,05, ou seja, tradicionalmente, utiliza-se o nível de significância de 0,05.

O software *R*, ao fornecer a tabela de variância de uma regressão, também indica o seu valor p . Caso esse valor seja menor que o nível de significância escolhido, atesta-se a significância estatística do modelo.

Isso também pode ser feito utilizando-se o teste F , também fornecido pelo *R*. Valores de F crítico são tabelados de acordo com o nível de significância α adotado. Assim sendo, caso o F calculado da regressão seja superior ao F crítico tabelado, não há evidências estatísticas de que o modelo se adeque aos dados experimentais.

O valor de p é dado por variável e checa a hipótese nula de que não haja relação entre a variável independente com a dependente. Assim, se em alguma das variáveis o valor de p for superior ao valor de α , o procedimento correto seria descartar o uso dessa variável, uma vez que o seu uso diminuiria a precisão do modelo.

O R também fornece os valores do coeficiente de determinação R^2 . Seu valor percentual indica o quanto da variação de y pode ser explicada pela variação de x . O restante da variação que não pode ser explicada pela regressão é resultado de outros fatores ou a erros na amostra (LARSON e FARBER, 2010).

CAPÍTULO 4

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações Iniciais

Antes de iniciar os experimentos propriamente ditos, foram feitos testes a fim de determinar quais seriam as dosagens utilizadas para cada coagulante. Primeiramente, definiu-se que seriam utilizados três coagulantes, sendo eles o Sulfato de Alumínio, o Cloreto Férrico e o Policloreto de Alumínio. Posteriormente foram definidas as dosagens de coagulante necessárias para predominância do mecanismo de varredura na coagulação. Essa observação foi apenas visual com escolha da dosagem pautada nos menores valores de turbidez remanescente e nos diagramas de coagulação/flocação dos trabalhos conduzidos por Dutra (2017), Mendes (2017) e Gonçalves (2017).

4.2 Preparação das soluções e água de estudo

Para o CF ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), foram diluídos 9,68 gramas do produto em 1 litro de água destilada, obtendo-se solução de 2 g de Fe/L.

No caso do PAC, segundo o fabricante Sun Produtos Químicos Ltda, o produto possui de 20 a 30% de Hidróxido de Alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Foi adotado, para efeito de cálculo, o valor de 25%. Dessa forma, foi necessário adicionar 23,13 ml do produto a 1 litro de água, de modo a obter solução final de 2 g de Al/L.

A solução de SA foi preparada de modo que se obtivesse 2 g de Alumínio (Al) para cada L de coagulante. Foram diluídos 46,7 de sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$) em 1 litro de água destilada, de modo a obter solução final de 2 g de Al/L.

A água de estudo foi preparada utilizando-se caulinita para conferir turbidez à água. A caulinita era adicionada em um jarro de 2 litros com água destilada e posteriormente

colocada em agitador mecânico por um período de 8 horas. Em seguida, a suspensão de caulinita foi retirada do agitador e deixada em repouso por 12 horas. Ao término desse tempo, o material sobrenadante foi retirado para constituição da água de estudo.

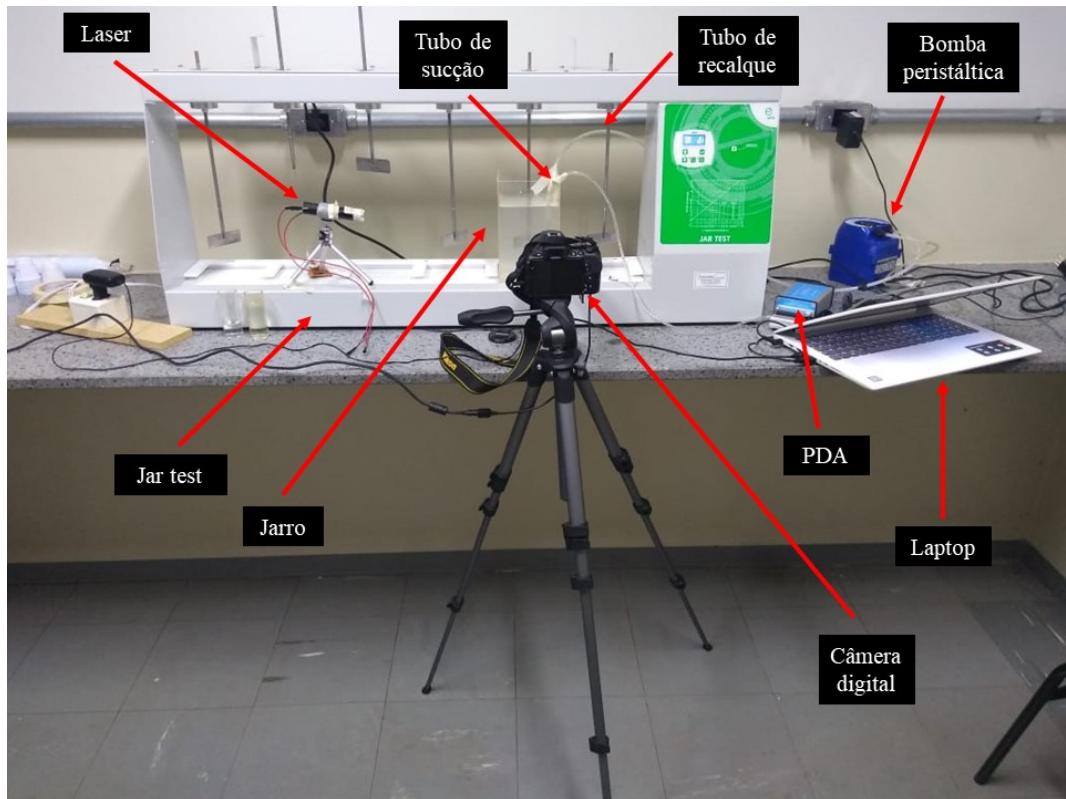
O material sobrenadante então era adicionado à água destilada e dosado de forma a alcançar os valores de turbidez desejados. Foram utilizadas águas com 3 valores de turbidez distintos, 10, 50 e 100 UNT.

4.3 Equipamentos

Inicialmente, foram conduzidos ensaios de coagulação / flocação / sedimentação para escolha das dosagens de coagulante e pH de coagulação. Foi utilizado o equipamento *Jartest* de 6 jarros e, além deste, foi utilizado também um pHmetro e um turbidímetro de bancada.

Posteriormente, após realização dos ensaios preliminares, foram conduzidos os ensaios relativos à obtenção de equações de relação entre o IF do equipamento *PDA* e parâmetros característicos dos flocos e da DTP bem como os ensaios de verificação da aplicação das equações obtidas. Nestes ensaios, além dos equipamentos supracitados, foi utilizado laser da marca Zhong Heng, adaptado com lente para proporcionar plano de luz de aproximadamente 1mm de espessura e sistema de acionamento no momento de aquisição das imagens; câmera digital Nikon D5500 com resolução de 25 megapixels, bomba peristáltica da marca Exatta e equipamento *PDA*. A câmera digital era conectada a um computador para seu acionamento por meio do software *Camera Control Pro 2* e transferência das imagens obtidas. Para funcionamento do *PDA* e aquisição do IF concomitantemente à aquisição das imagens dos flocos, foi instalada uma bomba peristáltica a jusante do *PDA*, diminuindo o efeito de quebra dos flocos antes da leitura, para recirculação da água flokulada. A Figura 2 mostra a montagem dos equipamentos utilizados nos experimentos com destaque para o tubo de saída de água flokulada do jarro (tubo de sucção), *PDA*, bomba peristáltica, e tubo de retorno de água para o jarro (tubo de recalque). Além desses são ilustrados o laser, o *Jartest*, o jarro de água flokulada, a câmera digital e o computador.

Figura 2: Esquema de montagem dos equipamentos



Fonte: Autor (2019).

4.4 Procedimentos de execução dos ensaios

Inicialmente, as águas de estudo foram preparadas adicionando-se a solução sobrenadante de caulinita à água destilada até se alcançar a turbidez desejada. Em seguida, 2 litros dessa solução foram colocados em cada jarro do *Jartest*. Para simulação dos processos de coagulação/flocação/sedimentação, vários valores de pH de coagulação e dosagens para cada coagulante foram estimados tendo-se como base os trabalhos de Dutra (2017), Gonçalves (2017) e Mendes (2017), escolhendo, em termos de turbidez remanescente, os valores adequados para a sequência de experimentos. Ao término dessa fase de testes, foram definidas 3 dosagens para coagulante e respectivos valores de pH de coagulação, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Dosagem de coagulante x pH de coagulação

| | Dosagem de coagulante (mg de Fe³⁺/L) | | |
|--|--|------|------|
| | 7,5 | 10 | 12,5 |
| | pH de coagulação | | |
| Cloreto Férrico - FeCl _{3.6H₂O} | 6,9 | 6,67 | 6,94 |
| | Dosagem de coagulante (mg de PAC/L) | | |
| Policloreto de Alumínio - PAC | 30 | 35 | 40 |
| | pH de coagulação | | |
| Sulfato de Alumínio - Al ₂ (SO ₄) _{3.16H₂O} | 8,26 | 8,15 | 8,14 |
| | Dosagem de coagulante (mg de Al³⁺/L) | | |
| | 2,5 | 5 | 7,5 |
| | pH de coagulação | | |
| | 7,67 | 7,96 | 6,87 |

Fonte: Autor (2019).

Os valores discriminados na Tabela 1 foram utilizados para condução dos experimentos de obtenção das equações de relação para cada uma das águas de estudo, ou seja, 10, 50 e 100 UNT. Para os ensaios de verificação da aplicabilidade das equações obtidas, foram estimadas, aleatoriamente, novas dosagens de coagulante e pH de coagulação, objetivando-se, principalmente, a possibilidade de estimação dos parâmetros representativos dos flocos e da DTP a partir dessas equações, independentemente das condições de coagulação/flocação para as quais a flocação foi desenvolvida. Ressalta-se que para os valores de turbidez estudados, essas dosagens de coagulante e respectivos valores de pH de coagulação conduziram à formação de flocos com boas características de sedimentabilidade, entretanto, não buscou-se as condições ideais, ou seja, a análise de eficiência do sistema em termos da qualidade da água produzida não fez parte dos objetivos do presente trabalho.

Os testes foram inicialmente conduzidos para a turbidez de 10 UNT, posteriormente para os valores de turbidez de 50 e 100 UNT. Como foram utilizados três coagulantes, três valores de turbidez e três dosagens diferentes para cada produto, no total foram conduzidos, nesta parte do trabalho, 27 experimentos.

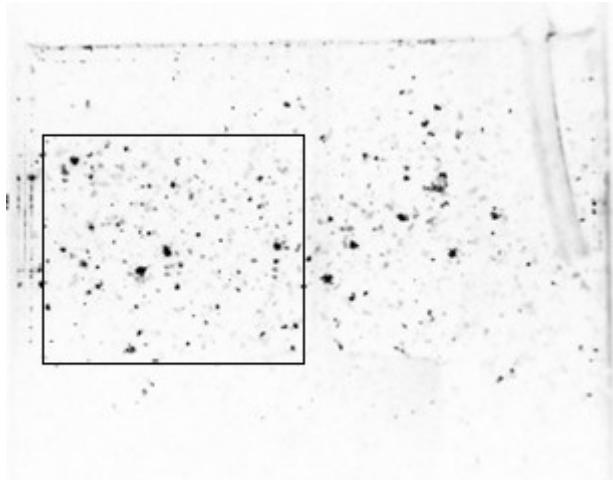
Após montagem adequada de todos os equipamentos, conforme ilustra a Figura 2, foi feita a calibração do sistema de aquisição de imagens posicionando-se uma régua graduada no plano de luz estabelecido pelo laser, local de foco da câmera fotográfica. Desta forma, foi possível identificar a escala das fotográficas e, consequentemente, o tamanho dos flocos.

Para início dos ensaios o *Jartest* era acionado com gradiente médio de velocidade de mistura rápida de 800 s^{-1} por 10 s logo após introdução de produtos químicos para correção do pH e o coagulante. Ao mesmo tempo a bomba peristáltica era ligada, promovendo a recirculação da água do jarro pelo *PDA* com posterior retorno ao jarro.

O tempo de floculação foi fixado em 20 minutos e o gradiente médio de velocidade de floculação em 20 s^{-1} . Ao passo em que as imagens dos flocos eram obtidas nos tempos de 1, 3, 5, 10, 15 e 20 min e com duração de 10 s, o sinal do equipamento *PDA* era continuamente armazenado no computador. As imagens eram obtidas nos 5 s antes e 5 s após os tempos de referência a uma taxa de 4 imagens por segundo, totalizando 240 imagens por ensaio.

A Figura 3 é um exemplo de uma imagem antes do tratamento (binarização).

Figura 3: Exemplo de imagem obtida durante os experimentos

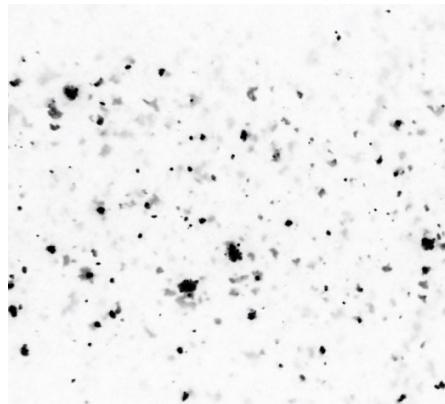


Fonte: Autor (2019).

4.5 Tratamento das imagens

O processo de tratamento das imagens iniciava-se com a utilização do software JPEGCrops v0.7.5. O programa foi utilizado de forma a cortar as imagens obtidas durante os experimentos, limitando-as a um retângulo posicionado aproximadamente no lado esquerdo superior dos jarros, cujas dimensões eram de 1275 x 1161 pixels. A Figura 4 mostra um exemplo de como as imagens ficavam após serem recortadas.

Figura 4: Exemplo de imagem recortada (detalhe da Figura 3) utilizando-se o JPEGCrops

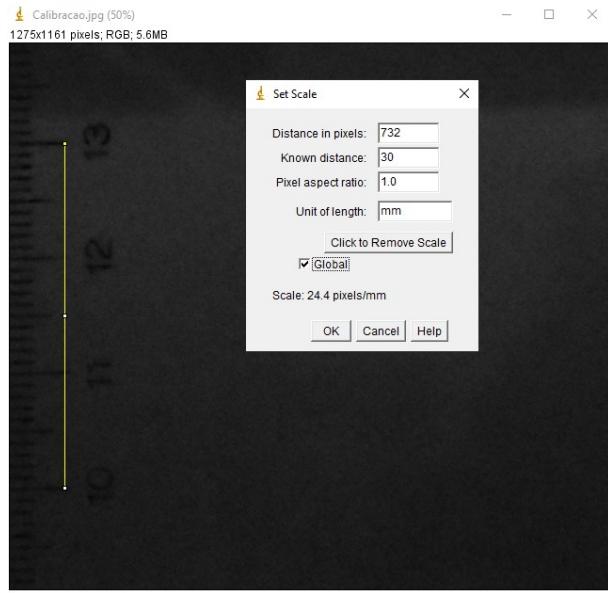


Fonte: Autor (2019).

Após o processo de recorte das imagens, prosseguiu-se com o tratamento dessas. Na etapa seguinte, foi utilizado o software ImageJ 1.52 para processamento de imagens.

Inicialmente, para cada uma das condições utilizadas nesse estudo, era feita a leitura da imagem de calibração. Com essa imagem, era possível transformar as dimensões, em pixels, em uma unidade usual, sendo, no caso, adotada a medida em mm. No geral, a proporção variava muito pouco, sendo em média de 25 pixels/mm. Na Figura 5 é possível ver como a calibração era feita. Um traço era posicionado, e na opção *known distance* era especificada a distância conhecida, sendo, no exemplo, de 30 mm. O programa então calculava a taxa de proporção de pixels/ mm, e era possível selecionar a opção *Global*. Ao selecioná-la, garantia-se que esse fator de escala seria utilizado nos processamentos posteriores, até que uma nova calibração fosse feita. O processo de definição da escala era importante uma vez que, ao se fazer o tratamento das imagens, o programa apresentaria os resultados em mm.

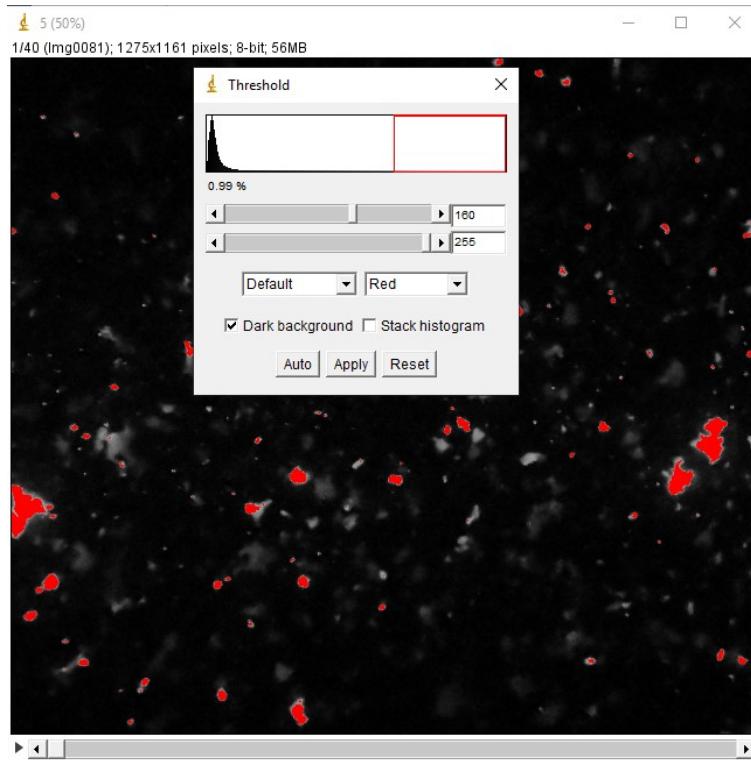
Figura 5: Calibração das imagens pelo software ImageJ



Fonte: Autor (2019).

Após a calibração, era possível iniciar o processamento das imagens. As imagens eram separadas por tempo, portanto a cada etapa, 40 imagens eram selecionadas. As imagens então, eram transformadas em imagens de 8 bits, para possibilitar a binarização. Nessa etapa, o objetivo era destacar os flocos que estavam mais iluminados, sendo esses aqueles posicionados no plano de luz criado pelo laser. A função utilizada para tal era acionada por meio dos botões *Image – Adjust – Threshold*. Essa opção é mostrada na Figura 6. O limiar de binarização (primeira opção, sendo no exemplo de 160) era definido conforme cada tipo de conjunto de imagens.

Figura 6: Binarização das imagens



Fonte: Autor (2019).

Após esse processo, seguia-se a etapa de processamento das informações. Na opção *Set measurements* foram escolhidas as medidas que o programa calcularia após o processamento. Ao clicar na opção *Analyze – Analyze particles*, o programa fazia a análise das medidas escolhidas, tais como área, diâmetros máximos e mínimos, diâmetro de Feret e etc. O programa então apresentava esses valores em formato tabelado, que posteriormente eram transferidos para planilhas Excel.

4.6 Definição da DTP

A distribuição de tamanhos das partículas visa categorizar as partículas em classes de tamanho, de forma a permitir uma análise mais precisa da evolução das dimensões ao longo do tempo. Nesse trabalho, para a divisão de classes, três parâmetros foram considerados: a área das partículas, o diâmetro equivalente (calculado pela aplicação da fórmula inversa da área) e o diâmetro de Feret (que no caso do ImageJ, é medido como sendo a maior distância entre dois pontos ao longo do limite de seleção do objeto).

Foram definidas 15 classes para cada coagulante. Os limites inferior e superior dessas classes foram definidos conforme os valores máximos e mínimos de tamanhos dos flocos de cada coagulante. Ou seja, para cada um dos três parâmetros, para cada um dos três coagulantes, foi analisado os valores máximos e mínimos das nove condições definidas e esses valores foram utilizados como limites superior e inferior das classes. Assim, foi possível obter-se as frequências absolutas e relativas para cada classe de tamanhos.

4.6.1 Definição do parâmetro β_1

Segundo Oliveira et al. (2015b), o parâmetro β_1 pode ser calculado como sendo o coeficiente angular da reta formada pelo gráfico construído a partir de $\log(\Delta N/\Delta dp) \times \log(dp)$, sendo ΔN a variação incremental no número de partículas, dp a média geométrica entre os diâmetros inferior e superior de cada classe e Δdp a variação incremental desta média geométrica.

Nesse estudo, em alguns casos, obteve-se valor de ΔN igual a 0. Quando isso acontecia, o valor da função nas abscissas e nas coordenadas era igualado a 0, evitando-se erros na formulação.

O parâmetro β_1 foi determinado para as 3 dimensões especificadas. Dessa forma, se obteve um parâmetro β_1 correspondente à DTP calculada pelo diâmetro equivalente (β_1 Deq), um parâmetro β_1 correspondente à DTP calculada pela área (β_1 Área), e um parâmetro β_1 correspondente à DTP calculada pelo diâmetro de Feret (β_1 Feret). Ao final do processo, obteve-se diferentes parâmetros β_1 para cada tempo.

4.6.2 Definição dos parâmetros α e β_2 da distribuição gama

Para a definição dos parâmetros α e β_2 da função de distribuição gama foi utilizado o *Software Microsoft Office Excel*. Adotando-se as classes de DTP como valores de x , pode-se testar valores aleatórios de α e β_2 de modo a encontrar aqueles que melhores se encaixam de acordo com os dados experimentais, isto é, são comparados os valores de frequência acumulada obtidos pela DTP para cada classe e os valores dessa mesma frequência calculados utilizando a função gama. Sendo assim, a ferramenta Solver do Excel foi utilizada

de modo a definir os valores de α e β_2 que promoviam o melhor ajuste da curva de distribuição gama.

Os parâmetros α e β_2 foram determinados para as 3 dimensões especificadas. Dessa forma, se obteve um parâmetro α e um parâmetro β_2 correspondente à DTP calculada pelo diâmetro equivalente (α_{Deq} e β_2_{Deq}), um parâmetro α e um parâmetro β_2 correspondente à DTP calculada pela Área ($\alpha_{\text{Área}}$ e $\beta_2_{\text{Área}}$), e um parâmetro α e um parâmetro β_2 correspondente à DTP calculada pelo diâmetro de Feret (α_{Feret} e β_2_{Feret}). Ao final do processo, obteve-se diferentes parâmetros α e β_2 para cada tempo.

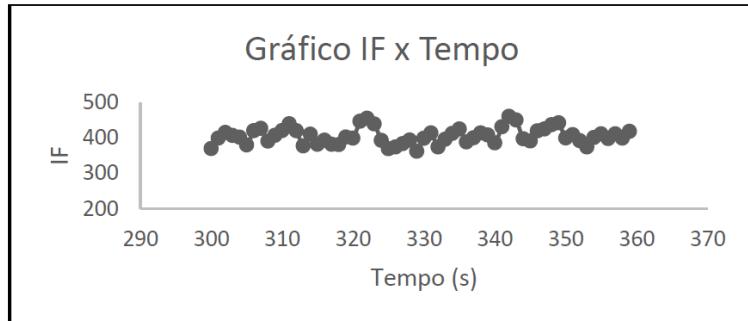
4.7 Determinação da dimensão fractal

A dimensão fractal foi definida utilizando-se um gráfico log x log de duas dimensões conhecidas, a área e o diâmetro máximo. O coeficiente angular da reta desse gráfico resultou na dimensão fractal, obtida para cada tempo.

4.8 Determinação das relações

Para a determinação das relações, foi utilizado o valor médio do IF, dentro dos 60 segundos representativos de cada tempo utilizado aquisição das imagens (1, 3, 5, 10, 15 e 20 minutos). Essa medida foi tomada uma vez que o IF se apresenta como um sinal flutuante ao longo do tempo (como exemplificado na Figura 7), e uma forma de caracterizá-lo é por meio do seu valor médio.

Figura 7: Exemplo de sinal emitido pelo PDA 3000



Fonte: Autor (2019).

Obtidos os valores dos parâmetros de DTP, do D_f e do IF, prosseguiu-se o processo de definição das equações de relação.

4.8.1 Determinação por meio do software R

Os dados obtidos foram utilizados para se estabelecer equações de relação entre os parâmetros de DTP e a dimensão fractal e o índice de floculação. Para isso, foi utilizado o software R. Esse programa computacional de uso gratuito permite a construção de regressões lineares e não lineares, assim como também faz a análise estatística das equações modeladas.

Para a determinação da relação do IF com os parâmetros β_1 e D_f , devido ao comportamento apresentado pelos dados na representação gráfica, foram utilizadas equações lineares, com formato igual ao da Equação () .

$$y = a + bx \quad \text{Equação (9)}$$

Sendo a o intercepto ou coeficiente linear da reta e b a inclinação da reta de regressão, chamada também de coeficiente angular ou de regressão.

Por sua vez, os dados utilizados para a determinação da relação de IF com os parâmetros α e β_2 tiveram um comportamento diferente. Como será visto nos gráficos posteriores, os dados para a distribuição gama foram ajustados conforme equações potenciais (portanto, não

lineares) devido à forma como os dados se apresentaram. As equações foram determinadas conforme o modelo descrito na Equação (10).

$$y = ax^b \quad \text{Equação (10)}$$

Como no caso da função gama são necessários dois valores de coeficientes, α e β_2 , uma alternativa diferente de modelagem dos dados foi adotada. Primeiramente, o valor de α foi comparado com o IF, sendo o IF o valor das abscissas, e o α o valor das ordenadas dos gráficos. Em seguida, os valores de α foram utilizados como eixo das abscissas, e os valores de β_2 como pertencentes aos eixos das ordenadas. Dessa forma, para cada dimensão utilizada (diâmetro equivalente, área e diâmetro de Feret) foram modeladas duas equações, uma para prever o valor de α em função do valor de IF, e uma para prever o valor de β_2 em função de α .

Nesse trabalho, o coeficiente de determinação R^2 também será considerado como fator de análise da regressão, porém, não será tido como parâmetro único/ principal para a aceitação ou não das equações modeladas. Isso porque, apesar de ser um parâmetro interessante de avaliação, esse valor por vezes tem interpretação errônea. Por exemplo, mesmo que grande parte dos dados se encaixem perfeitamente na equação modelada, grandes variações entre o que é observado e o que é modelado pela regressão em uma pequena porcentagem dos dados podem gerar diminuições significativas no valor de R^2 .

Dessa forma, além da análise do R^2 , foi analisada também a significância estatística por meio do valor p obtido por meio da análise ANOVA. Para essa pesquisa, foi adotado um valor p limite de 0,05.

4.9 Validação dos resultados

A etapa seguinte à determinação das equações de relação foi a de validação dos resultados, isto é, a utilização de outras condições de experimentos diferentes das utilizadas na etapa de equacionamento, com o objetivo de comprovar a confiabilidade dos modelos. Para simulação das águas com turbidez, foram utilizados valores intermediários àqueles utilizados nos experimentos iniciais, determinados de forma relativamente randômica (a solução de

água com caulinita era adicionada à água até que a turbidez chegasse a valores diferentes dos utilizados nos testes iniciais).

No caso das dosagens de coagulantes, foram utilizados valores medianos e superiores àqueles utilizados nos experimentos. Evitou-se utilizar valores muito acima dos valores já utilizados. Também foram utilizadas dosagens de coagulantes inferiores àquelas utilizadas nos experimentos, exceto para o Sulfato de Alumínio, em que a utilização de dosagens inferiores (abaixo de 2,5 mg de Al/L) não foi possível devido ao insucesso do processo de coagulação.

A Tabela 2 mostra os valores de turbidez e dosagens utilizados no processo de validação dos resultados.

Tabela 2: Dosagens de coagulantes e valores de turbidez

| | Turbidez (UNT) | Dosagem de coagulante (mg de Fe³⁺/L) | |
|--|-----------------------|--|-----|
| Cloreto Férrico - FeCl_{3.6H₂O} | 8 | 9,5 | 13 |
| | 19 | 9 | 11 |
| | 75 | 7 | 8 |
| Policloreto de Alumínio - PAC | Turbidez (UNT) | Dosagem de coagulante (mg de PAC/L) | |
| | 8 | 32 | 43 |
| | 35 | 27 | 38 |
| Sulfato de Alumínio - Al₂(SO₄)_{3.16H₂O} | Turbidez (UNT) | Dosagem de coagulante (mg de Al³⁺/L) | |
| | 7,5 | 4 | 6 |
| | 30 | 3,5 | 8 |
| | 70 | 3 | 6,5 |

Fonte: Autor (2019).

O procedimento adotado para a realização dos experimentos de validação foram os mesmos descritos para os outros ensaios assim como o tratamento das imagens, a determinação dos parâmetros representativos da DTP e da dimensão fractal. Após o processamento das imagens, a obtenção dos parâmetros de DTP e da dimensão fractal, o IF médio para os 60 segundos representativos de cada tempo também foi calculado.

Esses dados foram então lançados nas planilhas onde estavam localizadas as equações de relação, assim como foi feita a análise estatística dessas novas regressões.

CAPÍTULO 5

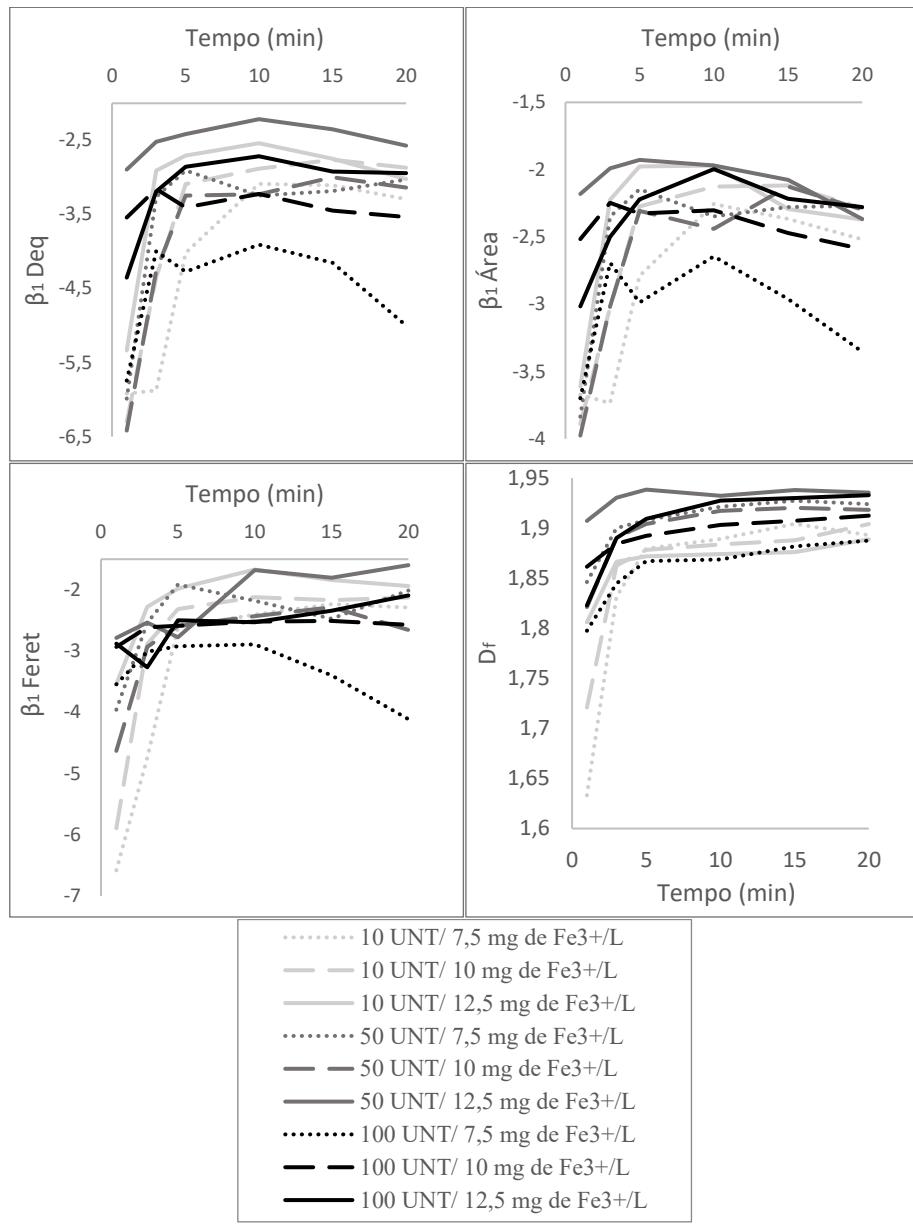
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Evolução dos parâmetros

5.1.1 Cloreto Férrico

A Figura 8 mostra o comportamento dos parâmetros β_1 e D_f ao longo dos 20 minutos de floculação.

Figura 8: Evolução dos parâmetros β_1 e da D_f durante a floculação com Cloreto Férrico como coagulante



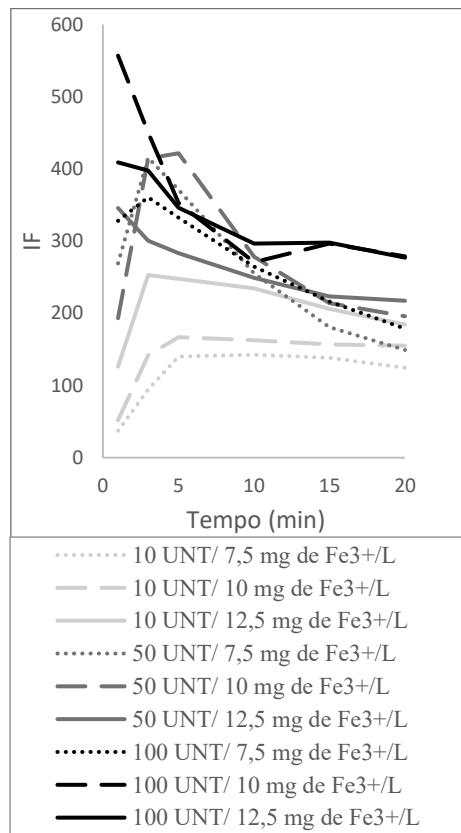
Fonte: Autor (2019).

Os valores do parâmetro β_1 mostram comportamentos semelhantes em todas as condições de experimentação. Seu crescimento inicial é indício de que há aglomeração das partículas de menores tamanhos, uma vez que diminui o número de flocos nas primeiras classes. Após alcance do pico, esses valores tendem a diminuir, indicando aumento no número de partículas menores. Isso porque, depois de certo tempo, as partículas de maiores tamanhos tendem a sedimentar e/ou desagregar até o alcance do estado de equilíbrio dinâmico (patamar de estabilização).

No caso do D_f , há um crescimento dos valores que, em um dado momento, atingem seu pico e em seguida se mantém praticamente estáveis ao longo do tempo restante da floculação. Isso pode ser sinal de que a morfologia dos flocos não tem uma relação direta com as variações percebidas na DTP.

A Figura 9 representa os IF médios obtidos durante a floculação.

Figura 9: Evolução do IF ao longo da floculação com Cloreto Férrico como coagulante



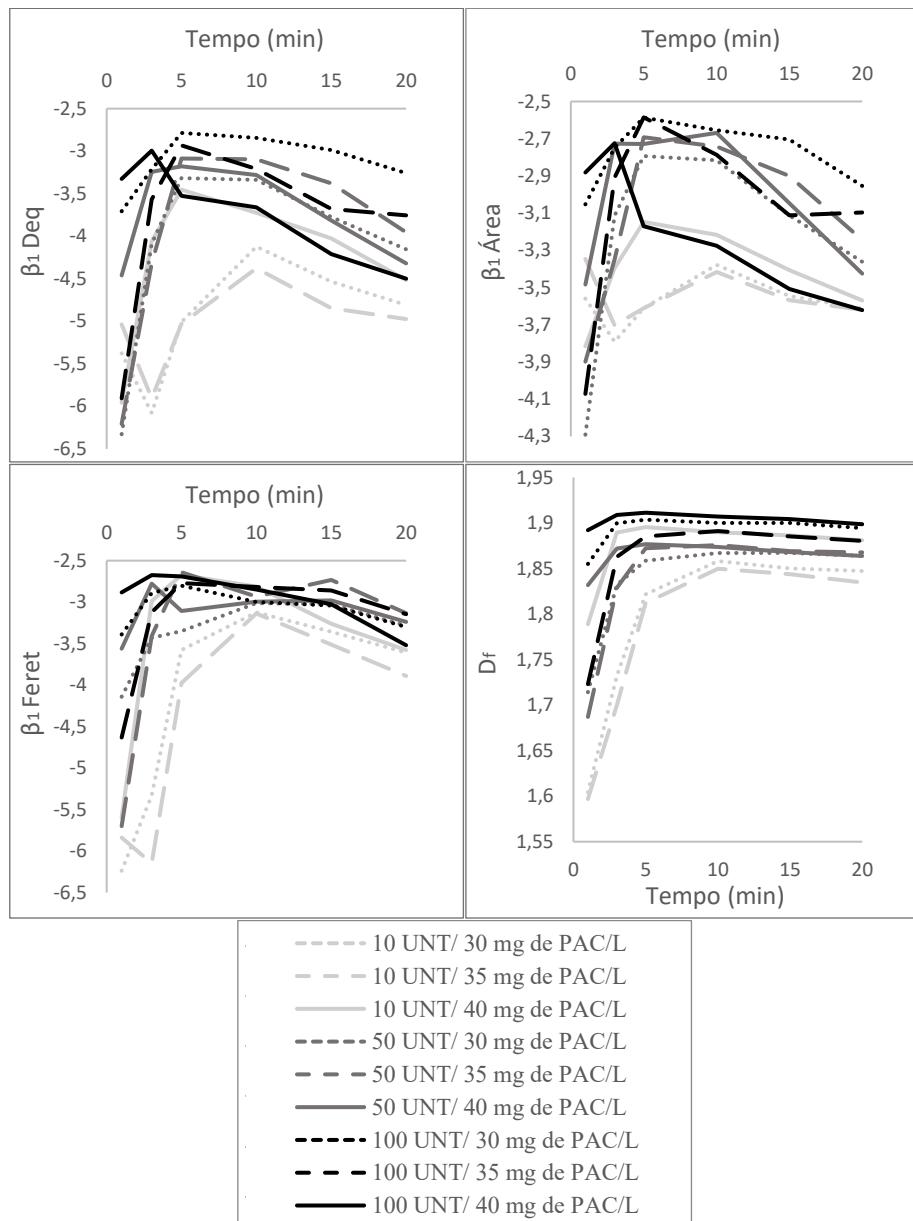
Fonte: Autor (2019).

Verifica-se que o Índice de Floculação tem tendência, para a maioria das condições, de crescimento inicial, até atingir um determinado pico, e em seguida, tem seu valor diminuído permanecendo praticamente constante, comportamento esse similar ao que é observado para β_1 e β_2 representativos da DTP. Nota-se também que o IF assume maiores valores para maiores valores de turbidez e dosagem de coagulante. Nesses casos, há uma maior tendência de aparecimento de maiores flocos, o que explica os maiores valores de IF.

5.1.2 Policloreto de Alumínio

A Figura 10 mostra o comportamento dos valores dos parâmetros β_1 e D_f ao longo dos 20 minutos de floculação.

Figura 10: Evolução dos parâmetros β_1 e da D_f no desenvolvimento da floculação com Policloreto de Alumínio como coagulante



Fonte: Autor (2019).

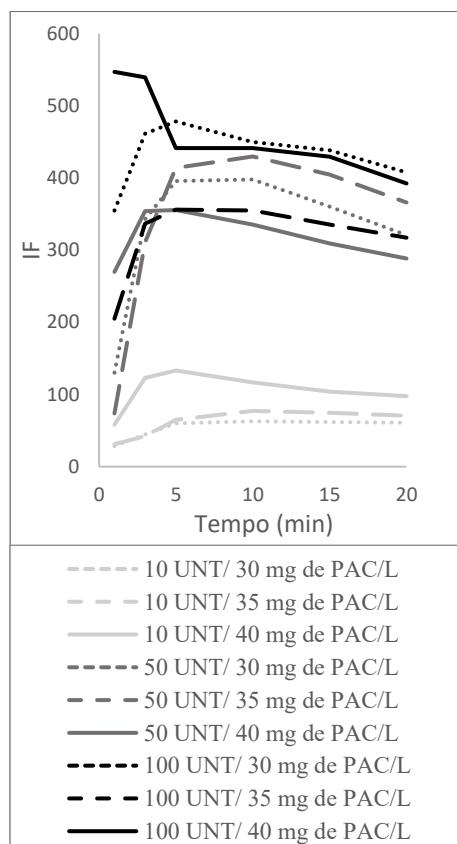
A evolução dos parâmetros β_1 acontece de forma similar entre as mesmas condições, com crescimento inicial evidente, indicando formação flocos maiores. Após os valores do

parâmetro atingirem seu pico, sua tendência é de decrescer, indicando estabelecimento do patamar de estabilização. Para água com turbidez de 10 UNT, dosagens de 30 e 35 mg/L os valores dos parâmetros β_1 inicialmente decresceram nos primeiros minutos, para só depois aumentar. Isso pode indicar dificuldade de formação de flocos maiores para esses casos, devido à combinação de baixa turbidez com baixa dosagem de coagulante. Isso também é reforçado pela verificação de que, nesse caso, o alcance do valor máximo acontece de forma mais tardia, apenas após decorridos 10 minutos de floculação.

Os valores de D_f apresentam crescimento inicial até atingir um pico, que, para as condições de menor dosagem e menor turbidez, acontece de forma mais tardia. Posteriormente, a dimensão fractal apresenta poucas variações, com valores quase estáveis ao longo do restante do processo de floculação.

O desenvolvimento do IF durante a floculação é ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Evolução do IF no desenvolvimento da floculação com Policloreto de Alumínio como coagulante



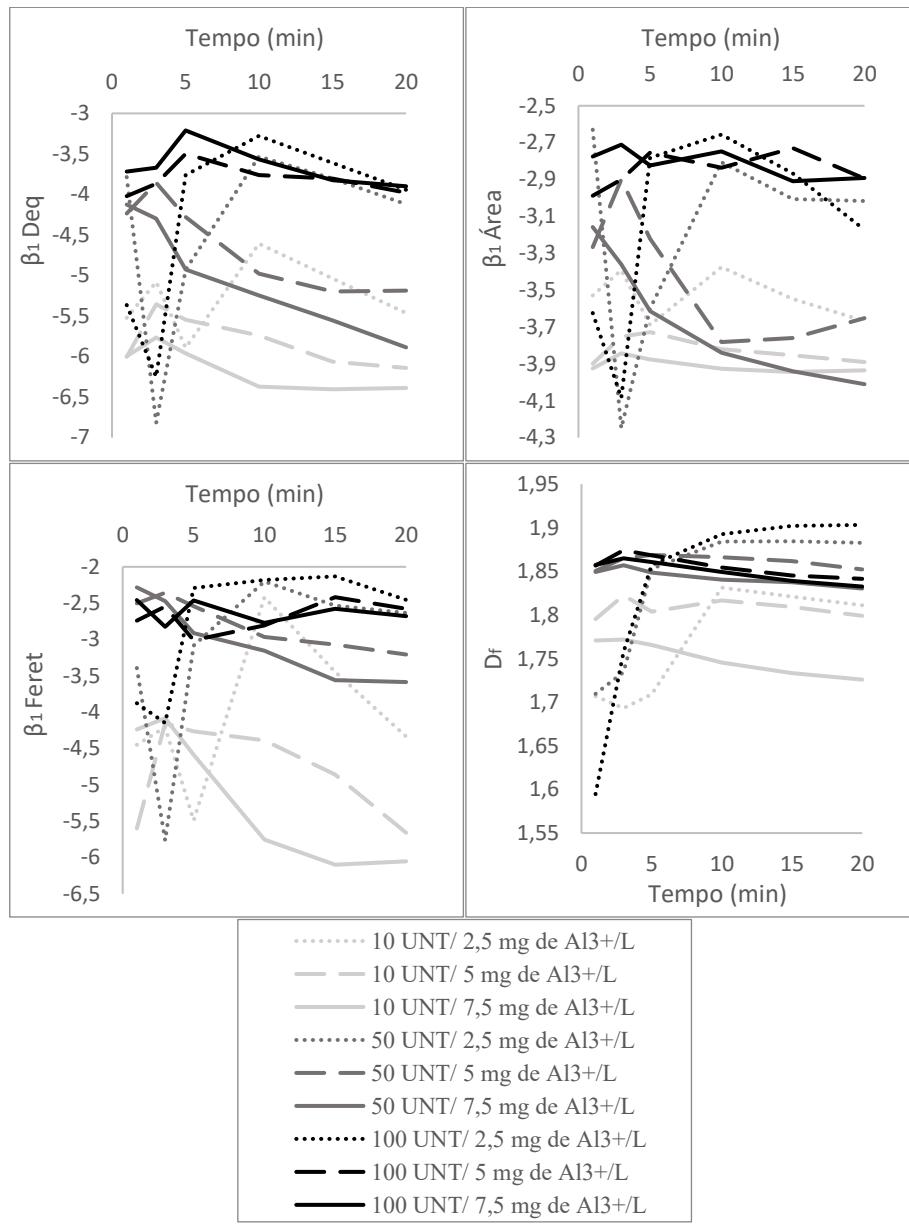
Fonte: Autor (2019).

Os valores de IF obtidos utilizando-se o Policloreto de Alumínio apresentam um crescimento inicial para a maioria das condições, seguido do alcance de um valor máximo, e em seguida, um decréscimo bem sútil, permanecendo praticamente estável. Esse comportamento é similar ao apresentado nos ensaios anteriores.

5.1.2 Sulfato de Alumínio

A Figura 12 mostra os valores obtidos para os parâmetros β_1 e D_f ao longo dos 20 minutos do tempo de floculação.

Figura 12: Evolução dos parâmetros β_1 e da D_f no desenvolvimento da floculação com Sulfato de Alumínio como coagulante

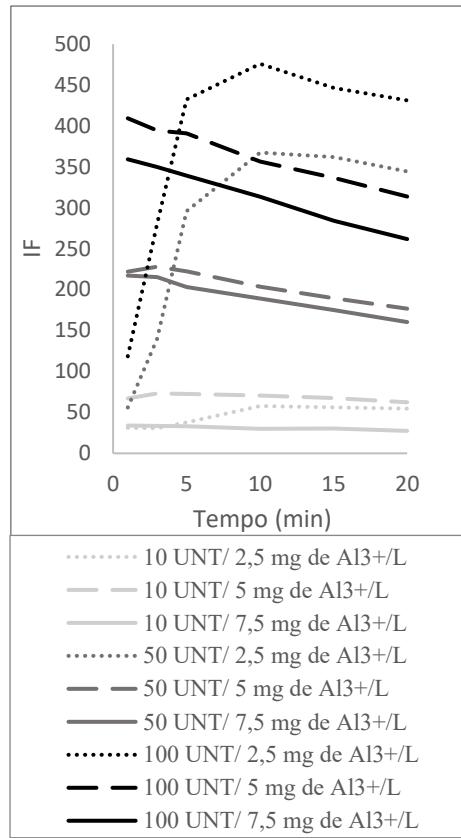


Fonte: Autor (2019).

A evolução de β_1 para o Sulfato de Alumínio não acompanhou o padrão de comportamento verificado para os outros dois coagulantes. Percebe-se, como esperado, que os maiores valores são obtidos para turbidez mais elevada. O desenvolvimento do D_f também não apresenta um padrão, mas, assim como no caso dos experimentos conduzidos com os outros coagulantes há alcance do patamar de estabilização a partir dos valores máximos.

A Figura 13 mostra os IF médios obtidos durante a floculação.

Figura 13: Evolução do IF ao longo da floculação para o Sulfato de Alumínio



Fonte: Autor (2019).

O gráfico da evolução do IF ao longo da floculação para o Sulfato de Alumínio apresenta comportamento bem definido. Nota-se para os menores valores de turbidez, considerando-se a mesma dosagem de coagulante, são obtidos os menores valores de IF. Esses valores, como esperado, aumentam à medida que se aumenta a turbidez e/ou a dosagem de coagulante, uma vez que os valores de IF acompanham o desenvolvimento do tamanho médio dos flocos.

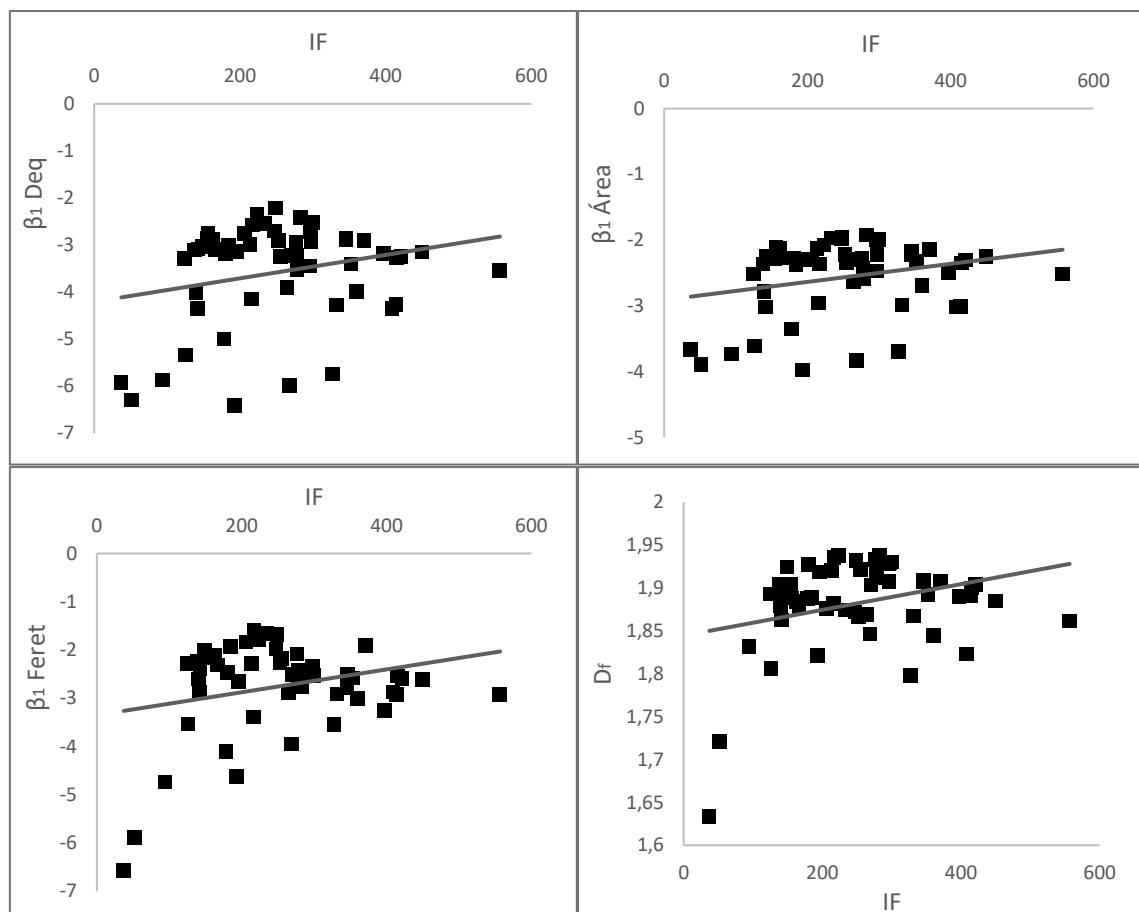
De maneira geral, para os três tipos de coagulantes utilizados, dosagens de coagulante e tipos de água de estudo, são observados comportamentos semelhantes para os parâmetros acompanhados. Salvo exceções, até mesmo em função da natureza dos experimentos conduzidos neste trabalho, em que são possíveis diversas interações entre os parâmetros físicos e químicos da água de estudo, do coagulante e das condições de controle, há crescimento inicial dos agregados e posterior estabilização.

5.2 Relações obtidas para o IF utilizando-se o Cloreto Férrico como coagulante

5.2.1 Parâmetros β_1 e D_f

A Figura 14 mostra os valores de IF relacionados com os valores dos parâmetros β_1 e D_f .

Figura 14: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros β_1 Deq, β_1 Área, β_1 Feret e D_f com Cloreto Férrico como coagulante



Fonte: Autor (2019).

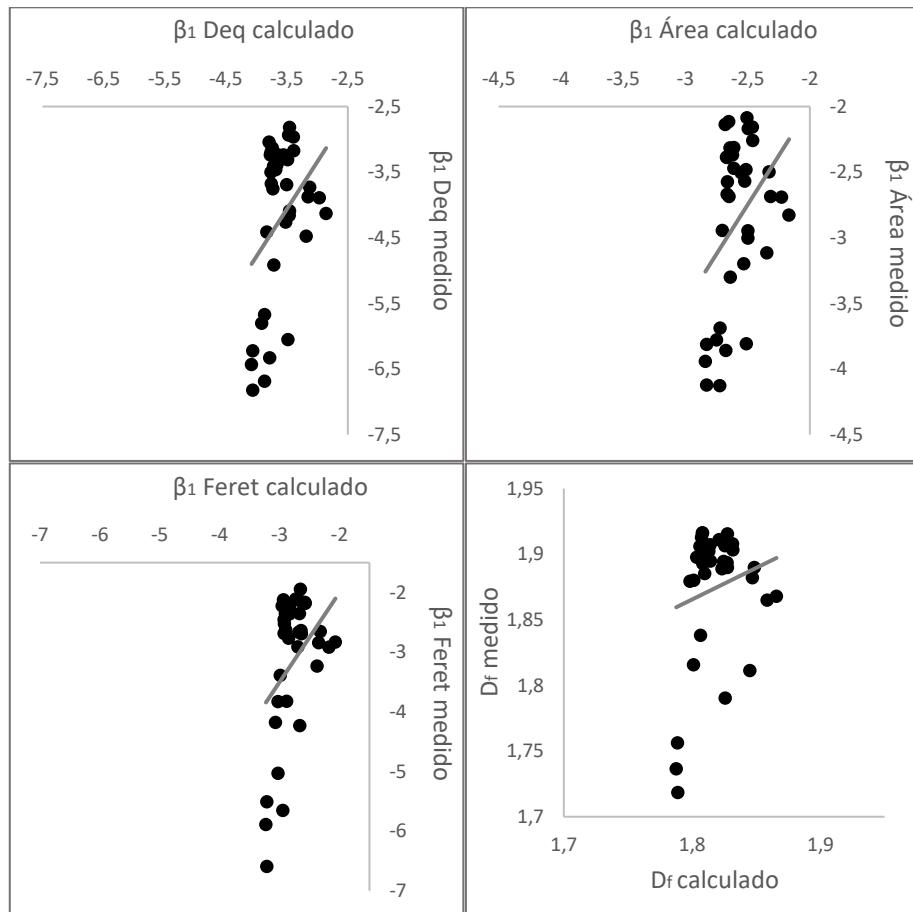
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA a partir do software R estão descritos na Tabela 3. Na Figura 15 é possível ver a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das regressões obtidas.

Tabela 3: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 14

| | Parâmetro | β_1 Deq | β_1 Área | β_1 Feret | Df |
|-------------------------|-----------------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------|
| Regressão linear | a | -4,204852 | -2,910295 | -3,350488 | 1,7793979 |
| | b | 0,002488 | 0,001372 | 0,002368 | 0,0001593 |
| | R² | 0,04191 | 0,0497 | 0,05078 | 0,05522 |
| | Valor p relativo a a | 1,62e-15 | 2e-16 | 7,16e-14 | 2e-16 |
| | Valor p relativo a b | 0,0743 | 0,0575 | 0,0556 | 0,0481 |
| | Valor p da regressão | 0,07427 | 0,05755 | 0,05556 | 0,04809 |
| Validação | R² | 0,1649 | 0,1397 | 0,2274 | 0,06855 |
| | Valor p da regressão | 0,008105 | 0,01421 | 0,001927 | 0,06717 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 15: Gráficos de comparação entre valores dos parâmetros medidos nos ensaios de validação e calculados por meio das regressões obtidas



Fonte: Autor (2019).

5.2.1.1 Parâmetro β_1 Deq em função de IF

O ajuste do parâmetro β_1 Deq não se mostrou interessante. Os valores p relativos ao parâmetro b e à regressão como um todo se apresentam acima do valor estabelecido como o limite aceitável para aceitação da regressão. Além disso, o valor do R^2 se apresentou muito baixo também. Nesse caso, é interessante notar que o valor do p relativo ao parâmetro a se apresenta bem baixo, e esse valor sozinho não pode ser utilizado como forma de aceitar a regressão. Sendo ele bem abaixo do limite de 0,05, mostra que é possível rejeitar a possibilidade de nulidade nesse parâmetro na equação. Mas, como o valor do coeficiente b está acima de 0,05, conclui-se que a participação do intercepto é isolada no que diz respeito à construção da regressão, ignorando-se a parcela relacionada ao coeficiente angular e o valor de x, o que não é interessante para esse trabalho.

5.2.1.2 Parâmetro β_1 Área em função de IF

Para o parâmetro β_1 Área, mesmo o valor p relativo ao coeficiente a se apresentando bem abaixo do limite estabelecido, o mesmo não aconteceu para o coeficiente b e para a regressão, além também de ter sido estabelecido um coeficiente de determinação muito baixo. No caso dos dados de validação, percebe-se que o R^2 foi maior e o valor p ficou abaixo do limite, resultado esse que pode ter sido obtido por acaso, uma vez que a equação de regressão modelada não tem significância estatística.

5.2.1.3 Parâmetro β_1 Feret em função de IF

Apesar do coeficiente linear ter apresentado um valor p bem abaixo do valor limite, o valor p relacionado à regressão como um todo foi acima desse limite e, portanto, configura como uma situação não interessante para o uso da regressão, uma vez que demonstra que essa equação modelada não apresenta significância estatística. Isso também é reforçado pelo baixo valor de R^2 . Os valores obtidos pelos experimentos de validação foram lançados nas equações, mas, como a regressão já foi rejeitada anteriormente, os resultados obtidos pela validação são irrelevantes.

5.2.1.4 Parâmetro D_f em função de IF

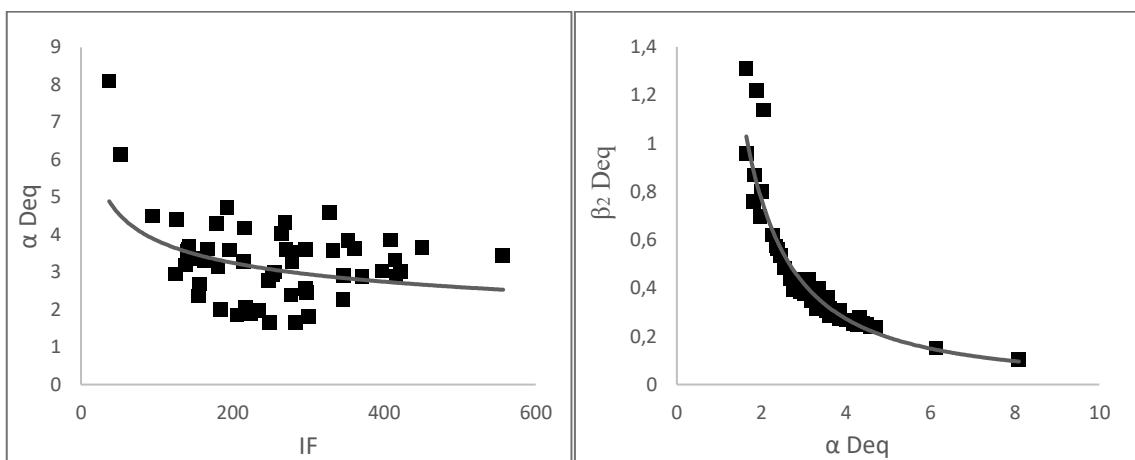
O parâmetro D_f apresenta um comportamento interessante e que mostra a importância dos experimentos de validação. O valor p da regressão foi baixo, abaixo do limite adotado nessa pesquisa. Por outro lado, o valor do R^2 está muito baixo, o que significa que o ajuste dos dados não foi muito bom. Entretanto, esse valor baixo do coeficiente de determinação pode ser resultado de grandes variações em uma pequena parcela dos dados, representada, por exemplo, pelos pontos do gráfico de comparação que estão muito distantes da linha de interseção. Pelos dados da validação, a conclusão acerca da significância ou não dessa regressão fica mais fácil de ser feita. Isso porque, pelo valor de p acima de 0,05 e também pelo baixo valor de R^2 , conclui-se que a regressão realmente não tem significância estatística.

5.2.2 Parâmetros α e β_2

5.2.2.1 Parâmetros α Deq e β_2 Deq

Os gráficos da Figura 16 representam as relações entre os valores de IF e os valores dos parâmetros α Deq e β_2 Deq.

Figura 16: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Deq e β_2 Deq para o Cloreto Férrico



Fonte: Autor (2019).

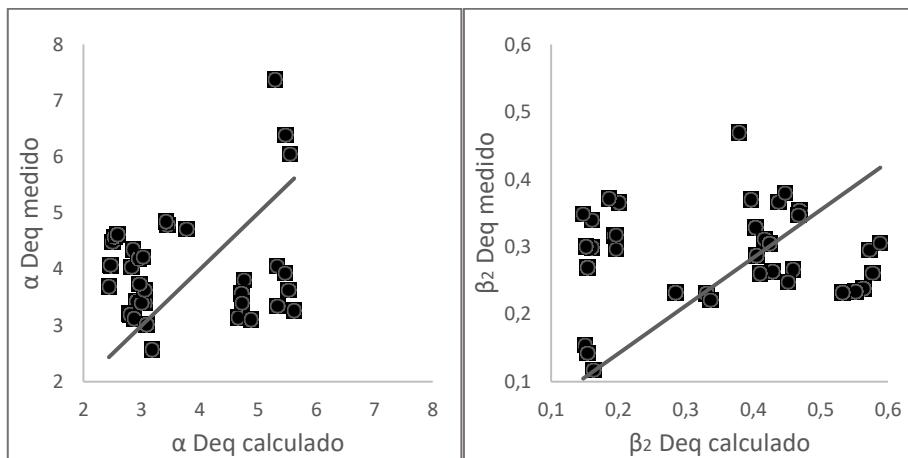
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA utilizando-se o software R estão descritos na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Na Figura 17 é possível ver a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das regressões obtidas.

Tabela 4: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 16

| | Parâmetro | α Deq | β_2 Deq |
|---------------------------------|--|--------------|---------------|
| Regressão não linear | a | 25,5682 | 2,573 |
| | b | -0,3814 | -1,656 |
| | R^2 | 0,3546 | 0,8822 |
| | Valor p relativo a a | 0,00131 | 2e-16 |
| | Valor p relativo a b | 1,18e-08 | 2e-16 |
| | Valor p da regressão | 2,04e-06 | 2e-16 |
| Validação | R^2 | 0,02979 | -0,0197 |
| | Valor p da regressão | 0,1589 | 0,5731 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 17: Gráficos de comparação entre valores dos parâmetros medidos nos ensaios de validação e calculados por meio das regressões obtidas



Fonte: Autor (2019).

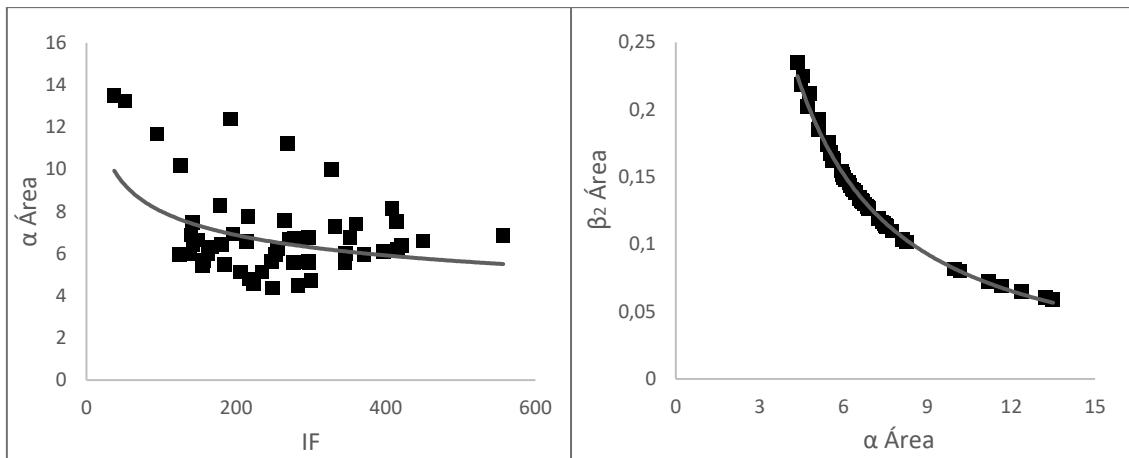
Tanto o parâmetro α Deq quanto o parâmetro β_2 Deq apresentaram um comportamento parecido para o Cloreto Férrico. Apesar de terem valores p abaixo do limite adotado nessa pesquisa, o que atestaria sua significância estatística, isso não é comprovado com os dados obtidos pelos experimentos de validação. Como é possível observar tanto pelos valores de p

e de R^2 , quanto pelos gráficos representados na Figura 17, os dados não se ajustam de forma suficiente a partir da equação de regressão obtida.

5.2.2.2 Parâmetros α Área e β_2 Área

A Figura 18 mostra os dados de relação obtidos para os valores de IF e os valores dos parâmetros α Área e β_2 Área.

Figura 18: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Área e β_2 Área para o Cloreto Férrico



Fonte: Autor (2019).

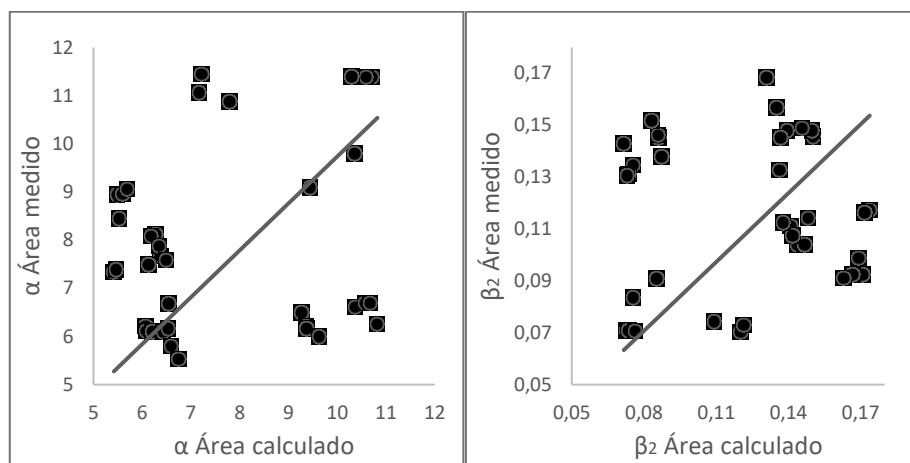
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA feitas utilizando o software R estão descritos na Tabela 5. Na Figura 19 é possível ver a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados utilizando-se as equações de relação obtidas.

Tabela 5: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 18

| | Parâmetro | α Área | β_2 Área |
|-------------------|-----------------------------|---------------|----------------|
| | a | 37,9621 | 1,514 |
| | b | -0,3159 | -1,281 |
| Regressão | R ² | 0,2941 | 0,9952 |
| não linear | Valor p relativo a a | 0,0014 | 2e-16 |
| | Valor p relativo a b | 7,73e-07 | 2e-16 |
| | Valor p da regressão | 2,28e-05 | 2e-16 |
| Validação | R ² | -0,00438 | -0,0277 |
| | Valor p da regressão | 0,3638 | 0,8136 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 19: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das equações de regressão obtidas para os experimentos de validação



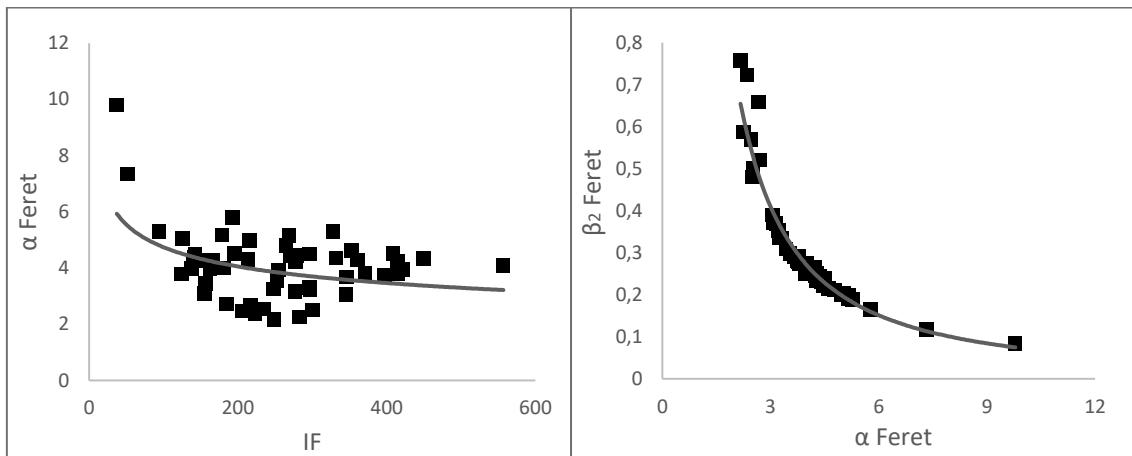
Fonte: Autor (2019).

Apesar de terem sido obtidos valores p abaixo do limite estabelecido tanto para a regressão modelada para o parâmetro α Área quanto para o parâmetro β_2 Área, incluindo até mesmo um coeficiente de determinação para esse segundo muito próximo a 100% de ajuste, o mesmo não acontece com os dados de validação. Isso porque, além de serem obtidos valores muito altos de p, os valores de R^2 para os parâmetros se apresentaram negativos. O baixo ajuste também é perceptível nos gráficos da Figura 19, devido à grande quantidade de pontos muito distantes da reta de interseção. Portanto, ambas as equações foram rejeitadas por não apresentarem significância estatística.

5.2.2.3 Parâmetros α Feret e β_2 Feret

A Figura 20 mostra os valores de IF relacionados com os valores dos parâmetros α Feret e β_2 Feret.

Figura 20: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Feret e β_2 Feret para o Cloreto Férrico



Fonte: Autor (2019).

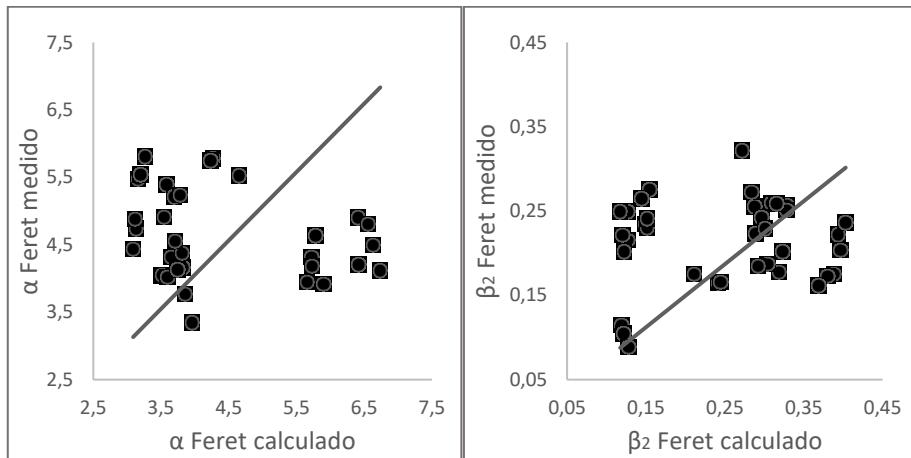
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA utilizando-se o software R estão descritos na Tabela 6. Na Figura 21 é possível ver a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das regressões obtidas.

Tabela 6: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 20

| | Parâmetro | α Feret | β_2 Feret |
|-------------------|--|----------------|-----------------|
| | a | 27,7218 | 2,4 |
| | b | -0,3561 | -1,582 |
| Regressão | R^2 | 0,3651 | 0,9392 |
| não linear | Valor p relativo a a | 0,000569 | 2e-16 |
| | Valor p relativo a b | 8,64e-09 | 2e-16 |
| | Valor p da regressão | 1,31e-06 | 2e-16 |
| Validação | R^2 | 0,04192 | -0,01756 |
| | Valor p da regressão | 0,1209 | 0,5334 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 21: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação



Fonte: Autor (2019).

Os valores p relativos tanto aos coeficientes a e b quanto o relacionado à regressão como um todo se apresentaram abaixo do limite de 0,05 adotado nessa pesquisa para ambos os parâmetros α Feret e β_2 Feret.

O valor de R^2 obtido para o parâmetro α se apresentou baixo, porém esse fato sozinho não descarta o uso da equação de regressão. Entretanto, pelos experimentos de validação, percebe-se que a equação não foi capaz de estimar os valores utilizando uma amostragem diferente da utilizada para a construção da regressão, uma vez que foi obtido um valor de p substancialmente superior ao valor obtido como limite, além também de um R^2 baixíssimo.

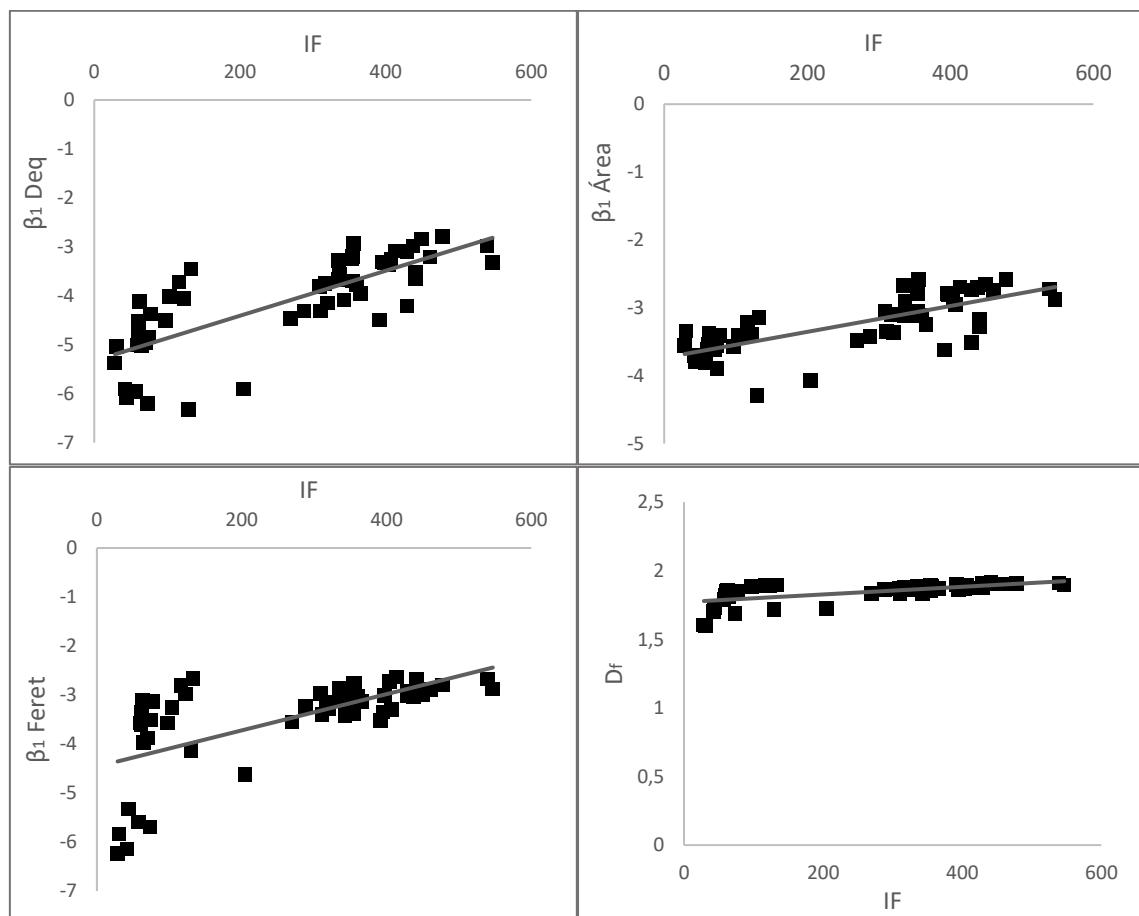
O mesmo acontece para o parâmetro β_2 , cujo valor de R^2 , inclusive, foi negativo, além também de ter fornecido um valor de p relativamente alto.

5.3 Relações para o IF utilizando-se Policloreto de Alumínio como coagulante

5.3.1 Parâmetros β_1 e D_f

A Figura 22 ilustra os valores de relação dos valores de IF com os valores dos parâmetros β_1 Deq, β_1 Área, β_1 Feret e D_f .

Figura 22: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros β_1 Deq, β_1 Área, β_1 Feret e D_f para o Policloreto de Alumínio



Fonte: Autor (2019).

Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA feitas utilizando o software R estão descritos na

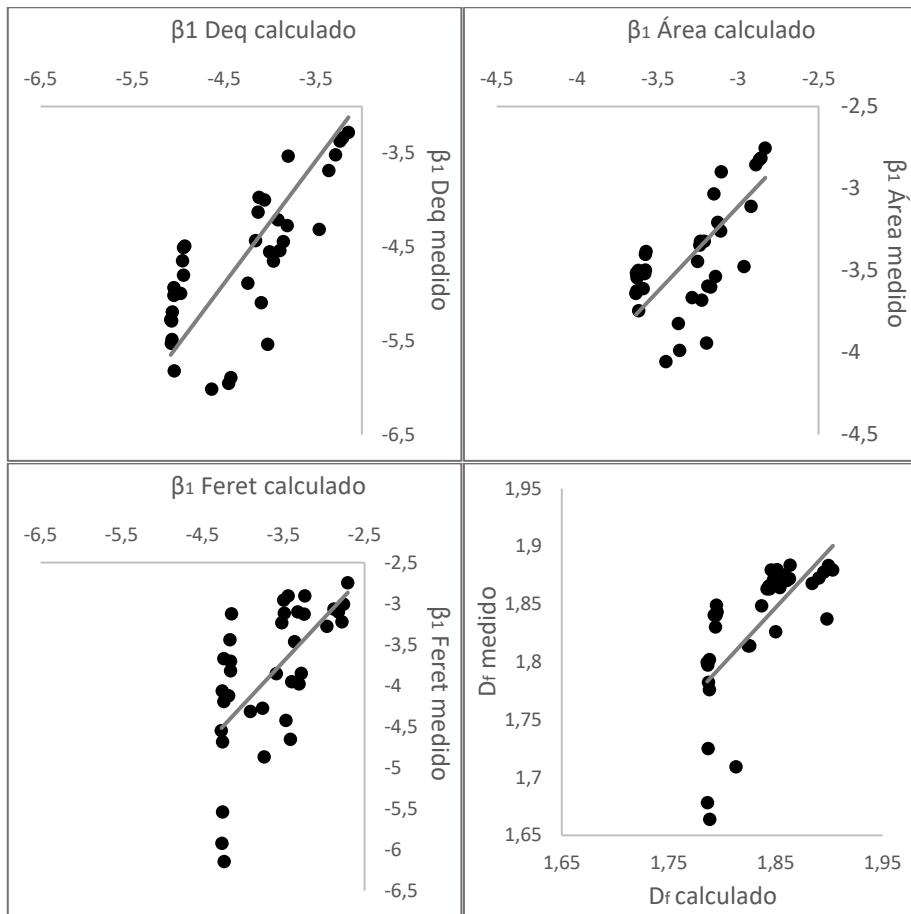
Tabela 7. Na Figura 23 é possível ver a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das regressões obtidas.

Tabela 7: Parâmetros obtidos pela regressão e análise ANOVA dos dados da Figura 22

| | Parâmetro | β_1 Deq | β_1 Área | β_1 Feret | D _f |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|
| Regressão linear | a | -5,326024 | -3,735 | -4,461468 | 1,7712259 |
| | b | 0,004592 | 0,001905 | 0,003696 | 0,0002786 |
| | R² | 0,5882 | 0,5371 | 0,3984 | 0,3709 |
| | Valor p relativo a a | 2e-16 | 2e-16 | 2e-16 | 2e-16 |
| | Valor p relativo a b | 8,25e-12 | 1,8e-10 | 1,87e-07 | 6,18e-07 |
| Validação | Valor p da regressão | 8,253e-12 | 1,8e-10 | 1,872e-07 | 6,177e-07 |
| | R² | 0,5277 | 0,3779 | 0,3686 | 0,4366 |
| | Valor p da regressão | 3,199e-07 | 3,975e-05 | 5,162e-05 | 6,947e-06 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 23: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação



Fonte: Autor (2019).

5.3.1.1 Parâmetro β_1 Deq em função de IF

Para esse parâmetro, a regressão se mostrou de certa forma ajustável aos dados. Os valores p de ambos os coeficientes estão bem abaixo do limite aceitável de 0,05, assim como o valor p relativo à regressão como um todo. É importante ressaltar que a avaliação dos coeficientes de forma separada é importante, uma vez que demonstra a importância estatística de ambos na construção da equação. O R^2 se aproxima de 0,6, o que indica que por volta de 60% dos dados obtidos pelos experimentos se ajustam conforme a equação determinada.

Cenário similar é observado na análise relativa aos dados de validação, tanto no que concerne ao coeficiente de determinação quanto ao analisar o valor de p, o que comprova que a regressão modelada é estatisticamente significativa.

5.3.1.2 Parâmetro β_1 Área em função de IF

Os coeficientes relacionados ao parâmetro β_1 Área obtiveram baixos valores de p, valor esse que também se apresentou baixo (isto é, quando comparado ao limite de 0,05 adotado) para a análise estatística da regressão como um todo. O valor do coeficiente de determinação ultrapassa os 50%.

O comportamento do valor p apresenta-se de forma similar para os dados de validação utilizados para a conferência da regressão. Ressalta-se que o valor de R^2 encontrado se apresenta abaixo de 50%, o que não necessariamente significa que a regressão deva ser rejeitada.

5.3.1.3 Parâmetro β_1 Feret em função de IF

Para esse parâmetro, o valor do coeficiente de determinação não se apresentou alto, o que, entretanto, não é motivo para a recusa da equação de regressão, como já foi explicitado anteriormente. Por outro lado, os valores de p foram abaixo do valor p limite, o que leva a conclusão de que a regressão tem significância estatística.

Os dados de validação seguem um comportamento parecido. Nota-se que o valor de p relacionado à regressão teve um ligeiro aumento quando comparado com o valor p encontrado para os dados iniciais. Entretanto, não é de interesse se comparar a magnitude deste valor, e sim se eles se encontram ou não dentro do limite estabelecido, não importando o valor propriamente dito. Como nesse caso, assim como para os dados de construção da regressão, o valor de p está abaixo de 0,05, conclui-se que a regressão tem significância estatística.

5.3.1.4 Parâmetro D_f em função de IF

A equação obtida para D_f tem significância estatística conforme valores de p, tanto considerando cada coeficiente da equação de forma isolada quanto ao analisar o valor p da regressão. Essa significância estatística também é obtida para os dados de validação.

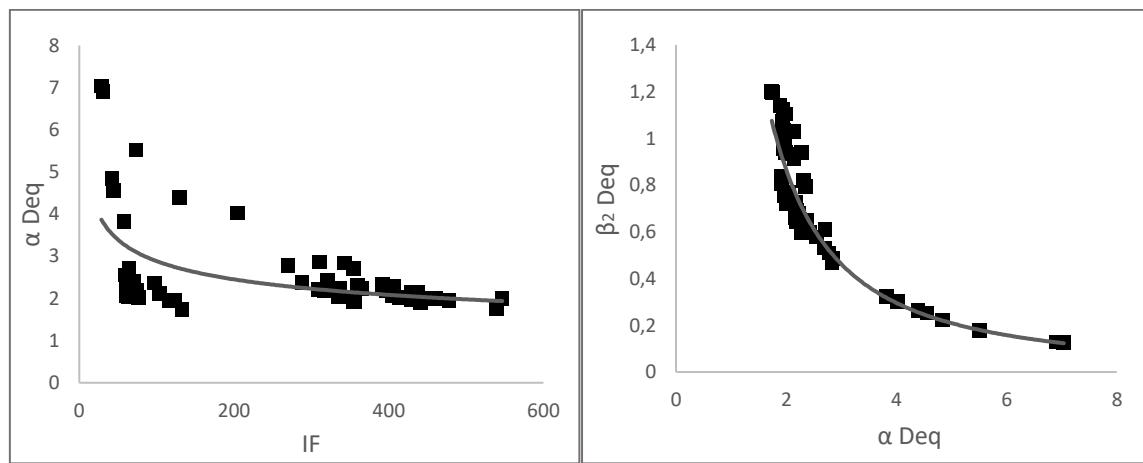
O caso desse parâmetro ilustra bem o cuidado em se avaliar equações de regressão somente com base no valor do R^2 . Ao comparar a análise ANOVA da regressão e a feita com base nos dados de validação, percebe-se que há um aumento no valor de R^2 no segundo caso. Entretanto, o valor de p aumentou, o que representa um contraste, uma vez que seria esperado que, com um aumento do R^2 , diminuísse o valor de p . Esse exemplo serve para ilustrar que nem sempre o R^2 deve ser considerado como um parâmetro único para aceitação ou não de uma equação de regressão.

5.3.2 Parâmetros α e β_2

5.3.2.1 Parâmetros α Deq e β_2 Deq

A Figura 24 mostra as relações entre os valores de IF com os valores dos parâmetros α Deq e β_2 Deq.

Figura 24: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Deq e β_2 Deq para o Policloreto de Alumínio



Fonte: Autor (2019).

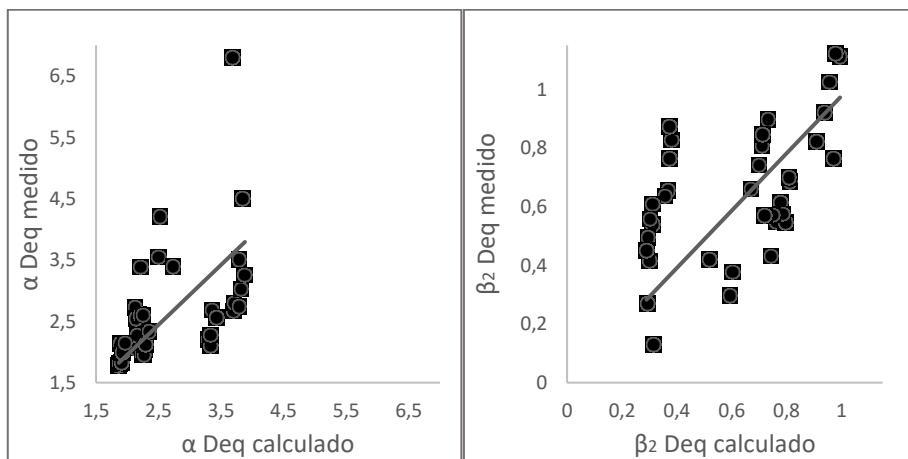
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA feitas utilizando o software R estão descritos na Tabela 8. A Figura 25 mostra a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das regressões obtidas.

Tabela 8: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 24

| | Parâmetro | α Deq | β_2 Deq |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------|---------------|
| | a | 14,6471 | 2,844 |
| | b | -0,3344 | -1,685 |
| Regressão não linear | R ² | 0,4403 | 0,8474 |
| | Valor p relativo a a | 6,78e-05 | 2,86e-12 |
| | Valor p relativo a b | 2,19e-09 | 7,85e-16 |
| | Valor p da regressão | 4,54e-08 | 2e-16 |
| Validação | R ² | 0,2311 | 0,2972 |
| | Valor p da regressão | 0,001766 | 0,0003478 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 25: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação



Fonte: Autor (2019).

O parâmetro α Deq teve valores de p relativamente baixos quando comparados com o limite pré-estabelecido nesse trabalho. O valor de R^2 , que se apresentou pouco abaixo dos 50% nos dados de construção da regressão, foi inferior no caso dos experimentos de validação.

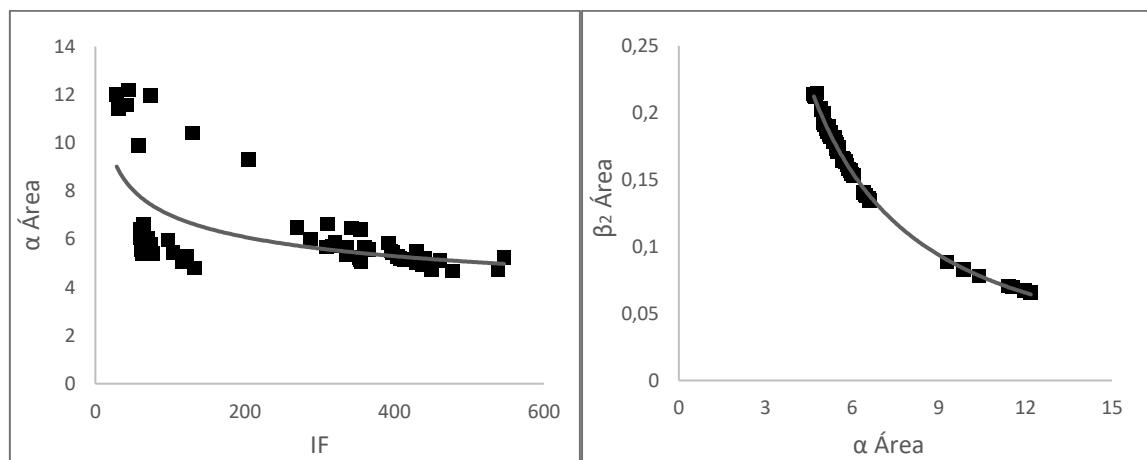
Entretanto, para os dados de validação, o valor p da regressão se manteve abaixo do limite de rejeição de 0,05, atestando a significância estatística da regressão. Ressalta-se, como pode ser visto na Figura 25, a existência de alguns pontos muito distantes na reta de interseção, o que diminui significativamente o valor de R^2 .

Para o β_2 Deq, os valores p se apresentaram bem baixos nos dados de construção da regressão linear, apresentando também um alto valor de R^2 . Para os dados de validação, o valor p não foi tão baixo, estando, entretanto, ainda abaixo de 0,05. Novamente, não há interesse em se comparar os valores, sendo de interesse apenas definir ou não a significância estatística do modelo, e, em caso positivo, fazer a comprovação por meio dos dados de validação.

5.3.2.2 Parâmetros α Área e β_2 Área

A Figura 26 mostra os valores de IF relacionados com os valores dos parâmetros α Área e β_2 Área.

Figura 26: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Área e β_2 Área para o Policloreto de Alumínio



Fonte: Autor (2019).

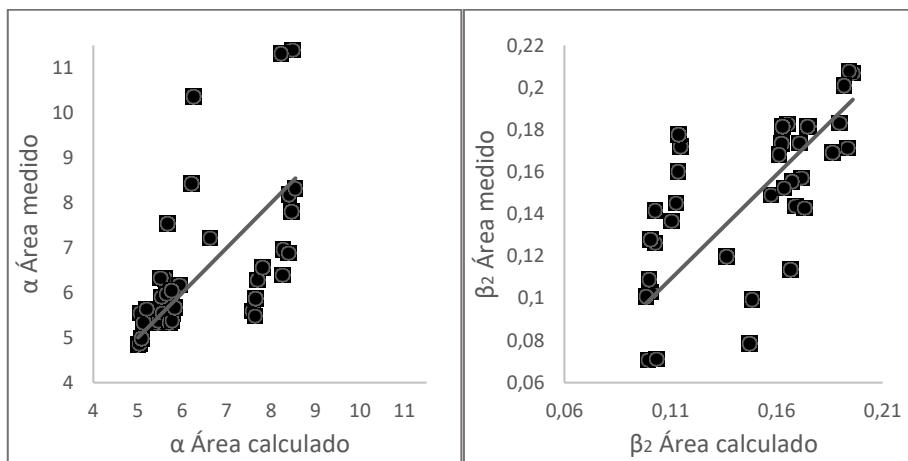
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA utilizando-se o software R estão descritos na Tabela 9. Na Figura 27 é possível verificar a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das equações de regressão obtidas.

Tabela 9: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 26

| | Parâmetro | α Área | β_2 Área |
|-------------------|-----------------------------|---------------|----------------|
| | a | 22,5660 | 1,553 |
| | b | -0,2443 | -1,285 |
| Regressão | R² | 0,4537 | 0,9967 |
| não linear | Valor p relativo a a | 4,66e-07 | 2e-16 |
| | Valor p relativo a b | 4,89e-09 | 2e-16 |
| | Valor p da regressão | 2,39e-08 | 2e-16 |
| Validação | R² | 0,306 | 0,4199 |
| | Valor p da regressão | 0,0002778 | 1,16e-05 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 27: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação



Fonte: Autor (2019).

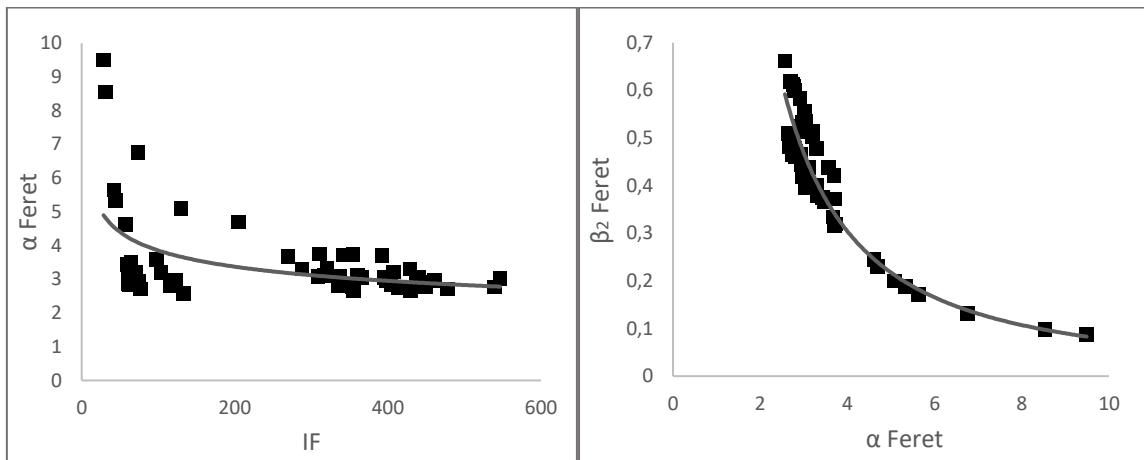
A equação obtida para o parâmetro α Área se mostrou estatisticamente significante por meio da análise dos valores p, tanto os relativos aos coeficientes da equação, quanto aquele que se relaciona à regressão. O mesmo é repetido para os dados de validação.

No caso do parâmetro β_2 Área, o baixo valor de p é obtido tanto para a regressão quanto para os dados obtidos na validação. O fato do valor de R^2 ter diminuído quando avaliados os dados de validação não pode constituir motivo único para rejeição da equação, uma vez que essa diminuição pode se dar por variações em uma pequena parcela dos dados, que dependendo de seu valor pode provocar deslocamento considerável na curva de relação.

5.3.2.3 Parâmetros α Feret e β_2 Feret

Na Figura 28 são apresentados os valores de IF relacionados com os valores dos parâmetros α Feret e β_2 Feret.

Figura 28: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Feret e β_2 Feret para o Policloreto de Alumínio



Fonte: Autor (2019).

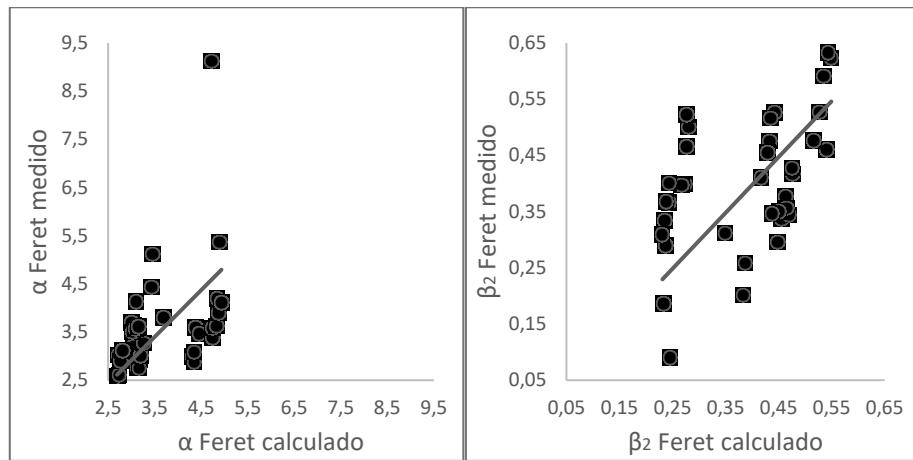
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA utilizando-se o software R estão descritos na Tabela 10. Na Figura 29 é possível ver a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das regressões obtidas.

Tabela 10: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 28

| | Parâmetro | α Feret | β_2 Feret |
|-------------------|-----------------------------|----------------|-----------------|
| | a | 14,8213 | 2,262 |
| | b | -0,2768 | -1,429 |
| Regressão | R² | 0,4042 | 0,8488 |
| não linear | Valor p relativo a a | 1,44e-05 | 5,12e-10 |
| | Valor p relativo a b | 2,81e-08 | 2e-16 |
| | Valor p da regressão | 2,4e-07 | 2e-16 |
| Validação | R² | 0,1746 | 0,2324 |
| | Valor p da regressão | 0,006522 | 0,001711 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 29: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação



Fonte: Autor (2019).

Os valores p se apresentaram inferiores a 0,05 tanto para a equação que relaciona o IF com o parâmetro α Feret, quanto para a equação que relaciona o parâmetro α Feret com o parâmetro β_2 Feret.

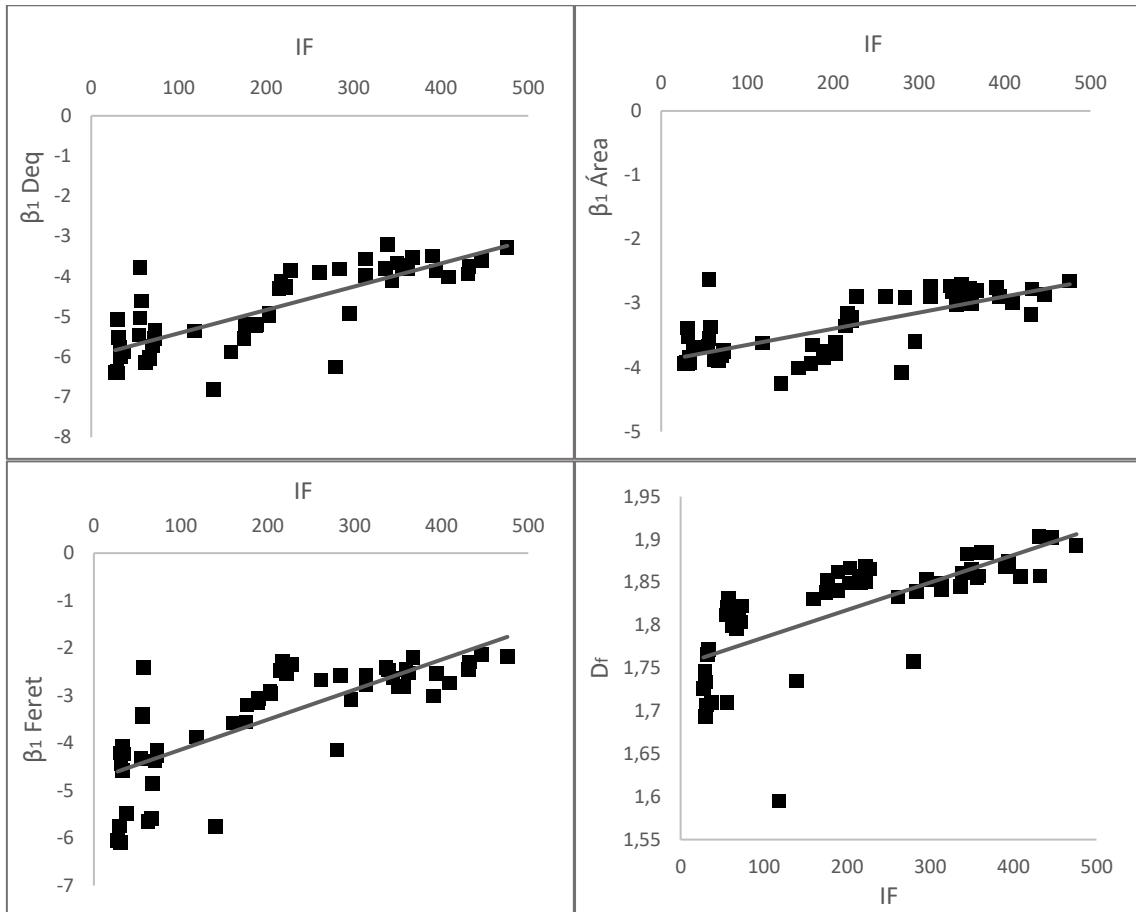
Isso acontece também para os dados utilizados na validação para ambos os parâmetros o que comprova a significância estatística de ambas as regressões não-lineares. Nesse caso, nota-se que os valores p das regressões utilizando os dados de validação estão bem mais próximos do valor limite pré-estabelecido, porém não há interesse no que concerne à magnitude desse valor.

5.4 Relações obtidas para o IF utilizando-se o Sulfato de Alumínio como coagulante

5.4.1 Parâmetros β_1 e D_f

Na Figura 30 são mostrados os valores de IF relacionados com os valores dos parâmetros de β_1 e D_f .

Figura 30: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros β_1 Deq, β_1 Área, β_1 Feret e Df com Sulfato de Alumínio como coagulante



Fonte: Autor (2019).

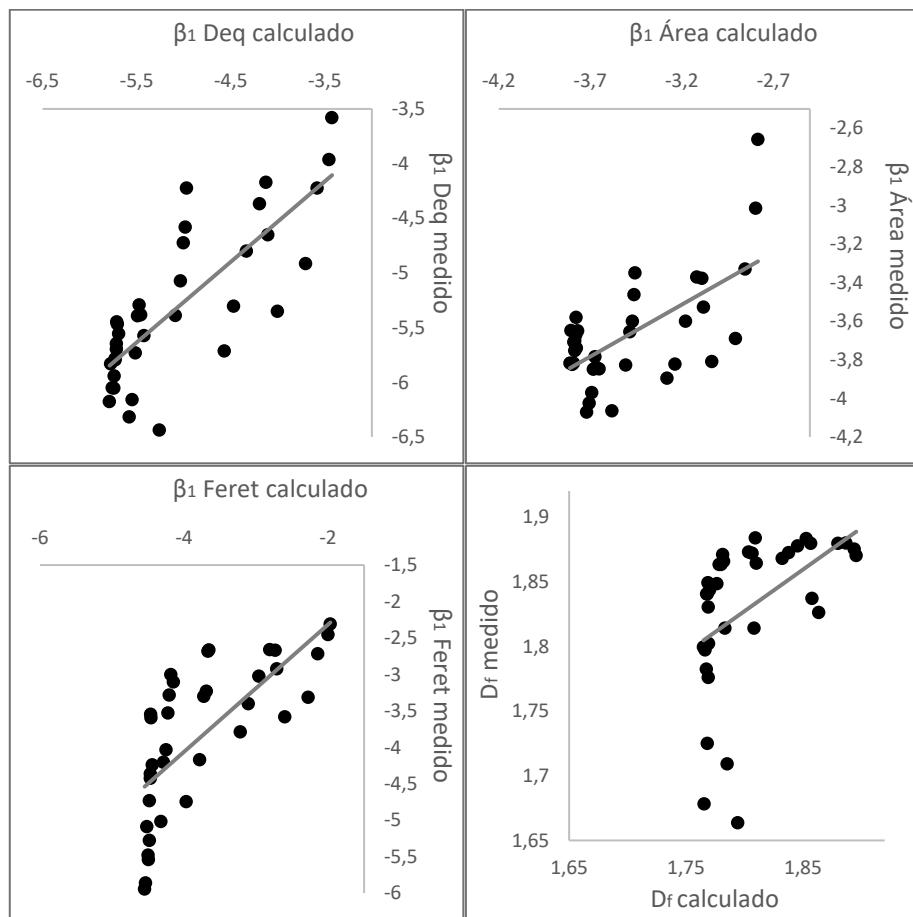
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA utilizando-se o software R estão descritos na Tabela 11. Na Figura 31 é possível ver a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das regressões obtidas.

Tabela 11: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 30

| | Parâmetro | β_1 Deq | β_1 Área | β_1 Feret | Df |
|-------------------------|-----------------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------|
| Regressão linear | a | -5,992355 | -3,899409 | -4,771092 | 1,7536373 |
| | b | 0,005792 | 0,002516 | 0,006319 | 0,0003203 |
| | R² | 0,6365 | 0,5377 | 0,5812 | 0,5065 |
| | Valor p relativo a a | 2e-16 | 2e-16 | 2e-16 | 2e-16 |
| | Valor p relativo a b | 3,1e-13 | 1,74e-10 | 1,28e-11 | 9,76e-10 |
| | Valor p da regressão | 3,098e-13 | 1,741e-10 | 1,282e-11 | 9,758e-10 |
| Validação | R² | 0,6218 | 0,3945 | 0,508 | 0,2004 |
| | Valor p da regressão | 6,817e-09 | 2,464e-05 | 1,079e-06 | 0,003619 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 31: Gráficos de comparação entre valores dos parâmetros medidos nos ensaios de validação e calculados por meio das regressões obtidas



Fonte: Autor (2019).

5.4.1.1 Parâmetro β_1 Deq em função de IF

A Tabela 11 apresenta o R^2 com valor igual a 0,6365 relativamente distante de 1, entretanto, isso por si só, não indica que a equação não é interessante para se estimar os valores de β_1 Deq em função dos valores de IF. Em seguida, é apresentado o valor p relativo ao intercepto a . Esse valor se encontra abaixo do limite de 0,05 indicado na maior parte das literaturas, indicando, portanto, que esse valor é estatisticamente significativo na regressão. Entretanto, é necessário também avaliar o valor p relativo ao coeficiente angular da reta, que se encontra também abaixo do limite de 0,05. Por fim, tem-se o valor p da regressão como um todo, que equivale a 3,098e-13. Conclui-se, portanto, que essa regressão tem significância estatística.

A validação da regressão é importante para que se teste se, mesmo com valores diferentes daqueles usados para a determinação da regressão, esses valores podem ser relacionados pela equação obtida. No caso desse parâmetro, a validação apresentou R^2 de 0,6218, e um valor p de 6,817e-09, portanto, inferior ao valor máximo admitido para essa pesquisa. Dessa forma, assim como para obtenção da equação de regressão, os resultados obtidos com utilização dos dados de validação também se apresentaram estatisticamente significativos.

5.4.1.2 Parâmetro β_1 Área em função de IF

Para o parâmetro β_1 Área foi obtido um valor do coeficiente de determinação R^2 igual a 0,5377. O valor está bem abaixo do valor de 1 desejado, porém, como já foi dito, o R^2 não pode ser analisado de forma isolada. Um valor de R^2 próximo a 1 indica uma regressão bem ajustada, mas um valor não tão próximo não necessariamente indica que a equação falha em estimar o valor da variável estudada. Tanto o valor p relativo a a quanto à b encontram-se abaixo 0,05. O valor p relativo à regressão também foi abaixo de 0,05, indicando equação com significância estatística. O mesmo acontece com o valor p obtido com os dados da validação, mesmo o valor de R^2 se apresentando bem abaixo do valor de 1.

5.4.1.3 Parâmetro β_1 Feret em função de IF

Nesse caso, obteve-se um R^2 próximo de 60%. Valores p para o intercepto a , para o coeficiente de regressão b e para a regressão como um todo mostraram que a equação calculada tem significância estatística ao estimar os valores de β_1 Feret por meio do valor de IF obtido com o PDA, estando esses abaixo do limite de 0,05 adotado. O mesmo acontece para os valores obtidos por meio dos procedimentos de validação.

5.4.1.4 Parâmetro D_f em função de IF

Para o parâmetro D_f , obteve-se valores p para a e b abaixo de 0,05, assim como o valor p obtido para a regressão, equivalente a 9,76e-10. O coeficiente de determinação calculado foi pouco acima de 50%, entretanto, a significância dos dados estatísticos não está atrelada somente a esse valor, já sendo atestada pelos baixos valores de p.

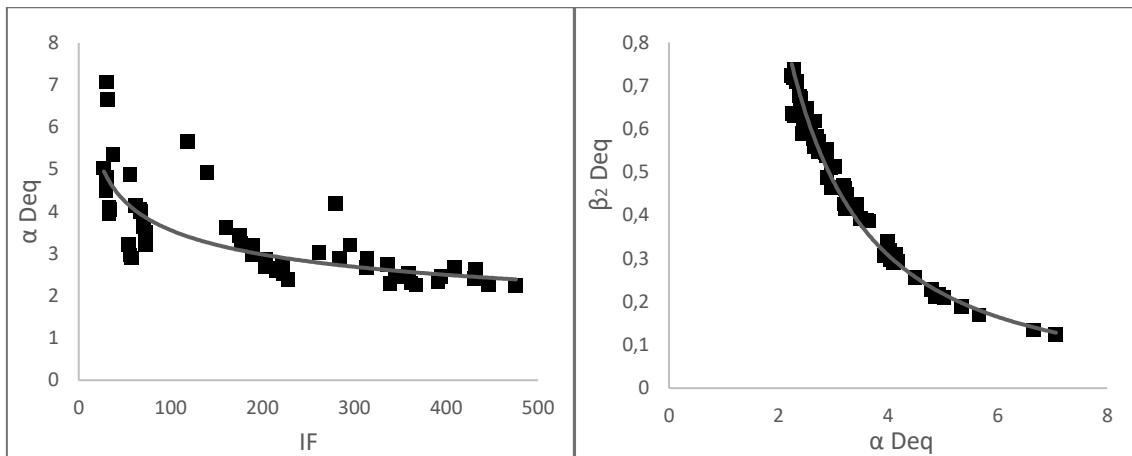
O mesmo ocorre com os dados de validação, que nesse caso possibilita uma análise ainda mais interessante. O coeficiente de determinação calculado se apresentou muito baixo, porém o valor p referente a esses dados continua abaixo de 0,05, assim como na análise da regressão. É importante notar que esse valor p é mais próximo do valor limite adotado que o valor p obtido na regressão. Entretanto, não há, novamente, interesse em se comparar esses valores quanto à sua “maior significância”. Ou seja, o objetivo é apenas definir se as regressões e os dados de validação estão ou não dentro do limite de confiança de 95% adotado.

5.4.2 Parâmetros α e β_2

5.4.2.1 Parâmetros α Deq e β_2 Deq

Plotando os valores de IF como o valor das abcissas e os valores dos parâmetros α Deq e β_2 Deq como o valor das ordenadas, tem-se os gráficos da Figura 32.

Figura 32: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Deq e β_2 Deq para o Sulfato de Alumínio



Fonte: Autor (2019).

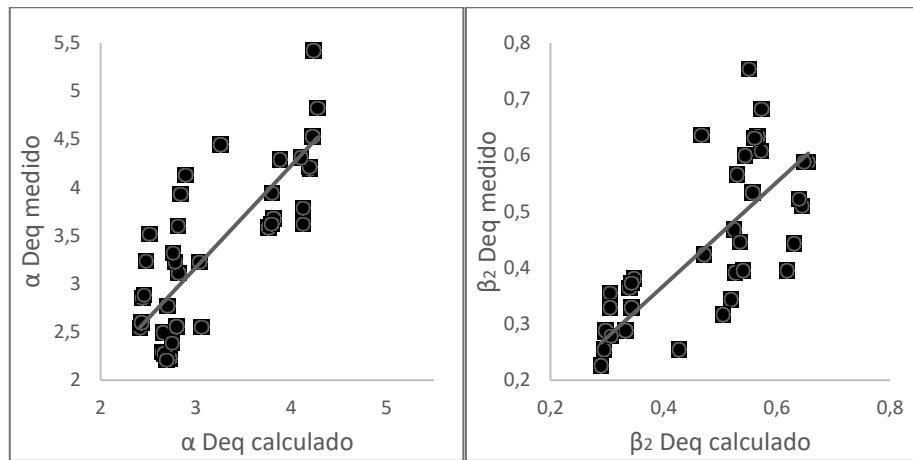
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA feitas utilizando o software R estão descritos na Tabela 12. Na Figura 33 é possível ver a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das regressões obtidas.

Tabela 12: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 32

| | Parâmetro | α Deq | β_2 Deq |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------------|---------------|
| Regressão não linear | a | 12,061 | 2,304 |
| | b | -0,261 | -1,426 |
| | R² | 0,5953 | 0,9753 |
| | Valor p relativo a a | 1,23e-09 | 2e-16 |
| | Valor p relativo a b | 6,23e-12 | 2e-16 |
| | Valor p da regressão | 8,58e-12 | 2e-16 |
| Validação | R² | 0,5882 | 0,5338 |
| | Valor p da regressão | 2,97e-08 | 2,548e-07 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 33: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação



Fonte: Autor (2019).

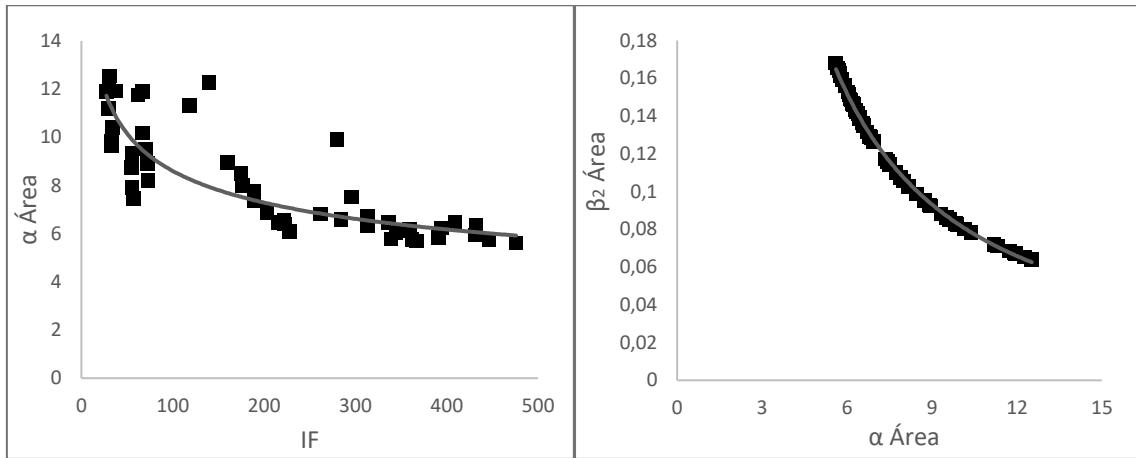
Para o parâmetro α Deq, os valores p relativos para ambos os coeficientes a e b se encontram abaixo do limite estipulado para que se rejeite a nulidade desses coeficientes. Isso acontece também para o p relativo à regressão. Além disso, o valor de R^2 está próximo de 60%, valor esse que se repete para os dados utilizados nos procedimentos de validação. Por fim, para a validação, o valor p também está abaixo do limite de 0,05 aceitável para que não seja rejeitada a equação de regressão.

Em relação ao parâmetro β_2 Deq, o ajuste da equação foi importante, com 0,98 do valor de R^2 e valores de p bem baixos, tanto dos coeficientes quanto do valor p relativo à equação global de regressão. O valor p abaixo dos 0,05 também é encontrado quando utilizados os dados de validação, embora com valor de R^2 de 0,54.

5.4.2.2 Parâmetros α Área e β_2 Área

Os gráficos da Figura 34 mostram as relações entre o IF e os valores dos parâmetros α Deq e β_2 Deq.

Figura 34: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Área e β_2 Área para o Sulfato de Alumínio



Fonte: Autor (2019).

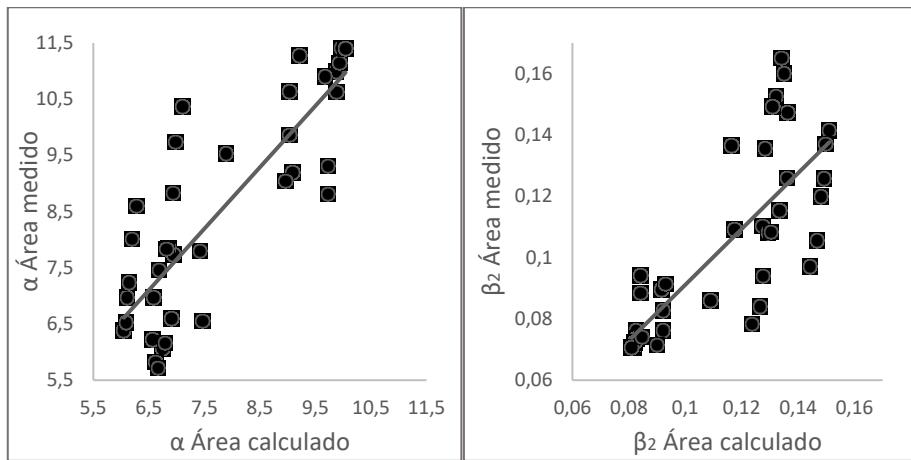
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA com uso do software R estão descritos na Tabela 13. Na Figura 35 é possível observar a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das regressões obtidas.

Tabela 13: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 34

| | Parâmetro | α Área | β_2 Área |
|------------------|-----------------------------|---------------|----------------|
| Regressão | a | 25,1559 | 1,383 |
| | b | -0,2312 | -1,230 |
| | R² | 0,7009 | 0,9986 |
| | Valor p relativo a a | 3,88e-14 | 2e-16 |
| | Valor p relativo a b | 2,60e-15 | 2e-16 |
| Validação | Valor p da regressão | 3,06e-15 | 2e-16 |
| | R² | 0,6552 | 0,54 |
| | Valor p da regressão | 1,379e-09 | 2,018e-07 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 35: Gráficos de comparação entre valores dos parâmetros medidos nos ensaios de validação e calculados por meio das regressões obtidas



Fonte: Autor (2019).

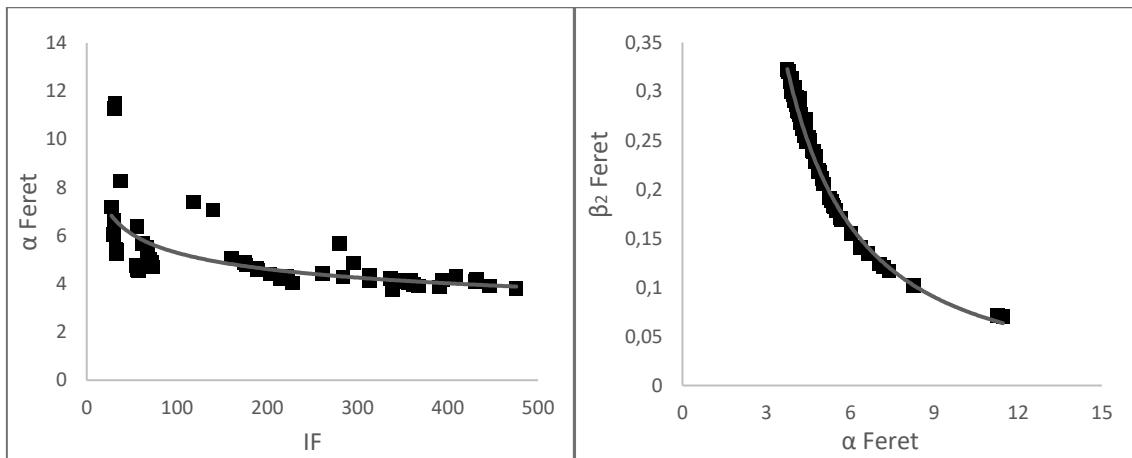
O parâmetro α Área apresentou R^2 de 70% de ajuste dos dados utilizados para a construção da regressão, valor esse quase alcançado para os dados de validação utilizados, cujo R^2 aproximou-se de 66%. Os valores p relativos aos coeficientes a e b da regressão se apresentaram abaixo do limite de 0,05 estipulado, assim como o valor p relativo à regressão como um todo. No caso dos dados de validação, o valor de p também foi inferior a 0,05.

Para o parâmetro β_2 Área, o coeficiente de determinação alcançado foi muito próximo a 1, assim como os valores os valores p calculados também estiverem bem abaixo dos 0,05. No caso dos dados de validação, o coeficiente de determinação foi de 0,54, com um valor p também abaixo do limite adotado.

5.4.2.3 Parâmetros α Feret e β_2 Feret

A Figura 36 mostra os valores de IF relacionados com os valores dos parâmetros α Feret e β_2 Feret.

Figura 36: Gráficos de relação entre o IF e os parâmetros α Feret e β_2 Feret para o Sulfato de Alumínio



Fonte: Autor (2019).

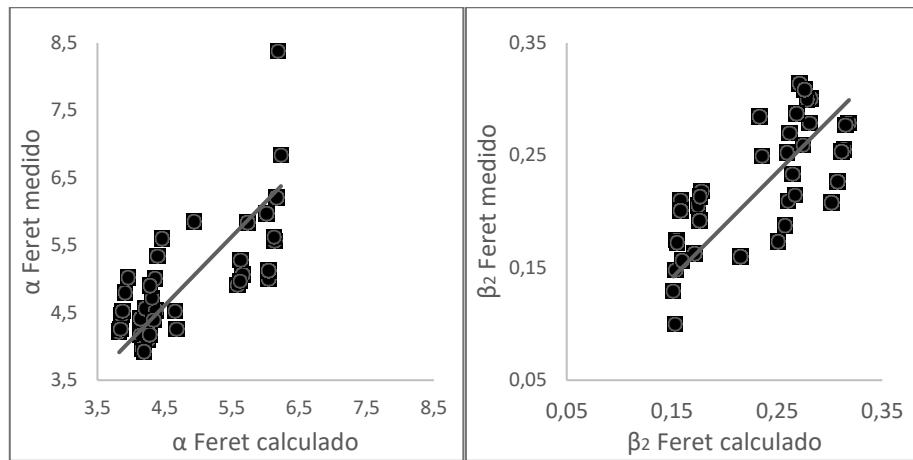
Os principais dados obtidos pela regressão e pela análise ANOVA utilizando-se o software R estão descritos na Tabela 14. Na Figura 37 é possível ver a comparação entre os parâmetros medidos nos experimentos de validação e os parâmetros calculados por meio das regressões obtidas.

Tabela 14: Parâmetros obtidos pela regressão e pela análise ANOVA para os dados da Figura 36

| | Parâmetro | α Feret | β_2 Feret |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------|
| Regressão não linear | a | 15,0897 | 2,457 |
| | b | -0,2228 | -1,524 |
| | R² | 0,4699 | 0,992 |
| | Valor p relativo a a | 1,52e-08 | 2e-16 |
| | Valor p relativo a b | 5,41e-09 | 2e-16 |
| Validação | Valor p da regressão | 1,07e-08 | 2e-16 |
| | R² | 0,4935 | 0,5154 |
| | Valor p da regressão | 1,079e-06 | 4,994e-07 |

Fonte: Autor (2019).

Figura 37: Gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados por meio das regressões modeladas para os experimentos de validação



Fonte: Autor (2019).

O parâmetro α Feret teve valores p baixos tanto para seus coeficientes quanto para a regressão, ou seja, podemos rejeitar a hipótese de nulidade desses parâmetros. A equação contribui para se prever os valores de α com base no IF, mesmo o ajuste dos dados ter seu coeficiente de determinação de apenas 0,47. O mesmo acontece para os dados de validação.

No caso do β_2 Feret, o ajuste dos dados apresentou R^2 de 0,99, assim como pelos baixos valores de p. Um baixo valor de p, abaixo de 0,05, também foi obtido para os dados de validação.

5.5 Comportamento dos dados de β_1 e D_f

Conforme Figuras 14, 22 e 30 é possível perceber comportamento semelhante com utilização dos três coagulantes, apesar da qualidade do ajuste ser diferente em cada caso. Os valores dos parâmetros β_1 , representativos da DTP, acompanham, no desenvolvimento da floculação, os valores de IF, ou seja, os valores aumentam (em módulo diminuem), à medida que o IF aumenta. De fato, esse padrão é esperado de acordo com a definição de ambas as dimensões. O parâmetro β_1 , assim como explicitado em 3.5.1, cresce à medida que diminui a concentração de partículas nas menores classes de tamanho ao passo que aumenta em classes superiores, comportamento explicado em Yukselen e Gregory (2002).

Foi observado também que o aumento nos valores de D_f foi acompanhado pelo aumento nos valores de IF, indicando que, à medida que o tamanho médio dos agregados é alterado em função do desenvolvimento da floculação, a estrutura interna vai se tornando mais organizada e compacta, diminuindo os poros e espaços existentes entre as partículas formadoras dos flocos, como observado em Spicer e Pratsinis (1996a) e Huang (1994).

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÃO

Foi possível o estabelecimento de relações entre o IF, os parâmetros da DTP e a dimensão fractal. Utilizando-se as equações de relação é possível estimar os valores dos parâmetros característicos dos agregados por meio dos valores de IF, no caso desse trabalho os parâmetros β_1 , α e β_2 , e D_f .

Os parâmetros β_1 permitem o acompanhamento do desenvolvimento dos agregados no decorrer da floculação e em função da dosagem de coagulante com informações sobre o deslocamento da concentração de partículas nas classes de tamanho.

O conhecimento dos parâmetros α e β_2 a partir do IF podem permitir, em tempo real, a estimativa das frequências absolutas das classes.

As medidas do parâmetro D_f podem possibilitar análises rápidas do desenvolvimento da estrutura dos flocos. O conhecimento deste parâmetro é importante uma vez que, normalmente, flocos de menores dimensões fractais apresentam estruturas mais esparsas e porosas, enquanto flocos de maiores dimensões fractais são mais densos.

O ajuste das equações não se apresentou interessante utilizando-se o Cloreto Férrico como coagulante, entretanto, o mesmo não ocorreu para o Sulfato de Alumínio e o Policloreto de Alumínio. No que concerne ao Policloreto de Alumínio, algumas das equações de regressão obtidas apresentaram ajuste com significância estatística com destaque para a equação obtida para se estimar o valor do parâmetro β_1 relacionado ao diâmetro equivalente. No caso dos parâmetros α e β_2 , a análise da regressão foi melhor quando a dimensão área foi considerada.

Os resultados obtidos com o Sulfato de Alumínio também apresentaram significância estatística, principalmente considerando-se o β_1 Deq e as equações relacionadas aos parâmetros α e β_2 .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOUYER, Denis; LINÉ, Alain; DO-QUANG, Zdravka. Experimental analysis of floc size distribution under different hydrodynamics in a mixing tank. *Aiche Journal*, [s.l.], v. 50, n. 9, p.2064-2081, 9 ago. 2004.

<https://doi.org/10.1002/aic.10242>

CHENG, Wen Po; CHANG, Jen Neng; CHEN, Ping Hung; YU, Ruey Fang; HUANG, Yu Wei; HSIEH, Ying JU. Monitoring Floc Formation to Achieve Optimal Flocculation in Water Treatment Plants. *Environmental Engineering Science*, [s.l.], v. 27, n. 6, p.523-530, jun. 2010.

<https://doi.org/10.1089/ees.2010.0065>

CRITTENDEN, J.C. *Water Treatment: principles and design*. 2nd ed. New Jersey: Jon Wiley & Sons, Inc., 2005, 1948 p.

DUTRA, Ricardo Henrique de Andrade. Obtenção dos parâmetros cinéticos da floculação com utilização de técnica de análise por imagem. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.

<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2017.84>

HENDRICKS, David W.. *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes: Physical, Chemical, and Biological*. Fort Collins: Crc Press, 2010. 927 p.

HE, Weipeng; NAN, Jun; LI, HAOYU; LI, Shengnan. Characteristic analysis on temporal evolution of floc size and structure in low-shear flow. *Water Research*, [s.l.], v. 46, n. 2, p.509-520, fev. 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.040>

HUANG, Hening. Fractal properties of flocs formed by fluid shear and differential settling. Physics Of Fluids, [s.l.], v. 6, n. 10, p.3229-3234, out. 1994.
<https://doi.org/10.1063/1.868055>

FERREIRA, Juliana Carvalho; PATINO, Cecilia Maria. What does the p value really mean? Jornal Brasileiro de Pneumologia, [s.l.], v. 41, n. 5, p.485-485, out. 2015.
<https://doi.org/10.1590/S1806-37132015000000215>

GONÇALVES, Luan Serafim Mendes. Evolução do diâmetro fractal de agregados formados a partir de água com baixa turbidez. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.
<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.40>

GREGORY, J. Turbidity fluctuations in flowing suspensions. Journal of Colloid and Interface Science, v. 105, n. 2m p.357-371, jun. 1985.
[https://doi.org/10.1016/0021-9797\(85\)90309-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(85)90309-1)

JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; GREGORY, J.; PARSONS, S.A. A review of floc strength and breakage. Water Research, [s.l.], v. 39, n. 14, p.3121-3137, set. 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.022>

JIN, Pengkang K.; WANG, Xiaochang C.; CHAI, Haixia. Evaluation of floc strength by morphological analysis and PDA online monitoring. Water Science & Technology, [s.l.], v. 56, n. 10, p.117-124, nov. 2007.
<https://doi.org/10.2166/wst.2007.781>

LARSON, Roland Edwin; FARBER, Betsy. Estatística Aplicada, 4. ed., Editora Pearson, São Paulo, 2010.

LI, Tao, ZHU, Zhe; WANG, Dongsheng; YAO, Chonghua; TANG, Hongxiao. Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms. Powder Technology, [s.l.], v. 168, n. 2, p.104-110, out. 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.07.003>

LI, Tao, ZHU, Zhe; WANG, Dongsheng; YAO, Chonghua; TANG, Hongxiao. The strength and fractal dimension characteristics of alum–kaolin flocs. International Journal Of Mineral Processing, [s.l.], v. 82, n. 1, p.23-29, fev. 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.012>

LI, Xiao-yan, ZHAI, Xue-dong; CHU, Hiu Ping; ZHANG, Jian-jun. Characterization of the Flocculation Process from the Evolution of Particle Size Distributions. Journal Of Environmental Engineering, [s.l.], v. 134, n. 5, p.369-375, maio 2008.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134:5\(369\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:5(369))

MAGALHÃES, Marcos Nascimento Probabilidade e Variáveis Aleatórias, 2. ed., Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MENDES, Yuri Cardoso. Evolução da distribuição do tamanho de partículas na flocação de água de baixa turbidez. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.

<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2017.82>

MORUZZI, Rodrigo Braga; OLIVEIRA, Andre Luiz de; JULIO, Marcelo de. Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF): experimentação, relação e calibração. Revista Dae, [s.l.], v. 63, n. 200, p.25-36, 2015.

<https://doi.org/10.4322/dae.2014.150>

MORUZZI, Rodrigo Braga; OLIVEIRA, André Luiz de; JULIO, Marcelo De; DUTRA, Ricardo Henrique de Andrade; SILVA, Pedro Augusto Grava da. Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 21, n. 4, p.817-824, dez. 2016.

<https://doi.org/10.1590/s1413-41522016144959>

MORUZZI, Rodrigo Braga; OLIVEIRA, André Luiz de; CONCEIÇÃO, Fabiano Tomazini da; GREGORY, John; CAMPOS, Luiza Cintra. Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions. *Science Of The Total Environment*, [s.l.], v. 609, p.807-814, dez. 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.194>

OLIVEIRA, André; MORENO, Pamela; DUTRA, Ricardo Henrique de Andrade; JULIO, Marcelo De; MORUZZI, Ricardo Braga. Avaliação de Parâmetros Representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas Presentes em Coleções Hídricas / Evaluation of Particle Size Distribution in Hydro Collections. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [s.l.], v. 20, n. 4, p.1084-1092, 2015b.

<https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p1084-1092>

OLIVEIRA, André Luiz De; MORENO, Pamela; SILVA, Pedro Augusto Grava da; JULIO, Marcelo De; MORUZZI, Rodrigo Braga. Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter. *Desalination And Water Treatment*, [s.l.], p.1-12, 28 ago. 2015a.

<https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1081833>

SERRA, Teresa; CASAMITJANA, Xavier. Structure of the Aggregates During the Process of Aggregation and Breakup Under a Shear Flow. *Journal Of Colloid And Interface Science*, [s.l.], v. 206, n. 2, p.505-511, out. 1998.

<https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5714>

SILLANPÄÄ, Mika; NCIBI, Mohamed Chaker; MATILAINEN, Anu; VEPSÄLÄINEN, Mikko. Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review. *Chemosphere*, [s.l.], v. 190, p.54-71, jan. 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.113>

SNODGRASS, William J.; CLARK, Mark M.; O'MELIA, Charles R.. Particle formation and growth in dilute aluminum (III) solutions. *Water Research*, [s.l.], v. 18, n. 4, p.479-488, 1984.

[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(84\)90157-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(84)90157-X)

SOOS, M.; WANG, L.; FOX, R.O.; SEFCIK, J.; MORBIDELLI, M. Population balance modeling of aggregation and breakage in turbulent Taylor–Couette flow. *Journal Of Colloid And Interface Science*, [s.l.], v. 307, n. 2, p.433-446, mar. 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.12.016>

SPICER, Patrick T.; PRATSINIS, Sotiris E.. Coagulation and fragmentation: Universal steady-state particle-size distribution. *Aiche Journal*, [s.l.], v. 42, n. 6, p.1612-1620, jun. 1996b.

<https://doi.org/10.1002/aic.690420612>

SPICER, Patrick T.; PRATSINIS, Sotiris E.. Shear-induced flocculation: The evolution of floc structure and the shape of the size distribution at steady state. *Water Research*, [s.l.], v. 30, n. 5, p.1049-1056, maio 1996a.

[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00253-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00253-7)

TSE, Ian C.; SWETLAND, Karen; WEBER-SHIRK, Monroe L.; LION, Leonard W. Method for quantitative analysis of flocculation performance. *Water Research*, [s.l.], v. 45, n. 10, p.3075-3084, maio 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.021>

VAHEDI, Arman; GORCZYCA, Beata. Predicting the settling velocity of flocs formed in water treatment using multiple fractal dimensions. *Water Research*, [s.l.], v. 46, n. 13, p.4188-4194, set. 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.031>

WERNER, Steve; THIENEL, Karl-christian; KUSTERMANN, Andrea. Study of fractured surfaces of concrete caused by projectile impact. *International Journal Of Impact Engineering*, [s.l.], v. 52, p.23-27, fev. 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.09.005>

XU, Weiyang; GAO, Baoyu; YUE, Qinyan; BO, Xiaowen. Influence of pH on flocs formation, breakage and fractal properties – The role of Al13 polymer. Journal of Water Sustainability, [s.l.], v. 1, p.45-57, June 2011.

<https://doi.org/10.11912/jws.1.1.45-57>

YUKSELEN, Mehmet Ali; GREGORY, John. Breakage and Re-formation of Alum Flocs. Environmental Engineering Science, [s.l.], v. 19, n. 4, p.229-236, jul. 2002.

<https://doi.org/10.1089/109287502760271544>