



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



FILIPPE AUGUSTO SILVA DE ALMEIDA

**INFLUÊNCIA DA POSORIDADE E MASSA ESPECÍFICA NA
VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO DE AGREGADOS
FRACTAIS DE ÁGUA COM TURBIDEZ MODERADA**

Uberlândia, 2020

FILIPPE AUGUSTO SILVA DE ALMEIDA

**INFLUÊNCIA DA POSORIDADE E MASSA ESPECÍFICA NA
VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO DE AGREGADOS
FRACTAIS DE ÁGUA COM TURBIDEZ MODERADA**

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

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

Uberlândia, 2020

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

A447i
2020 Almeida, Filipe Augusto Silva de, 1994-
Influência da porosidade e massa específica na velocidade de sedimentação de agregados fractais de água com turbidez moderada [recurso eletrônico] / Filipe Augusto Silva de Almeida. - 2020.

Orientador: André Luiz de Oliveira.

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

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3054>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

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

CDU: 624

Rejâne Maria da Silva – CRB6/1925



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 259, PPGE				
Data:	30 de outubro de 2020	Hora de início:	14:00 h	Hora de encerramento:	17:30 h
Matrícula do Discente:	11812ECV006				
Nome do Discente:	Filipe Augusto Silva de Almeida				
Título do Trabalho:	Influência da porosidade e massa específica na velocidade de sedimentação de agregados fractais de água com turbidez moderada				
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 residuária				

Reuniu-se, em sessão pública pela plataforma Conferência Web (MConf) provida pela 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, Ed Carlo Rosa Paiva – DECIV/UFU e André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, André Luiz de Oliveira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do 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(às) 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 **André Luiz de Oliveira, Presidente**, em 03/11/2020, às 10:28, 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 **Fábio Augusto do Amaral, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/11/2020, às 12:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ed Carlo Rosa Paiva, Usuário Externo**, em 03/11/2020, às 17:39, 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 **2360766** e o código CRC **06D13716**.

RESUMO

Este estudo tem como objetivo analisar a influência da porosidade e da massa específica nas velocidades de sedimentação de agregados fractais formados com a aplicação de dois coagulantes químicos: sulfato de alumínio (SA) e policloreto de alumínio (PAC). Para cada produto químico, os flocos foram formados sob os seguintes gradientes de velocidade: 20, 30, 40, 50 e 60 s⁻¹. A água bruta, caracterizada por turbidez moderada de 50 ± 5 UNT, foi preparada com água deionizada e caulinita. A aquisição de dados dos agregados foi feita por meio da técnica não-intrusiva de acompanhamento por imagens durante a sedimentação. Foi desenvolvido um algoritmo com a finalidade de identificar e seleccionar os flocos de interesse, já que o procedimento manual demandou um tempo maior do que a análise computacional. Resultados mostraram que o código assimilou mais de 90% dos agregados corretamente. Nas condições ensaiadas, os flocos produzidos pela coagulação com policloreto de alumínio apresentaram menores valores médios de velocidades de sedimentação para todos os gradientes do estudo, em comparação com os agregados coagulados pela ação do sulfato de alumínio. Sob $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$, a média das velocidades de sedimentação foi 9,2 mm/s para o SA, enquanto foi calculado o valor de 6,4 mm/s para o PAC. Em $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$, o valor médio calculado para o PAC representou 61% da média das velocidades calculada para o SA. Além disso, foi observado que dimensões fractais e massas específicas elevadas (próximas aos valores máximos determinados nas amostras) influenciaram positivamente na sedimentabilidade dos flocos. Quando os fractais foram comparados com as esferas impermeáveis de Stokes de mesma massa específica, foram obtidas velocidades superiores para todos os coagulantes e gradientes de velocidade de floculação. A consideração da porosidade dos flocos neste trabalho evidenciou que as velocidades de sedimentação dos fractais foram até 3,82 vezes maiores do que aquelas determinadas pela lei de Stokes.

Palavras-chave: Tratamento de água - Acompanhamento por imagens - Flocos - Velocidade de sedimentação - Massa específica - Porosidade

ABSTRACT

This study aims to analyze the influence of porosity and specific mass on settling velocities of fractal aggregates formed with the application of two chemical coagulants: aluminum sulfate (SA) and aluminum polychloride (PAC). For each coagulant, the flocs were formed under the following speed gradients: 20, 30, 40, 50 and 60 s^{-1} . The raw water, characterized by moderate turbidity of 50 ± 5 NTU, was prepared with deionized water and kaolin. The acquisition of aggregate data was made using the non-intrusive image monitoring technique during sedimentation. An algorithm was developed in order to identify and select the flocs of interest, since the manual procedure required a longer time than the computational analysis. Results showed that the code correctly assimilated more than 90% of the aggregates. Under the conditions tested, the flocs produced by coagulation with aluminum polychloride showed lower mean values of settling velocities for all gradients of the study, in comparison with the aggregates coagulated by the action of aluminum sulfate. Under $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$, the mean sedimentation speeds were 9.2 mm/s for SA, while the value of 6.4 mm/s for PAC was calculated. At $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$, the average value calculated for PAC represented 61% of the average speeds calculated for SA. In addition, it was observed that fractal dimensions and high specific masses (close to the maximum values determined in the samples) positively influenced the sedimentability of the flocs. When the fractals were compared with the impermeable Stokes spheres of the same specific mass, higher velocities were obtained for all coagulants and flocculation velocity gradients. The consideration of the porosity of the flocs in this work showed that the settling velocities of fractals were up to 3.82 times greater than those determined by Stokes' law.

Keywords: Water treatment - Imaging analysis - Flocs - Settling velocity - Specific mass - Porosity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Tecnologias de tratamento de água para consumo humano	16
Figura 2 -	Estrutura da caulinita	18
Figura 3 -	Teoria da Dupla Camada Elétrica	19
Figura 4 -	Autossimilaridade de agregados porosos	25
Figura 5 -	Diâmetro de Feret de uma partícula projetada em um plano	30
Figura 6 -	Tipos de sedimentação: (a) sedimentação discreta, (b) sedimentação flocculenta e (c) sedimentação zonal.	31
Figura 7 -	Forças atuantes no floco durante a sedimentação	32
Figura 8 -	Da Vinci: “Água caindo sobre água”	34
Figura 9 -	Esquema do sistema PIV para experimentos em coluna de sedimentação	35
Figura 10 -	Técnicas de frame único	37
Figura 11 -	Técnicas de frames múltiplos	37
Figura 12 -	Primeira fase: processos para a aquisição de imagens durante a sedimentação	40
Figura 13 -	Segunda fase: extração de dados das imagens e cálculo de outros parâmetros	40
Figura 14 -	(a) vista frontal do jarro, mostrando a formação do plano de luz devido ao laser; (b) esquema da bancada de testes	43
Figura 15 -	Bancada de testes	44
Figura 16 -	Posicionamento da régua dentro do jarro para o conhecimento da distância entre dois pontos	44
Figura 17 -	Aparato utilizado para minimizar o efeito rotacional dos flocos	47
Figura 18 -	Sincronização de cortes pelo programa computacional <i>JPEG Crops Beta 0.7.5</i>	49
Figura 19 -	Esquema de sobreposição de imagens no <i>ImageJ</i>	51
Figura 20 -	Tratamento de imagens pelo <i>ImageJ</i> : (a) binarização da imagem; (b) extração dos dados	51
Figura 21 -	Coloração dos flocos pelo <i>ImageJ</i> . (a) combinação de imagens após a medição dos parâmetros e (b) flocos coloridos	52
Figura 22 -	(a) Imagem da sedimentação de um floco, após a aplicação do sulfato de alumínio e a floculação em um gradiente de 20 s^{-1} (uso do aparato no jarro). (b) Identificação do floco com o número gerado pelo <i>ImageJ</i>	53
Figura 23 -	Exemplo de comparação de flocos pelas ordenadas	56
Figura 24 -	Floco predominantemente vertical	56
Figura 25 -	Limitação do ângulo reduz o erro da identificação do floco	57
Figura 26 -	Mudanças nas áreas e formas de três flocos durante a captura de imagens na sedimentação	58
Figura 27 -	(a) Comparação de um floco com três flocos no segundo instante de captura. (b) Criação de uma região de comparação para o floco	59
Figura 28 -	Variação dos diâmetros médios com a variação dos gradientes de velocidade para SA	67
Figura 29 -	Plotagem de gráficos área \times diâmetro máximo para a determinação das dimensões fractais bidimensionais de flocos de SA para: (a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ e (b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$	67

Figura 30 -	Plotagem de gráficos área \times diâmetro máximo para a determinação das dimensões fractais bidimensionais de flocos de SA para: (a) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$, (b) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ e (c) $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$	68
Figura 31 -	Evolução da dimensão fractal bidimensional para os flocos formados pela coagulação do SA	69
Figura 32 -	Evolução da dimensão fractal bidimensional para tempo de floculação de 20 minutos	69
Figura 33 -	Número de partículas primárias pela relação $d_{\text{máx}}/d_p$ para SA em: (a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, (b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$, (c) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ e (d) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$	71
Figura 34 -	Número de partículas primárias pela relação $d_{\text{máx}}/d_p$ para SA em $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$	72
Figura 35 -	Comparação entre os formatos de flocos formados sob gradiente de 50 s^{-1} e 40 s^{-1}	73
Figura 36 -	Relação entre porosidade e dimensão fractais para SA	75
Figura 37 -	Relação entre massas específicas e dimensões fractais para SA	78
Figura 38 -	Velocidades de sedimentação dos fractais para SA	81
Figura 39 -	Relação entre velocidades de sedimentação com a porosidade (à esquerda) e massa específica (à direita) dos agregados de SA para: (a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ e (b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$	82
Figura 40 -	Relação entre velocidades de sedimentação com a porosidade (à esquerda) e massa específica (à direita) dos agregados de SA para: (a) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ (b) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ e (c) $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$	83
Figura 41 -	Relação entre porosidade com o quociente adimensional Γ para os agregados fractais formados pelo SA para: (a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ e (b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$	85
Figura 42 -	Relação entre porosidade com o quociente adimensional Γ para os agregados fractais formados pelo SA para: (a) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$, (b) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ e (c) $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$	86
Figura 43 -	Plotagem de gráficos área \times diâmetro máximo para a determinação das dimensões fractais bidimensionais de flocos de PAC	89
Figura 44 -	Comparação entre os formatos de flocos de PAC formados sob gradiente de 30 s^{-1} e 60 s^{-1}	90
Figura 45 -	Número de partículas primárias pela relação $d_{\text{máx}}/d_p$ para PAC	91
Figura 46 -	Relação entre porosidade e dimensão fractais para PAC	93
Figura 47 -	Relação entre massas específicas e dimensões fractais de flocos de PAC	95
Figura 48 -	Velocidades de sedimentação dos fractais para flocos de PAC	96
Figura 49 -	Relação entre velocidades de sedimentação com a porosidade (à esquerda) e massa específica (à direita) dos agregados de PAC para: (a) 30 s^{-1} , (b) 40 s^{-1} e (c) 50 s^{-1}	98
Figura 50 -	Relação entre velocidades de sedimentação com a porosidade (à esquerda) e massa específica (à direita) dos agregados de PAC para 60 s^{-1}	99
Figura 51 -	Relação entre porosidades e quocientes adimensionais Γ dos agregados fractais formados pelo PAC	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Alguns diâmetros característicos de agregados	29
Tabela 2 -	Configuração da câmera para a aquisição das imagens dos flocos durante a sedimentação	43
Tabela 3 -	Dosagens das soluções utilizadas e pH de coagulação	45
Tabela 4 -	Assimilação entre as planilhas “ <i>Summary</i> ” e “ <i>Results</i> ”	55
Tabela 5 -	Exemplo de validação de um em uma combinação de cinco imagens	61
Tabela 6 -	Valores dos tamanhos dos flocos e dados estatísticos para o SA	65
Tabela 7 -	Valores para parâmetro de forma de SA para cada gradiente de floculação ensaiado	72
Tabela 8 -	Dados estatísticos das dimensões fractais calculadas para os flocos de SA	74
Tabela 9 -	Dados estatísticos para a porosidade de flocos de SA	76
Tabela 10 -	Dados estatísticos para massa específica dos flocos de SA	79
Tabela 11 -	Dados estatísticos para as velocidades de sedimentação dos fractais de SA	80
Tabela 12 -	Resumo dos parâmetros dos agregados que apresentaram as menores e maiores velocidades para cada gradiente ensaiado para o SA	84
Tabela 13 -	Dados estatísticos para os flocos formados pela coagulação do PAC	88
Tabela 14 -	Valores para fator de forma para cada gradiente de floculação ensaiado para o PAC	92
Tabela 15 -	Dados estatísticos das dimensões fractais calculadas para os flocos de PAC	92
Tabela 16 -	Dados estatísticos para a porosidade de flocos de PAC	94
Tabela 17 -	Dados estatísticos para massa específica dos flocos de PAC	95
Tabela 18 -	Dados estatísticos para as velocidades de sedimentação dos fractais formados pelo PAC	97
Tabela 19 -	Resumo dos parâmetros dos agregados que apresentaram as menores e maiores velocidades para cada gradiente ensaiado para o PAC	99
Tabela 20 -	Dados estatísticos para dimensões fractais dos flocos de SA e PAC formados sob gradientes de velocidade iguais a 30, 40, 50 e 60 s ⁻¹	102

LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Sulfato de alumínio
Al_2O_3	Óxido de alumínio
Al^{3+}	Íon alumínio III
A, A_s	Área projetada do floco
b	Parâmetro de forma
C_D	Coeficiente de arrasto
D_f	Dimensão fractal
D_{fp}'	Dimensão fractal bidimensional
D_{fp}	Dimensão fractal tridimensional
d, d_f	Diâmetro do floco
d_{eq}	Diâmetro equivalente
$d_{m\acute{a}x}$	Dimensão máxima do floco
d_p	Diâmetro da partícula primária
d_{ps}	Diâmetro da partícula sólida
dV	Diferencial de velocidade
dY	Diferencial de distância
ξ_2	Fator de forma bidimensional
$\varepsilon, \varepsilon_f$	Porosidade do floco
F_D	Força de arrasto
F_E	Empuxo
Fe^{+3}	Íon Ferro III
FeCl_3	Cloreto férrico
F_G	Força gravitacional
G	Gradiente de velocidade
G_f	Gradiente médio de velocidade de floculação/mistura lenta
g	Aceleração da gravidade
Ω	Fator de correção de agregados porosos
H^+	Íon hidrogênio
H_2O	Água
N	Número de partículas primárias
NaOH	Hidróxido de sódio
M_A	Massa do agregado fractal
OH^-	Íon hidroxila
R_A	Dimensão do agregado fractal

R_c	Raio de colisão
R_g	Raio de giração
R_h	Raio hidrodinâmico
Re	Número de Reynolds
SiO_2	Dióxido de silício
V	Volume do elipsoide
V_A	Volume do agregado fractal
v_{se}, V_{esfera}	Velocidade de sedimentação da esfera de Stokes
$v_{sf}, V_{fractal}$	Velocidade de sedimentação do agregado fractal
V_{ps}	Volume da partícula
V_s	Velocidade de sedimentação
ΔV	Diferença de velocidade
ΔY	Distância
μ	Viscosidade absoluta da água
ρ_A	Massa específica do agregado fractal
ρ_a, ρ_1	Massa específica da água
ρ_f	Massa específica do floco
ρ_p	Massa específica da partícula primária
ρ_s	Massa específica da partícula
Γ	Quociente adimensional (relação entre velocidade dos fractais e das esferas)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREVIATURAS

cm	Centímetro
g	Grama
kg	Quilograma
L	Litro
Ltda	Limitada
m	Metro
M	Molar
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mg	Miligrama
min	Minuto
mL	Mililitro
mm	Milímetros
N	Newton
pH	Potencial hidrogeniônico
qps	Quadros por segundo
rpm	Rotações por minuto
s	Segundo
s ⁻¹	Segundos a menos um / por segundo
s ²	Segundo ao quadrado
UNT	Unidade nefelométrica de turbidez
µm	Micrômetro

SIGLAS

CC	Camada compacta
CCP	<i>Camera Control Pro</i>
CD	Camada difusa
CF	Cloreto férrico
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DCE	Dupla camada elétrica
DTP	Distribuição de tamanho de partículas

ETA	Estação de tratamento de água
EUA	Estados Unidos da América
FISPQ	Ficha de Informação de Segurança para Produtos Químicos
PAC	Policloreto de alumínio
PIV	<i>Particle image velocimetry</i>
SA	Sulfato de alumínio
VBA	<i>Visual basics for applications</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	15
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA, TURBIDEZ E DISPERSÕES COLOIDAIIS.....	16
2.2 COAGULAÇÃO (MISTURA RÁPIDA).....	18
2.2.1 <i>Mecanismos da coagulação</i>	20
2.2.2 <i>Coagulantes químicos</i>	21
2.2.3 <i>Fatores que influenciam na coagulação</i>	22
2.3 FLOCULAÇÃO (MISTURA LENTA)	24
2.3.1 <i>Geometria fractal</i>	25
2.3.2 <i>Dimensões dos flocos</i>	28
2.4 SEDIMENTAÇÃO.....	30
2.4.1 <i>Lei de Stokes</i>	31
2.4.2 <i>Equação de Stokes modificada para agregados porosos</i>	33
2.5 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS.....	34
2.5.1 <i>Técnicas de gravação do PIV</i>	36
2.5.2 <i>Trabalhos anteriores sobre determinação de velocidades de sedimentação por meio do PIV</i>	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	40
3.2 PREPARAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO	41
3.3 PREPARAÇÃO DOS COAGULANTES	42
3.4 PREPARAÇÃO DA BANCADA DE TESTES.....	42
3.5 DOSAGENS DE ALCALINIZANTE E ENSAIOS DE COAGULAÇÃO	45

3.6 ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO	45
3.7 ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO E ACOMPANHAMENTO POR IMAGENS	46
3.8 TRATAMENTO DAS IMAGENS	48
3.8.1 JPEG Crops Beta 0.7.5.....	48
3.8.2 ImageJ 1.51	50
3.9 SELEÇÃO DE FLOCOS DE INTERESSE	53
3.9.1 Desenvolvimento de um algoritmo no Visual Basic for Applications para a identificação dos flocos.....	54
3.9.2 Validação do algoritmo.....	60
3.10 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES FRACTAIS.....	62
3.11 CÁLCULO DAS VELOCIDADES DE SEDIMENTAÇÃO	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1 SEDIMENTAÇÃO DOS FLOCOS COAGULADOS POR SULFATO DE ALUMÍNIO ...	65
4.1.1 Tamanho dos flocos.....	65
4.1.2 Dimensões fractais bidimensionais	67
4.1.3 Dimensões fractais tridimensionais	71
4.1.4 Porosidades.....	75
4.1.5 Massas específicas.....	77
4.1.6 Velocidades dos fractais	80
4.2 SEDIMENTAÇÃO DOS FLOCOS COAGULADOS POR POLICLORETO DE ALUMÍNIO.....	87
4.2.1 Tamanho dos flocos.....	87
4.2.2 Dimensões fractais bidimensionais	89
4.2.3 Dimensões fractais tridimensionais	91
4.2.4 Porosidades.....	93
4.2.5 Massas específicas.....	94
4.2.6 Velocidades dos fractais	96
4.3 SEDIMENTAÇÃO DOS FLOCOS COAGULADOS POR CLORETO FÉRRICO	101

4.4 COMPARATIVO ENTRE OS FLOCOS DE SULFATO DE ALUMÍNIO E POLICLORETO DE ALUMÍNIO.....	102
4.4.1 <i>Tamanho dos flocos</i>	102
4.4.2 <i>Dimensões fractais tridimensionais</i>	102
4.4.3 <i>Porosidades</i>	103
4.4.4 <i>Massas específicas</i>	103
4.4.5 <i>Velocidades dos fractais</i>	103
5 CONCLUSÃO.....	105
5.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	105
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
APÊNDICE A – Algoritmo elaborado para a assimilação dos agregados para cada combinação de imagens.	111

1 INTRODUÇÃO

As águas superficiais e subterrâneas não são ideais para o consumo humano sem tratamento prévio, visto que podem estar contaminadas com organismos patogênicos, metais pesados e produtos químicos, além de conter partículas que podem conferir cor, odor e gosto à água. Dentre os vários tipos de tecnologias de tratamento de água, destaca-se o tratamento em ciclo completo, equivocadamente denominado por alguns autores como tratamento convencional. Essa tecnologia é indicada para o tratamento de águas correntes com valor de turbidez que pode chegar a 1000 UNT.

O tratamento em ciclo completo compreende a sequência de etapas: pré-tratamento, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoreação e correção de pH. O pré-tratamento consiste nas unidades de pré-sedimentação, necessárias quando a água a ser tratada apresenta turbidez superior a 1000 UNT (RICHTER, 2009). Do pré-tratamento à filtração, o objetivo é a remoção da turbidez e da cor da água afluente à estação de tratamento.

A turbidez é uma característica física provocada pela presença de pequenas partículas em suspensão que são extremamente estáveis. Para alterar este equilíbrio, o coagulante é aplicado na etapa de coagulação a fim de alterar a estabilidade desses sólidos, de modo que se aglutinem e formem flocos capazes de serem removidos nas etapas posteriores. Os flocos precisam ser densos para se sedimentarem nos decantadores e ter tamanhos suficientes para que sejam retidos nos filtros. Portanto, a coagulação e a floculação desempenham papel de suma importância no tratamento em ciclo completo.

A decantação consiste na sedimentação dos flocos formados nos floculadores. Para se ter propriedades ideais para a sedimentação, devem ser estudados e definidos os principais fatores: pH da água bruta, tipo e dosagem de coagulante, pH de coagulação, gradientes de velocidade de mistura rápida, gradientes de velocidade dos floculadores e tempo de floculação. A definição desses parâmetros é realizada em escala de laboratório, por meio de ensaios no equipamento *jar test*. Na ETA, os decantadores devem garantir boa remoção de flocos para que os filtros não sejam sobrecarregados. Nesse contexto, o projeto do decantador e a sua operação devem ser testados em instalações-piloto.

Massa específica e porosidade são propriedades totalmente relacionadas à velocidade de sedimentação dos flocos e são frequentemente determinadas nos trabalhos científicos.

Muitos métodos utilizados para a determinação dessas propriedades podem causar a ruptura dos frágeis flocos, e, portanto, a escolha de métodos intrusivos pode alterar os resultados dos ensaios. Dentre esses métodos intrusivos, pode-se citar o método de detecção por eletrodos, a análise microscópica e técnica de espalhamento de luz dinâmico (LI *et al.*, 2008).

O acompanhamento por análise de imagens é uma metodologia que tem sido adotada para a determinação de propriedades dos flocos. Uma das principais vantagens desta técnica é que ela é não-intrusiva, ou seja, não modifica as propriedades dos flocos durante a aquisição de dados. Esta metodologia é simples e de baixo custo: configura em um laser que ilumina o jarro do *jar test*, a fim de gerar um plano de luz para aumentar a nitidez dos flocos nas imagens; e em uma câmera de alta resolução acoplada a um computador que controla a captura e armazena as imagens dos flocos durante os ensaios.

A porosidade é difícil de ser determinada por meio da análise de imagens devido à complexidade da estrutura das partículas floculentas. As partículas que formam os flocos – chamadas partículas primárias – se arranjam de maneiras variadas em um mesmo ensaio, gerando flocos de diferentes tamanhos e porosidades. Além disso, os flocos são estruturas tridimensionais e, em contramão, uma imagem captura o formato dos flocos em apenas um plano. Assim sendo, neste trabalho serão apresentados valores de porosidade que foram calculados indiretamente.

Dessa forma, por meio da análise de imagens, serão mostrados os valores de dimensões fractais, porosidades e massas específicas dos agregados a fim de calcular as velocidades de sedimentação dos fractais. Conforme Moruzzi *et al.* (2020), uma prática comum no projeto de decantadores é adotar os flocos como esferas impermeáveis de Stokes, o que pode ser uma adoção errônea, visto que a porosidade das partículas floculentas pode influenciar na redução da força de arrasto, aumentando, assim, a velocidade de sedimentação. Neste contexto, neste trabalho serão confrontados os valores das velocidades de sedimentação dos agregados fractais com as velocidades das esferas de Stokes, a fim de evidenciar se os flocos apresentam melhor ou pior sedimentabilidade em relação às esferas impermeáveis.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da porosidade e da massa específica na velocidade de sedimentação de agregados fractais.

1.1.2. Objetivos específicos

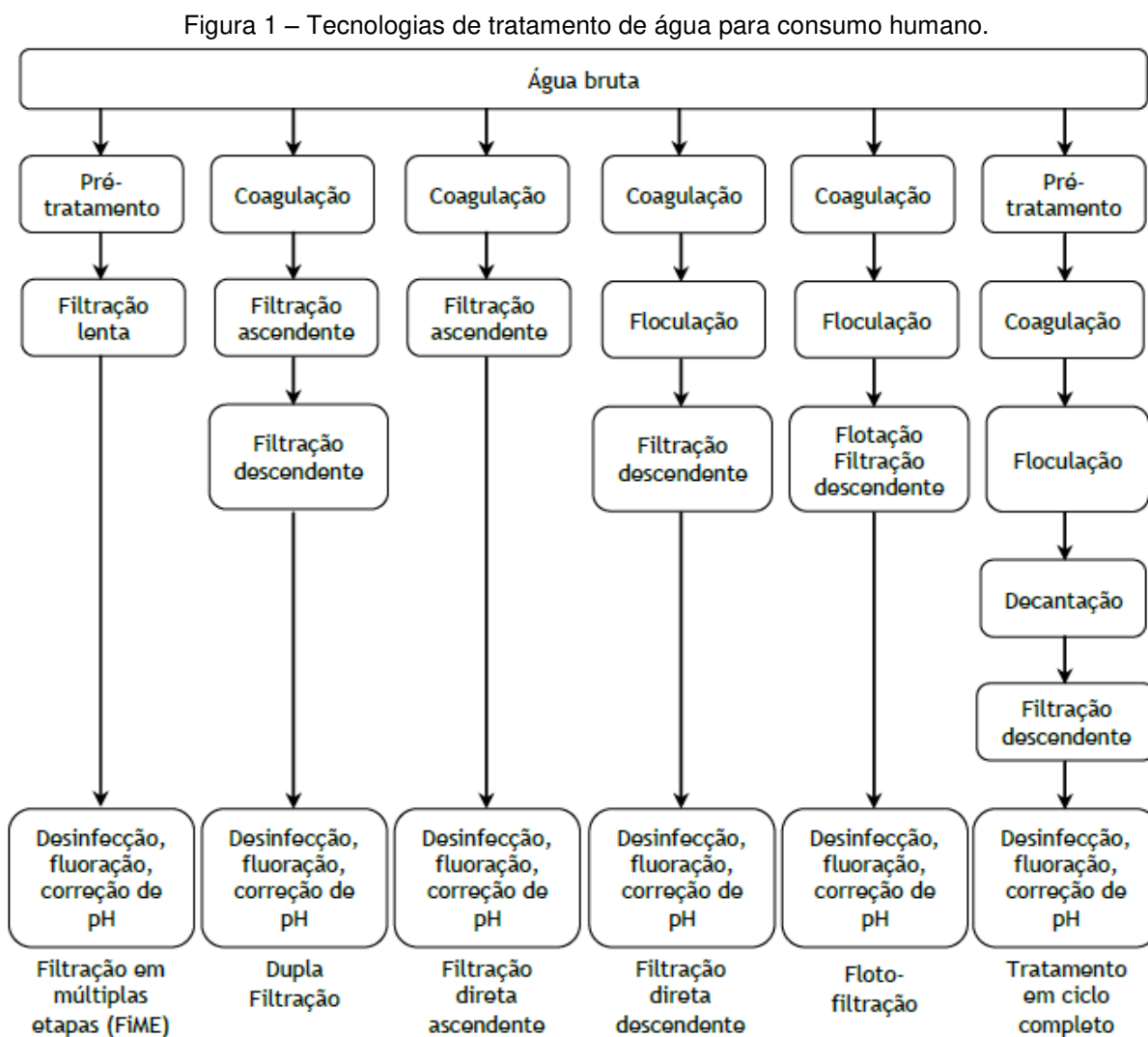
Os objetivos específicos são os seguintes:

- a. Desenvolvimento de um algoritmo para a seleção dos flocos sedimentáveis;
- b. Para um mesmo coagulante químico utilizado, relacionar as velocidades de sedimentação com a porosidade e massa específica dos flocos para cada gradiente de velocidade de floculação (mistura lenta);
- c. Avaliar a influência do coagulante nas velocidades de sedimentação em função da porosidade e morfologia dos agregados fractais;
- d. Comparar os valores das velocidades de sedimentação dos agregados fractais com as velocidades de sedimentação das esferas impermeáveis que seguem a lei de Stokes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA, TURBIDEZ E DISPERSÕES COLOIDAIIS

A água bruta não é recomendada para o consumo humano, uma vez que esta pode estar contaminada por substâncias tóxicas e organismos patogênicos, além de apresentar sólidos suspensos e dissolvidos que atribuem propriedades como cor, odor e sabor. Para torná-la ideal para consumo, a água bruta deve passar por um tratamento físico-químico. De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), a escolha do tratamento deve ser feita considerando a qualidade de água bruta por meio de ensaios de laboratório e da validação de parâmetros de projeto com as instalações-piloto de escoamento contínuo. As principais tecnologias de tratamento de água são apresentadas na Figura 1.



Richter (2009) define turbidez como uma propriedade física que representa a dispersão e a absorção de uma luz que incide sobre a amostra. É um parâmetro que indica a presença de sólidos suspensos na água. A turbidez tem como unidade a unidade nefelométrica de turbidez (UNT) e é facilmente quantificada pelos equipamentos denominados turbidímetros.

Segundo Richter (2009), os sólidos presentes na água são classificados em suspensões e dispersões coloidais (ou coloides). As suspensões são sólidos com tamanhos que variam de 10^{-3} a 10^{-1} mm e podem ser separados da água por meio de sedimentação ou flotação. As dispersões coloidais são caracterizadas por sólidos menores, que abrangem tamanhos de 10^{-6} a 10^{-3} mm, e para se separarem da água precisam passar primeiramente pela etapa de coagulação na ETA.

O autor ainda classifica os coloides em quatro classes:

a. Partículas de origem fluvial

- Produtos de desagregação e coloides do solo (silicatos de alumínio, caulinita, gibbsita, SiO_2);
- Óxidos de ferro (III) e manganês;
- Fitoplâncton, resíduos biológicos, húmus coloidal (ácido húmico coloidal), fibrilas;
- Ferro (III) supostamente dissolvido, porém constituído principalmente de óxidos de Fe^{+3} estabilizados por ácidos húmicos e fúlvicos.

b. Partículas do solo

- Partículas de caulinita. Cerca de 50 lâminas hexagonais empilhadas irregularmente;
- Ilita e outros componentes da argila. Partículas laminares empilhadas irregularmente;
- Húmus, ácidos húmicos coloidais, fibrilas;
- Óxidos hidratados de ferro;
- Coberturas poliméricas de partículas do solo por húmus, óxidos hidratados de ferro (III), e compostos hidróxido-Al (III).

c. Coloides em sedimentos

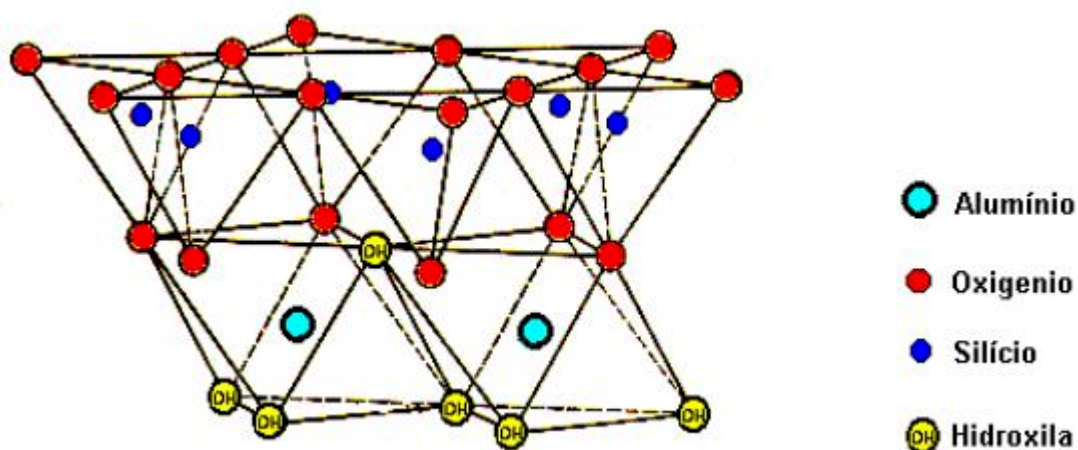
- Em adição aos coloides listados acima: sulfetos e polisulfetos em sedimentos anóxicos.

d. Coloides de origem orgânica e biológica

- Micro-organismos, vírus, biocoloides, fibrilas; agregação de exudatos e matéria orgânica macromolecular.

Dentre os coloides citados, descreve-se a caulinita, que é um argilomineral encontrado nas argilas. É quimicamente inerte sob pH de 3 a 9, é um sólido branco e facilmente disperso na água (RUFINO, 2009). Sua estrutura é constituída por uma camada de tetraedros de SiO_4 e uma de octaedros de $\text{Al}_2(\text{OH})_6$. Essas duas camadas estão interligadas pelos átomos de oxigênio, o que torna a estrutura da caulinita bastante polarizada (MENDES, 1989). Na Figura 2 é apresentada a estrutura da caulinita.

Figura 2 – Estrutura da caulinita.



Fonte: UFES (2011).

Os coloides de origem mineral não acarretam malefícios à saúde humana, exceto quando a água apresenta fibras de amianto (agentes cancerígenos). Para os padrões de qualidade, as dispersões coloidais conferem parâmetros estéticos à água, como cor e turbidez. Entretanto, os coloides podem adsorver em suas superfícies matéria orgânica e organismos patogênicos, protegendo estes da ação desinfetante do tratamento (RICHTER, 2009).

2.2 COAGULAÇÃO (MISTURA RÁPIDA)

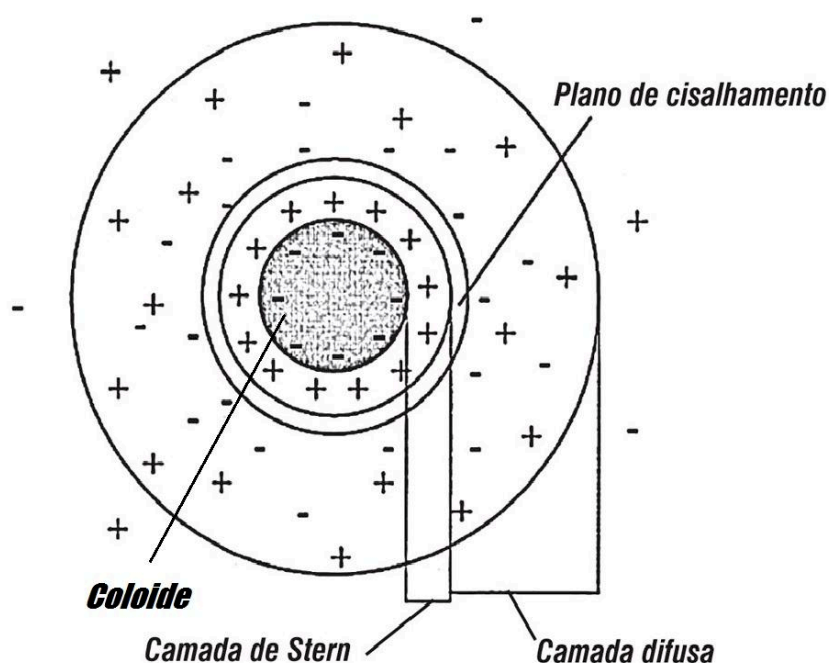
Parte das partículas presentes na água bruta não são facilmente separáveis por meio de processos físicos. Como as suspensões coloidais são muito pequenas e possuem densidade próxima à da água, é necessário um pré-tratamento químico por meio da dissolução de coagulantes (sais minerais ou polímeros) para alterar as características físico-químicas das partículas (BOUYER; LINÉ; DO-QUANG, 2004). Essa mistura é uma das etapas iniciais de uma estação de tratamento de água e geralmente ocorre na calha Parshall.

Os coloides geralmente possuem carga elétrica negativa, portanto as forças de repulsão os mantêm separados e em suspensão. O papel da coagulação é alterar a carga dessas partículas, de modo que elas se aglutinem e possam ser removidas por meio de sedimentação, flotação ou filtração (RITCHER, 2009).

Di Bernardo e Dantas (2005) citam que um dos fatores que deixam a carga das partículas de argilas minerais carregadas negativamente é a substituição isomórfica. Nesse fenômeno, um íon de silício (maior valência) é substituído por um átomo de alumínio (menor valência) – no caso do tetraedro de silicato –, ou o magnésio (menor valência) substitui o alumínio (maior valência) no octaedro da estrutura (MENDES, 1989).

Helmholtz propôs a teoria da Dupla Camada Elétrica (DCE). Nesse modelo, apresentado na Figura 3, a carga superficial negativa dos coloides atrai fortemente íons positivos, formando uma camada compacta (CC), também conhecida como Camada de Stern. Os íons positivos da CC atraem íons negativos, que atraem outros íons positivos e formam a camada difusa (CD) (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). De acordo com Ritcher (2009), a concentração de íons decai da CC à CD até se igualar com a concentração do meio aquoso.

Figura 3 – Teoria da Dupla Camada Elétrica.



Fonte: Daltin (2011), adaptado por Autor (2020).

Segundo Bouyer, Liné e Do-Quang (2004), a mistura do coagulante é o processo mais importante no tratamento de água e deve ser garantida uma dispersão rápida da solução. A

dosagem do coagulante requer bastante atenção: a superdosagem pode elevar os custos do tratamento e pode oferecer riscos aos consumidores desta água – por exemplo, conforme Richter (2009), a utilização de sais de alumínio está associada ao desenvolvimento da doença de Alzheimer. Já a subdosagem resulta em um tratamento menos eficiente, com baixa remoção de turbidez. Assim sendo, deve-se conhecer a dosagem ótima de coagulante a ser diluída.

2.2.1 Mecanismos da coagulação

2.2.1.1 Compressão da dupla camada elétrica

Di Bernardo e Dantas (2005) afirmam que a adição de cátions devido à hidrólise dos compostos coagulantes aumenta a concentração desses íons na camada difusa. Ao atrair ânions, ocorre a redução da esfera da camada difusa para manter-se estabilizada eletronicamente. Nesse processo, as forças de Van der Waals tornam-se dominantes em relação às forças iônicas e ocorre a compressão da dupla camada elétrica, um dos mecanismos da coagulação.

2.2.1.2 Adsorção e neutralização de cargas

A adsorção e neutralização de cargas ocorre em baixos valores de pH e é um mecanismo rápido que dura cerca de um segundo – que, de acordo com Ritcher (2009), é o tempo suficiente para que as espécies hidrolisadas neutralizem as cargas dos coloides. Como este mecanismo apenas desestabiliza as partículas e não formam flocos volumosos, é indicado em tratamentos com filtração direta sem necessidade de sedimentação, visto que na filtração direta precisa-se apenas que as partículas desestabilizadas fiquem retidas nos filtros (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

2.2.1.3 Varredura

A varredura é o mecanismo de coagulação mais utilizado nas estações de tratamento de ciclo completo (isto é, tratamento que abrange coagulação, floculação, decantação/flotação e filtração). É caracterizada por alta dosagem de coagulante, com a qual os precipitados (como o hidróxido de alumínio e o hidróxido de ferro) entrelaçam as partículas coloidais e formam flocos mais volumosos (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

2.2.1.4 Formação de pontes

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a formação de pontes é notada quando empregam-se polímeros como agentes coagulantes. Os polímeros são adsorvidos à superfície dos coloides e servem de pontes que interligam outras partículas.

2.2.2 Coagulantes químicos

Deve-se levar em consideração, ao escolher um coagulante, a trabalhabilidade em qualquer época do ano e a viabilidade econômica. Na Europa, Estados Unidos e Japão, empregam-se coagulantes poliméricos devido às águas se encontrarem a baixas temperaturas. Alguns coagulantes à base vegetal também estão sendo considerados, como o tanato. No Brasil, o coagulante mais empregado é o sulfato de alumínio (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

2.2.2.1 Sulfato de alumínio

O sulfato de alumínio é um composto ácido, corrosivo e é fornecido em pedras (granular) ou líquido. Sua espécie é representada pela fórmula química $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, na qual “n” é o número de moléculas de água de cristalização, que varia de 14 a 18. De acordo com Pavanelli (2001), o sulfato de alumínio com 14 moléculas de água de cristalização é 12% mais duro do que com 18 moléculas. No produto seco, há entre 14 e 18% de óxido de alumínio (Al_2O_3), enquanto que no produto líquido há 8%. A coagulação com sulfato de alumínio é notada entre pH 5 e 7.

Quando adicionado à água, o sulfato de alumínio sofre algumas reações intermediárias que precedem a formação do precipitado de hidróxido de alumínio. Essas reações liberam íons H^+ que diminuem o pH do meio. Quando a água tratada é de baixa alcalinidade, há a necessidade de adicionar soda cáustica ou cal para favorecer a formação do hidróxido de alumínio (AMIRTHARAJAH; O'MELIA, 1990).

Ao contrário do que se pensa, são espécies hidrolisadas como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{+3}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$ e $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{+5}$ que promovem a desestabilização das partículas, e não o íon alumínio (RICHTER, 2009).

2.2.2.2 Cloreto férrico

Os coagulantes férricos são eficientes na faixa de pH que varia entre 4 e 11. São indicados para a remoção de cor a baixos valores de pH e remoção de manganês e ferro a altos valores de pH (RICHTER, 2009). O cloreto férrico é anidro, possui a fórmula FeCl_3 e também é fornecido na forma líquida e granular. De acordo com Amirtharajah e O'Melia (1990), os coagulantes férricos são mais ácidos e menos solúveis do que os sais de alumínio.

De acordo com Ching *et al.* (1994), quando o cloreto férrico se hidrata, o aquometal $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ é formado e se hidrolisa em espécies monoméricas e poliméricas, como o FeOH^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Fe}_3(\text{OH})_4^{5+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_3^0$ e $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$.

Pavanelli (2001) destaca que o cloreto férrico diminui drasticamente a DBO e a turbidez da água, elimina fosfatos e, a altos valores de pH, também elimina metais pesados como mercúrio e chumbo, e metais venenosos como o arsênio, o selênio e o bário.

2.2.2.3 Policloreto de Alumínio (PAC)

O policloreto de alumínio (PAC) é um polímero inorgânico de alto peso molecular e efetivo em larga faixa de pH. É usado intensivamente no Japão, França, Alemanha e EUA para o tratamento de águas frias e túrbidas. Esse produto é corrosivo e se mostra eficiente para o tratamento de águas com suspensões de argila. Sua fórmula química é $\text{Al}_n(\text{OH})_m.\text{Cl}_{3n-m}$ (AMIRTHARAJAH; O'MELIA, 1990).

Apesar de ser um produto mais caro do que o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, a coagulação utilizando o PAC ocorre sob dosagens menores do que as notadas com os outros coagulantes. Além disso, é notado também um menor consumo de alcalinizante.

2.2.3 Fatores que influenciam na coagulação

As características dos sólidos em suspensão, a dosagem de coagulante, o tempo de mistura e os gradientes de velocidade são alguns fatores que interferem na eficiência da coagulação.

Segundo Richter (2009), os gradientes de velocidade (G) estão relacionados à intensidade de agitação da água em tratamento. Quando nota-se elevada diferença da velocidade entre dois pontos muito próximos, o gradiente de velocidade é alto. Quando essa diferença de velocidade é baixa, o gradiente de velocidade é baixo. Matematicamente, o gradiente de velocidade é calculado por meio da Equação 1:

$$G = \lim_{\Delta Y \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta Y} = \frac{dV}{dY} \quad (1)$$

Em que: G é expresso em T^{-1} ; ΔV é a diferença de velocidade entre dois pontos do escoamento, em L/T e ΔY é a distância entre os dois pontos, em L .

As reações de hidrólise e a formação de precipitados são muito rápidas, portanto deve ser garantida uma mistura homogênea e rápida de coagulante. A formação de hidróxidos se completa de 6 a 7 segundos. Tempos de mistura rápida superiores a esses valores não melhoram significativamente a coagulação. Recomendam-se valores de gradientes de velocidade de mistura rápida entre 300 a 1200 s^{-1} . Faixas entre 1500 e 3500 s^{-1} apresentam desestabilização mínima dos coloides (RICHTER, 2009).

Ainda conforme o autor, a temperatura influencia na ionização da água (geração de íons H^+ e OH^-) e pode modificar o pH. Na mistura, a temperatura interfere na viscosidade, propriedade que está diretamente relacionada com os gradientes locais de velocidade.

O pH é um fator decisivo na coagulação. A coagulação ótima com sulfato de alumínio acontece na faixa de pH entre 5,5 a 7,5, enquanto a coagulação com sais de ferro acontece entre pH 5 a 8,5. Como os coagulantes são ácidos, é necessário corrigir a alcalinidade da água bruta. O alcalinizante (como a cal e a soda cáustica) deve ser aplicado antes da aplicação do coagulante, garantindo uma mistura homogênea (RICHTER, 2009).

A presença de matéria orgânica também influencia na dosagem de coagulante e nas características dos flocos formados nas etapas seguintes do tratamento. Li *et al.* (2008) compararam a coagulação e formação de flocos em duas amostras. Em um ensaio, as partículas suspensas eram apenas de caulinita; enquanto no outro ensaio, matéria orgânica estava adsorvida nas partículas de caulinita. Eles concluíram que foi necessária uma dosagem de sulfato de alumínio cinco vezes maior para que as partículas com matéria orgânica formassem flocos do mesmo tamanho que as partículas de caulinita formaram.

2.3 FLOCULAÇÃO (MISTURA LENTA)

Após a mistura de coagulante, a água é conduzida para os floculadores, onde as partículas já desestabilizadas da água bruta aglutinam-se e formam flocos densos que sedimentarão nos decantadores, unidades subsequentes. Esse processo de formação de flocos é denominado floculação e é fundamental para reduzir a turbidez da água durante o tratamento.

A floculação pode ser classificada em dois tipos: a. floculação pericinética, na qual as partículas colidem devido à energia térmica (movimento browniano) e b. floculação ortocinética, que é a formação de flocos devido aos gradientes de velocidade (RICHTER, 2009). A floculação pericinética produz flocos de 0,1 a 1 μm , portanto não é relevante às ETAs, visto que os flocos que são conduzidos para os decantadores devem ser grandes e densos. Assim, a floculação ortocinética é mais efetiva no tratamento da água.

Na floculação ortocinética, os gradientes de velocidade provocam colisões entre flocos, e assim eles podem aglutinar-se e formar agregados maiores. Neste contexto, define-se eficiência de colisão como a porcentagem de flocos que se aglutinam ao colidir. Quanto maior o gradiente de velocidade, maior o número de colisões entre os flocos, porém não se pode afirmar que há maior eficiência de colisão (RICHTER, 2009).

O crescimento dos flocos é dominante enquanto estes possuem dimensões menores do que as microescalas de comprimento de Kolmogorov (BOUYER; LINÉ; DO-QUANG, 2004). Essa denominação se refere às menores estruturas turbilhonares possíveis no escoamento. À medida que os flocos crescem, a fragmentação (ruptura de flocos) interfere no processo.

A fragmentação é menos notória em flocos que são mais compactos, cujas partículas primárias estão fortemente ligadas. Jin *et al.* (2007) definem *binding force* (“força vinculativa” em português) como a força que mantém as partículas do floco unidas. Esta força depende da estrutura e do processo de formação do floco. Em contraste, a força cisalhante do escoamento se opõe à força vinculativa e o floco romperá quando a força cisalhante atuante for maior do que a força vinculativa. O estado de equilíbrio entre a força do floco e a força cisalhante é chamado condição crítica.

Segundo Jin *et al.* (2007), sob as mesmas condições de coagulação, as forças vinculativas dos flocos têm comportamento inalterado com o aumento do gradiente de velocidade,

enquanto forças cisalhantes aumentam linearmente. Os autores mostraram, ainda, que há uma redução no diâmetro médio dos flocos quando a condição crítica é ultrapassada, isto é, os flocos se fragmentam.

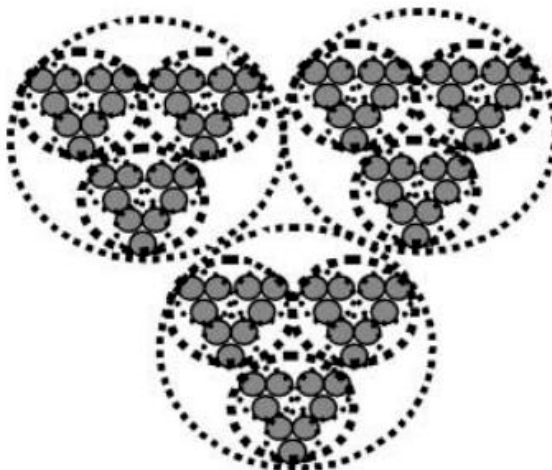
Devido à fragmentação dos flocos, existe um tamanho de floco que não será superado, mesmo com maior tempo de floculação. A partir de certo tempo de floculação, a distribuição do tamanho das partículas (DTP) não se altera mais, isto é, a frequência de cada classe de tamanho de flocos não varia mais ao longo do tempo. A invariabilidade no formato da DTP é denominada estado estacionário (SPICER; PRATSINIS, 1996).

Podem-se resumir, dessa maneira, as interações existentes durante a formação e ruptura de um floco genérico, de tamanho i : dois ou mais flocos se unem para formar um floco de tamanho i (aumento da concentração ou porcentagem dos flocos de tamanho i); o floco de tamanho i pode se unir outros flocos, formando assim um floco maior (queda da concentração); um floco de tamanho i origina dois ou mais flocos menores (queda) e um floco maior se fragmenta e origina flocos de tamanho i (aumento) (SPICER; PRATSINIS, 1996).

2.3.1 Geometria fractal

Segundo Tang *et al.* (2002), há um consenso de que a estrutura dos agregados formados durante a floculação é descrita pela geometria fractal. Estruturas fractais são autossimilares, isto é, os flocos possuem o mesmo padrão geométrico independentemente da escala analisada, conforme é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Autossimilaridade de agregados porosos.



Fonte: Tang *et al.* (2002).

A dimensão fractal dá uma noção da compacidade das partículas primárias no agregado. A dimensão fractal varia de 1 a 3, sendo que o valor 3 corresponde a um agregado esférico sólido. Por outro lado, quando o valor dessa dimensão aproxima-se a 1, a estrutura do floco é irregular e aberta (SPICER; PRATSINIS, 1996b).

Conforme Serra e Casamitjana (1998), quando o valor da dimensão fractal é conhecido, é possível determinar propriedades físicas dos flocos, tais como densidade, volume e massa. A autossimilaridade implica que quanto maior a estrutura analisada, maior o volume de vazios. Dessa forma, a massa específica diminui à medida que o tamanho do floco aumenta (TANG *et al.*, 2002). Assim sendo, introduz-se a segunda propriedade das estruturas fractais: a lei de potência.

Pela lei de potência, a massa de um agregado fractal (M_A) é proporcional à sua dimensão (R_A), isto é:

$$M_A \propto R_A^{D_f} \quad (2)$$

Onde: D_f é a dimensão fractal do agregado (adimensional), M_A em kg e R_A em m.

Sabendo-se que a massa é uma grandeza relacionada com a massa específica, a equação 2 pode ser reescrita conforme a Equação 3:

$$\rho_A V_A \propto R_A^{D_f} \quad (3)$$

Onde: ρ_A é a massa específica do agregado (em kg/m³) e V_A é o volume do agregado (em m³).

Considerando um agregado esférico, o volume pode ser calculado por meio da Equação 4:

$$V_A = \frac{4}{3} \pi R_A^3 \quad (4)$$

Ao combinar as Equações 3 e 4, chega-se em:

$$\rho_A \propto R_A^{D_f-3} \quad (5)$$

Como os agregados são porosos, com dimensões fractais menores do que 3 – o que implica que $(D_f - 3) < 0$, o valor da massa específica diminui com o aumento do tamanho do agregado (TANG *et al.*, 2002).

Li *et al.* (2007) mostraram que quanto maior o gradiente de velocidade durante a floculação, maior a dimensão fractal dos flocos. Quando G é baixo, os flocos são descritos por estruturas mais abertas e ramificadas, o que reduz a dimensão fractal. Quando G é alto, as estruturas mais abertas são destruídas pelo escoamento, permanecendo unidos apenas os flocos mais compactos. Também foi concluído que flocos com alto valor de dimensão fractal são mais resistentes devido à proximidade das partículas (compacidade).

2.3.1.1 Determinação da dimensão fractal bidimensional e tridimensional

Segundo Serra e Casamitjana (1998), a dimensão fractal tridimensional não pode ser determinada diretamente por meio da análise de imagens, visto que as imagens são resultados da projeção dos flocos em apenas duas dimensões. Portanto, pela análise de imagens, pode-se calcular uma dimensão fractal bidimensional, cujo valor é igual a 2 para partículas esféricas.

Ao plotar um gráfico log-log correlacionando a dimensão característica dos flocos com a área projetada, os pontos aproximam-se de uma função exponencial cujo expoente é a dimensão fractal bidimensional, D_{fp}' . Área projetada e comprimento característico dos flocos são relacionados por meio da Equação 6 (SERRA; CASAMITJANA, 1998).

$$A = \xi_2 d_p^{2-D_{fp}'} d^{D_{fp}'} \quad (6)$$

Em que: A é a área projetada (L^2), ξ_2 é o fator de forma (adimensional), d_p é a dimensão das partículas primárias e d é o comprimento característico dos flocos (ambas em L). Um floco esférico possui fator de forma ξ_2 próximo a $\pi/4$.

O coeficiente da função exponencial C_2 representa o produto $\xi_2 d_p^{2-D_{fp}'}$. Com a interpolação dos pontos do gráfico $d \times A$, o valor desse coeficiente é conhecido. Como os valores de d_p e D_{fp}' também são conhecidos, determina-se o valor do fator de forma ξ_2 (SERRA; CASAMITJANA, 1998).

Considerando que é difícil estimar o volume de um floco por meio de métodos não-intrusivos, a comunidade científica propõe modelos aproximados para esse parâmetro do

floco. Com base nas dimensões mínima e máxima dos agregados determinados na análise de imagens, Moruzzi *et al.* (2020) aproximaram os flocos a elipsoides de revolução que continham os flocos para determinar a dimensão fractal tridimensional (Equação 7). Ao linearizar a equação, encontra-se o valor da dimensão fractal tridimensional (D_{fp}).

$$V \sim d_{máx}^{D_{fp}} \quad (7)$$

Em que: V , volume do elipsoide (L^3) e $d_{máx}$ é a dimensão máxima do floco (em L).

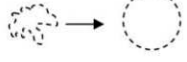

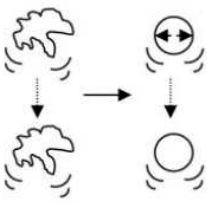
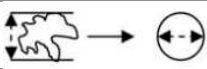
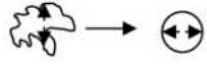
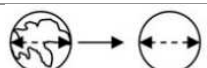
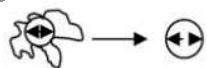
2.3.2 Dimensões dos flocos

Por se tratarem de estruturas fractais, Bushell *et al.* (2002) descrevem os flocos como sistemas desordenados, caóticos e complexos. Assim sendo, existem várias dimensões na literatura que caracterizam o tamanho de partículas floculentas, e por isso os pesquisadores devem conhecê-las para comparar corretamente com os resultados de trabalhos anteriores.

Bushell *et al.* (2002) citaram três tipos de raios atribuídos aos agregados: o raio de giração (R_g), o raio hidrodinâmico (R_h) e o raio de colisão (R_c). O primeiro deles trata-se de uma distância média do centro de massa do floco até cada partícula primária. Já o raio hidrodinâmico se refere ao raio de uma esfera que apresenta a mesma resistência à sedimentação que o agregado. O última deles, raio de colisão, é correspondente ao raio da menor esfera que pode conter o floco.

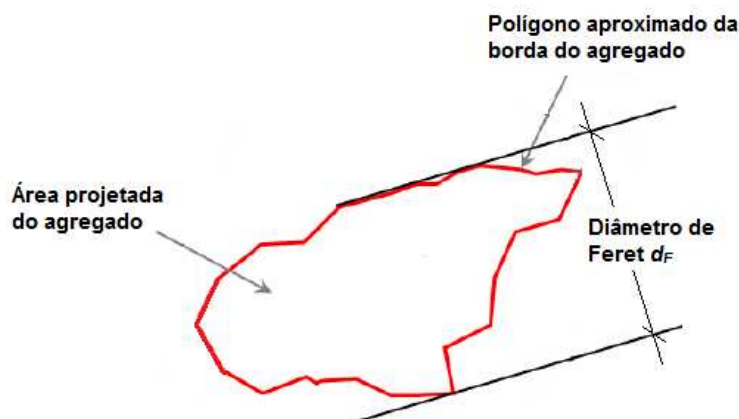
Jarvis *et al.* (2005) apresentaram alguns diâmetros que são utilizados para aproximar os flocos a formatos conhecidos, como circunferências e esferas. Os autores afirmam que, por se tratarem de equacionamentos distintos, vários diâmetros podem caracterizar a mesma partícula. Alguns diâmetros calculados com base na análise bidimensional de flocos, listados por Jarvis *et al.* (2005), e seus respectivos conceitos e equacionamentos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Alguns diâmetros característicos de agregados. Fonte: o Jarvis *et al.* (2005), adaptado por Autor (2020).

Diâmetro do floco	Descrição	Diagrama	Equação
Diâmetro com base no perímetro (d_c)	O diâmetro do círculo com o mesmo perímetro (P) da partícula medida		$d_c = \frac{P}{\pi}$
Diâmetro da área projetada 1 (d_a)	O diâmetro de um círculo com a mesma área projetada (A) de um floco medido em uma orientação constante		$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}}$
Diâmetro da área projetada 2 (d_p)	O diâmetro de um círculo com a mesma área projetada (A) de um floco medido em uma orientação aleatória		
Diâmetro de sedimentação (d_s)	O diâmetro da esfera com a mesma densidade e velocidade de sedimentação que um floco em mesmo fluido com a mesma densidade e viscosidade		
Diâmetro de Stoke (d_{st})	O diâmetro de uma partícula sedimentando em um intervalo de Reynolds de fluxo laminar ($Re < 0,2$)		$d_{st} = \frac{18\mu v}{\rho_f - \rho}$
Diâmetro de Feret (d_F)	O valor entre duas tangentes paralelas projetadas do exterior da partícula		-
Diâmetro de Martin (d_M)	O comprimento da reta paralela a uma direção fixa que divide a área projetada do floco em duas partes iguais		-
Diâmetro circunscrito (d_{sc})	O diâmetro do menor círculo que circunscribe a área do floco projetado		-
Diâmetro inscrito (d_i)	O diâmetro do maior círculo que se encaixa dentro da área do floco projetado		-

Dentre os diâmetros listados na Tabela 1, destaca-se o diâmetro de Feret (d_F). Este diâmetro refere-se à distância normal entre dois planos paralelos que tangenciam o floco – para análise bidimensional de agregados, é a distância entre duas retas paralelas. O diâmetro de Feret pode ser medido em várias direções aleatórias, por isso é comum que se utilize a média dos diâmetros das várias medições. Assim sendo, uma única medição do diâmetro de Feret tem pouca significância (MERKUS, 2009). A Figura 5 esquematiza uma partícula floculenta projetada em um plano e mostra a indicação de um dos diâmetros de Feret.

Figura 5 – Diâmetro de Feret de uma partícula projetada em um plano.



Fonte: Yepes *et al.* (2009), adaptado por Autor (2020).

2.4 SEDIMENTAÇÃO

Antes de passar pela filtração, a água floculada passa por um processo de clarificação baseada na separação líquido-sólido com o objetivo de aumentar a eficiência dos filtros de areia e diminuir a frequência de lavagem dessas unidades (AZEVEDO, 2013). Dentre as técnicas de separação sólido-líquido, destacam-se a flotação por ar dissolvido (FAD) e a sedimentação.

A sedimentação é o fenômeno o qual as partículas em suspensão, de massa específica superior à da água, separam-se do meio líquido devido à força gravitacional e, nas ETAs, depositam-se no fundo dos decantadores ou em zonas de armazenamento. Para que os agregados tenham velocidades de sedimentação satisfatórias, a floculação deve garantir a formação de flocos densos e as bacias de sedimentação devem operar em regime laminar. Portanto, conforme Azevedo (2013), os sedimentadores são caracterizados por baixa taxa de aplicação superficial, o que necessita de elevada área de ocupação para essas unidades. Devido à facilidade de operação dos sedimentadores, a sedimentação é a técnica mais difundida nas estações de tratamento de água brasileiras.

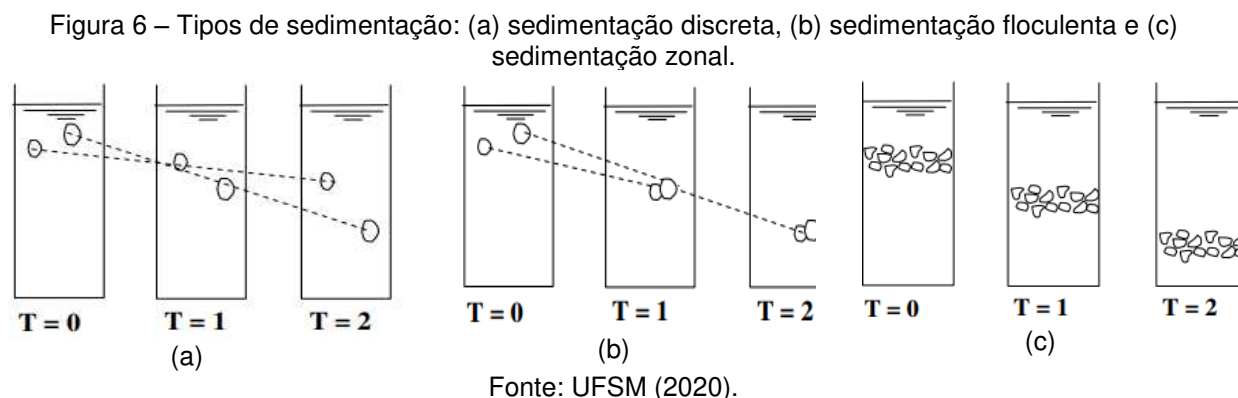
De acordo com Richter (2009), a tecnologia de tratamento de águas no Brasil segue a dos EUA. Entretanto, as águas dos rios estadunidenses são caracterizadas por turbidez elevada, enquanto as do Brasil são de cor elevada (as florestas fornecem aos rios grande quantidade de matéria orgânica, que aumenta a cor da água). Por isso, nos EUA empregam-se pré-sedimentadores – unidades que antecedem a mistura rápida a fim de facilitar o tratamento nas etapas seguintes. No Brasil, em regiões afetadas por chuvas torrenciais e pelo

desmatamento, a turbidez pode variar de 5000 a 20000 UNT, portanto faz-se necessária a implantação dessas unidades.

Sedimentação discreta, flocculenta e zonal são tipos de sedimentação de partículas, conforme Azevedo (2013). A sedimentação discreta é caracterizada pela separação das partículas do meio líquido individualmente, sem que haja interação entre elas. Ou seja, durante a sedimentação, as partículas mantêm as mesmas características da suspensão, como tamanho e massa específica. Dessa forma, a sedimentação das partículas segue trajetória retilínea. Em contraste, na sedimentação flocculenta, as partículas podem se aglomerar durante a decantação, o que modifica a massa específica e a velocidade de sedimentação das partículas durante o processo.

Quando a suspensão é caracterizada por uma alta concentração de sólidos, pode ocorrer a sedimentação zonal. As partículas se deslocam como uma massa única, portanto a distância entre as partículas permanece a mesma durante a sedimentação. Na sedimentação zonal, é visível a separação sólido-líquido (AZEVEDO, 2013).

Os três tipos de sedimentação descritos são ilustrados na Figura 6.



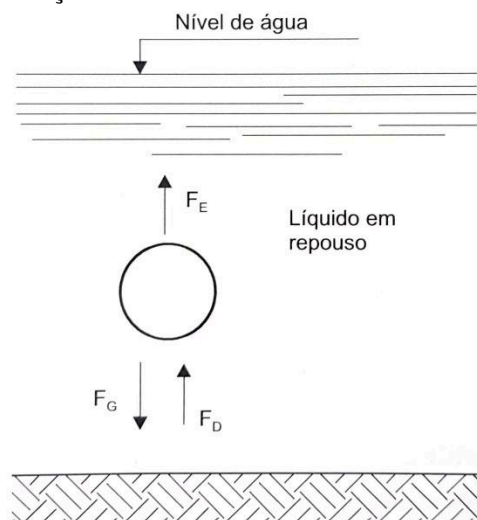
2.4.1 Lei de Stokes

Ao resolver um caso particular das equações de Navier-Stokes – equações que regem os escoamentos –, o físico George Gabriel Stokes formulou a Lei de Stokes, que descreve a sedimentação de pequenas esferas sólidas em um meio em repouso. Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), apesar dessa lei ter sido formulada no século XIX, os estudos para a clarificação da água por meio dessa lei surgiram apenas no século XX.

O movimento vertical para baixo de uma partícula no vácuo, sob campo gravitacional, é acelerado porque não existe nenhuma força resistiva a este deslocamento. Entretanto, quando uma partícula está no meio gasoso ou líquido, propriedades físicas da partícula e do meio interferem nas forças resistivas e o movimento da partícula desacelera (LIMA; LUZ, 2001).

Durante a sedimentação, duas forças resistentes podem ser citadas: a força de empuxo, F_E , igual ao peso do líquido deslocado pela partícula (princípio de Arquimedes) e a força de arrasto, F_D , que é a força que age contra o movimento e depende da velocidade de sedimentação. Quando F_D e F_E se igualam à força gravitacional (F_G), a partícula se sedimenta a uma velocidade constante, denominada velocidade terminal de sedimentação. Na Figura 7 são ilustradas as forças atuantes na sedimentação de uma esfera.

Figura 7 – Forças atuantes no esfera durante a sedimentação.



Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005).

A velocidade terminal de sedimentação (V_s) pode ser calculada por meio da Equação 8 e é expressa em m/s.

$$V_s = \sqrt{\frac{2g(\rho_s - \rho_a)V_{ps}}{C_D\rho_a A_s}} \quad (8)$$

Na qual g é a aceleração da gravidade, em m/s^2 ; ρ_s é a massa específica da partícula, em kg/m^3 ; ρ_a é a massa específica da água, em kg/m^3 ; V_{ps} é o volume da partícula, em m^3 ; C_D é o coeficiente de arrasto, adimensional; A_s é a área projetada da partícula na direção do movimento, em m^2 .

Para partículas esféricas, a Equação 8 pode ser reescrita conforme a Equação 9.

$$V_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_s - \rho_a)d_{ps}}{3C_D\rho_a}} \quad (9)$$

A equação de Stokes é válida para partículas que não alteram suas características durante a sedimentação – as partículas discretas. O coeficiente de arrasto depende do valor do número de Reynolds (Re), que por sua vez é calculado de acordo com a Equação 10.

$$Re = \frac{\rho_a V_s d_{ps}}{\mu} \quad (10)$$

Em que μ é a viscosidade absoluta da água, em N s/m².

Para $Re < 1$, o coeficiente de arrasto é calculado por intermédio da Equação 11.

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (11)$$

2.4.2 Equação de Stokes modificada para agregados porosos

A lei de Stokes é aplicável à sedimentação de pequenas partículas esféricas sólidas, descritas pela geometria euclidiana. Em contraposição, no estudo de agregados formados para a separação sólido-líquido, os flocos são estruturas mais complexas do que as esferas de Stokes.

Os flocos são agregados porosos. Trabalhos como o de Xiao *et al.* (2013) comprovam que, devido à permeabilidade de flocos, existe um fluxo interno no interior das partículas que reduz a força de arrasto, logo a velocidade de sedimentação é maior quando comparada às velocidades de flocos impermeáveis. Além disso, dois flocos de mesmo tamanho podem ter massas específicas diferentes. Isso significa que quanto maior o tamanho do floco, maior a faixa de dimensões fractais possíveis para este floco. Portanto, um tamanho de floco não resulta em apenas uma velocidade de sedimentação (VAHEDI; GORCZYCA, 2012).

Neste contexto, apresenta-se a equação de Stokes modificada para agregados porosos (Equação 12):

$$V_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_s - \rho_a)d_{ps}}{3\Omega C_D \rho_a}} \quad (12)$$

Note que acrescentou apenas um coeficiente na Equação 12, ao comparar com a Equação 9. Este coeficiente (Ω) é um fator de correção que varia de acordo com a porosidade do agregado. Por definição, esse fator de correção é igual a 1,0 para esferas sólidas impermeáveis (WU; LEE, 1998).

2.5 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS

A observação da natureza é instintiva para o ser humano. Leonardo Da Vinci (1452-1519) manifestou grande interesse pela hidrodinâmica, o que resultou em centenas de anotações de conceitos e desenhos de escoamentos. Um dos trabalhos de Da Vinci é apresentado na Figura 8. O estudioso detalhou em sua obra várias estruturas turbilhonares que se formaram em um corpo de água ao receber uma vazão por um canal. Esse esboço intriga os atuais estudiosos da hidrodinâmica pelo fato de que o renascentista retratou um escoamento muito complexo a partir de observações a olho nu.

Figura 8 – Da Vinci: “Água caindo sobre água”.



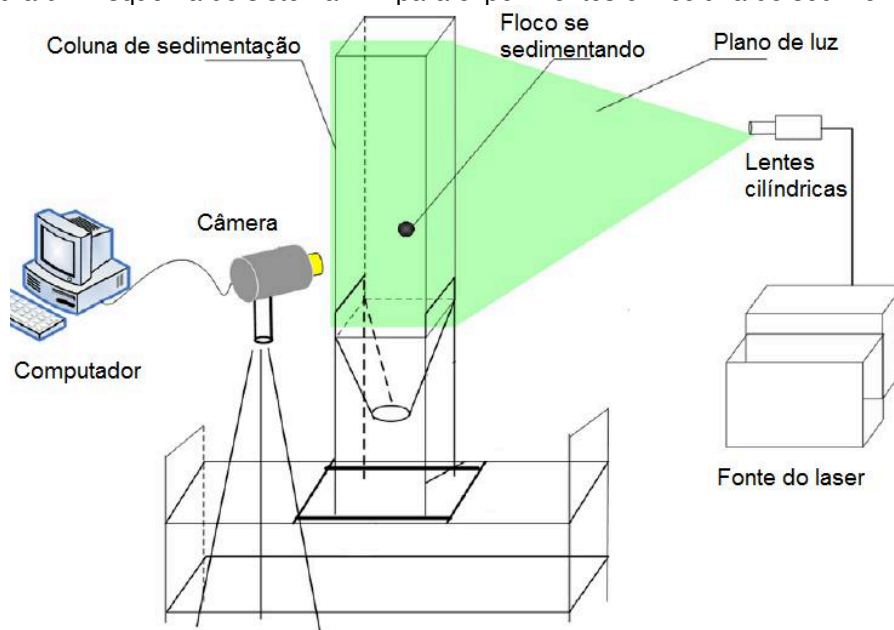
Fonte: Da Vinci (1508-1509).

Ludwig Prandtl (1875-1953) é um dos nomes importantes na hidrodinâmica, um dos primeiros estudiosos a criar um aparato para a visualização de escoamentos e extração de informações. Ao utilizar partículas de mica em protótipos de canais, Prandtl estudou qualitativamente as características de escoamentos laminares e turbulentos.

Entretanto, trabalhos como os de Da Vinci e Prandtl tratam de análises qualitativas devido às limitações tecnológicas de cada época. Atualmente, há recursos sofisticados para a análise qualitativa de escoamentos, como lasers, computadores e equipamentos fotográficos e videográficos. Assim, também torna-se possível a análise quantitativa de campos de velocidade instantâneos (RAFFEL *et al.*, 2007).

O *particle image velocimetry* (PIV), em português “velocimetria por imagem de partículas”, é uma técnica não-intrusiva que, por meio da análise de imagens, permite calcular campos de velocidade em escoamentos. Para a obtenção dessas imagens, é necessário um conjunto de equipamentos que formam o sistema PIV (Figura 9).

Figura 9 – Esquema do sistema PIV para experimentos em coluna de sedimentação.



Fonte: adaptado de Xiao *et al.* (2013).

Xiao *et al.* (2011) explica que o sistema PIV é formado por um conjunto laser, uma câmera de alta resolução e um computador para o controle de *softwares* para captura, processamento e armazenamento de imagens. Quando o pulso de um laser atravessa as lentes cilíndricas, é formado um plano de luz que ilumina as partículas dentro da coluna de sedimentação. A luz realça a forma dos agregados e imagens de alta resolução são capturadas pela câmera. As imagens, então, são processadas pelo *software* que determina parâmetros das partículas como área e diâmetro.

Segundo Raffel *et al.* (2007), o vetor velocidade de uma partícula é calculado conhecendo-se o tempo entre as duas iluminações da partícula e o deslocamento observado na imagem.

Os autores ressaltam que é necessário um pós-processamento sofisticado para a análise de um grande volume de dados.

Na maioria das aplicações, utiliza-se partículas traçadoras com densidades próximas à da água para que o fluxo seja traçado nas imagens. Quando aplica-se o PIV na análise de flocos em sedimentação, o objetivo não é determinar os campos de velocidade do escoamento, e sim o cálculo das velocidades de sedimentação dos flocos. Nesses casos, a partícula traçadora é o próprio floco.

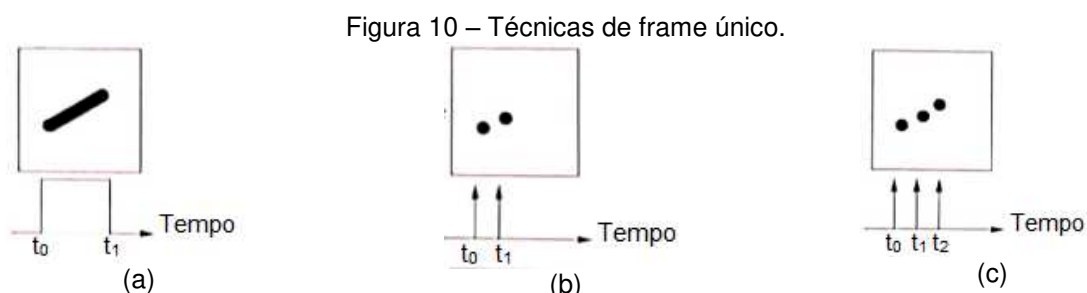
Entre as vantagens do PIV, pode-se pontuar que é uma técnica não-intrusiva, ou seja, por se tratar de um método óptico, não ocorre a perturbação do escoamento; além disso o PIV permite o cálculo de vetores de velocidade em vários pontos do escoamento. Raffel *et al.* (2007) salienta que o tempo do pulso do laser – tempo de captura entre imagens – seja suficiente para capturar o deslocamento da partícula, porém deve ser curto para evitar que a partícula desapareça do plano de luz.

2.5.1 Técnicas de gravação do PIV

Uma gravação de vídeo é formada por várias imagens estáticas denominadas quadros de vídeos ou frames de vídeo (TERUKINA, 2005). De acordo com Raffel *et al.* (2007), as técnicas de gravações estudadas no PIV são classificadas como gravações de frame único e frames múltiplos.

As técnicas de frame único são aquelas que resultam em apenas uma imagem para retratar os deslocamentos das partículas. Como desvantagem, o frame único não fornece informação temporal desses deslocamentos sem ajuste das imagens. O ajuste pode ser feito por meio de código de cores, indicação do tempo das partículas nas imagens, dentre outros meios (RAFFEL *et al.*, 2007).

A Figura 10.a esquematiza um modo de frame único com exposição única. Observe que a imagem forneceu apenas o deslocamento da partícula. A Figura 10.b representa uma imagem de exposição dupla, ou seja, a posição da partícula em dois tempos distintos. A exposição múltipla – posições da partícula em diferentes instantes – é apresentada na Figura 10.c.

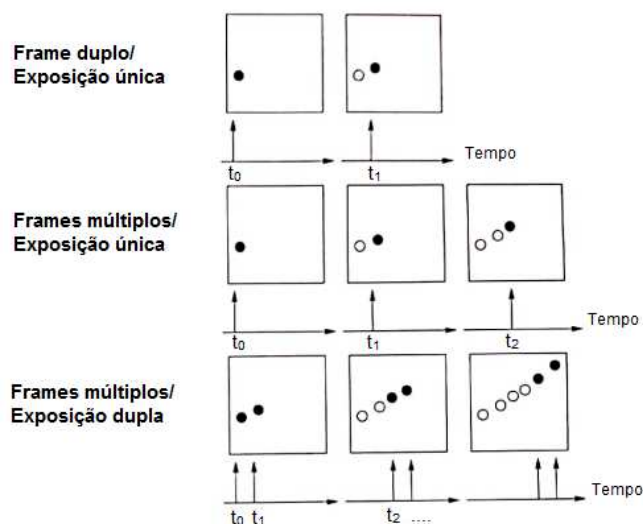


Fonte: o Autor (2020), adaptado de Raffel *et al.* (2007).

Nos exemplos ilustrados em Figura 10.b e 10.c pode-se extrair informações do formato da partícula, diferentemente da Figura 10.a. Vale ressaltar que se não fossem as retas indicando a evolução temporal dos frames, não seria possível determinar a direção dos deslocamentos: as partículas do exemplo estariam se deslocando para cima ou para baixo? Esta incerteza do deslocamento é denominada ambiguidade direcional (RAFFEL *et al.*, 2007).

A Figura 11 mostra categorias de gravações de frames múltiplos, nas quais cada imagem mostra a posição da partícula em certo instante. Sendo assim, esse tipo de gravação fornece altas resoluções temporal e espacial do deslocamento das partículas. Na Figura 11, as partículas brancas representam suas posições nos frames anteriores (RAFFEL *et al.*, 2007). O primeiro conjunto de frames representa frames duplos com exposição única. Ou seja, têm-se dois frames, e em cada frame é mostrada a posição de uma partícula. Já o segundo conjunto de frames esboça frames múltiplos com exposição única. O terceiro conjunto de frames se trata de uma exposição dupla *multiframe* – cada frame mostra duas posições distintas da partícula.

Figura 11 – Técnicas de frames múltiplos.



Fonte: Raffel *et al.* (2007), adaptado por Autor (2020).

Raffel *et al.* (2007) destaca que a técnica de gravação não é definida pelo equipamento de aquisição das imagens – tanto fotografias quanto gravações de vídeo podem abordar técnicas de frame único e frames múltiplos.

2.5.2 Trabalhos anteriores sobre determinação de velocidades de sedimentação por meio do PIV

Zhong *et al.* (2011) estudaram a influência do ácido húmico nas propriedades dos flocos de caulinita. Os experimentos foram idealizados em escala de bancada, em um equipamento jar-test. Para aglomerar as partículas da água, dois coagulantes foram utilizados: o sulfato de alumínio e o cloreto férrico. A mistura lenta ocorreu durante trinta minutos, a uma velocidade de 20 rpm.

Após a floculação, os flocos foram transferidos para uma coluna de sedimentação de 50 cm de altura para aquisição de dados por meio de um sistema PIV. Os flocos foram gravados se sedimentando na porção inferior da coluna e dados como tempo de sedimentação, diâmetro máximo e área projetada dos flocos foram obtidos nos ensaios. Assim sendo, Zhong *et al.* (2011) concluíram que os flocos mais sedimentáveis foram aqueles formados pelo cloreto férrico, na água sem presença de ácido húmico. O ácido húmico também representou influência negativa para o tamanho dos flocos formados pelos dois coagulantes.

Além da determinação de velocidades de sedimentação pelo PIV em colunas de sedimentação, Xiao *et al.* (2013) buscaram determinar a porosidade por meio da análise de gravações de vídeo. Os objetos de estudo foram flocos de lodo ativado e flocos formados por partículas de látex por intermédio do cloreto férrico. Com o auxílio de traçadores, os autores mostraram que ocorre um fluxo no interior dos flocos devido à porosidade dos agregados. Os autores destacaram que a presença de escoamento dentro dos poros dos flocos diminui a força de arrasto e aumenta a velocidade de sedimentação das partículas, se comparados com flocos impermeáveis.

Xiao *et al.* (2013) concluíram que os flocos de lodo ativado são mais sedimentáveis do que os agregados formados pela ação do cloreto férrico. Ademais, os flocos de lodo ativado mostraram-se menos permeáveis do que os flocos de látex, o que é coerente com trabalhos antecessores. As bactérias do lodo excretam as chamadas substâncias poliméricas extracelulares (SPE), correspondem a polissacarídeos, proteínas, lipídeos e ácidos

nucleicos (PAIVA, 2004). As SPE entopem os poros dos flocos de lodo ativado, o que afeta a permeabilidade.

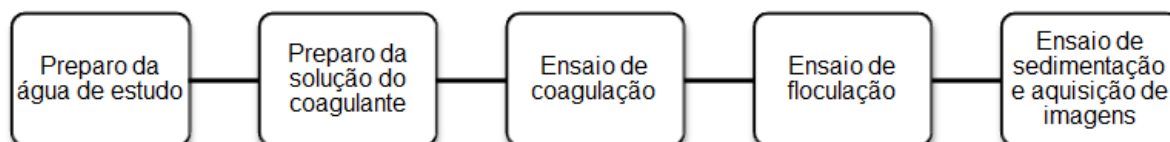
Moruzzi *et al.* (2020) previram as velocidades de sedimentação de flocos de caulinita formados em uma água de turbidez 25 UNT (sintética), após ensaios de floculação caracterizados por gradientes de velocidade que variaram de 20 a 60 s⁻¹, durante quinze minutos. O coagulante utilizado foi o sulfato de alumínio. Nas imagens obtidas pelo sistema PIV, os autores selecionaram 118 flocos após os ensaios de floculação. Ao processar as imagens, foram extraídas as áreas e dimensões dos agregados, para assim calcular parâmetros como porosidade, densidade e velocidade de sedimentação.

Para calcular as velocidades de sedimentação, Moruzzi *et al.* (2020) supuseram que o formato das partículas floculentas não alterariam durante a sedimentação. Assim sendo, eles concluíram que as velocidades de sedimentação foram maiores para os flocos de todas as faixas de tamanho, comparando-se com as velocidades de sedimentação das esferas sólidas de Stokes. Isso está de acordo com as conclusões de Xiao *et al.* (2013), no que se refere à interferência da porosidade na sedimentação de partículas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

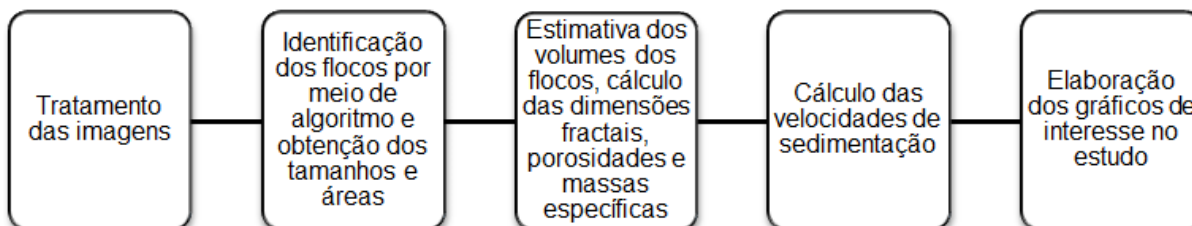
Neste capítulo são apresentados os materiais, equipamentos, programas computacionais e métodos que foram utilizados nesta pesquisa. A metodologia de trabalho se dividiu em duas fases – a primeira foi a parte experimental com a finalidade de aquisição de imagens; enquanto a segunda fase foi a extração de dados das imagens capturadas e o cálculo de demais parâmetros necessários no estudo. Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as etapas da primeira e da segunda fase da metodologia, respectivamente.

Figura 12 – Primeira fase: processos para a aquisição de imagens durante a sedimentação.



Fonte: Autor (2020).

Figura 13 – Segunda fase: extração de dados das imagens e cálculo de outros parâmetros.



Fonte: Autor (2020).

3.1 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Nesta pesquisa foram utilizados os seguintes equipamentos, materiais e programas computacionais:

- a. Deionizador de água – a água utilizada no estudo foi fornecida pela rede pública de distribuição, porém passou pelo deionizador para a remoção de sais e outros compostos para a realização dos ensaios;
- b. Balde de 18 L para o preparo da água de estudo;
- c. Agitador magnético para o preparo da solução mãe de caulinita, sólido que atribuiu turbidez à água;
- d. Turbidímetro da marca *Policontrol*, modelo AP 2000 IR;
- e. Coagulantes químicos – sulfato de alumínio, cloreto férrico e policloreto de alumínio;
- f. Alcalinizante – hidróxido de sódio;

- g. Balança eletrônica digital de precisão de 0,0001 g para quantificar a massa necessária dos produtos químicos para o preparo das soluções;
- h. pHmetro digital de bancada da marca *Hanna Instruments*, modelo HI 8314;
- i. Agitador *jar test* da empresa *Ethik Technology* para os ensaios de coagulação, floculação e sedimentação, ensaiados em um jarro de 2 L de capacidade;
- j. Materiais de laboratório – béqueres, balões volumétricos, provetas, pipetas, pissetas, peras de sucção, conta-gotas, bastões, espátulas, dentre outros;
- k. Copos descartáveis de 50 mL para a coleta de amostras;
- l. Cronômetro digital portátil;
- m. Ponteiro laser sob suporte para melhorar a nitidez dos flocos nas imagens capturadas;
- n. Câmera digital da marca *Nikon*, modelo D5500, fixada sobre um tripé, para a aquisição das imagens dos flocos;
- o. Computador para controle de captura, processamento, armazenamento e tratamento das imagens; necessário também para a elaboração de planilhas e gráficos. Os programas computacionais utilizados foram o *Camera Control Pro 2.0* para configuração da câmera e controle da captura de imagens; *JPEG Crops* para o recorte das imagens; *ImageJ 1.51* para o tratamento das imagens e extração de dados; e planilhas eletrônicas.

3.2 PREPARAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO

Para atribuir turbidez à água, foram preparadas soluções-mãe de caulinita. A caulinita utilizada foi natural, da empresa *Sigma-Aldrich*. A caulinita foi adicionada em uma garrafa de vidro com água deionizada. Colocou-se a garrafa no agitador para homogeneizar a solução durante 8 horas. Após esse tempo, o agitador foi desligado para que a solução ficasse em repouso durante 12 horas. Esse processo foi necessário para que todas as partículas maiores de caulinita se sedimentassem, garantindo que apenas as partículas primárias ficassem em suspensão. Assim sendo, o conteúdo sobrenadante da garrafa foi coletado e armazenado em um galão plástico.

A água de estudo era deionizada e foi colocada em um balde de 18 L. Com auxílio de um béquer de 50 mL, a solução-mãe de caulinita era adicionada aos poucos. A cada adição, homogeneizava-se a água e coletava-se uma amostra para realizar a leitura da turbidez da água no turbidímetro. O procedimento foi repedido até alcançar uma turbidez de 50 ± 5 UNT.

Preparava-se a água de estudo em todos os dias de ensaio para garantir que a caulinita não se sedimentasse no balde e a turbidez da água se mantivesse na faixa de 50 ± 5 UNT.

3.3 PREPARAÇÃO DOS COAGULANTES

Três coagulantes químicos foram utilizados para análise da sedimentação dos flocos: o sulfato de alumínio, o cloreto férrico e o policloreto de alumínio (PAC).

O sulfato de alumínio utilizado foi da marca *Synth* e o número de moléculas de cristalização não foi especificado na Ficha de Informação de Segurança para Produtos Químicos (FISPQ) do produto. Como o número de moléculas varia de 14 a 18, foi adotado o valor médio de moléculas (16 moléculas de H_2O), tal como Oliveira (2018).

A dosagem de coagulante tomada como referência foi a dosagem determinada por Gonçalves (2017), igual a 2,5 mg/L de Al^{3+} .

O cloreto férrico utilizado também foi adquirido na empresa *Synth*, com 6 moléculas de água de cristalização ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$). A dosagem escolhida adotada foi a dosagem do trabalho de Gonçalves (2017), igual a 5,2 mg/L de Fe^{3+} .

O policloreto de alumínio líquido aplicado nos ensaios foi da empresa *Sun Química Ltda*, e de acordo com a FISPQ fornecida pelo fabricante, o produto era composto de 20 a 30% de hidrato de alumínio. Foi preparada uma solução com concentração de 2,3% do coagulante polimérico, e a dosagem utilizada foi de 30 mL da solução, assim como Anício (2019).

3.4 PREPARAÇÃO DA BANCADA DE TESTES

Os ensaios de coagulação, floculação e sedimentação foram realizados no equipamento *jar test* em apenas um jarro de 2 L de capacidade. Para o abastecimento do jarro, utilizou-se uma proveta de 2 L. O *jar test* permite ensaio simultâneo de seis jarros, mas como o objetivo deste trabalho é acompanhar a sedimentação por imagens, utilizou-se apenas um jarro.

Para a aquisição das imagens, foi utilizada uma câmera de alta resolução da marca *Nikon*, modelo D5500, posicionada em um tripé o mais próximo possível da bancada. Por meio de um cabo USB, a câmera foi conectada a um notebook para capturar e armazenar as

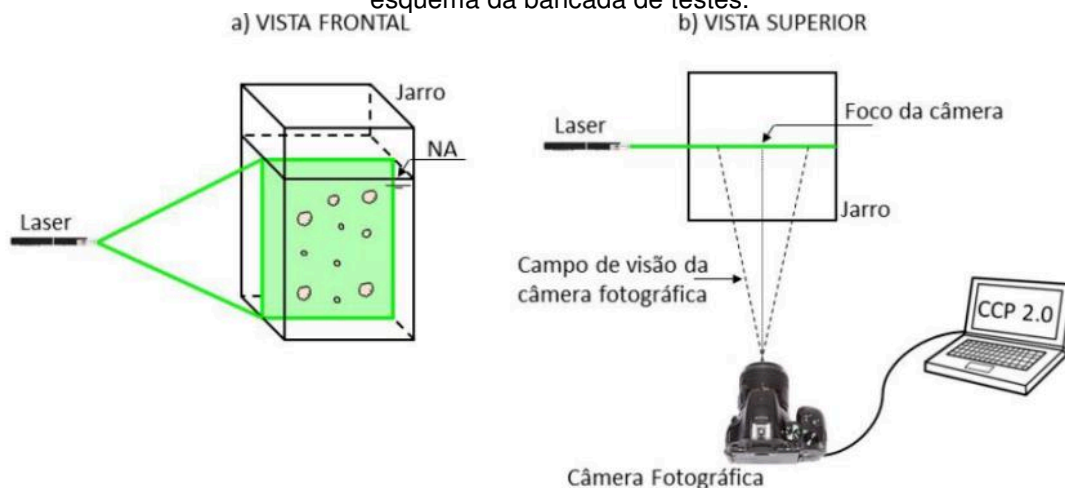
imagens. Com o programa computacional *Camera Control Pro 2.0* (CCP 2.0), as configurações da câmera foram definidas e as imagens foram capturadas. A configuração da câmera utilizada para acompanhar os ensaios é a mesma de Oliveira (2018) e é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Configuração da câmera para a aquisição das imagens dos flocos durante a sedimentação. Fonte: o Autor (2020).

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor utilizado</i>
Abertura do obturador	F 5.6
Compensação de exposição	+1 1/3 EV
Sensibilidade ISO	12800
Velocidade de captura do obturador	1/3200 s
Frequência de disparo	4 qps
Resolução	6000×4000 pixels

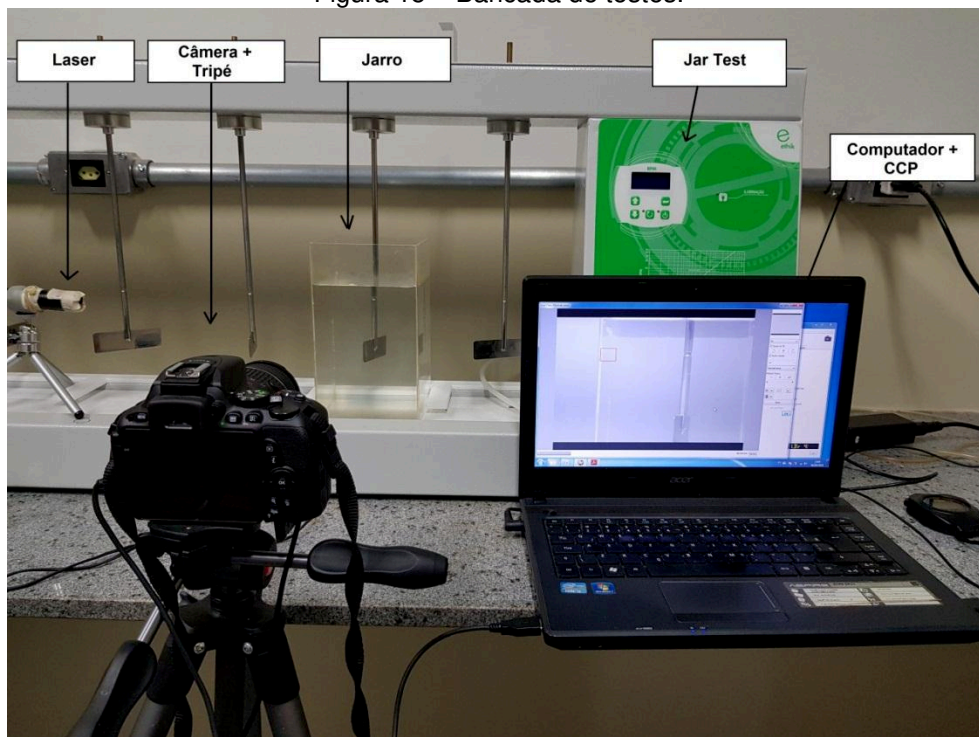
Um ponteiro laser foi fixado em um suporte a fim de criar um plano de luz verde dentro do jarro para iluminar os flocos e torná-los mais nítidos nas imagens. O plano de luz era situado a uma distância de 1 cm da parede frontal do jarro. Vale ressaltar que a câmera foi posicionada perpendicularmente a este plano de luz. Na Figura 14 é representado um esquema da bancada de testes, enquanto a Figura 15 é uma imagem da bancada de testes.

Figura 14 – (a) vista frontal do jarro, mostrando a formação do plano de luz devido ao laser; (b) esquema da bancada de testes.



Fonte: Oliveira (2018).

Figura 15 – Bancada de testes.



Fonte: o Autor (2020).

Antes da realização dos ensaios, imagens de calibração eram capturadas com a finalidade de se conhecer a distância entre dois pontos no plano de luz e converter as imagens capturadas de pixels para milímetros. Para isso, uma régua graduada em milímetros foi posicionada dentro do jarro coincidindo com o plano de luz, conforme a Figura 16.

Figura 16 – Posicionamento da régua dentro do jarro para o conhecimento da distância entre dois pontos.



Fonte: o Autor (2020).

3.5 DOSAGENS DE ALCALINIZANTE E ENSAIOS DE COAGULAÇÃO

Os três coagulantes manipulados no trabalho são ácidos e reduzem o pH da água. Como os flocos são formados em um meio levemente básico, foi necessário misturar alcalinizante antes dos ensaios de coagulação/floculação. O alcalinizante escolhido foi o NaOH com duas soluções de concentrações molares: 0,1 M e 0,5 M.

O pH de uma solução é uma propriedade difícil de ser pré-estabelecida, portanto a dosagem necessária de NaOH para a coagulação foi determinada por tentativas. Os jarros do *jar test* foram abastecidos com 2 L da água de estudo. Os impulsores do *jar test* eram acionados e aplicava-se o alcalinizante após os impulsores alcançarem a velocidade de 400 rpm (ou gradiente de velocidade igual a 800 s^{-1}). A mistura era realizada durante 10 s, e em seguida era aplicada a dosagem de coagulante, também durante 10 s. Após a mistura rápida, a velocidade dos impulsores era reduzida até alcançar o gradiente de velocidade de mistura lenta desejado para a formação dos flocos. Nesse momento, realizava-se a coleta de uma amostra da água coagulada para a leitura do pH. Caso não fosse observada a formação de flocos, um novo teste era realizado com outra dosagem de coagulante. Se o pH lido fosse elevado, a dosagem era reduzida; caso o valor fosse baixo, uma dosagem maior era aplicada no próximo teste. As dosagens de NaOH escolhidas foram as menores quantidades observadas necessárias para a formação de flocos.

Na Tabela 3 são apresentados os valores de concentrações das soluções e pH lidos.

Tabela 3 – Dosagens das soluções utilizadas e pH de coagulação. Fonte: o Autor (2020).

<i>Coagulante químico</i>	<i>Dosagem de coagulante</i>	<i>Dosagem de NaOH</i>	<i>pH de coagulação</i>
Sulfato de alumínio	2,5 mg/L de Al^{3+}	2 mL (0,5 M) + 0,5 mL (0,1 M)	7,41
Cloreto férrico	5,2 mg/L de Fe^{3+}	1 mL (0,5 M) + 1,1 mL (0,1 M)	6,86
Policloreto de alumínio	30 mL de PAC	4,5 mL (0,5 M)	8,45

3.6 ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO

Após a coagulação, o gradiente de velocidade de mistura rápida foi reduzido a fim de favorecer a formação de flocos. O tempo de floculação em todos os ensaios foi de 20 min e para cada coagulante foram ensaiados os seguintes gradientes de velocidade: 20, 30, 40, 50 e 60 s^{-1} . Gradientes acima desses valores prejudicam o crescimento dos flocos porque há um aumento da influência da ruptura.

3.7 ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO E ACOMPANHAMENTO POR IMAGENS

Usualmente, utilizam-se colunas de sedimentação para estudar velocidade de sedimentação de flocos. No trabalho de Zhong *et al.* (2011), a floculação ocorreu em experimentos *jar-test*, em jarros de dimensões 80 mm × 80 mm × 200 mm), e em seguida os flocos foram transferidos para uma coluna de sedimentação de 500 mm de altura e 40 mm de largura. Em Xiao *et al.* (2013) ocorreu o mesmo, e os autores citam que os flocos foram colocados cuidadosamente no topo da coluna de sedimentação com o auxílio de um conta-gotas.

Esse transporte de flocos de um recipiente para outro, conforme observado em Zhong *et al.* (2011) e Xiao *et al.* (2013), é intrusivo e pode causar a quebra dos flocos. Dessa maneira, os resultados para sedimentação representam velocidades de flocos alterados e não àqueles propriamente formados durante a mistura lenta. Nesse sentido, para o presente trabalho, os ensaios de sedimentação foram realizados no próprio jarro dos ensaios de floculação. Assim, as propriedades dos flocos não foram alteradas.

Para que os flocos ficassem bem nítidos nas imagens capturadas, deveria ter o mínimo possível de interferência luminosa externa. Mantinham-se a luz do laboratório desligada e a porta fechada durante todos os ensaios de sedimentação. O brilho da tela do computador foi reduzido para o mínimo e a tampa no notebook foi mantida entreaberta, visto que o computador estava próximo à câmera. Dessa forma, os flocos eram iluminados unicamente pela luz do laser.

Após os 20 min de floculação, o *jar test* era desligado e a lâmina impulsora era levantada para os flocos sedimentarem. Era necessário levantar a lâmina porque, durante a sedimentação, alguns flocos poderiam ficar aderidos à lâmina. Assim, diminuiu-se a interferência nos resultados.

Em função das dimensões do jarro, o movimento das partículas não era apenas descendente após cessada a mistura, como também rotacional. Isso também se deve pelo fato de que o fluido do jarro ainda sofria influência da energia cinética inserida na floculação. Portanto, para amenizar esse movimento rotacional e para que mais flocos fossem analisados, o jarro foi alterado para receber uma placa de acrílico logo após o fim dos ensaios de floculação. Essa placa de acrílico era posicionada a uma distância de 40 mm da parede frontal do jarro, após o desligamento do *jar test*. Neste contexto, define-se efeito de parede como uma força extra que as paredes do jarro exercem sobre o fluido, o que retarda

as velocidades das partículas (SÁ, 1990). A distância de 40 mm foi adotada conforme Zhong *et al.* (2011), pois os autores acompanharam a sedimentação de flocos em uma coluna desta espessura e afirmaram que é uma distância suficiente para evitar o efeito de parede. O ponteiro laser era posicionado de modo que o plano de luz fosse gerado entre a parede frontal do jarro e o aparato de acrílico. Na Figura 17 é ilustrado um esquema desse aparato de acrílico colocado no jarro.

Figura 17 – Aparato utilizado para minimizar o efeito rotacional dos flocos.



Fonte: o Autor (2020).

Após o desligamento do *jar test*, esperava-se um minuto para iniciar a captura das imagens. Esse tempo era necessário para o levantamento do impulsor do *jar test*, para fechar a porta e desligar a luz do laboratório, para ajustar a iluminação do notebook e também era um intervalo para reduzir a turbulência dentro do jarro após a mistura lenta. A turbulência fazia com que os flocos se movimentassem muito rapidamente e rotacionalmente, e portanto os agregados permaneciam em cerca de uma ou duas imagens. Assim, imagens capturadas até cinco minutos após o desligamento do equipamento não forneceram informações suficientes das seções transversais dos flocos sedimentáveis.

Por meio do programa computacional *Camera Control Pro*, foi realizado o controle da captura e armazenamento das imagens. Nas configurações desse software, foi definido que a cada clique seriam capturadas quatro imagens.

O tempo do acompanhamento da sedimentação dos flocos foi de 15 min para o sulfato de alumínio e policloreto de alumínio, enquanto o tempo para o cloreto férrico foi de 7 min. O

tempo de sedimentação do cloreto férrico foi menor porque foi observado que os flocos se sedimentaram mais rapidamente, comparando-se com o emprego dos coagulantes de alumínio.

Neste trabalho foram realizados 15 experimentos de coagulação/floculação/sedimentação: três coagulantes foram empregados para promover a aglutinação das partículas de caulinita, e para cada coagulante foram ensaiados cinco gradientes de velocidade de mistura lenta.

As estimativas das velocidades de sedimentação foram realizadas considerando-se a trajetória do agregado preponderantemente na vertical, ou seja, a partir do instante em que se movimentavam com ângulo menor que 45 graus em relação ao eixo vertical. Esta medida levou em consideração a redução da oportunidade de choque entre os agregados de forma a se assumir comportamento de partículas discretas.

3.8 TRATAMENTO DAS IMAGENS

3.8.1 *JPEGCropps Beta 0.7.5*

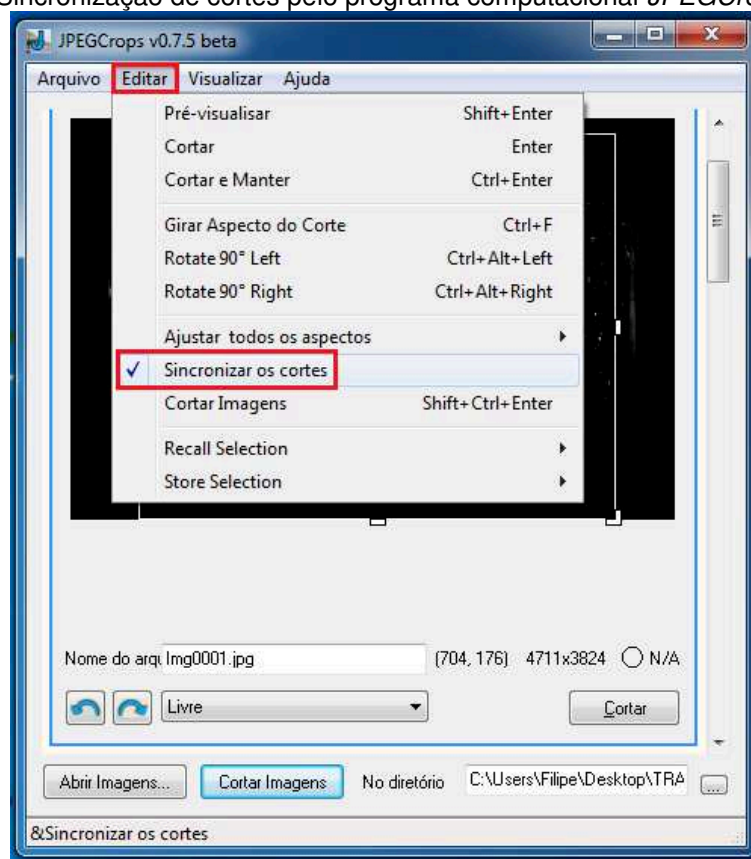
As imagens brutas obtidas nos ensaios de sedimentação possuem dimensões de 6000 × 4000 megapixels e apresentam zonas que não interessam no estudo da sedimentação dos flocos, tais como a região do jarro acima do nível de água, arestas iluminadas do jarro e regiões externas ao recipiente. Para estudar apenas a região de interesse, todas as imagens foram recortadas. Nesse sentido, foi de extrema preocupação que as imagens mantivessem a qualidade, pois a redução na qualidade prejudica na identificação de flocos. Quanto maior a qualidade, maior o nível de detalhamento dos flocos.

Assim sendo, foi utilizado o programa computacional *JPEGCropps Beta 0.7.5*. O interessante desta ferramenta é que se podem recortar inúmeras fotos simultaneamente, no mesmo enquadramento e sem a perda de qualidade. Como as imagens foram comparadas umas às outras, elas foram recortadas com as mesmas dimensões e posicionamento.

O primeiro passo foi carregar as imagens no *JPEGCropps Beta 0.7.5*. Para tal, clicou-se no botão “Abrir Imagens”, no canto inferior esquerdo da interface do *software*. O programa, então, abriu uma janela para a indicação do diretório no qual as imagens estavam salvas. Encontrada a pasta, as imagens a serem recortadas foram selecionadas e em seguida clicou-se no botão “Abrir”, para que as imagens brutas fossem carregadas no programa

computacional. Na barra de ferramentas situada na parte superior da interface, foi selecionada a opção “Editar” e depois “Sincronizar os cortes” (Figura 18). Dessa maneira, ao definir a região de corte de uma imagem, todas as demais seguiriam o mesmo padrão. Posteriormente, clicou-se no botão localizado no canto inferior direito da interface para escolher a pasta na qual as imagens recortadas seriam salvas. Por fim, foi acionado o botão “Cortar Imagens” que se encontra no canto inferior esquerdo do software, para que todas as imagens fossem recortadas simultaneamente.

Figura 18 – Sincronização de cortes pelo programa computacional *JPEGCrops Beta 0.7.5*.



Fonte: o Autor (2020).

Todas as imagens foram recortadas de modo que se aproveitasse a maior região possível iluminada pelo ponteiro laser, a fim de garantir que o maior número de flocos fosse identificado nas etapas posteriores do tratamento.

3.8.2 ImageJ 1.51

O objeto de estudo deste trabalho são os flocos que se sedimentam dentro do jarro, cujas trajetórias descendentes foram identificadas por meio da análise digital de imagens. O laser gerou um plano de luz dentro do jarro que realçou as dimensões dos flocos que interceptavam o plano. A calibração foi feita com a leitura de uma régua milimetrada, por meio da identificação de dois pontos inseridos neste plano.

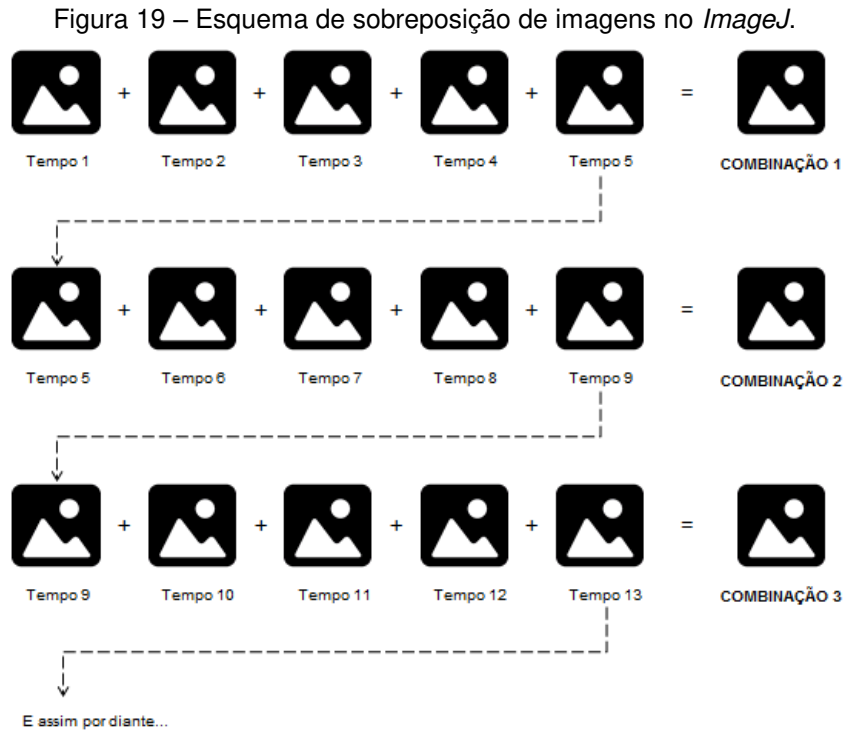
Entretanto, nas imagens capturadas, é possível identificar outros flocos menos nítidos – menos claros –, posicionados em planos diferentes ao plano de luz. Esses flocos influenciam negativamente nos resultados desejados, visto que as dimensões identificadas na imagem não correspondem às dimensões reais desses flocos.

Por esse motivo, foi preciso selecionar os flocos de interesse (ou seja, os flocos mais iluminados nas imagens) e eliminar os demais, considerados ruídos. No processamento de imagens, esta etapa se chama segmentação e a técnica utilizada foi a binarização. A binarização é um procedimento no qual os pixels são convertidos para apenas dois valores – 0 (cor preta) e 1 (cor branca). A binarização se dá por meio da definição de um limiar (valor médio de pixel), e para os pixels com valores maiores do que o limiar atribui-se o valor 1 (branco), enquanto atribui-se o valor 0 para os pixels com valores menores do que o limiar (cor preta).

A calibração e a binarização das imagens foram feitas na ferramenta computacional *ImageJ* 1.51. Este trabalho seguiu as instruções de manuseio do *software* que são detalhadamente descritas em Oliveira (2018). Além da segmentação de imagens, por meio do *ImageJ* foram geradas planilhas com parâmetros fundamentais na análise de flocos por meio de imagens, como: área do floco e posição do centroide, perímetro, diâmetros de Feret, número total de flocos.

Nesse programa é possível sobrepor imagens e obter esses parâmetros de uma só vez, otimizando o tempo gasto no tratamento. No presente trabalho, as sobreposições foram feitas de cinco em cinco imagens por dois motivos: primeiro porque o *ImageJ* tem limitação de tamanho total de arquivos a serem manipulados. Como as imagens capturadas são de alta resolução, são arquivos pesados. O segundo ponto é que muitas imagens sobrepostas geram uma combinação muito poluída de flocos, o que dificulta a visualização das trajetórias das partículas.

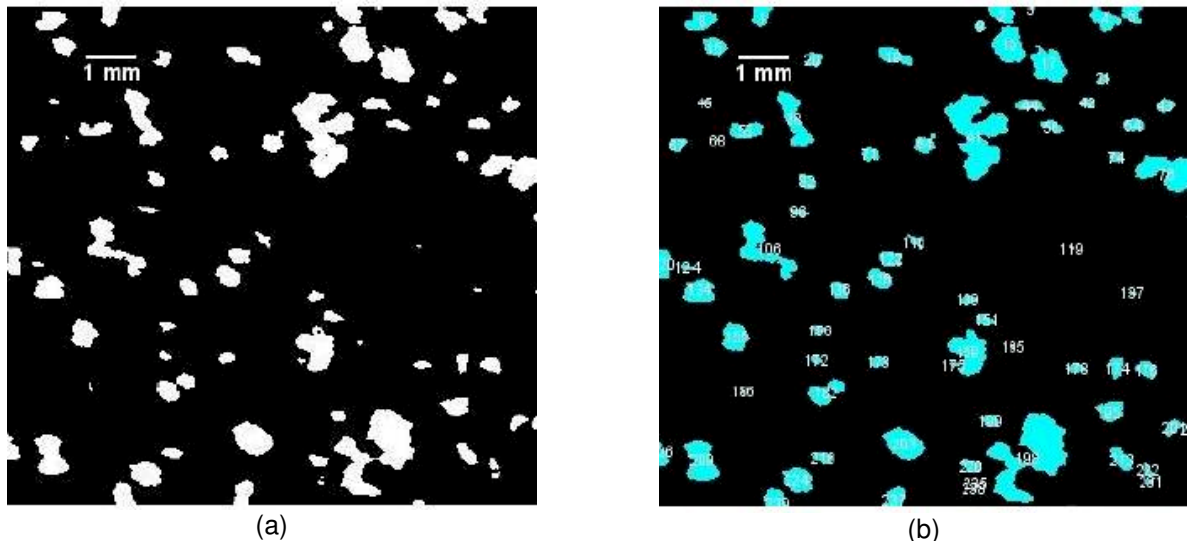
As combinações de imagens precisaram ter conexão entre si para a definição das trajetórias dos flocos. Para isto, a última imagem de uma combinação correspondia à primeira imagem da combinação seguinte. Na Figura 19 é esquematizado como as imagens foram combinadas.



Fonte: o Autor (2020).

Na Figura 20 é apresentado um exemplo de tratamento de imagem por meio da binarização e a extração de dados utilizando o *ImageJ*.

Figura 20 – Tratamento de imagens pelo *ImageJ*: (a) binarização da imagem; (b) extração dos dados.



Fonte: Oliveira (2018).

Após a medição dos parâmetros dos flocos, a ferramenta computacional sobrepõe as imagens e identifica cada floco com um número. Para ter melhor noção da trajetória dos flocos, as imagens foram coloridas para que os flocos capturados em cada imagem (cada tempo) tivessem uma cor.

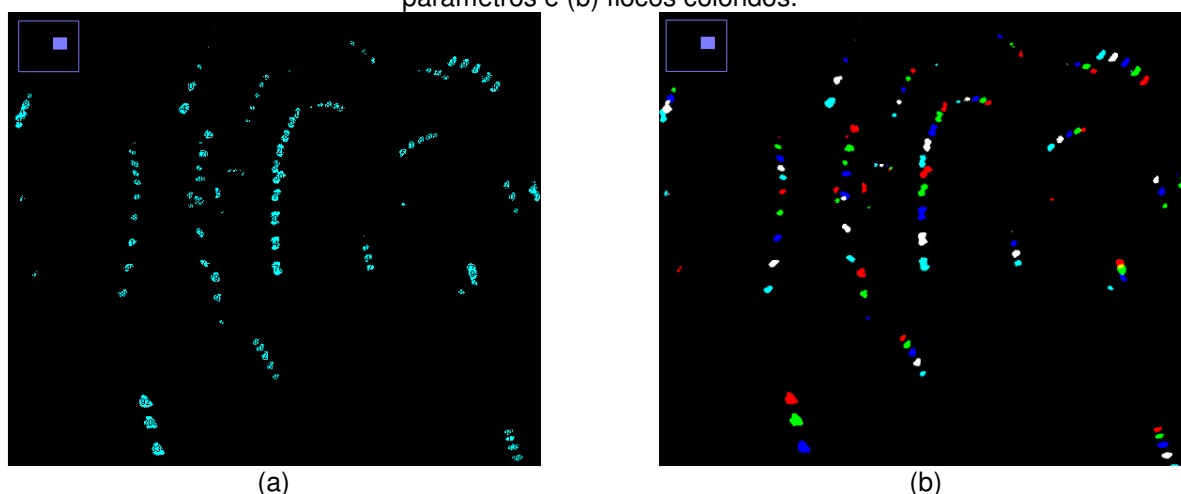
Para tal, o primeiro passo era transformar a imagem em uma combinação de cores: depois de clicar na opção “*Image*” na barra de ferramentas, era preciso selecionar a opção “*Color*” e em seguida “*Make Composite*”. Então, na janela aberta, era escolhido o modo “*Composite*”. Para finalizar a etapa, o software abria uma janela para a seleção das cores da combinação: todas as opções eram marcadas.

Feita a combinação de cores, o próximo procedimento era separar as imagens da combinação seguindo as seguintes instruções: na barra de ferramentas, selecionava-se a opção “*Color*” e em seguida “*Split Channels*”. Depois desta etapa, as imagens eram separadas e era atribuída uma cor a cada imagem.

Para mesclar as imagens com flocos coloridos, selecionava-se a opção “*Merge Channels*”, em “*Color*”. O *ImageJ* abria uma janela para a seleção das cores de cada imagem: vermelho para a primeira imagem, verde para a segunda, azul para a terceira, branco para a quarta e ciano para a quinta. Finalmente, clicava-se em “*OK*” e as imagens eram sobrepostas novamente, só que agora com os flocos coloridos.

Na Figura 21, é ilustrado um exemplo da coloração dos flocos: na Figura 21.a é retratada a imagem antes da coloração e a Figura 21.b é a imagem após a coloração.

Figura 21 – Coloração dos flocos pelo *ImageJ*. (a) combinação de imagens após a medição dos parâmetros e (b) flocos coloridos.



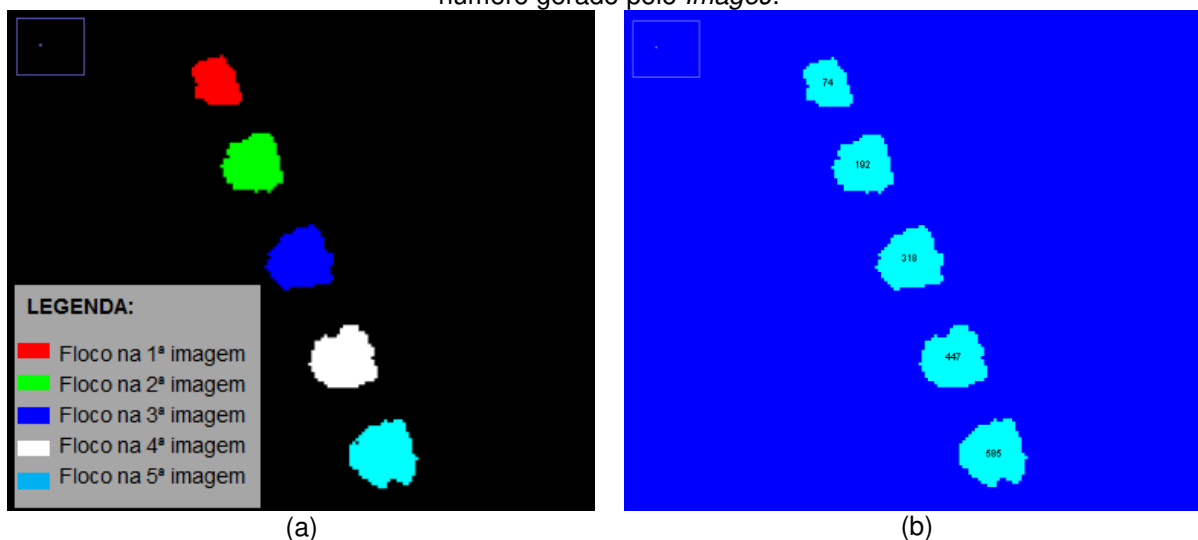
Fonte: o Autor (2020).

3.9 SELEÇÃO DE FLOCOS DE INTERESSE

Após a binarização das imagens e a medição das partículas, o *ImageJ* gerava duas planilhas para cada combinação: em uma, denominada “*Results*”, eram apresentadas características geométricas de todos os flocos. A segunda planilha, “*Summary*”, apresentavam-se informações dos flocos de cada imagem da combinação, tais como o número total de partículas floculentas em cada em imagem.

Com as planilhas do *ImageJ*, juntamente com as imagens trabalhadas, tornou-se possível identificar os flocos e assimilar aos seus parâmetros. O programa computacional atribuiu um número a cada floco, visualizado na própria imagem trabalhada. Nas planilhas “*Results*”, as informações dos flocos estavam identificadas por esses números. A Figura 22 ilustram o exemplo da identificação de um floco nos cinco tempos da combinação das imagens.

Figura 22 – (a) Imagem da sedimentação de um floco, após a aplicação do sulfato de alumínio e a floculação em um gradiente de 20 s^{-1} (uso do aparato no jarro). (b) Identificação do floco com o número gerado pelo *ImageJ*.



Fonte: o Autor (2020).

Portanto, comparando a Figura 22.a com a Figura 22.b, o floco na primeira imagem (primeiro tempo) corresponde ao índice 74, no segundo tempo ao índice 192, 318 no terceiro tempo, 447 no quarto tempo e finalmente 585 no quinto tempo. Na planilha “*Results*” tem o valor das coordenadas x e y do centroide de cada floco.

3.9.1 Desenvolvimento de um algoritmo no Visual Basic for Applications para a identificação dos flocos

A Figura 22 mostra o exemplo para apenas um floco de uma combinação. Em cada combinação eram identificados centenas a milhares de flocos (maiores gradientes de velocidade geravam maior número de flocos), e para cada gradiente de velocidade foram feitas cerca de 35 combinações de imagens. Portanto, identificar os flocos visualmente levaria muito tempo.

Neste trabalho, a sedimentação dos flocos formados por sulfato de alumínio com gradientes de floculação iguais a 20 e 30 s⁻¹ foi lida visualmente. A partir do gradiente de velocidade igual a 40 s⁻¹, houve um aumento considerável de rotações por minuto do impulsor do *jar-test*. Isso provocou um grande aumento do número de flocos identificados nas imagens, o que tornou a identificação visual dos agregados uma atividade extremamente onerosa. Assim, optou-se pela identificação dos flocos por meio de um algoritmo na linguagem VBA (*Visual Basic for Applications*) nas próprias planilhas geradas pelo *ImageJ*.

A identificação das imagens pelo olho humano é imediata, porém um algoritmo necessita de operações e números para fazê-la. No presente trabalho, a identificação visual foi substituída por uma aproximação matemática. O código elaborado encontra-se no Apêndice A deste documento.

3.9.1.1 Comparação de imagem a imagem, floco a floco

As imagens resultantes do *ImageJ*, como explicado anteriormente, foram combinações de cinco imagens capturadas pela câmera em cinco tempos distintos. O princípio de comparação do algoritmo foi o de imagem a imagem, floco a floco: os flocos da primeira imagem foram comparados com os flocos da segunda imagem; os flocos da segunda imagem foram comparados com os flocos da terceira imagem; e assim por diante.

A planilha “*Summary*” gerada pela ferramenta computacional mostrava quantos flocos foram contabilizados por imagem, e a planilha “*Results*” apresentava todas as características geométricas dos flocos medidos.

Suponha que, para uma combinação de imagens, a planilha “*Summary*” apontou 10 flocos para a primeira imagem, 13 para a segunda, 9 para a terceira, 15 para a quarta e 12 para a

quinta imagem. Portanto, 59 flocos foram contabilizados nesta combinação. Então na planilha “*Results*” os flocos foram identificados de 1 a 59. Para fazer uma comparação de imagem a imagem, os flocos foram separados em blocos conforme a contagem de flocos por imagem da planilha “*Summary*”: os flocos da primeira imagem receberam índices nominais para a identificação de 1 a 10, e o primeiro floco da segunda imagem é igual a 11 e vai até o número 23 (assim por diante). A Tabela 4 mostra esse exemplo.

Tabela 4 – Assimilação entre as planilhas “*Summary*” e “*Results*”. Fonte: o Autor (2020).

<i>Planilha Summary</i>		<i>Planilha Results</i>	
<i>Imagem</i>	<i>Número de flocos por imagem</i>	<i>Índice do primeiro floco da imagem</i>	<i>Índice do último floco da imagem</i>
Imagem 1	10	1	10
Imagem 2	13	11	23
Imagem 3	9	24	32
Imagem 4	15	33	47
Imagem 5	12	48	59

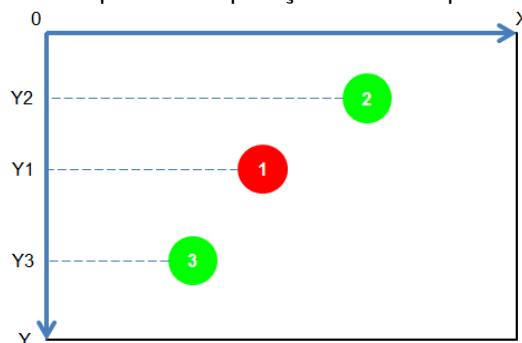
3.9.1.2 Flocos descendentes

Nas combinações de imagens havia flocos que não interessavam para a sedimentação, visto que partículas ascendiam ao invés de decantarem. Os agregados tiveram esse comportamento devido à turbulência residual da água durante a floculação. Portanto, os únicos flocos aqui estudados são aqueles que apresentaram trajetórias descendentes no jarro.

Essa análise pelo algoritmo foi simples. Após a calibração da imagem pelo *ImageJ*, o programa criou um sistema de coordenadas com a origem no vértice superior esquerdo na imagem, de modo que o eixo das abscissas aumentava da esquerda para a direita da imagem e o eixo das ordenadas aumentava do topo para baixo. Dessa maneira, um floco só foi comparado com os flocos que estavam abaixo dele.

Na Figura 23 é ilustrado um exemplo de comparação de flocos levando-se em consideração o valor das ordenadas. O floco 1 (floco vermelho) é correspondente à primeira imagem da combinação e os flocos 2 e 3 (verdes) correspondem à segunda imagem. Pela orientação do eixo das ordenadas, $Y_3 > Y_1 > Y_2$. Portanto, o algoritmo não compara o floco 1 com o floco 2.

Figura 23 – Exemplo de comparação de flocos pelas ordenadas.

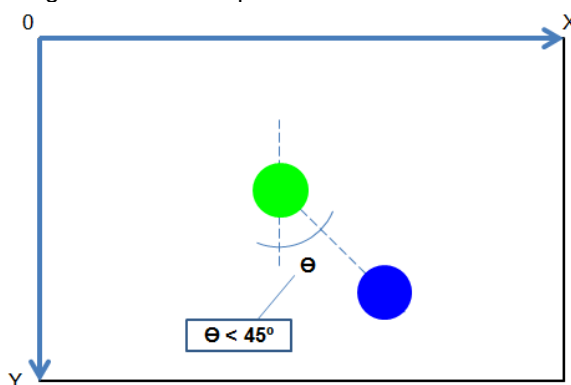


Fonte: o Autor (2020).

3.9.1.3 Flocos descendentes com trajetórias mais verticais

Durante os ensaios de sedimentação, os flocos decantaram em diferentes direções. A turbulência provocada na água durante a floculação teve efeito remanescente durante a decantação: havia flocos que se movimentavam predominantemente na horizontal. Flocos com trajetória mais vertical indicavam que parâmetro como massa específica prevaleceu a essa turbulência. Dessa maneira, foram selecionados flocos com a sedimentação prevalentemente vertical, considerando que o ângulo formado com o eixo vertical fosse menor do que 45° , conforme Figura 24.

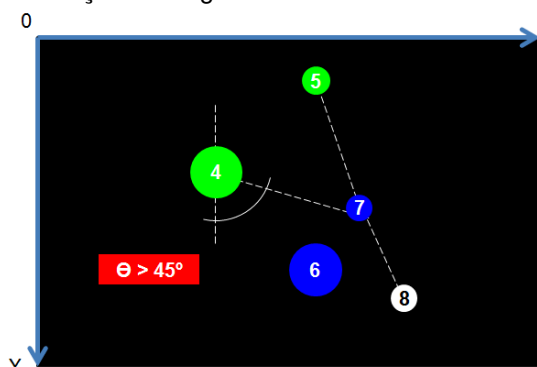
Figura 24 – Floco predominantemente vertical.



Fonte: o Autor (2020).

Essa limitação do ângulo diminui o erro da aproximação, pois reduz a quantidade de flocos que se adequam na comparação, como pode ser esquematizado na Figura 25. Como os flocos na mesma combinação correspondem às mesmas condições físico-químicas de formação (mesmo coagulante químico e mesmo gradiente de velocidade de floculação) e o mesmo tempo do ensaio de sedimentação, há flocos com parâmetros similares ao floco comparado.

Figura 25 – Limitação do ângulo reduz o erro da identificação do floco.



Fonte: o Autor (2020).

Na Figura 25, tem-se os flocos 4 e 5 correspondentes ao tempo 2. Visualmente, pode-se concluir que o floco correspondente ao floco 5 é o floco 7, assim como o floco 8 corresponde ao floco 7. Entretanto, o algoritmo até aqui não entende isso. Os flocos 6 e 7 (flocos do tempo 3) são elegíveis como possíveis flocos correspondentes ao floco 4, pois $Y_6 > Y_7 > Y_4$. Porém, o ângulo formado do deslocamento de 4 a 7 é maior do que 45° . Ao limitar o valor de Θ , apenas o floco 6 pode ser comparado.

Esta suposição retratou um possível erro de leitura do algoritmo, pois visualmente o floco 6 corresponde ao floco 5. É importante ressaltar que houve flocos que de fato fazem trajetórias a um ângulo maior do que 45° . Todavia, esses flocos não interessam no estudo.

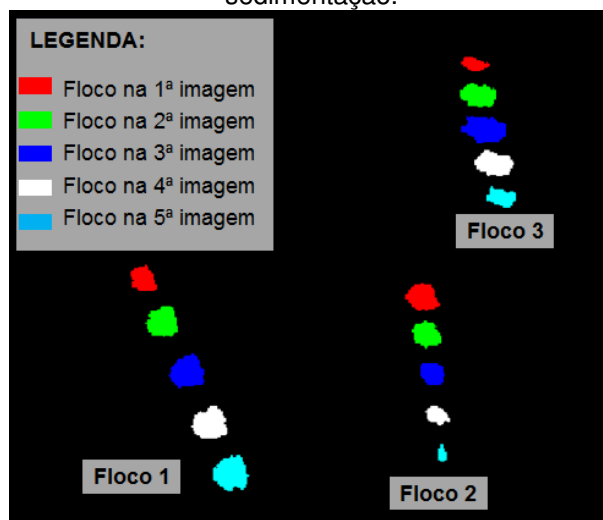
3.9.1.4 Assimilação pelos parâmetros dos flocos

O *ImageJ* calculou parâmetros do floco como área e diâmetros máximo e mínimo de Feret. Essas características auxiliaram na identificação dos flocos. A premissa da assimilação dos flocos por meio de um algoritmo foi de que se a área e os diâmetros de flocos de imagens subsequentes tivessem valores próximos, então eles poderiam ser o mesmo floco. Essa suposição nem sempre é verdade, por exemplo: um floco que está surgindo no plano de luz pode ter uma área menor do que quando está saindo do plano luminoso do laser, e vice-versa. Entretanto, se um floco apresentou valores bem próximos nos tempos de captura da imagem, significa que ele não rotacionou muito durante o deslocamento no plano de luz.

A Figura 26 representa a sedimentação de três flocos aos 10 minutos de ensaio. Os flocos foram formados com o uso do sulfato de alumínio na coagulação e o gradiente de velocidade de floculação foi de 20 s^{-1} . Observe que o Floco 1 tem formas e áreas bastante similares ao longo de sua trajetória, o que não nota-se nos Flocos 2 e 3. O Floco 2 apresenta uma redução de área ao longo dos tempos de captura, o que indica que ele está

saindo do plano luminoso gerado pelo laser. Já o Floco 3, do primeiro para o segundo tempo, há um aumento da área, o que significa que ele rotacionou de uma imagem para outra ou está surgindo no plano de luz.

Floco 26 – Mudanças nas áreas e formas de três flocos durante a captura de imagens na sedimentação.



Fonte: o Autor (2020).

Nesse sentido, foram tomadas duas considerações na assimilação dos flocos: ao comparar flocos de duas imagens, a razão entre a menor área e a maior área deveria ser maior do que 0,50, enquanto a razão entre o menor diâmetro mínimo de Feret e o maior deveria ser superior a 0,65. Esses valores foram determinados por meio de tentativas. A validação do código mostrou que mais de 90% dos flocos foram assimilados corretamente pelo algoritmo, conforme será descrito nos itens a seguir, o que justifica a adoção dessas razões.

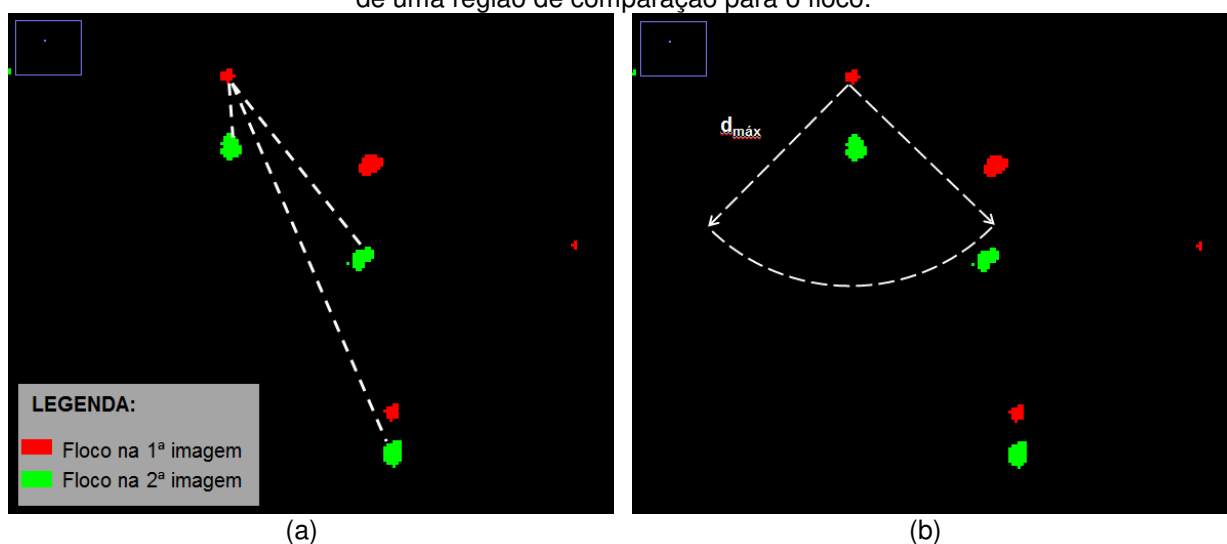
Caso mais de um floco da segunda imagem enquadrasse nas condições de razão de área e diâmetro mínimo especificadas no parágrafo anterior, o floco eleito seria aquele que apresentasse o menor erro absoluto para o diâmetro máximo de Feret.

3.9.1.5 Deslocamento máximo do floco

O algoritmo fez uma comparação de uma imagem para outra, na qual todos os flocos da primeira imagem eram comparados com todos os flocos da segunda imagem. Em uma mesma imagem há vários flocos com valores similares de diâmetros e áreas, e por isso uma aproximação apenas pelos parâmetros dos flocos poderia levar a um erro de assimilação.

Na Figura 27.a, destaca-se a comparação de um floco no primeiro tempo com todos os flocos do segundo instante de captura. Visualmente, são evidentes quais os flocos do segundo instante (flocos verdes) que correspondem aos flocos do primeiro instante (flocos vermelhos), mas para o algoritmo não. Assim, no desenvolvimento do código, foi necessário impor um deslocamento máximo permissível do floco, que em conjunto com a delimitação de ângulo (item 3.9.1.3), criou-se uma área de comparação para cada floco: todos os flocos contidos nesta área foram comparados, e com base nas características geométricas das partículas floculentas, o código decidia qual era o floco correspondente.

Figura 27 – (a) Comparação de um floco com três flocos no segundo instante de captura. (b) Criação de uma região de comparação para o floco.



Fonte: o Autor (2020).

A definição do valor do deslocamento máximo permissível foi feito com base na análise visual das imagens para os gradientes de velocidade iguais a 20 e 30 s^{-1} , com uso de sulfato de alumínio como coagulante. Com base em todos os deslocamentos calculados, observou-se valores médios pouco superiores a 1 mm para os deslocamentos entre cada instante. Portanto, o valor de 2 mm foi tomado como o valor máximo para o deslocamento entre dois instantes de captura de imagem.

É importante salientar que, assim como para o ângulo Θ (item 3.9.1.3), o aumento do valor do deslocamento máximo conduz aos erros de assimilação do algoritmo.

3.9.1.6 Permanência do floco nas imagens

As imagens foram capturadas ao longo de todos os ensaios de sedimentação para desenhar as trajetórias dos flocos nas imagens. Após o corte, binarização e coloração das imagens,

tornou-se possível a identificação desses trajetos, visto que, na combinação das imagens, a imagem do último instante da combinação era igual ao primeiro instante da combinação seguinte.

Foram selecionados os flocos que conseguiram permanecer em mais imagens, pois a trajetória é bem mais definida devida à quantidade de dados da geometria dos agregados. Flocos que foram identificados em menos de quatro imagens foram desprezados.

Como critério de seleção foram utilizados agregados cuja trajetória mantinha um ângulo menor que 45° tomando como referência a linha vertical. Desta forma todos os agregados avaliados apresentaram trajetória predominantemente vertical, ou seja, com menor influência da energia dispersa no meio pela mistura lenta.

3.9.2 Validação do algoritmo

Como discutido no item 3.9.1, a identificação dos flocos pelos cálculos de um algoritmo não é exata. É impossível reproduzir, em um código de programação, a identificação visual feita pelo ser humano. Dessa maneira, foi esperado que o algoritmo identificasse alguns flocos erroneamente. Por esse motivo, foi necessário validar o código para saber a confiança da aproximação.

Para isso, foram lidas cinco combinações correspondentes a cada um dos gradientes de velocidade estudados. As combinações escolhidas foram aquelas nas quais observou-se o maior número de flocos que se sedimentavam, pois mais flocos na imagem podem conduzir ao erro de assimilação do código. Quanto maior o número de flocos a serem comparados, mais provável que tenha mais de um floco na região de influência da Figura 27.b. Com mais de um floco nessa região de influência, o código precisa eleger qual deles é o floco correspondente ao agregado da imagem anterior. Também tem a hipótese de que o único floco que esteja nessa região de influência pode corresponder a outro floco da imagem anterior.

Os flocos identificados visualmente foram padrão de comparação aos resultados do algoritmo, como está exemplificado na Tabela 5. Após a análise do *ImageJ*, os agregados em cada imagem são identificados por números.

Tabela 5 – Exemplo de validação de um em uma combinação de cinco imagens. Fonte: o Autor (2020).

	<i>Imagem</i>				
	<i>1ª</i>	<i>2ª</i>	<i>3ª</i>	<i>4ª</i>	<i>5ª</i>
<i>Identificação visual</i>	188	771	1378	1974	2355
<i>Assimilação pelo algoritmo</i>	188	771	1378	1974	2555

A Tabela 5 mostra que um floco aleatório teve a identificação nº 188 para a primeira imagem, 771 para a segunda, 1378 para a terceira, 1974 para a quarta e, finalmente, 2355 para a última. O código fez a seguinte identificação na sequência de imagens: 188, 771, 1378, 1974 e 2555. Portanto, comparando a identificação visual com a seleção do algoritmo, o código selecionou quatro flocos corretamente, e o erro na seleção foi apenas para a quinta imagem da sequência. E assim foi feito para todos os flocos das sequências com o maior número de agregados, para cada gradiente de velocidade.

Os flocos que não foram reconhecidos pelo algoritmo foram aqueles que não obedeceram às condições estabelecidas em 3.9.1: ou os flocos eram ascendentes; ou os flocos se deslocaram a um ângulo superior a 45 °; valores de área e diâmetros eram discrepantes; ou o deslocamento dos flocos entre uma imagem e outra foi superior a 2 mm; ou os flocos permaneceram em menos de quatro imagens.

Com o gradiente de velocidade de mistura lenta igual a 20 s⁻¹, foram identificados visualmente uma maior população de flocos em uma combinação de fotos feita aos 10 minutos de sedimentação. Visualmente, foram identificados 98 flocos na combinação. O código, entretanto, não conseguiu identificar 24 desses flocos, correspondente a 24,49% dos flocos lidos visualmente. Dos 74 flocos lidos pelo algoritmo, apenas um estava errado. Isto significa que o código, para esta combinação, teve um erro igual a 1,35%.

Para o gradiente de velocidade igual a 30 s⁻¹, foi escolhida uma combinação aos 11 minutos de sedimentação. Visualmente foram identificados 61 flocos, mas o algoritmo não leu 24 deles – o algoritmo identificou 60,65% deles, sendo que nenhum desses foi uma assimilação incorreta (0% de erro).

A combinação em um tempo igual a 12 min de sedimentação foi escolhida para validar os flocos que se sedimentaram após a floculação a 40 s⁻¹. A confiança do código também foi boa: dos 147 flocos reconhecidos visualmente, o algoritmo reconheceu 117. Destes, 7,69% foram aproximações errôneas.

A validação do código para os gradientes de velocidade de mistura lenta iguais a 50 e 60 s⁻¹ foi feita para as imagens dos ensaios de sedimentação dos flocos de policloreto de alumínio. Em uma análise visual para o gradiente igual a $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$, para uma combinação de imagens aos 11 min de sedimentação, foram selecionados 149 flocos para a comparação com a assimilação do algoritmo. O código reconheceu 89 flocos e apresentou 96,63% de leituras corretas. Para o gradiente de floculação igual a 60 s⁻¹, foram selecionados 140 flocos aos 13 min de sedimentação. O algoritmo reconheceu 99 flocos, obtendo sucesso em 93,34% da leitura.

Em suma, devido às condições supostas na elaboração do algoritmo, não é possível identificar todos os flocos das combinações. As validações mostraram que o algoritmo consegue reconhecer mais de 60% dos flocos com confiança superior a 90% na assimilação dos flocos lidos.

3.10 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES FRACTAIS

A dimensão fractal (D_f) e o parâmetro de forma (b) dos flocos podem ser calculados por intermédio da equação 13 e sua forma linearizada, Equação 14:

$$N = b \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{D_f} \quad (13)$$

$$\log N = \log b + D_f \log \left(\frac{d_f}{d_p} \right) \quad (14)$$

Nas quais: N é o número de partículas primárias que formam o floco; d_f é a dimensão característica do floco e d_p é a dimensão da partícula primária.

Para estimar os valores de N , as seções dos flocos capturadas nas imagens foram aproximadas a um elipsoide pelo *ImageJ*, como em Moruzzi *et al.* (2020). Foi considerado que a dimensão da partícula primária foi a menor partícula capturada nas imagens, ou seja, o pixel. Na configuração adotada para a aquisição de imagens, a dimensão do pixel correspondeu a 0,023 mm. Os valores de N foram calculados pela razão entre o volume do elipsoide e o volume da partícula primária.

A dimensão característica escolhida para o cálculo dos parâmetros físicos neste trabalho foi o eixo maior da elipse que contorna os flocos. Os valores de eixo maior foram fornecidos automaticamente na análise do *ImageJ*.

Conforme a Equação 14, foram plotados gráficos para a determinação dos valores de dimensões fractal e parâmetro de forma. Os valores das abcissas representaram o logaritmo da relação d_f / d_p , enquanto as ordenadas corresponderam ao logaritmo de N . Os pontos do gráfico foram aproximados a uma reta por meio do recurso linha de tendência do *Excel*. Dessa forma, a interseção da reta com a origem representava o valor do logaritmo de b . Com o valor do parâmetro de forma conhecido, o valor da dimensão fractal de cada agregado foi calculado isolando-se D_f na Equação 14.

Os valores de porosidade (ε_f) e massa específica do floco (ρ_f) foram determinados pelas Equações 15 e 16, respectivamente:

$$\varepsilon_f = 1 - (b d_f^{D_f-3} d_p^{3-D_f}) \quad (15)$$

$$\rho_f = \rho_1 + (b d_f^{D_f-3} d_p^{3-D_f} (\rho_p - \rho_1)) \quad (16)$$

Em que: ρ_1 é a massa específica da água e ρ_p é a massa específica da partícula primária. Todos os valores de massa específica em kg/m³.

3.11 CÁLCULO DAS VELOCIDADES DE SEDIMENTAÇÃO

As velocidades de sedimentação foram estimadas conforme a equação clássica de Stokes e também por uma equação que leva em consideração a geometria fractal dos flocos. O equacionamento de Stokes considera que as partículas são esféricas e não mudam suas características ao longo da sedimentação. Neste trabalho, o comprimento característico de flocos esféricos foi o diâmetro equivalente em relação à área do floco, conforme Equação 17:

$$d_{eq} = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (17)$$

Onde: d_{eq} é o diâmetro equivalente do floco, em L; A é a área do floco na imagem capturada, em L².

Foi considerado que a sedimentação dos flocos ocorreu no regime laminar com $Re < 1$, e, assim, as velocidades de sedimentação das esferas foram determinadas por intermédio da Equação 18:

$$V_{esfera} = \frac{g(\rho_f - \rho_1)d_f^2}{18\mu} \quad (18)$$

Na qual: V_{esfera} é a velocidade de sedimentação do floco esférico, em L/T, e d_f é o diâmetro equivalente do floco, calculado de acordo com a Equação 8.

Já as velocidades de sedimentação dos agregados fractais, $V_{fractal}$, foram calculadas mediante Equação 19, sendo d_f também o valor do diâmetro equivalente.

$$V_{fractal} = \frac{g(\rho_p - \rho_1)d_f^{D_f-1}d_p^{3-D_f}b}{18\mu} \quad (19)$$

Por fim, foram determinados valores para o quociente adimensional Γ , definido como a razão entre a velocidade dos fractais e a velocidade das esferas, como é apresentado na Equação 20, conforme Moruzzi *et al.* (2020).

$$\Gamma = \frac{V_{fractal}}{V_{esfera}} \quad (20)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SEDIMENTAÇÃO DOS FLOCOS COAGULADOS POR SULFATO DE ALUMÍNIO

4.1.1 Tamanho dos flocos

Na Tabela 6 são apresentados os valores para tamanhos e os dados estatísticos dos flocos selecionados durante os ensaios de sedimentação. D_{eq} se refere ao diâmetro equivalente calculado por intermédio da Equação 17, enquanto D_{min} e $D_{máx}$ são os diâmetros mínimo e máximo de Feret, obtidos nas planilhas eletrônicas geradas pelo *ImageJ*.

Tabela 6 – Valores dos tamanhos dos flocos e dados estatísticos para o SA. Fonte: o Autor (2020).

$G_f (s^{-1})$	Parâmetro	média	Desv.pad.	Max	Min	Int 95%
20	$D_{eq} (mm)$	0,407	0,083	0,623	0,16	0,008
	$D_{min} (mm)$	0,371	0,074	0,597	0,15	0,007
	$D_{máx} (mm)$	0,532	0,119	0,898	0,20	0,012
30	$D_{eq} (mm)$	0,319	0,064	0,580	0,12	0,008
	$D_{min} (mm)$	0,289	0,057	0,528	0,10	0,007
	$D_{máx} (mm)$	0,430	0,098	0,807	0,19	0,012
40	$D_{eq} (mm)$	0,277	0,059	0,538	0,12	0,004
	$D_{min} (mm)$	0,253	0,057	0,525	0,09	0,004
	$D_{máx} (mm)$	0,374	0,090	0,762	0,16	0,007
50	$D_{eq} (mm)$	0,353	0,123	0,717	0,16	0,020
	$D_{min} (mm)$	0,321	0,115	0,769	0,12	0,018
	$D_{máx} (mm)$	0,506	0,195	1,192	0,23	0,031
60	$D_{eq} (mm)$	0,259	0,067	0,596	0,11	0,006
	$D_{min} (mm)$	0,232	0,064	0,595	0,09	0,006
	$D_{máx} (mm)$	0,365	0,106	0,799	0,13	0,009

Os diâmetros equivalentes dão noção da área dos flocos. Foram registrados os maiores valores médios de diâmetros equivalentes para os gradientes de velocidade de floculação de 20, 50 e 30 s^{-1} . Ou seja, as maiores áreas, e consequentemente os maiores tamanhos de partículas. O menor floco, em área, foi capturado em $G_f = 60 s^{-1}$, com diâmetro equivalente de 0,11 mm, enquanto o maior floco selecionado foi formado sob gradiente de 50 s^{-1} , com diâmetro equivalente igual a 0,717 mm.

Pela Tabela 6 também é possível discutir que, apesar de ocorrer uma tendência de redução dos diâmetros com o aumento das taxas de cisalhamento na floculação, agregados de gradientes de velocidade elevados podem superar dimensões encontradas em gradientes

de velocidade menos intensos. Por exemplo, mesmo que o valor médio de diâmetro equivalente correspondente a $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ foi maior do que $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ (0,277 contra 0,259 mm), em $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ foi registrado um floco com diâmetro máximo de Feret superior ao maior descrito em $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ – o maior tamanho de floco em 40 s^{-1} foi de 0,762 mm, enquanto 0,799 mm foi o maior tamanho para o gradiente de 60 s^{-1} .

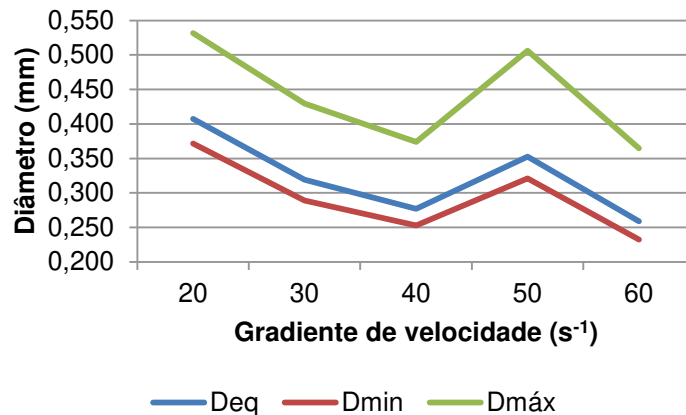
O maior diâmetro máximo de Feret apontado pelo *ImageJ* foi de 1,192 mm para $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$. Em contraste, os menores diâmetros mínimos foram registrados para $G_f = 40$ e 60 s^{-1} , correspondentes a 0,09 mm.

As faixas menos amplas ocorreram para os maiores gradientes de velocidade: de 0,09 a 0,762 mm para 40 s^{-1} e de 0,09 a 0,799 mm para 60 s^{-1} . A tendência de redução das dimensões características dos agregados de sulfato de alumínio quando ocorre um aumento do gradiente de velocidade é reportada pela comunidade científica, como em Spicer e Pratsinis (1996b), Bouyer *et al.* (2004), Oliveira (2018), dentre outros. Entretanto, neste estudo, os valores médios dos tamanhos dos flocos formados sob $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ superaram aqueles formados sob gradientes de 30 e 40 s^{-1} . De acordo com as conclusões de Spicer e Pratsinis (1996b), Bouyer *et al.* (2004) e Oliveira (2018), esses valores deveriam ser menores do que os registrados para os gradientes de velocidade de 20, 30 e 40 s^{-1} .

Neste contexto, pode-se levantar duas explicações: a primeira é que possivelmente ocorreu um erro de dosagem durante o ensaio de coagulação. A outra possibilidade é que a amostra dos flocos pode não ter representado muito bem toda a população de agregados produzidos no ensaio de floculação: quando o aparato de acrílico era colocado após o desligamento do *jar test*, uma parcela dos flocos não era capturada pelas imagens (os flocos que ficaram entre a placa de acrílico e a parede traseira do jarro). Mesmo assim, serão apresentados os resultados para o gradiente médio de velocidade igual a 50 s^{-1} nos próximos itens.

A Figura 28 trata-se de um gráfico que ilustra a variação dos valores médios dos diâmetros médios com a variação dos gradientes de velocidade de floculação.

Figura 28 – Variação dos diâmetros médios com a variação dos gradientes de velocidade para SA.



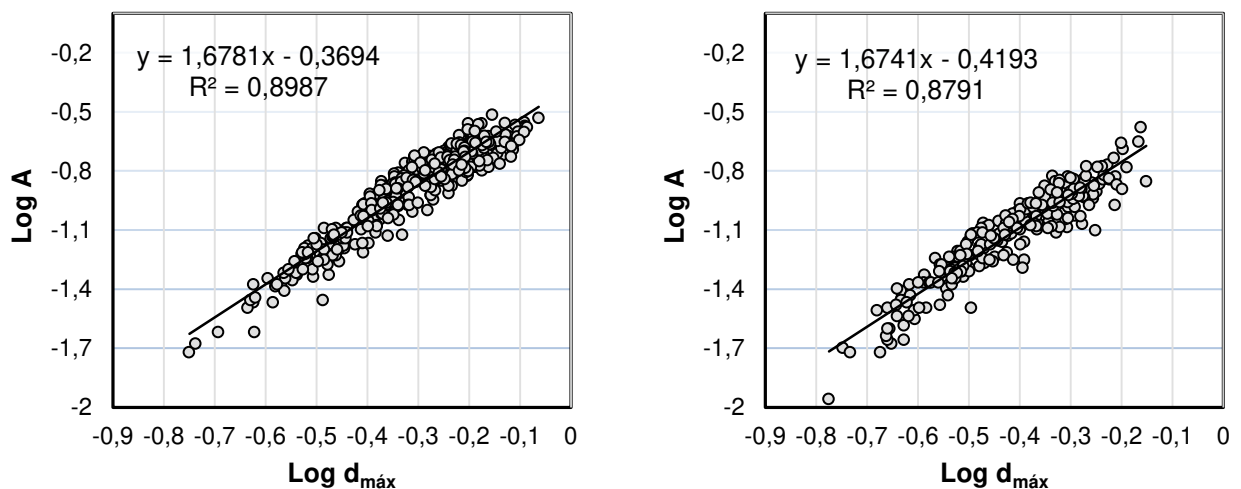
Fonte: o Autor (2020).

4.1.2 Dimensões fractais bidimensionais

No caso das dimensões fractais bidimensionais, a relação da área com o diâmetro máximo do floco retrata o quão alongado ou arredondado é o agregado. Por exemplo, se o floco possui um diâmetro elevado e uma área elevada (em relação às demais partículas floculentas da amostra), indica que o floco é mais arredondado. Caso o floco possua um diâmetro elevado, mas um valor baixo para área, o floco é alongado.

Com a plotagem dos dados coletados para área \times diâmetro máximo dos flocos em um gráfico log-log, foi possível determinar as dimensões fractais bidimensionais para cada gradiente médio de velocidade de floculação, conforme apresentado nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Plotagem de gráficos área \times diâmetro máximo para a determinação das dimensões fractais bidimensionais de flocos de SA para: (a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ e (b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$.

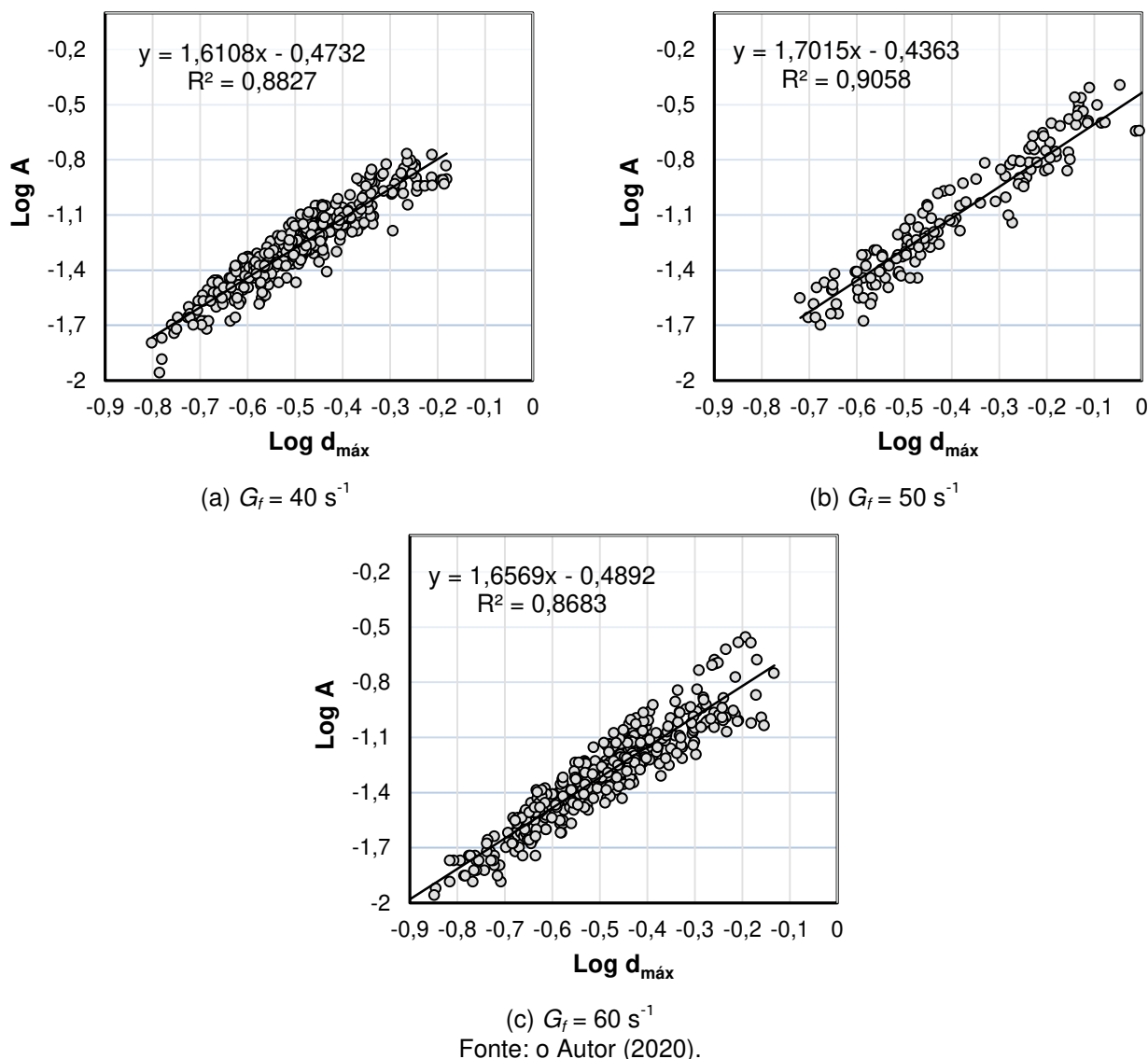


(a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$

(b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$

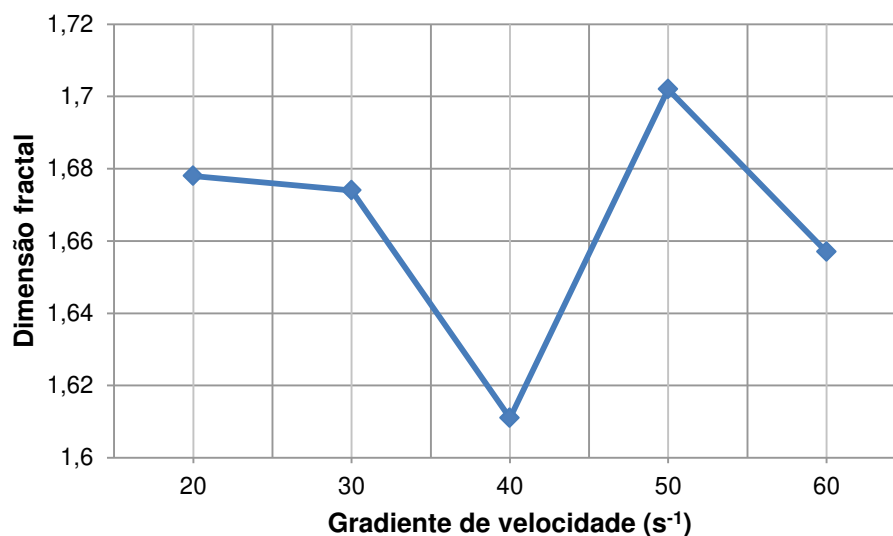
Fonte: o Autor (2020).

Figura 30 – Plotagem de gráficos área \times diâmetro máximo para a determinação das dimensões fractais bidimensionais de flocos de SA para: (a) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$, (b) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ e (c) $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$.



A inclinação das retas dos gráficos apresentados nas Figuras 29 e 30 representa a dimensão fractal bidimensional. Portanto, os valores obtidos para este parâmetro foram 1,678; 1,674; 1,611; 1,702 e 1,657 para os gradientes de 20, 30, 40, 50 e 60 s^{-1} , respectivamente. Dessa forma, não foi observada tendência de redução ou aumento da dimensão fractal com o aumento do gradiente de velocidade de floculação. De $G_f = 20$ até 40 s^{-1} , houve uma redução na dimensão fractal, entretanto o valor se elevou para $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$. Na Figura 31 é apresentada a evolução da dimensão fractal bidimensional para os flocos formados pela coagulação do sulfato de alumínio, conforme aumento do gradiente médio de velocidade de floculação.

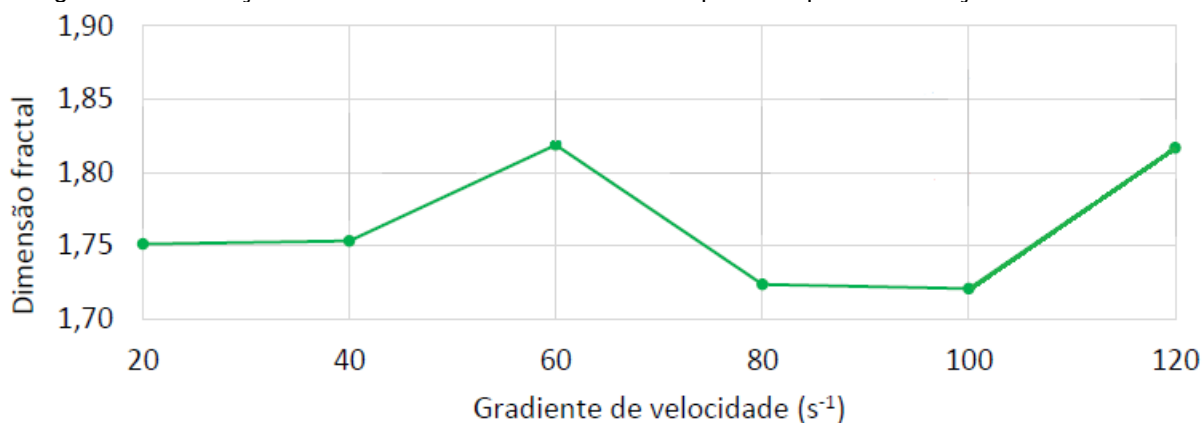
Figura 31 – Evolução da dimensão fractal bidimensional para os flocos formados pela coagulação do SA.



Fonte: o Autor (2020).

Gonçalves (2017) estudou a evolução da dimensão fractal bidimensional durante o processo de floculação para gradientes de velocidade que variaram de 20 a 120 s^{-1} . A água bruta dos ensaios foi preparada com caulinita e caracterizada por turbidez igual a 6,5 UNT. Um dos coagulantes utilizados no trabalho foi o sulfato de alumínio, com dosagem de Al^{3+} foi de 2,5 mg/L e o pH de coagulação foi de 6,50. Aos 20 min de floculação, tempo adotado no presente trabalho, Gonçalves (2017) calculou as dimensões fractais apresentadas na Figura 32.

Figura 32 – Evolução da dimensão fractal bidimensional para tempo de floculação de 20 minutos.



Fonte: Gonçalves (2017), adaptado por Autor (2020).

Dessa maneira, Gonçalves (2017) notou um aumento na dimensão fractal de 20 a 60 s^{-1} , mas uma queda nos gradientes de 80 e 100 s^{-1} e um valor superior a 1,80 em 120 s^{-1} . O objetivo da apresentação desse gráfico é mostrar que existe a possibilidade da dimensão

fractal não apenas aumentar ou diminuir conforme o aumento de G_f , como também pode apresentar oscilações, conforme em Gonçalves (2017). Segundo o autor, este comportamento pode ser atribuído ao fato de que o efeito do coagulante provavelmente estava ativo. Essa justificativa também pode ser assimilada neste trabalho.

Assim como neste trabalho, Jin *et al.* (2007) não encontraram uma relação entre o aumento do gradiente de velocidade de floculação e o aumento ou decréscimo da dimensão fractal. Eles estudaram a morfologia de flocos formados pela coagulação do sulfato de alumínio em pH igual a 5, sendo o ácido húmico responsável pela atribuição de turbidez à água a ser tratada. Os referidos autores encontraram os seguintes valores para dimensões fractais bidimensionais: 1,49; 1,47; 1,49; 1,46; 1,46; 1,54 para os respectivos gradientes de floculação: 30, 60, 90, 120, 150 e 180 s^{-1} .

Oliveira *et al.* (2016) avaliaram as dimensões fractais ao longo da floculação para uma água bruta sintética de caulinita, com turbidez 25 ± 2 UNT, coagulada com SA de dosagem de 2 mg/L de Al^{3+} sob pH de 7,5. Os gradientes de velocidade de floculação foram 20, 30, 40, 50 e 60 s^{-1} . Aos 20 min de floculação, os referidos autores observaram dimensão fractal maior para $G_f = 20 s^{-1}$ (um pouco menos de 1,80), e uma redução da dimensão fractal com o aumento do gradiente médio de velocidade, sendo que as dimensões fractais para 40, 50 e 60 s^{-1} apresentaram valores bem próximos. No presente trabalho, a turbidez foi de 50 ± 5 UNT, a coagulação para SA ocorreu em pH igual a 7,41, praticamente o mesmo de Oliveira *et al.* (2016), e a dosagem de Al^{3+} foi 0,5 mg superior, indicando que uma pequena variação nos valores de pH e dosagem de coagulante pode afetar totalmente a estruturação dos agregados durante a floculação.

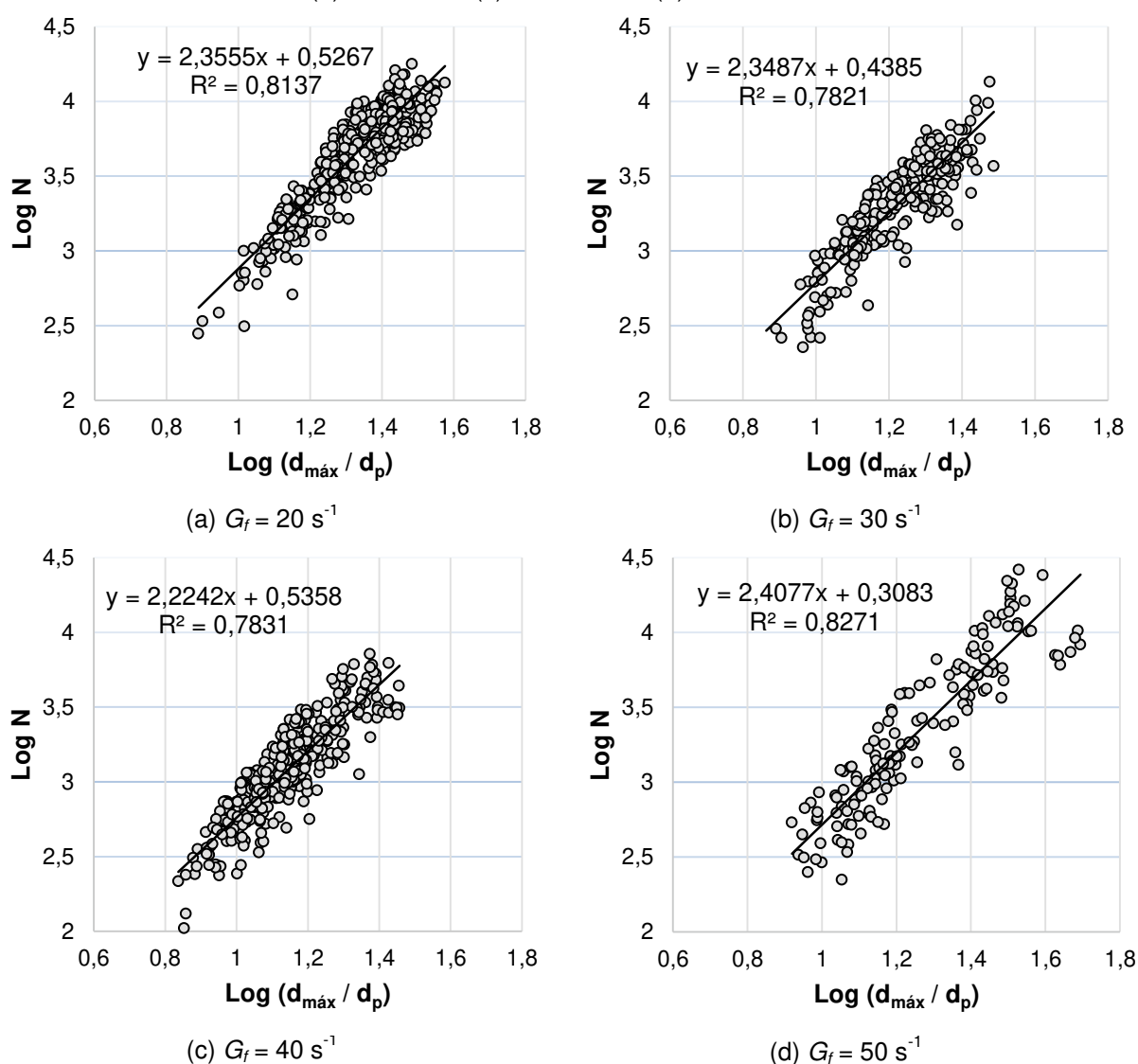
Em contraste, Li *et al.* (2007) mediram parâmetros estruturais e de força dos flocos em uma água bruta preparada com caulinita, empregando-se sulfato de alumínio como coagulante químico. A turbidez da água bruta foi de 50 UNT e a dosagem de coagulante foi de 0,1 mol/L. Os autores observaram um aumento da dimensão fractal com o aumento do gradiente de velocidade médio de floculação. Enquanto flocos formados em $G_f = 4,5 s^{-1}$ foram descritos por dimensão fractal bidimensional igual a 1,30, aqueles formados em $G_f = 134,6 s^{-1}$ resultaram em dimensão fractal de 1,60. De acordo com Li *et al.* (2007), o aumento do G_f é responsável pela quebra dos flocos mais abertos e ramificados, o que resulta em flocos finais menos alongados e mais compactos, com elevados valores de D_f . Para os flocos com maiores dimensões fractais, os autores levantam que ou as partículas primárias que foram os flocos estão mais unidas, ou que a repulsão entre elas é minimizada.

Assim sendo, os resultados encontrados na literatura são muito divergentes, o que evidencia a complexidade do processo de formação dos flocos. A dimensão fractal não é um parâmetro determinista – não necessariamente um aumento nos gradientes de velocidade aumenta ou diminui a dimensão fractal. A turbidez da água a ser tratada e suas características químicas e físicas, a dosagem de coagulante e pH de coagulação resultam em um comportamento estrutural específico para o ensaio em questão.

4.1.3 Dimensões fractais tridimensionais

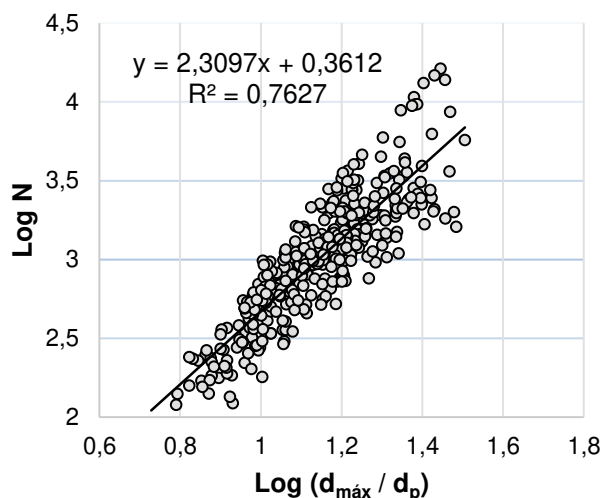
Nas Figuras 33 e 34 são apresentados os gráficos log-log do número de partículas primárias nos flocos em relação os valores da razão $d_{m\acute{a}x}/d_p$, conforme a Equação 14.

Figura 33 – Número de partículas primárias pela relação $d_{m\acute{a}x}/d_p$ para SA em: (a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, (b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$, (c) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ e (d) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$.



Fonte: o Autor (2020).

Figura 34 – Número de partículas primárias pela relação $d_{\text{máx}}/d_p$ para SA em $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$.



Fonte: o Autor (2020).

Os gráficos apresentados nas Figuras 33 e 34 fornecem os valores do log do parâmetro de forma, correspondente à interseção das retas no eixo das ordenadas. Para calcular o valor do fator de forma, calcula-se uma expoência cuja base é 10 e o valor do expoente é o valor da interseção. Desse modo, os valores do parâmetro de forma são apresentados na Tabela 7.

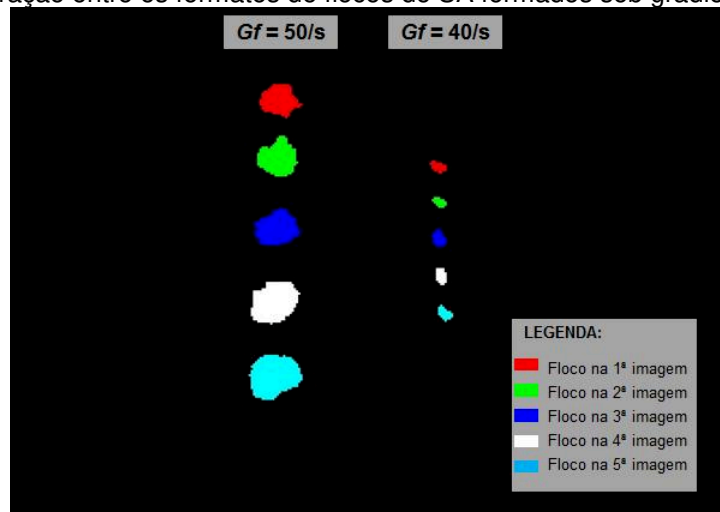
Tabela 7 – Valores para parâmetro de forma de SA para cada gradiente de floculação ensaiado.
Fonte: o Autor (2020).

	Valores de $G_f (\text{s}^{-1})$				
	20	30	40	50	60
log b	0,5267	0,4385	0,5358	0,3083	0,3612
b	3,36	2,74	3,43	2,03	2,30

De posse dos valores de parâmetro de forma, então foram calculadas as dimensões fractais de cada floco, isolando-se a D_f da Equação 14. Assim sendo, foram observados os seguintes valores médios: 2,355; 2,348; 2,226; 2,407 e 2,308 para os gradientes de 20, 30, 40, 50 e 60 s^{-1} , respectivamente. Assim como as dimensões fractais bidimensionais, também não foi observada uma relação direta ou inversa entre gradientes de velocidade e dimensões fractais tridimensionais.

Na Figura 35 são apresentados dois flocos capturados nos ensaios de sedimentação para SA. Para o floco de $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, além de apresentarem diâmetros maiores do que os de $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ – conforme descrito no item 4.1.1 deste trabalho –, observa-se que os formatos são mais regulares do que os flocos formados sob 40 s^{-1} . Para esse último gradiente, as seções capturadas do floco são mais alongadas, o que implica em menor dimensão fractal.

Figura 35 – Comparação entre os formatos de flocos de SA formados sob gradiente de 50 s^{-1} e 40 s^{-1} .



Fonte: o Autor (2020).

Os flocos formados em $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ foram caracterizados por estruturas mais abertas e ramificadas, pois resultou a menor dimensão fractal para os gradientes de velocidade ensaiados. Os flocos formados em $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$, em contraste, apresentaram estruturas mais regulares e compactas, com o maior valor médio de dimensão fractal observado.

Li *et al.* (2006) estudaram o processo de formação e a estruturação de flocos de caulinita formados por meio de diferentes mecanismos de coagulação – neutralização de cargas, varredura e formação de pontes. Os autores utilizaram sulfato de alumínio para a mistura rápida e em seguida o polímero poliacrilamida para auxílio na floculação. A floculação ocorreu durante 15 minutos e os flocos foram formados sob as seguintes velocidades de agitação: 40, 80, 150, 200, 300, 400 e 500 rpm. Por intermédio do equipamento *Mastersizer 2000* (técnica de espalhamento de luz para a obtenção de parâmetros dos flocos), Li *et al.* (2006) determinaram as dimensões fractais por meio de uma relação entre intensidade da luz espalhada pelos flocos e dimensão fractal.

Para todos os mecanismos de coagulação, Li *et al.* (2006) observaram um aumento da dimensão fractal com o aumento dos gradientes de velocidade. De acordo com os autores, os flocos formados são mais ramificados e, à medida que aumenta o gradiente de velocidade, as forças cisalhantes atuantes rompem essas estruturas mais alongadas, o que resulta em estruturas menores, mais compactas e com maiores valores de dimensão fractal. Esta constatação não foi feita neste trabalho, diante a oscilação negativa e positiva dos valores de dimensão fractal à medida que ocorreu o aumento do gradiente de velocidade.

Na Tabela 8 são apresentados os dados estatísticos a respeito das dimensões fractais tridimensionais calculadas para os flocos de sulfato de alumínio.

Tabela 8 – Dados estatísticos das dimensões fractais calculadas para os flocos de SA.
Fonte: o Autor (2020).

$G_f (s^{-1})$	média	Desv.pad.	Max	Min	Int 95%
20	2,355	0,093	2,595	1,894	0,009
30	2,348	0,104	2,595	1,795	0,013
40	2,226	0,108	2,519	1,738	0,008
50	2,407	0,138	2,710	1,94	0,022
60	2,308	0,132	2,676	1,628	0,012

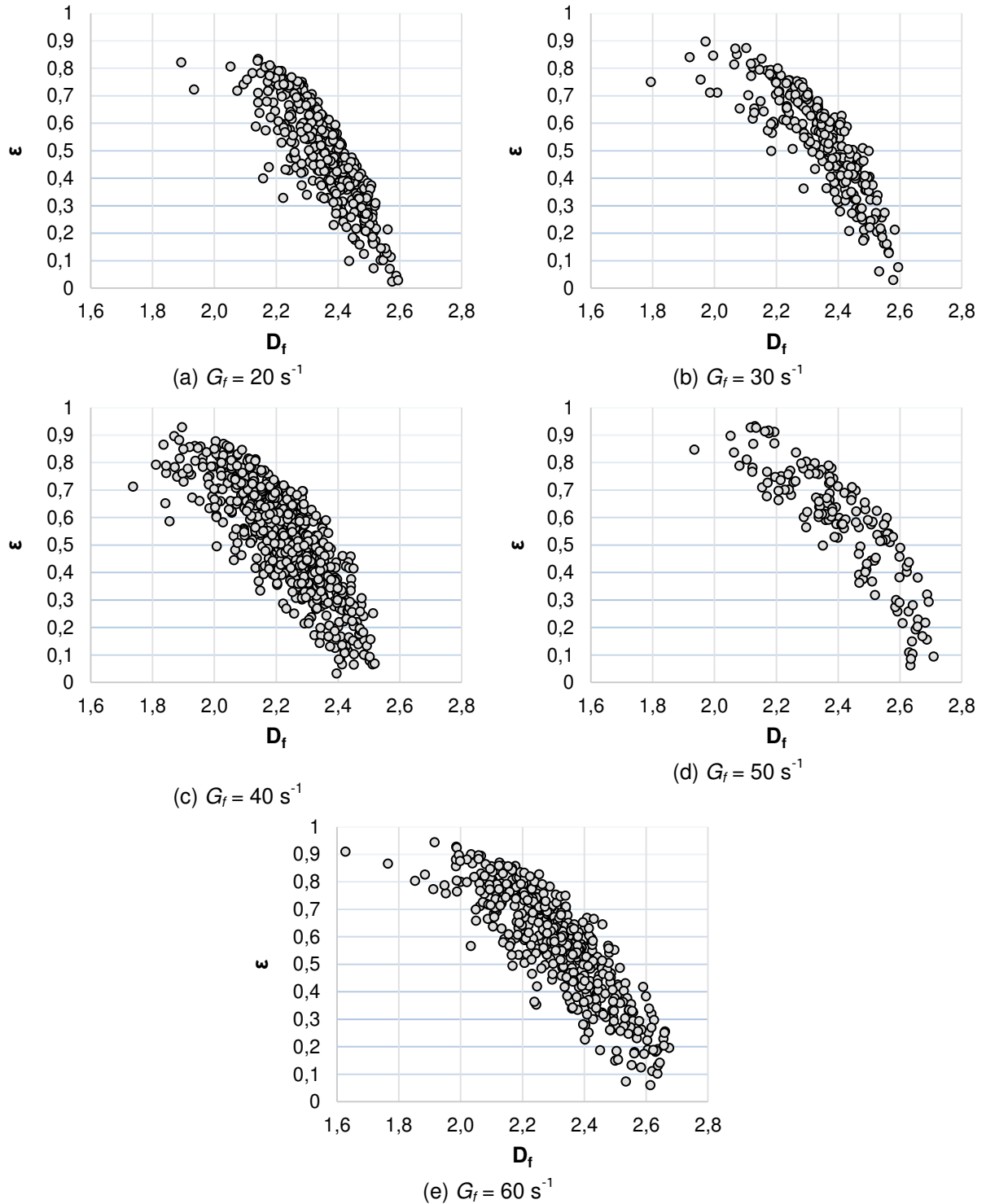
Os flocos formados sob o gradiente de $50 s^{-1}$ apresentaram os maiores valores médios para a dimensão fractal tridimensional. Já para aqueles formados sob $20 s^{-1}$, observa-se o menor desvio padrão entre os gradientes ensaiados. Isso significa que as dimensões fractais dos flocos formados a $20 s^{-1}$ estão mais próximas do valor médio do que nos demais ensaios. Isso é confirmado pela menor faixa de variação das dimensões fractais: enquanto o menor valor observado foi igual a 1,89, o maior valor foi de 2,59. Já para $G_f = 50 s^{-1}$, nota-se o maior desvio padrão dentre os gradientes de velocidade. Para $G_f = 60 s^{-1}$, nota-se a faixa mais ampla de dimensões fractais, cujos valores variaram, aproximadamente, de 1,63 a 2,68. O floco mais regular e compacto foi observado em $G_f = 50 s^{-1}$, enquanto o floco mais ramificado e aberto foi observado na floculação que ocorreu sob $60 s^{-1}$.

Moruzzi *et al.* (2020) determinaram as dimensões fractais tridimensionais de flocos formados sob gradientes de velocidade de 20 e $60 s^{-1}$, em uma água sintética com turbidez atribuída pela caulinita, cujo valor de turbidez correspondeu a 25 ± 2 UNT. O sulfato de alumínio foi utilizado como coagulante químico com dosagem de Al^{3+} igual a 2 mg/L. O pH de coagulação foi de 7,5. Os autores observaram valores de dimensões fractais de 2,83 a 2,33, configurando flocos mais compactos do que os descritos no presente trabalho. Vale lembrar que o pH do presente trabalho é praticamente o mesmo de Moruzzi *et al.* (2020), enquanto a dosagem de Al^{3+} aqui descrita foi de 2,5 mg/L. Chang *et al.* (2005) explicam que há um limite na dosagem de coagulante que, quando excedido, há a produção de flocos mais abertos e alongados, pois o mecanismo de coagulação passa da neutralização de cargas para a varredura. Sendo assim, acredita-se que, por esse motivo, as dimensões calculadas neste trabalho foram inferiores às calculadas por Moruzzi *et al.* (2020).

4.1.4 Porosidades

A Figura 36 relaciona a porosidade com as dimensões fractais para os gradientes ensaiados.

Figura 36 – Relação entre porosidade e dimensão fractais para SA.



Fonte: o Autor (2020).

Observe que não foram adicionadas linhas de tendência para os gráficos da Figura 36. Assim como para a porosidade, não serão apresentadas linhas de tendências relacionando as propriedades físicas dos flocos com as dimensões fractais para nenhum dos coagulantes ensaiados. A linha de tendência simplificaria a complexidade das estruturas fractais, pois apenas um valor de dimensão fractal resultaria em um valor de porosidade, por exemplo. Na prática, flocos de diferentes tamanhos podem apresentar a mesma dimensão fractal, e por isso um valor de dimensão fractal também pode levar a diferentes valores de massas específicas e velocidades de sedimentação. Neste estudo, as propriedades foram calculadas para cada floco de modo a discutir a influência das condições químicas e hidrodinâmicas aplicadas durante a floculação.

Os gráficos da Figura 36 evidenciam essa complexidade das geometrias fractais, visto que várias porosidades podem ser atribuídas para um mesmo valor de dimensão fractal. Porém, foi observada uma tendência dos valores mais baixos de dimensão fractal caracterizarem flocos com porosidade mais elevada, enquanto os maiores valores de dimensão fractal descrevem partículas floculentas de menor porosidade. Por exemplo, para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, as dimensões fractais menores do que 1,90, estruturas mais abertas, indicaram porosidades acima de 0,80, enquanto dimensões fractais próximas a 2,60 representaram flocos com porosidade próximas a 0 – menor porosidade devido à elevada compacidade do agregado, isto é, as partículas primárias estavam mais fortemente ligadas e, portanto, existiu menor repulsão entre elas.

Na Tabela 9 são apresentados os dados estatísticos calculados para a porosidade.

Tabela 9 – Dados estatísticos para a porosidade de flocos de SA. Fonte: o Autor (2020).

$G_f (\text{s}^{-1})$	média	Desv.pad.	Max	Min	Int 95%
20	0,487	0,15	0,833	0,02	0,015
30	0,522	0,145	0,897	0,03	0,018
40	0,522	0,151	0,928	0,03	0,011
50	0,582	0,161	0,931	0,06	0,026
60	0,576	0,157	0,943	0,06	0,014

A porosidade máxima da amostra dos ensaios foi referente ao gradiente de 60 s^{-1} , cujo valor foi de 0,943, com dimensão fractal correspondente a 1,92. Este floco é contido por uma elipse – aproximada pelo *ImageJ* – com valor de eixo maior igual a 0,702 mm e eixo menor igual a 0,167 mm, o que caracteriza um floco bastante alongado. O valor de 0,702 mm é uma das maiores dimensões calculadas para os flocos de $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$, conforme apresentado na Tabela 6. O parâmetro de forma, b , de $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ é 2,30 e é o menor valor dentre os

gradientes de velocidade ensaiados. Assim, conforme a Equação 15, um diâmetro elevado e baixos valores de dimensão fractal e parâmetro de forma resultam em valores mais elevados para a porosidade.

Moruzzi *et al.* (2020) destacam que, para o mesmo valor de dimensão fractal, os maiores flocos apresentam as maiores porosidades. Para fins comparativos, ainda para $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$, um floco com dimensão fractal de 1,89 (próxima à dimensão fractal de 1,92 do floco de porosidade máxima), porém com valores de eixos maior e menor correspondentes a 0,232 e 0,097 mm, respectivamente, resultou em porosidade de 0,825, ou seja, menor do que a porosidade do floco com maior valor de eixo maior.

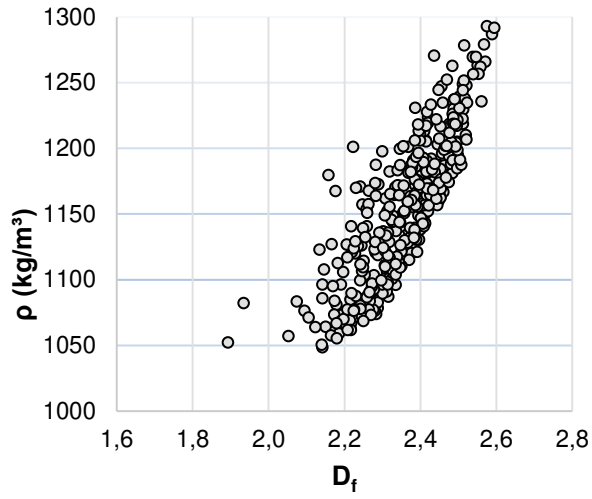
O floco mais compacto e menos poroso foi observado para o gradiente médio de floculação de 20 s^{-1} , cuja porosidade foi 0,02. A dimensão fractal para este agregado foi de 2,58 e o parâmetro de forma igual a 3,36. O eixo menor da elipse ajustada ao agregado foi 0,42 mm e o eixo maior foi 0,425 mm, indicando um floco bem próximo à geometria circular. Além da dimensão fractal do referido agregado ter sido uma das maiores dentre os flocos registrados (a dimensão fractal máxima dos ensaios foi igual a 2,67), o parâmetro de forma b foi elevado para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, o que resultou em baixa porosidade.

Em Moruzzi *et al.* (2020), os flocos de caulinita formados sob gradiente de velocidade de 20 e 60 s^{-1} tiveram o valor médio de porosidade igual a 0,76. Além disso, os flocos de Moruzzi *et al.* (2020) foram mais compactos do que o presente trabalho, com porosidades que variaram de 0,53 a 0,91. Neste trabalho, o maior valor médio de porosidade foi de 0,576 (referente à $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$) e os resultados variaram de 0,02 a 0,943.

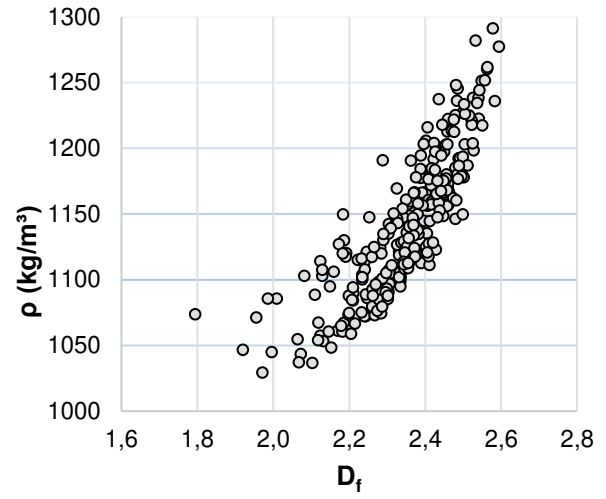
4.1.5 Massas específicas

Os gráficos de dimensão fractal versus massa específica são apresentados na Figura 37.

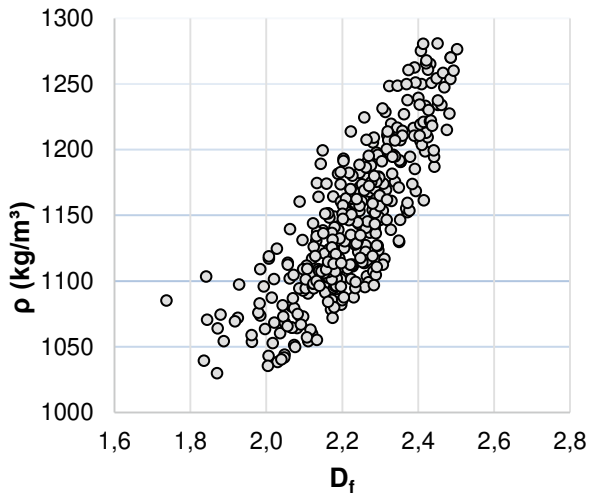
Figura 37 – Relação entre massas específicas e dimensões fractais para SA.



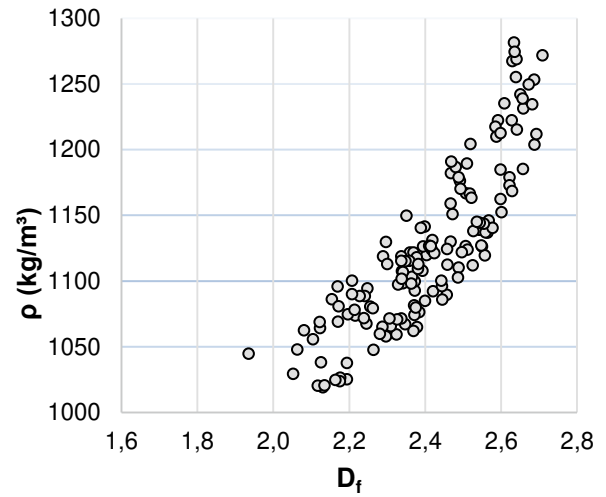
(a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$



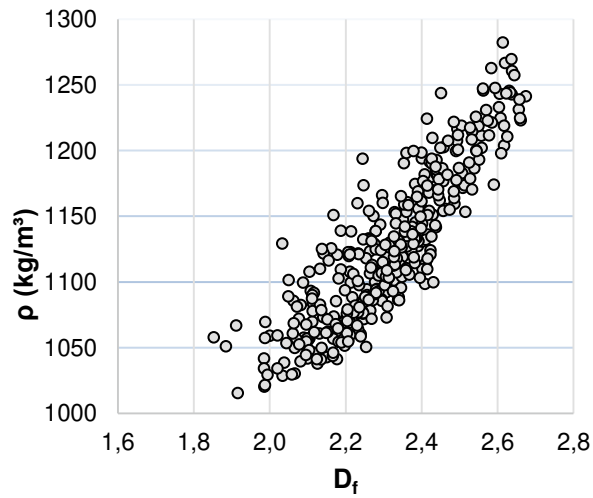
(b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$



(c) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$



(d) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$



(e) $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$

Fonte: o Autor (2020).

Os gráficos da Figura 37 evidenciam um aumento da massa específica com o aumento da dimensão fractal, conforme conclusões de Moruzzi *et al.* (2020). O que está coerente, visto que quanto maior a dimensão fractal, mais próximas e compactas as partículas primárias que formam o floco. Assim sendo, há um maior número de partículas primárias no floco do que um descrito por um menor valor de dimensão fractal, acarretando em maior massa específica.

Os dados estatísticos para as massas específicas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados estatísticos para massa específica dos flocos de SA. Fonte: o Autor (2020).

$G_f (s^{-1})$	Média (kg/m ³)	Desv.pad.	Max (kg/m ³)	Min (kg/m ³)	Int 95%
20	1153	45	1293	1048	4,575
30	1142	44	1291	1029	5,359
40	1142	46	1290	1020	3,357
50	1124	49	1281	1019	7,782
60	1126	47	1282	1015	4,233

Com os dados apresentados na Tabela 10, observa-se redução no valor médio das massas específicas com o aumento do gradiente de velocidade até $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$, e deste gradiente a 60 s^{-1} o valor médio das massas específicas se eleva sutilmente para 1126 kg/m^3 . A massa específica média é máxima para o gradiente de velocidade de floculação de 20 s^{-1} , relacionado aos maiores valores de dimensões fractais (flocos mais compactos), menores porosidades e maiores tamanhos de agregados dentre os gradientes ensaiados. Apesar de apresentarem menores valores para os diâmetros dos flocos e dimensões fractais, os flocos submetidos a gradiente de floculação de 40 s^{-1} apresentaram valor médio de massa específica igual ao do gradiente de 30 s^{-1} . Portanto, o maior valor do parâmetro de forma de $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ (3,43 contra 2,74) teve maior influência no cálculo das massas específicas, elevando o valor médio correspondente a um gradiente de velocidade mais baixo.

As massas específicas dos agregados fractais variaram de 1015 kg/m^3 ($G_f = 60 \text{ s}^{-1}$) até 1293 kg/m^3 ($G_f = 20 \text{ s}^{-1}$). Esse valor mínimo corresponde ao floco de maior porosidade. O valor máximo de 1293 kg/m^3 é atribuído ao floco de menor porosidade. Portanto, conforme Moruzzi *et al.* (2020), pode-se afirmar que a massa específica é uma propriedade inversa à porosidade. Moruzzi *et al.* (2020) registraram flocos com massas específicas que variaram de 1024 a 1138 kg/m^3 . A massa específica máxima calculada no presente trabalho supera à calculada pelos autores, assim como o valor mínimo é inferior ao calculado por esses autores. Isso se deve ao fato de que foram estimados, neste trabalho, dimensões fractais mais compactas e também mais ramificadas do que em Moruzzi *et al.* (2020), além da adoção de um diâmetro da partícula primária superior ($23 \text{ }\mu\text{m}$ contra $10 \text{ }\mu\text{m}$). Os referidos

autores determinaram a distribuição de tamanho das partículas da caulinita utilizada e chegaram ao valor médio de 7,5 μm . Com base nesta dimensão, Moruzzi *et al.* (2020) adotaram o tamanho de pixel igual a 10 μm para que as imagens capturassem as menores partículas que formavam os agregados. No presente trabalho, esta curva não foi determinada, e a configuração da câmera para a captura das imagens dos flocos durante a sedimentação resultou em pixels iguais a 23 μm .

4.1.6 Velocidades dos fractais

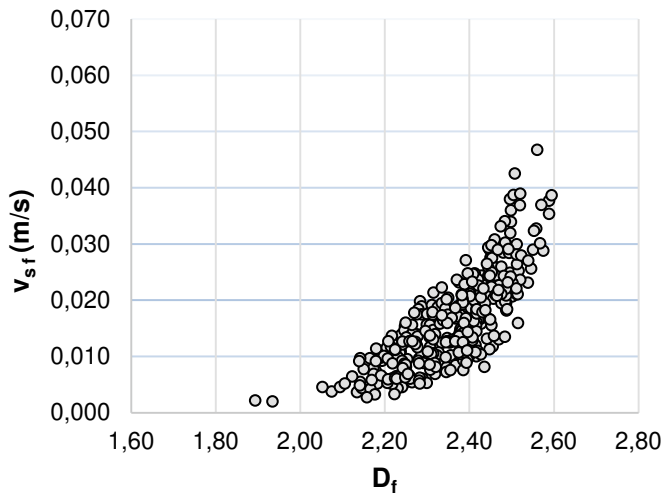
Os melhores resultados para a média de velocidade de sedimentação foram observados para os flocos formados sob gradiente igual a 20 s^{-1} . As velocidades variaram de 2 a 46,7 mm/s, sendo 16 mm/s a média das velocidades. Neste gradiente, os agregados apresentaram maiores valores médios para tamanho, dimensão fractal, massa específica e menor valor de porosidade. Em contraste, o gradiente de 60 s^{-1} apresentou os piores resultados para velocidades. Os valores se situaram na faixa de 6 a 44,6 mm/s, e a velocidade média dos flocos foi de 5,9 mm/s. Ao contrário dos flocos formados a 20 s^{-1} , em 60 s^{-1} foram observados menores valores para tamanho, massa específica e maior valor médio de porosidade. Na Tabela 11 são apresentados os dados estatísticos para as velocidades de sedimentação dos fractais.

Tabela 11 – Dados estatísticos para as velocidades de sedimentação dos fractais de SA. Fonte: o Autor (2020).

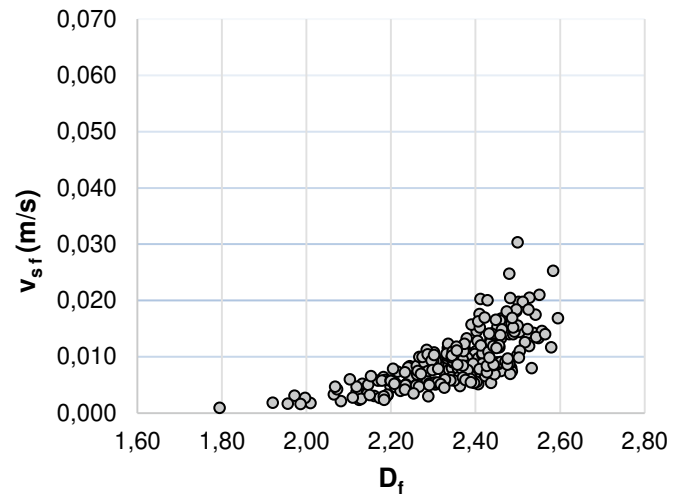
$G_f (\text{s}^{-1})$	média	Desv.pad.	Max	Min	Int 95%
20	0,0160	0,0066	0,0467	0,0020	0,0007
30	0,0092	0,0037	0,0303	0,0009	0,0004
40	0,0071	0,0031	0,0308	0,0010	0,0002
50	0,0145	0,0094	0,0676	0,0017	0,0015
60	0,0059	0,0033	0,0446	0,0006	0,0003

A Figura 38 mostra as relações entre as velocidades de sedimentação para os fractais (v_{st}) e as dimensões fractais.

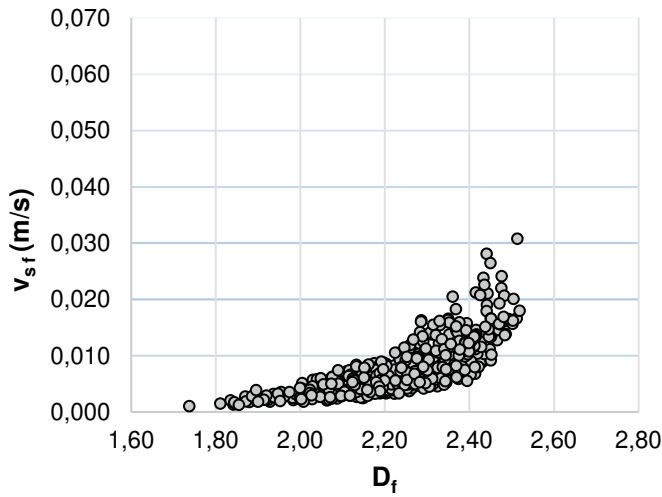
Figura 38 – Velocidades de sedimentação dos fractais para SA.



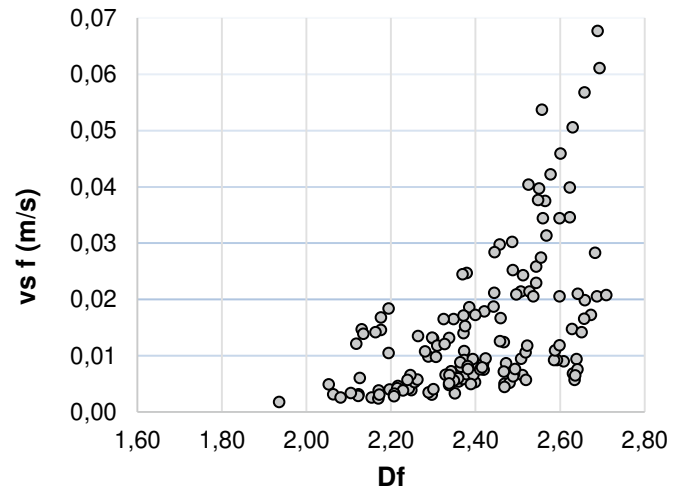
(a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$



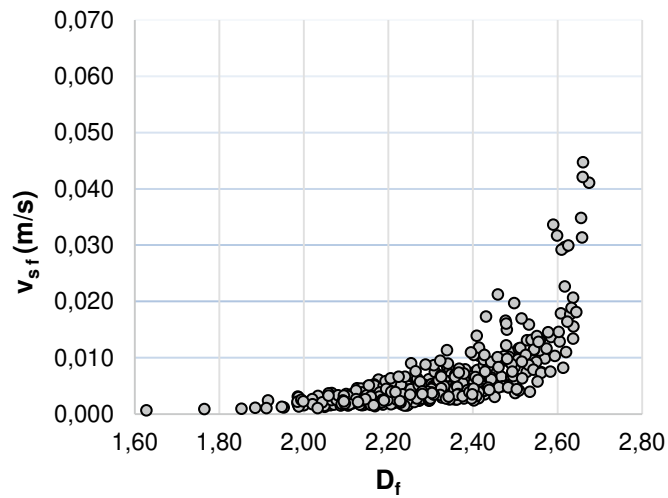
(b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$



(c) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$



(d) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$



(e) $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$

Fonte: o Autor (2020).

Os gráficos da Figura 38 indicam um aumento das velocidades de sedimentação com o aumento da dimensão fractal. Em todos os gradientes ensaiados, observou-se uma redução nas velocidades de sedimentação com a diminuição dos valores de dimensão fractal. Ou seja, partículas mais abertas e alongadas, descritas por menores valores de dimensão fractal, tiveram menores velocidades de sedimentação.

Nas Figuras 39 e 40 são explicitados gráficos que relacionam as porosidades e massas específicas dos agregados com as velocidades de sedimentação dos fractais.

Figura 39 – Relação entre velocidades de sedimentação com a porosidade (à esquerda) e massa específica (à direita) dos agregados de SA para: (a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ e (b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$.

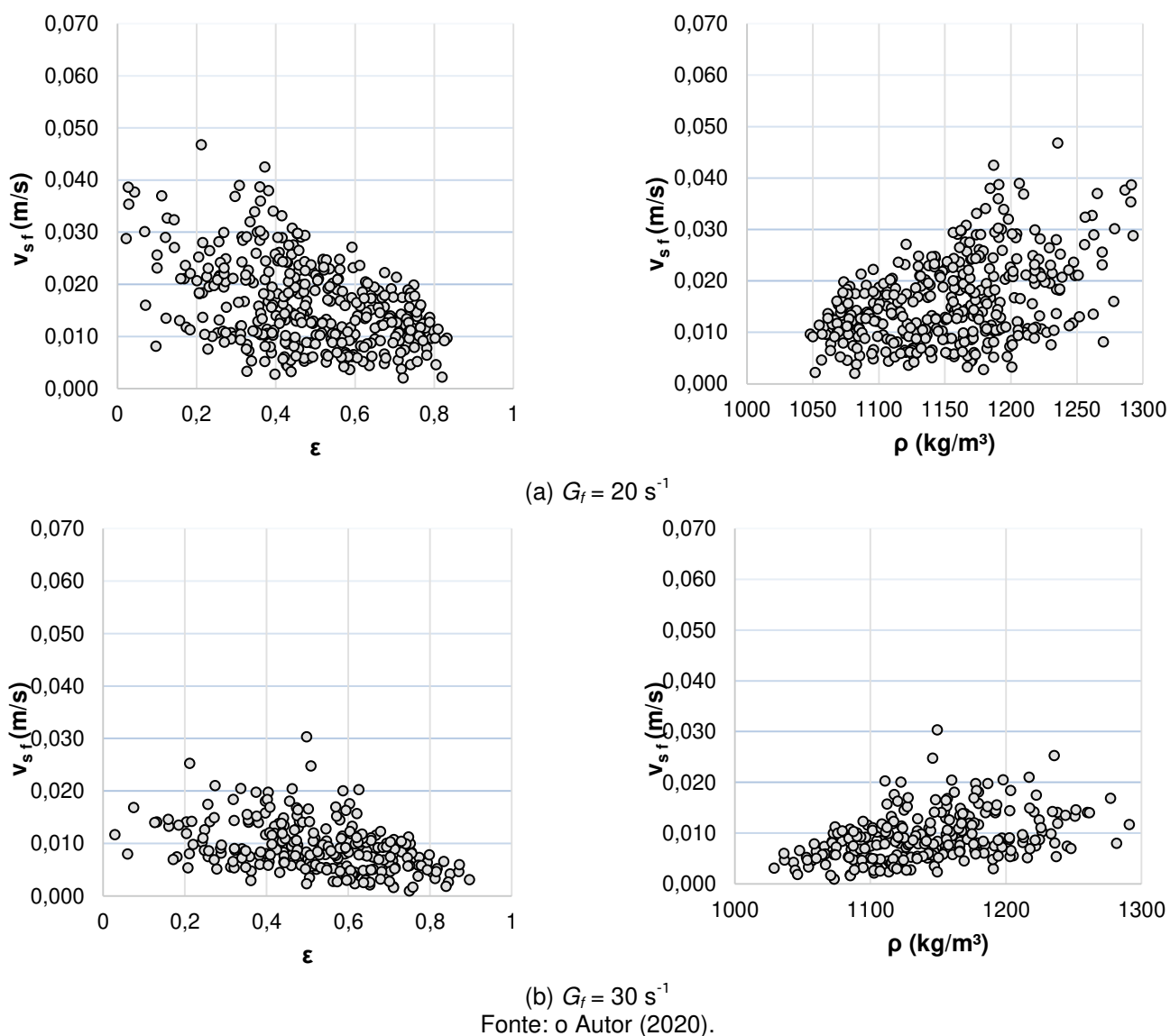
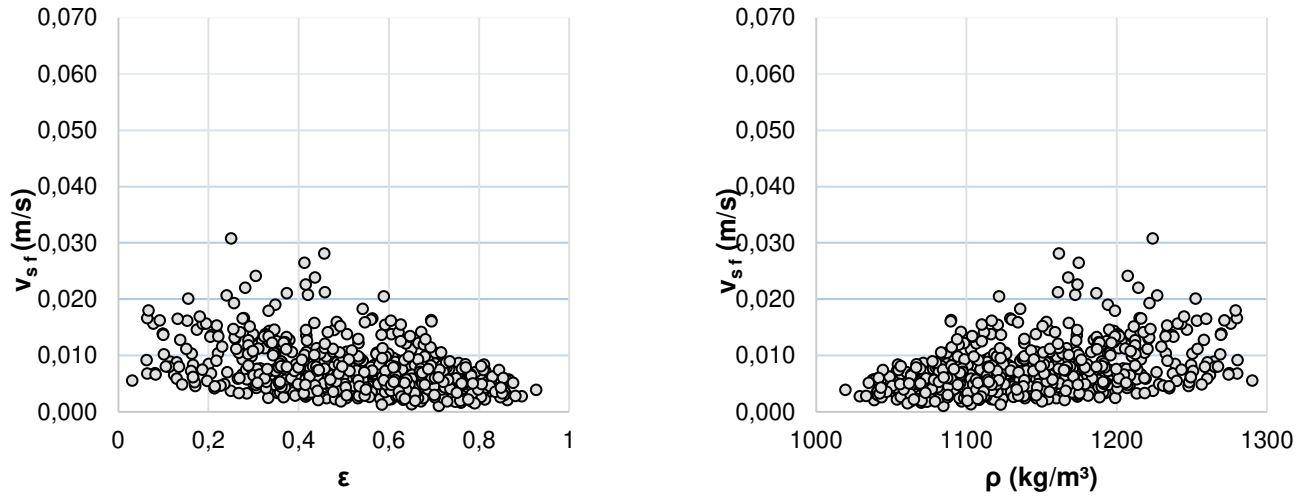
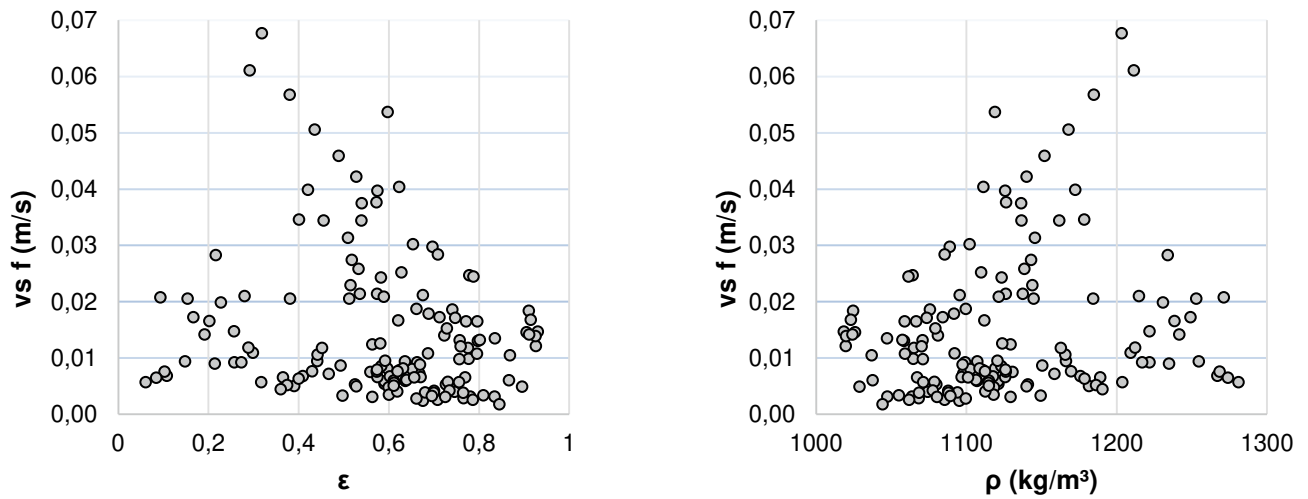


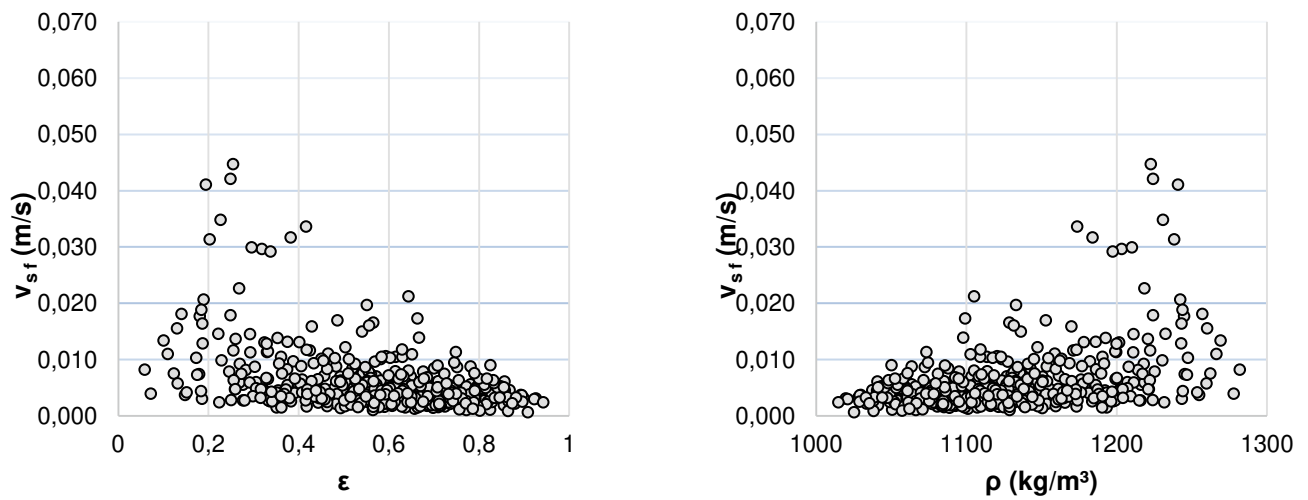
Figura 40 – Relação entre velocidades de sedimentação com a porosidade (à esquerda) e massa específica (à direita) dos agregados de SA para: (a) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ (b) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ e (c) $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$.



(a) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$



(b) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$



(c) $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$

Fonte: o Autor (2020).

Nas Figuras 39 e 40, os gráficos que relacionam a porosidade (à esquerda) e massa específica (à direita) com as velocidades de sedimentação são espelhados devido ao fato de que essas duas propriedades são inversas. Esses gráficos evidenciam a tendência de redução na velocidade de sedimentação à medida que aumenta os valores de porosidade, ao passo que a velocidade de sedimentação aumenta para massas específicas mais elevadas. As porosidades para as velocidades de sedimentação mais elevadas foram de: 0,213; 0,498; 0,251; 0,319 e 0,255 para os gradientes de 20, 30, 40, 50 e 60 s^{-1} , respectivamente. Quanto às massas específicas, os valores correspondentes foram: 1236; 1223; 1224; 1204 e 1223 kg/m^3 , referentes aos respectivos gradientes de 20, 30, 40, 50 e 60 s^{-1} .

Neste contexto, Moruzzi *et al.* (2020) afirmam que não há um consenso na comunidade científica a respeito do efeito da porosidade nas velocidades de sedimentação. Por exemplo, Johnson *et al.* (1996) concluíram que a porosidade influencia positivamente nas velocidades de sedimentação. Entretanto, Bushell *et al.* (2002) discutiram que é difícil explicar o aumento das velocidades de sedimentação. Por outro lado, Xiao *et al.* (2013) mostraram, com o auxílio de traçadores, que ocorre fluxo interno em partículas porosas, mas as velocidades de sedimentação observadas foram maiores para os flocos menos porosos, pois os flocos eram maiores e mais pesados.

Na Tabela 12 são resumidos os parâmetros necessários para o cálculo das velocidades de sedimentação, referentes às mínimas e máximas velocidades estimadas para cada gradiente de velocidade de mistura lenta.

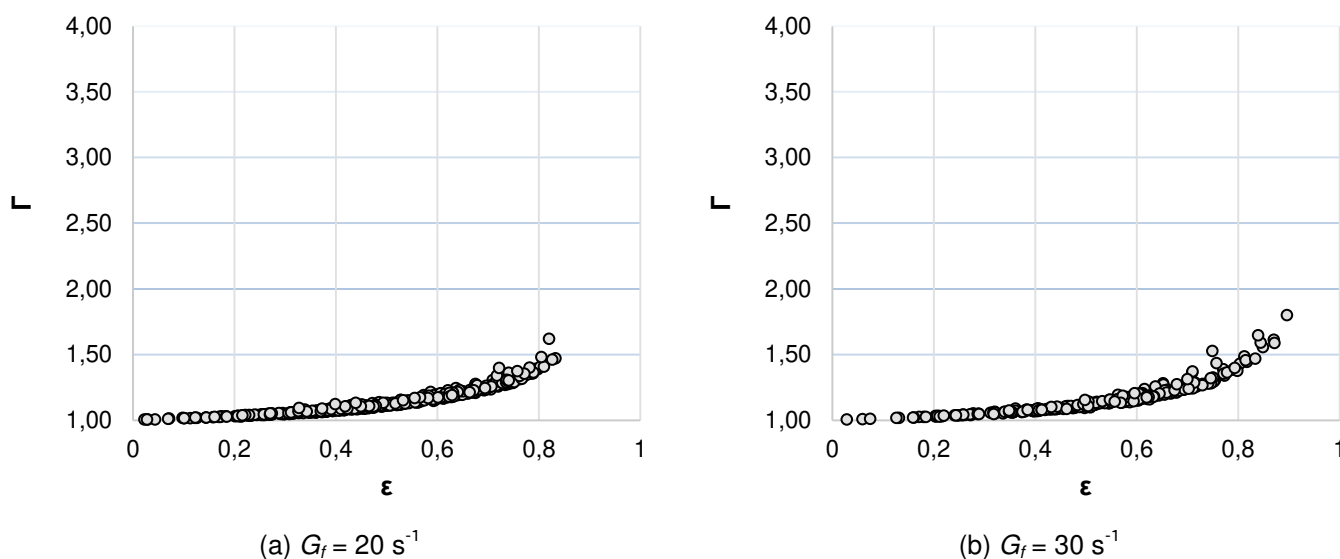
Tabela 12 – Resumo dos parâmetros dos agregados que apresentaram as menores e maiores velocidades para cada gradiente ensaiado para o SA. Fonte: o Autor (2020).

$G_f (s^{-1})$	$d_f (mm)$	b	D_f	ε	$\rho (kg/m^3)$	$v_{sf} (m/s)$
20	0,592	3,36	2,56	0,213	1236	0,04672
	0,175		1,93	0,722	1082	0,00195
30	0,579	2,74	2,50	0,498	1149	0,030255
	0,118		1,80	0,75	1074	0,000879
40	0,491	3,43	2,51	0,251	1224	0,030751
	0,118		1,74	0,712	1085	0,001002
50	0,705	2,03	2,69	0,319	1204	0,067627
	0,163		1,94	0,846	1044	0,001712
60	0,596	2,30	2,66	0,255	1223	0,044647
	0,134		1,63	0,909	1025	0,000604

Portanto, pode-se dizer que a massa específica e a dimensão fractal exercem maior influência na velocidade de sedimentação do que a porosidade, para as condições químicas e hidrodinâmicas ensaiadas com a utilização do sulfato de alumínio. As velocidades mínimas, por exemplo, foram devidas às dimensões fractais e massas específicas próximas dos valores mínimos registrados, enquanto as porosidades não foram próximas dos valores máximos encontrados – exceto no gradiente de 60 s^{-1} , no qual a velocidade mínima correspondeu à porosidade de 0,909, enquanto o maior valor calculado para o parâmetro foi 0,943. Em oposição, as maiores velocidades ocorreram para dimensões fractais e massas específicas próximas aos valores máximos dos ensaios.

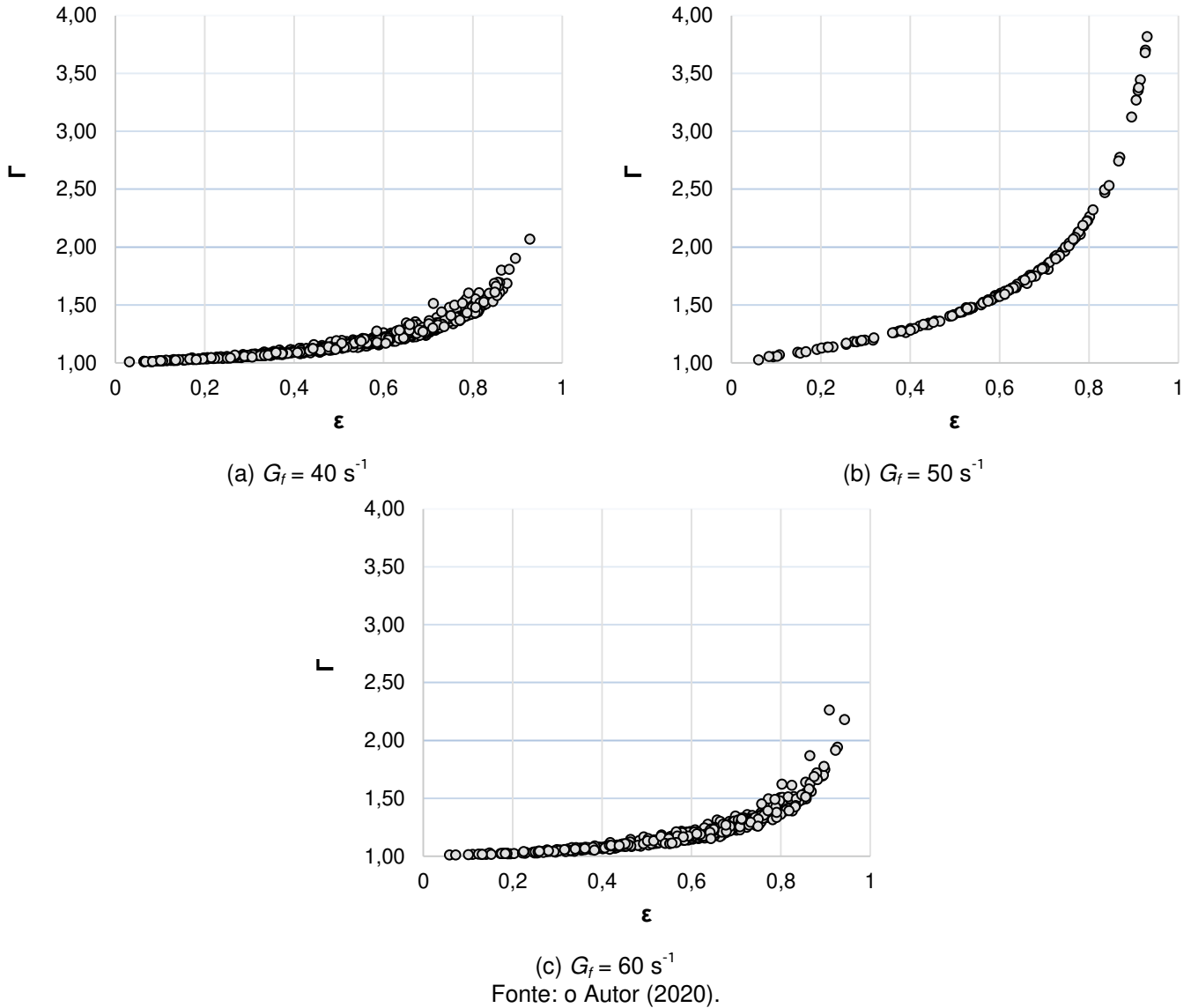
Para mostrar que a porosidade causa redução na força de arrasto, contribuindo para a elevação das velocidades de sedimentação dos agregados fractais, foram calculadas as velocidades das esferas de Stokes com os mesmos valores de massas específicas dos agregados fractais e com as mesmas dimensões características dos flocos (diâmetro equivalente), conforme a Equação 18 apresentada no item 3.11. As Figuras 41 e 42 relacionam as porosidades com o quociente adimensional Γ .

Figura 41 – Relação entre porosidade com o quociente adimensional Γ para os agregados fractais formados pelo SA para: (a) $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ e (b) $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$.



Fonte: o Autor (2020).

Figura 42 – Relação entre porosidade com o quociente adimensional Γ para os agregados fractais formados pelo SA para: (a) $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$, (b) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ e (c) $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$.



As Figuras 41 e 42 mostram que as velocidades dos agregados fractais foram superiores às esferas impermeáveis para todos os gradientes de velocidade ensaiados, o que comprova isso é que as ordenadas de todos os pontos são maiores do que 1. Para que o quociente adimensional Γ resulte em um valor superior à unidade, a velocidade de sedimentação do fractal deve ser maior do que a velocidade da esfera de Stokes. As Figuras 41 e 42 mostram, ainda, que existe uma tendência dos valores de Γ aumentarem à medida que os valores de porosidade aumentam. Quanto mais poroso o floco, maior a velocidade de sedimentação do fractal em relação à esfera de Stokes. Esse comportamento provavelmente está relacionado ao fato de que o fluxo interno nos flocos porosos reduz a força de arrasto durante a sedimentação, o que acarreta no aumento da velocidade de sedimentação, conforme Wu e Lee (1998).

A relação entre a velocidade dos fractais e das esferas apresentou um valor médio de 1,141 para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, sendo 1,003 e 1,167 os valores mínimos e máximos. Para o gradiente de 30 s^{-1} , o valor médio foi de 1,162 e Γ variou de 1,004 a 1,797. Flocos formados sob gradiente médio de velocidade de 40 s^{-1} tiveram o valor médio de 1,194, com quocientes que variaram de 1,005 a 2,066. Para o gradiente de velocidade de 50 s^{-1} , o valor mínimo foi de 1,023, e o máximo foi 3,817. Por fim, a média do quociente foi 1,217 para $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$, cujo valor mínimo foi 1,007 e o máximo foi 2,261.

Vahedi e Gorczyca (2012) simularam flocos com dimensões fractais múltiplas e concluíram que os fractais se sedimentam em velocidades superiores às esferas de Stokes, assim como neste trabalho. Nas simulações de Moruzzi *et al.* (2020), entretanto, flocos porosos com tamanhos maiores do que $320 \mu\text{m}$ e $D_f = 2,61$ se sedimentariam em velocidades inferiores do que as esferas de Stokes. Assim sendo, conclui-se que não é sempre que as velocidades de sedimentação dos fractais serão maiores do que as esferas de Stokes, pois este comportamento depende das características geométricas e estruturais dos agregados.

4.2 SEDIMENTAÇÃO DOS FLOCOS COAGULADOS POR POLICLORETO DE ALUMÍNIO

4.2.1 Tamanho dos flocos

Na Tabela 13 são apresentados os valores estatísticos referentes aos tamanhos dos flocos que sedimentaram após os ensaios de floculação. Os flocos do gradiente de velocidade de 20 s^{-1} não permaneceram nas imagens. Possivelmente os flocos se sedimentaram tão rapidamente que eles foram registrados em menos de quatro imagens e, portanto, não atenderam ao critério de seleção pelo algoritmo. Dessa forma toda a análise deste coagulante trata-se dos gradientes de 30, 40, 50 e 60 s^{-1} .

Tabela 13 – Dados estatísticos para os flocos formados pela coagulação do PAC.
Fonte: o Autor (2020).

$G_f (s^{-1})$	Parâmetro	média	Desv.pad.	Max	Min	Int 95%
30	$D_{eq} (mm)$	0,264	0,051	0,431	0,12	0,007
	$D_{min} (mm)$	0,242	0,049	0,388	0,11	0,007
	$D_{máx} (mm)$	0,363	0,083	0,639	0,17	0,012
40	$D_{eq} (mm)$	0,198	0,033	0,307	0,11	0,004
	$D_{min} (mm)$	0,182	0,034	0,289	0,09	0,004
	$D_{máx} (mm)$	0,271	0,048	0,520	0,15	0,006
50	$D_{eq} (mm)$	0,191	0,034	0,378	0,08	0,005
	$D_{min} (mm)$	0,173	0,032	0,311	0,07	0,004
	$D_{máx} (mm)$	0,264	0,050	0,509	0,12	0,007
60	$D_{eq} (mm)$	0,179	0,038	0,388	0,10	0,007
	$D_{min} (mm)$	0,168	0,039	0,413	0,09	0,007
	$D_{máx} (mm)$	0,236	0,052	0,473	0,13	0,009

As partículas floculentas coaguladas pelo PAC apresentaram redução nos tamanhos médios com o aumento do gradiente de floculação. Além de maiores valores de dimensões mínimas e máximas, os flocos foram descritos por maiores áreas para os menores gradientes de velocidade de floculação, conforme valores dos diâmetros equivalentes.

Esses resultados divergem dos discorridos por Mendes (2017), o qual notou um aumento dos diâmetros equivalentes médios de flocos formados pelo mesmo coagulante polimérico, aos 20 minutos de floculação, dos gradientes de velocidade de 30 a 60 s^{-1} . Vale ressaltar que o par de coagulação e a turbidez de Mendes (2017) foram diferentes dos adotados no presente estudo: pH igual a 6,2, dosagem de coagulante igual a 70 mg/L e turbidez igual a 6,5 UNT.

Em confronto, conforme Jin *et al.* (2007), o aumento dos gradientes de velocidade provoca redução nos diâmetros médios dos flocos, pois a força cisalhante excede a força que mantém as partículas primárias dos flocos unidas, provocando a quebra dos agregados. Xu *et al.* (2014) utilizaram o PAC para a formação de flocos de ácido húmico e, assim como no presente trabalho, reportaram o efeito da quebra dos agregados e redução dos diâmetros equivalentes médios com o aumento dos gradientes de velocidade.

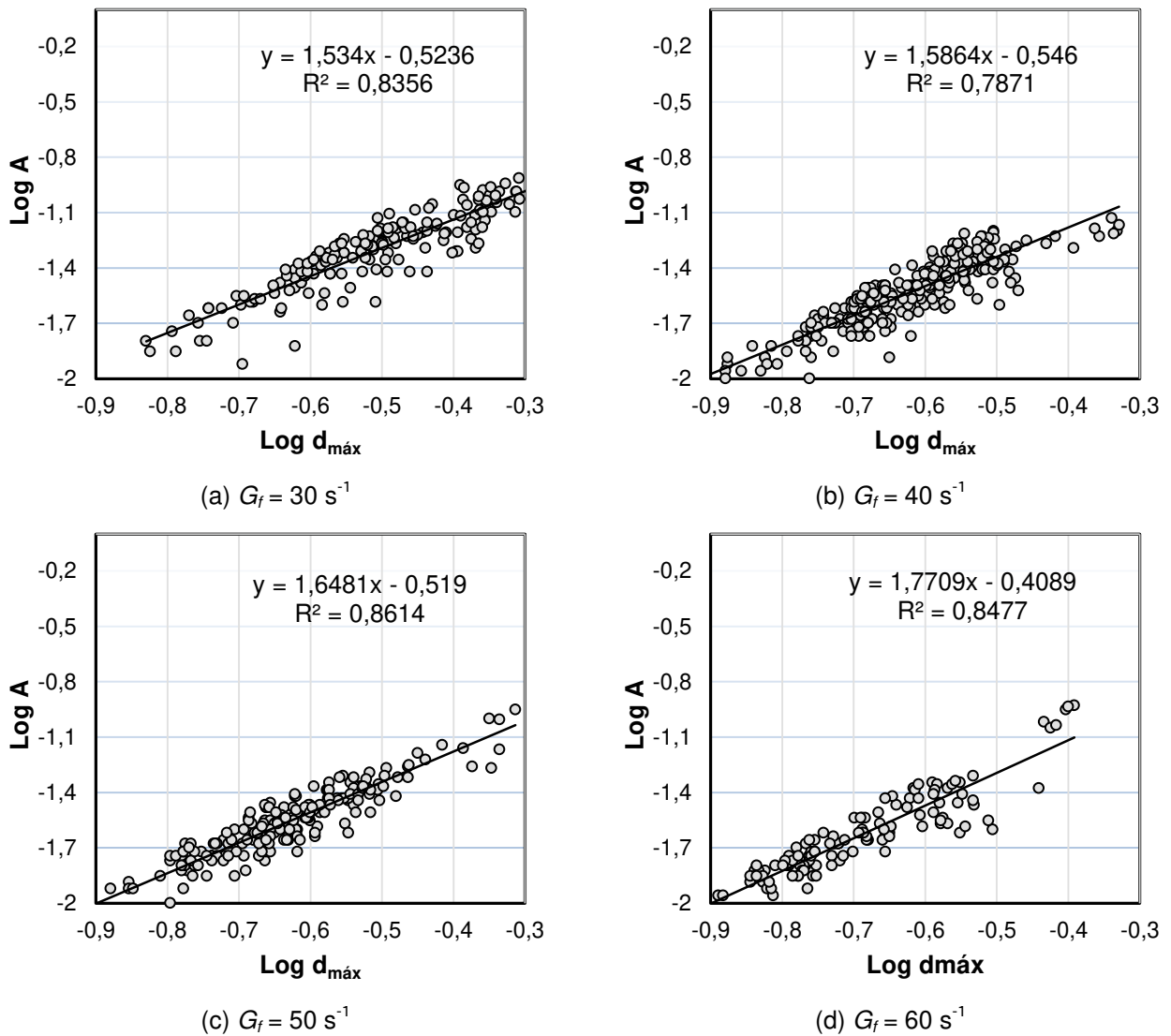
Os dados descritos na Tabela 13 também dão ideia das faixas de distribuição de tamanho das partículas, de acordo com os valores mínimos e máximos de diâmetro de Feret. A faixa mais extensa, que caracteriza uma DTP mais larga, corresponde ao gradiente de velocidade de 30 s^{-1} , com diâmetros que variaram de 0,11 a 0,639 mm. Por outro lado, a faixa menos extensa de tamanhos de partículas foi para $G_f = 60 s^{-1}$, cujos diâmetros oscilaram entre 0,09

e 0,474 mm. O mínimo valor para o diâmetro de Feret acusado pelo *ImageJ* foi igual a 0,07 mm, sob $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$, enquanto o valor máximo foi igual 0,639 mm no gradiente de 30 s^{-1} .

4.2.2 Dimensões fractais bidimensionais

Na Figura 43 são apresentados os gráficos das dimensões características dos flocos versus áreas das seções transversais dos flocos, necessários para a determinação das dimensões fractais bidimensionais para cada gradiente de velocidade.

Figura 43 – Plotagem de gráficos área \times diâmetro máximo para a determinação das dimensões fractais bidimensionais de flocos de PAC.

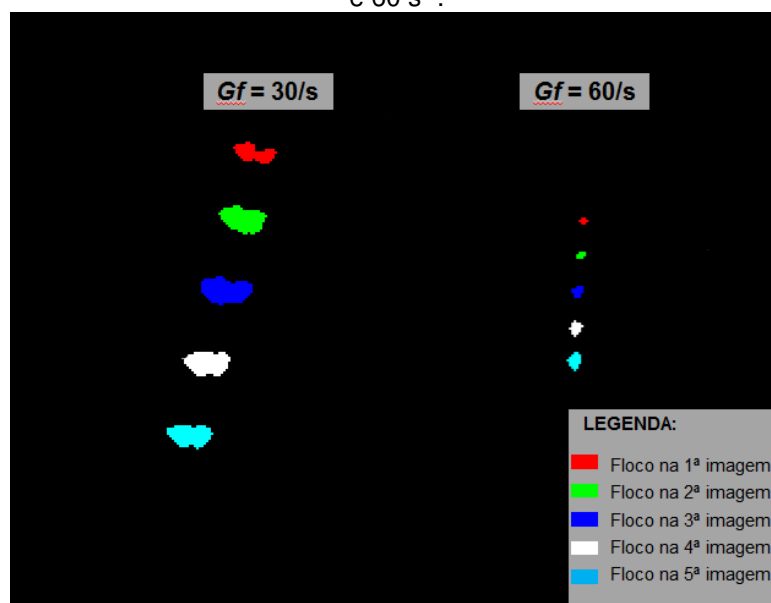


Fonte: o Autor (2020).

As inclinações das linhas de tendência dos gráficos da Figura 43 referem-se às dimensões fractais bidimensionais. Sendo assim, as dimensões fractais foram 1,534; 1,586; 1,648 e 1,771 para os gradientes de 30, 40, 50 e 60 s^{-1} , respectivamente. Portanto, ocorre um aumento da dimensão fractal à medida que aumenta o gradiente de velocidade, dos flocos mais alongados e ramificados para 30 s^{-1} , até flocos mais arredondados e próximos à geometria euclidiana para 60 s^{-1} . Gonçalves (2017) também notou, ao utilizar o PAC para estudar a evolução da dimensão fractal durante a floculação, para tempo de mistura lenta de 20 minutos, um aumento da dimensão fractal de $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ até 60 s^{-1} . Gradientes acima de 60 s^{-1} induziram à redução da dimensão fractal dos agregados.

Na Figura 44 são exemplificados dois flocos registrados nos ensaios de 30 e 60 s^{-1} . O floco formado sob gradiente de velocidade de floculação de 30 s^{-1} é maior do que o submetido a 60 s^{-1} – conforme valores médios da Tabela 13 –, além disso é estruturalmente mais alongado e achatado do que ao floco de 60 s^{-1} , que é mais regular e próximo à geometria circular. A diferença entre esses formatos atribui menor valor de dimensão fractal para o floco formado sob 30 s^{-1} do que para o floco submetido a 60 s^{-1} .

Figura 44 – Comparação entre os formatos de flocos de PAC formados sob gradientes de 30 s^{-1} e 60 s^{-1} .



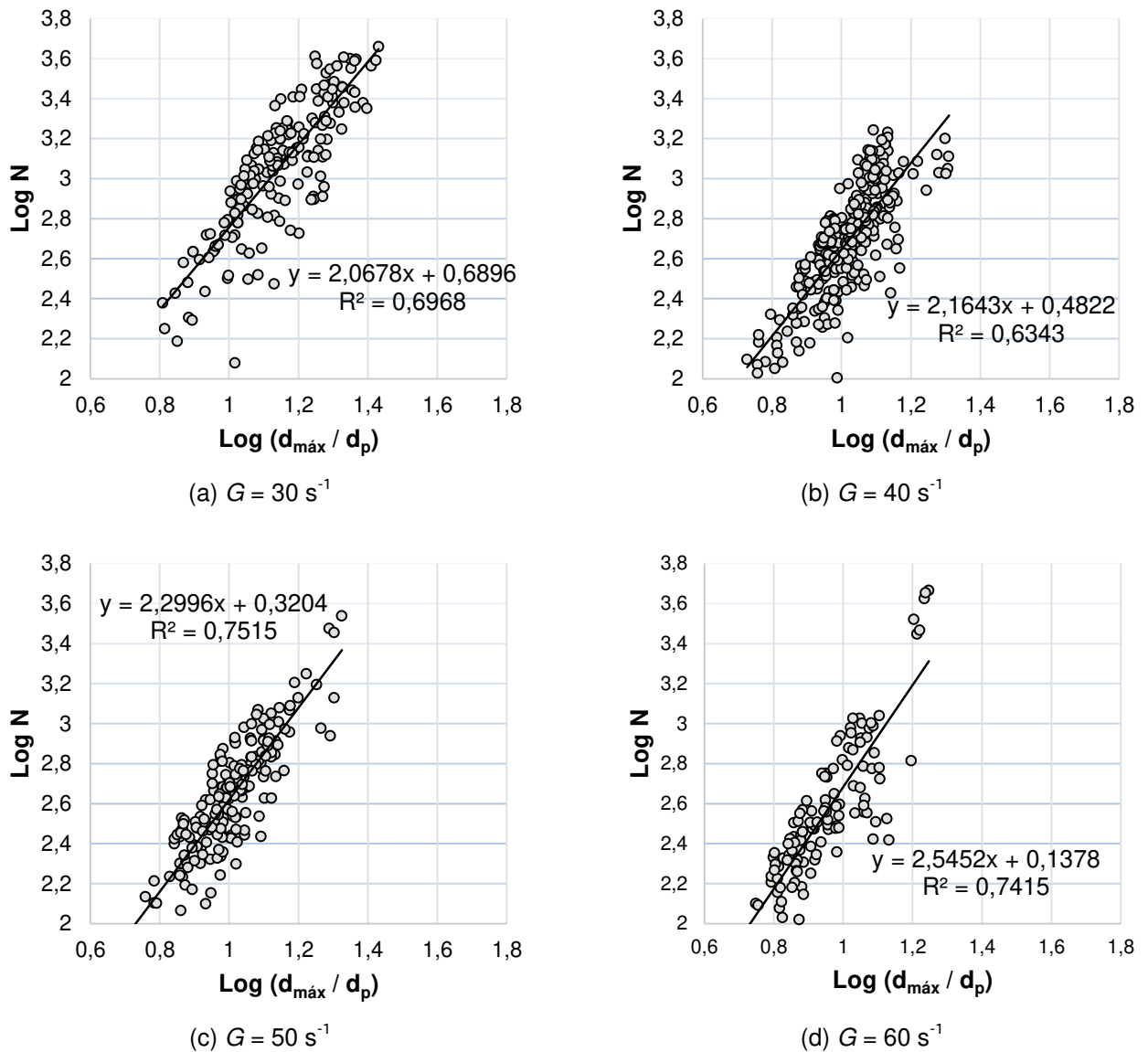
Fonte: o Autor (2020).

Li *et al.* (2006) discorreram sobre o emprego de coagulantes poliméricos, como é o caso do PAC. A coagulação das partículas ocorre com a formação de pontes, e os flocos geralmente são mais fortes do que aqueles formados com o emprego de sais convencionais, como o sulfato de alumínio. Por isso, para baixos gradientes de velocidade, flocos de PAC podem apresentar dimensões fractais menores do que flocos de SA.

4.2.3 Dimensões fractais tridimensionais

Os flocos foram aproximados a elipses pelo *ImageJ* e os valores dos eixos menor e maior de cada floco serviram de base para estimar os volumes e o número de partículas primárias de cada floco. As relações entre número de flocos e diâmetros estão apresentados na Figura 45.

Figura 45 – Número de partículas primárias pela relação $d_{\text{máx}}/d_p$ para PAC.



Fonte: o Autor (2020).

O log do parâmetro de forma intercepta o eixo das ordenadas dos gráficos da Figura 45, portanto os logaritmos do parâmetro e os valores em si são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores para fator de forma para cada gradiente de floculação ensaiado para o PAC.
Fonte: o Autor (2020).

	Valores de $G_f (s^{-1})$			
	30	40	50	60
$\log b$	0,6896	0,4822	0,3204	0,1378
b	4,89	3,04	2,09	1,37

Com os valores de b , foi possível calcular os valores das dimensões fractais para cada floco selecionado pelo algoritmo. Na Tabela 15 são explicitados os dados estatísticos de dimensões fractais tridimensionais referentes ao PAC.

Tabela 15 – Dados estatísticos das dimensões fractais calculadas para os flocos de PAC. Fonte: o Autor (2020).

$G_f (s^{-1})$	média	Desv.pad.	Max	Min	Int 95%
30	2,067	0,121	2,361	1,332	0,017
40	2,164	0,130	2,525	1,539	0,016
50	2,299	0,115	2,599	1,905	0,016
60	2,546	0,143	2,839	2,013	0,025

Para o PAC, diferentemente do que para os ensaios com sulfato de alumínio, o aumento do gradiente de velocidade de floculação implicou em maiores dimensões fractais. Isso evidencia a complexidade do processo de formação dos flocos – com a mudança do coagulante utilizado pode alterar significativamente a estrutura dos flocos. A baixa agitação do jarro pode permitir que agregados mais alongados se colidem e aglutinem, o que resulta em menor dimensão fractal; enquanto um grau elevado de agitação fragmenta os flocos em estruturas menores e menos alongadas.

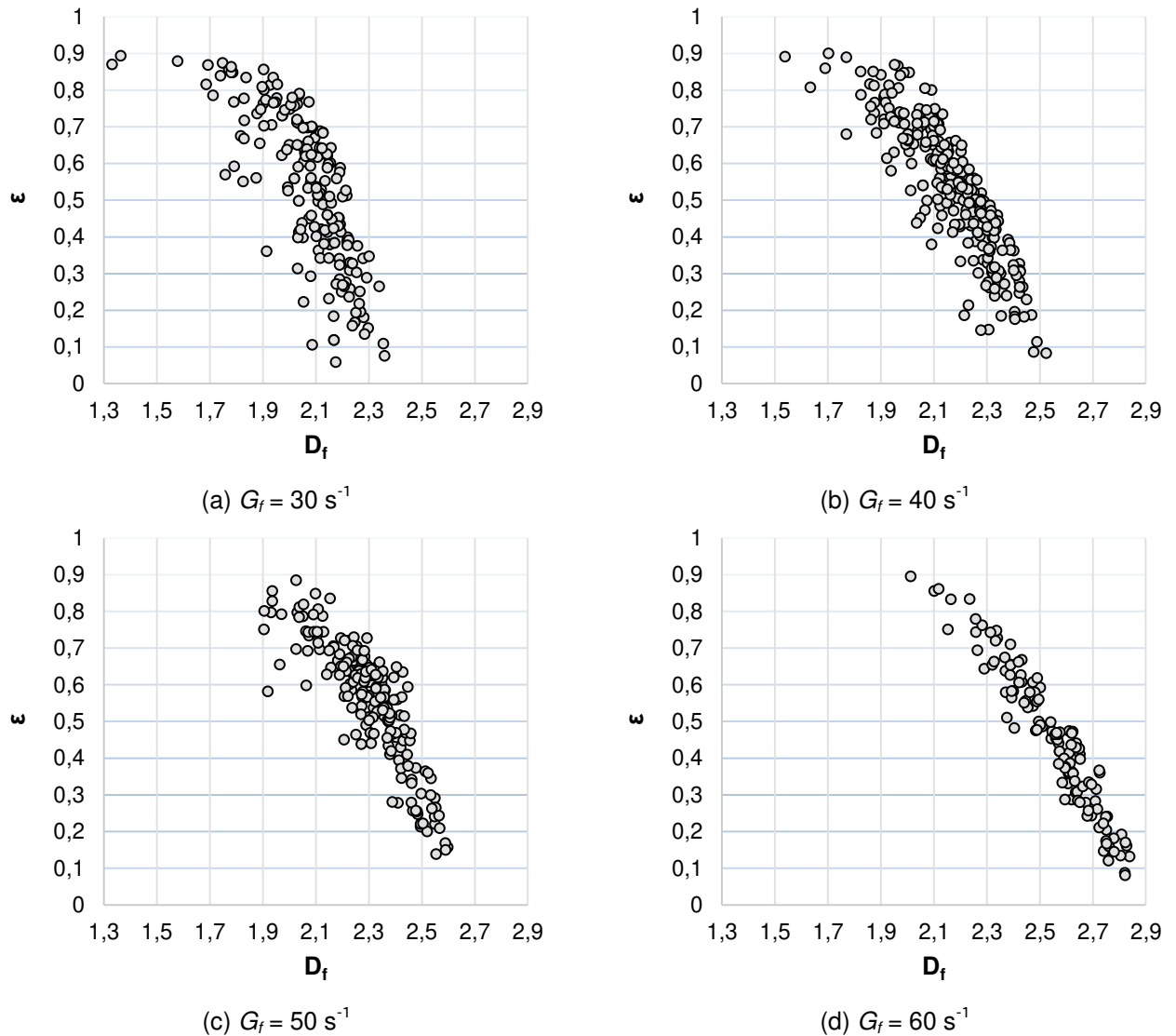
Ocorreu um aumento não apenas nos valores médios de dimensão fractal tridimensional, mas também nos valores mínimos e máximos de cada ensaio. O maior valor de dimensão fractal foi reportado para $G_f = 60 s^{-1}$, igual a 2,839; enquanto a menor dimensão fractal, 1,332, ocorreu para $G_f = 30 s^{-1}$. A Tabela 15 também explicita a redução das faixas de dimensões fractais com o aumento da intensidade da floculação: as faixas de 30 e 40 s^{-1} foram maiores do que em 50 e 60 s^{-1} .

Em concordância com o presente estudo, Xu *et al.* (2014) também relataram aumento das dimensões fractais com o aumento dos gradientes de velocidade. Com a utilização do PAC, os referidos autores avaliaram estruturas dos flocos de ácido húmico por meio da aplicação da técnica de espalhamento de luz. Os flocos formados sob 100 e 150 rpm de agitação apresentaram $D_f = 2,24$; para 200 apresentaram $D_f = 2,26$; $D_f = 2,37$ para 300 rpm e o maior valor de dimensão fractal foi de 2,38 em 400 rpm.

4.2.4 Porosidades

Na Figura 46 são apresentadas as relações entre porosidades e dimensões fractais tridimensionais.

Figura 46 – Relação entre porosidade e dimensão fractais para PAC.



Fonte: o Autor (2020).

Pela Figura 46.a, gradiente de floculação igual a 30 s^{-1} , pode-se notar que a porosidade máxima do floco, em torno de 0,90, é relacionada a uma dimensão fractal entre 1,30 e 1,40. Já na Figura 46.d, para um gradiente de 60 s^{-1} , a mesma ordem de porosidade corresponde a um floco com dimensão fractal próxima a 2,00. Apesar de ser mais compacta em $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$, o agregado é tão poroso quanto o floco mais aberto em $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$. Em contraste, os

flocos menos porosos em $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ ocorrem em dimensões fractais próximas a 2,40, enquanto essa ordem no $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ indica flocos com porosidades entre 0,50 e 0,70.

Os dados estatísticos estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Dados estatísticos para a porosidade de flocos de PAC. Fonte: o Autor (2020).

$G_f (\text{s}^{-1})$	média	Desv.pad.	Max	Min	Int 95%
30	0,527	0,173	0,893	0,058	0,025
40	0,535	0,145	0,900	0,082	0,017
50	0,556	0,129	0,884	0,138	0,018
60	0,450	0,159	0,895	0,080	0,028

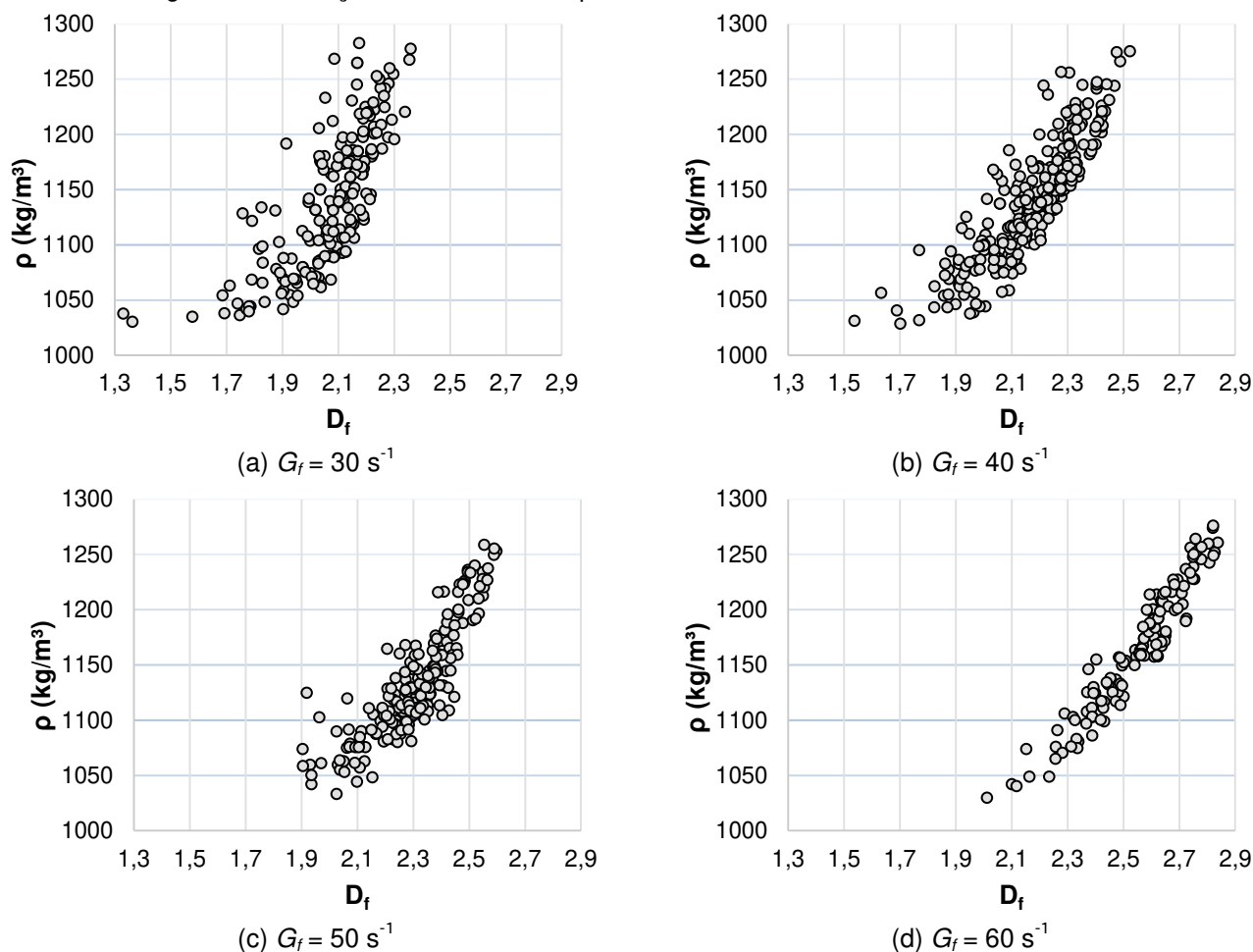
Nota-se, para $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$, uma média de porosidade de 52,7%, acompanhado com o maior desvio padrão calculado dentre os quatro ensaios, igual a 0,173. Isso significa que a média deste gradiente não representa tão bem a amostra quanto os demais. Dos gradientes de $G_f = 30$ a 50 s^{-1} , percebe-se pouca variação na porosidade, variam de 52,7 a 55,6%. Para o gradiente de velocidade de 60 s^{-1} foi calculada uma média de 45% de porosidade, a menor dentre os ensaios. Apesar do desvio padrão de 0,159, é esperado que menores porosidades sejam atribuídas aos flocos descritos por maiores dimensões fractais, como é o caso do referido gradiente. Vale lembrar que os flocos formados sob gradiente de 60 s^{-1} tiveram dimensões fractais de 2,01 a 2,84. Somado a isso, o parâmetro de forma (b) e os tamanhos médios dos flocos sob gradiente de 60 s^{-1} foram os menores reportados, o que reduz a porosidade.

A menor porosidade calculada nos ensaios ocorreu em $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$, correspondente à porosidade de 5,8% e dimensão fractal 2,18. A elipse aproximada pelo *ImageJ* foi descrita por eixo maior igual a 0,17 mm e eixo menor 0,165 mm, configurando uma elipse próxima à circunferência. Foi um dos menores flocos observados no ensaio. Portanto, o pequeno volume e elevada esfericidade resultou em baixa porosidade.

4.2.5 Massas específicas

Na Figura 47 são introduzidos os gráficos que relacionam dimensão fractal com massa específica dos flocos.

Figura 47 – Relação entre massas específicas e dimensões fractais de flocos de PAC.



Fonte: o Autor (2020).

Na Tabela 17 são apresentados os dados estatísticos para as massas específicas calculadas.

Tabela 17 – Dados estatísticos para massa específica dos flocos de PAC. Fonte: o Autor (2020).

$G_f (\text{s}^{-1})$	Média (kg/m^3)	Desv.pad.	Max (kg/m^3)	Min (kg/m^3)	Int 95%
30	1141	52	1282	1030	7
40	1139	44	1275	1028	5
50	1132	39	1258	1033	5
60	1164	48	1276	1030	8

Conforme pontuado por Moruzzi *et al.* (2020), a porosidade é uma propriedade inversa à massa específica. Um floco de baixa porosidade, desse modo, possui massa específica elevada. Os melhores resultados de massa específica foram para os agregados produzidos no gradiente de floculação de 60 s^{-1} , com valor médio de 1164 kg/m^3 , que também foi o gradiente com os maiores valores de dimensão fractal e com as menores porosidades.

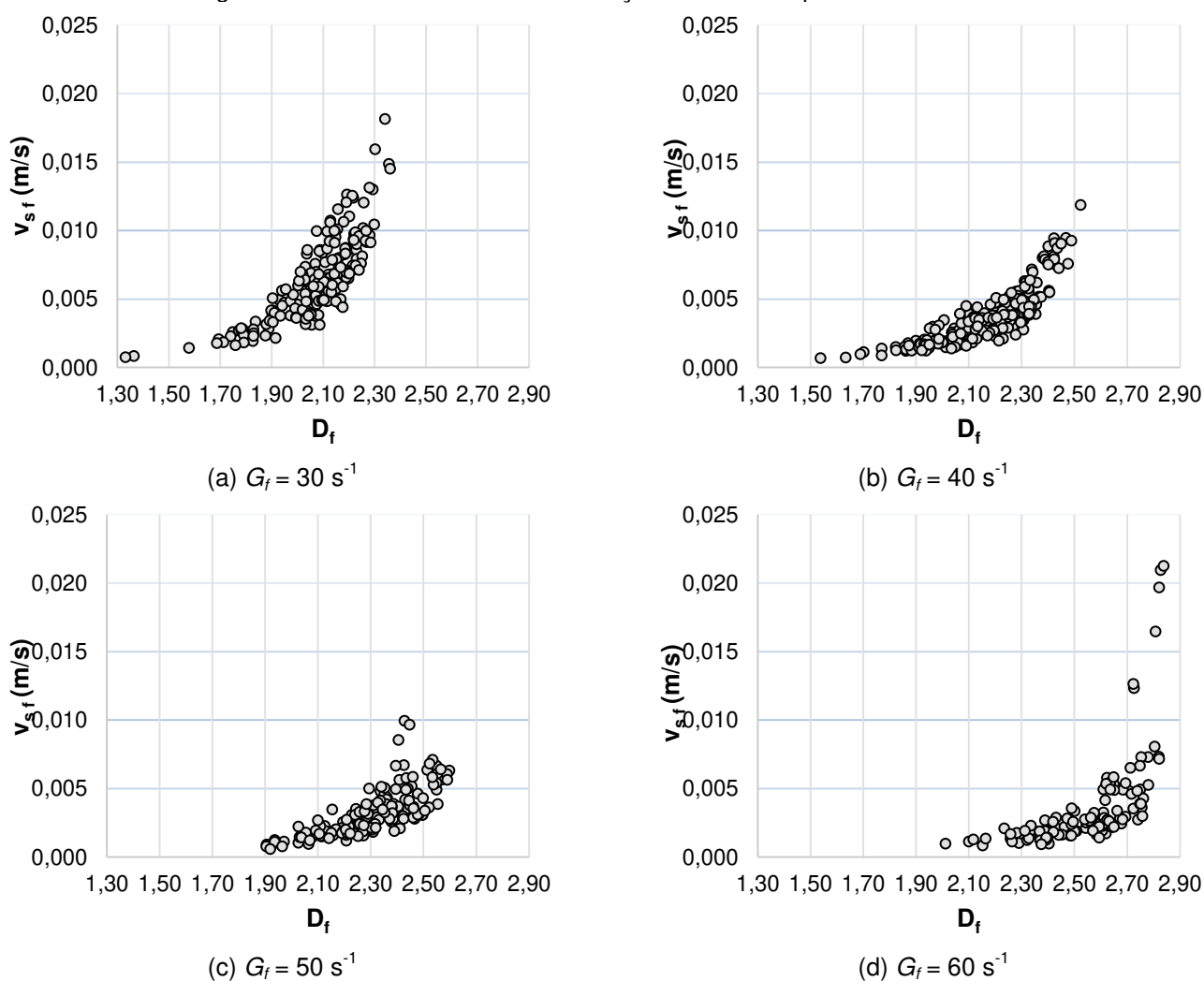
Assim como para a porosidade, a proximidade dos valores médios de massa específica dos gradientes 30 a 50 s^{-1} foram notados.

O agregado cuja massa específica foi a máxima estimada – com valor de 1282 kg/m^3 – formou-se sob o gradiente de velocidade de 30 s^{-1} , que também é o floco menos poroso calculado (porosidade de 5,8%). Da mesma forma, o floco de menor massa específica correspondeu ao floco de maior porosidade, submetido ao gradiente de velocidade de floculação de 40 s^{-1} .

4.2.6 Velocidades dos fractais

Na Figura 48 são apresentadas relações das velocidades de sedimentação dos fractais e dimensões fractais.

Figura 48 – Velocidades de sedimentação dos fractais para flocos de PAC.



Fonte: o Autor (2020).

A Figura 48 evidencia a tendência dos flocos mais compactos exibirem velocidades de sedimentação mais elevadas. Em $G_f = 40$ e 60 s^{-1} , os flocos mais arredondados corresponderam às maiores velocidades de cada ensaio: em 40 s^{-1} , o floco descrito por dimensão fractal 2,52 apresentou velocidade de sedimentação aproximada de 12 mm/s, enquanto em 60 s^{-1} o floco de $D_f = 2,83$ teve velocidade de sedimentação estimada de 21 mm/s. Em 30 s^{-1} , a sedimentação máxima de aproximadamente 18 mm/s ocorreu para um agregado de dimensão fractal 2,34 e em 50 s^{-1} a velocidade máxima de 10 mm/s ocorreu para o floco com $D_f = 2,43$. Na Tabela 18 são mostrados os dados estatísticos para as velocidades fractais.

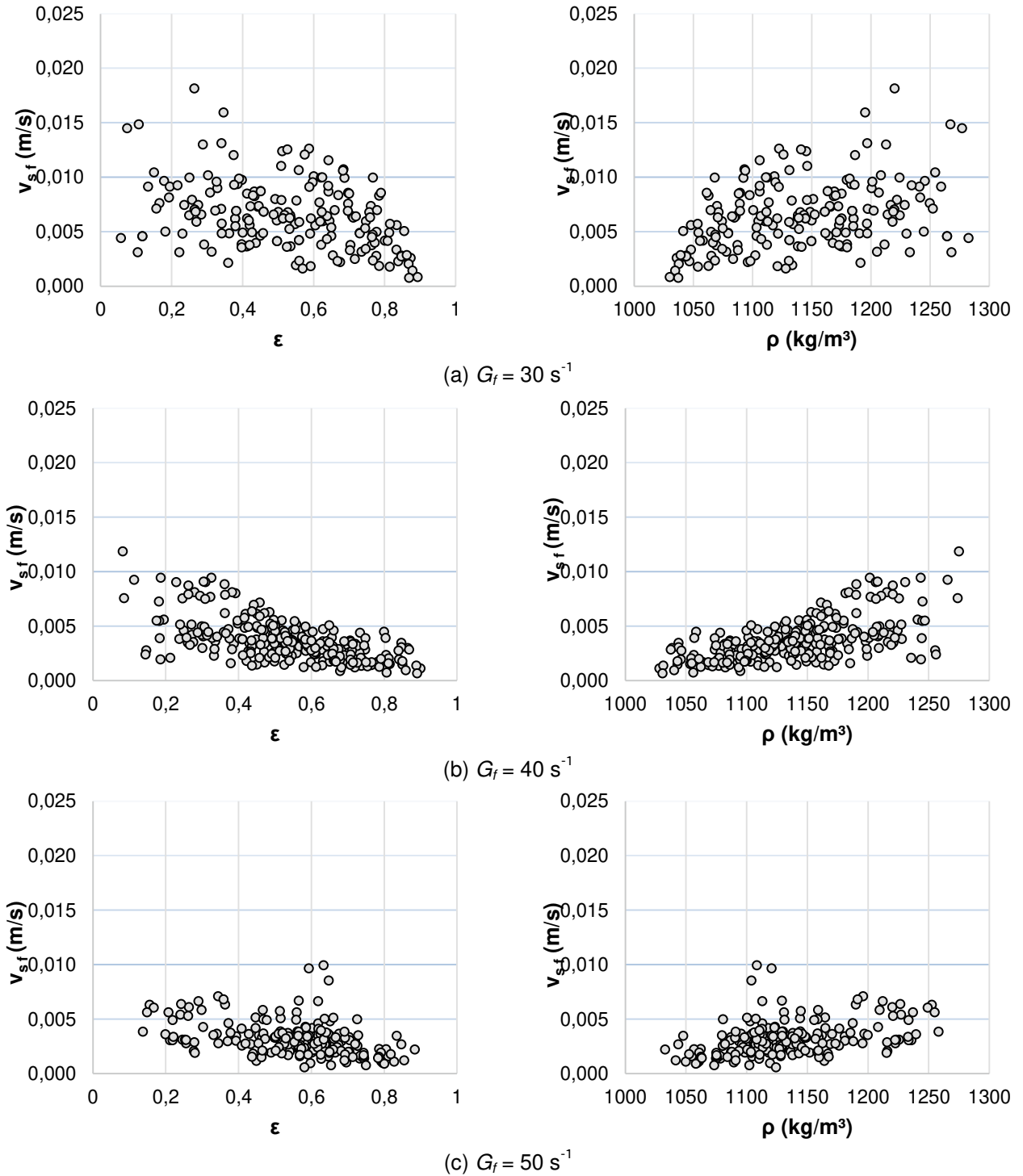
Tabela 18 – Dados estatísticos para as velocidades de sedimentação dos fractais formados pelo PAC. Fonte: o Autor (2020).

$G_f (\text{s}^{-1})$	<i>média</i>	<i>Desv.pad.</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Int 95%</i>
30	0,0064	0,0024	0,0181	0,0007	0,0003
40	0,0037	0,0014	0,0119	0,0007	0,0002
50	0,0031	0,0012	0,0099	0,0006	0,0002
60	0,0036	0,0021	0,0212	0,0008	0,0004

Os flocos formados sob gradiente de velocidade de 30 s^{-1} demonstraram melhores valores de velocidade de sedimentação, com velocidades que variaram de 0,7 a 18,1 mm/s, sendo o valor médio igual a 6,4 mm/s. Flocos que se sedimentaram acima dessa média foram caracterizados por $D_f > 2,00$. Flocos formados sob $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ apresentaram velocidades de 0,8 mm/s a 21,2 mm/s, cujo valor máximo é maior do que a velocidade máxima de sedimentação em $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$. Apesar desse pico, a Figura 48.d fornece a informação de que a maioria dos flocos de $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ apresentaram velocidades inferiores a 10 mm/s.

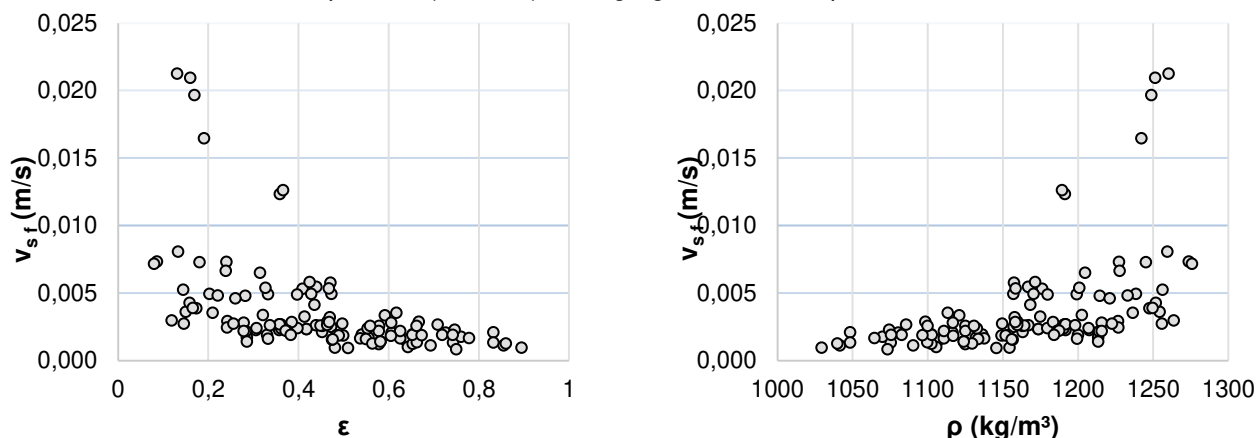
Nas Figuras 49 e 50 são explicitados gráficos que relacionam as porosidades e massas específicas dos agregados com as velocidades de sedimentação dos fractais.

Figura 49 – Relação entre velocidades de sedimentação com a porosidade (à esquerda) e massa específica (à direita) dos agregados de PAC para: (a) 30 s^{-1} , (b) 40 s^{-1} e (c) 50 s^{-1} .



(c) $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$
 Fonte: o Autor (2020).

Figura 50 – Relação entre velocidades de sedimentação com a porosidade (à esquerda) e massa específica (à direita) dos agregados de PAC para 60 s^{-1} .



Fonte: o Autor (2020).

Observando-se a Figura 49.b, pode-se concluir que a maior velocidade de sedimentação do ensaio de $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ correspondeu à mínima porosidade e à máxima massa específica do referido gradiente (conforme Tabelas 16 e 17), o que não é relatado para os demais gradientes de velocidade de floculação, apesar de que existe a mesma tendência. Um fato interessante da Figura 49.c foi que o agregado mais sedimentável para $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ foi caracterizado por valores intermediários de porosidade e massa específica, e nesse caso a sedimentabilidade foi devido à compacidade e tamanho do floco (com $d_f = 0,377 \text{ mm}$). Nesse sentido, apresenta-se a Tabela 19, na qual são resumidos os parâmetros necessários para o cálculo das velocidades de sedimentação, referentes às mínimas e máximas velocidades estimadas para cada gradiente de velocidade de mistura lenta.

Tabela 19 – Resumo dos parâmetros dos agregados que apresentaram as menores e maiores velocidades para cada gradiente ensaiado para o PAC. Fonte: o Autor (2020).

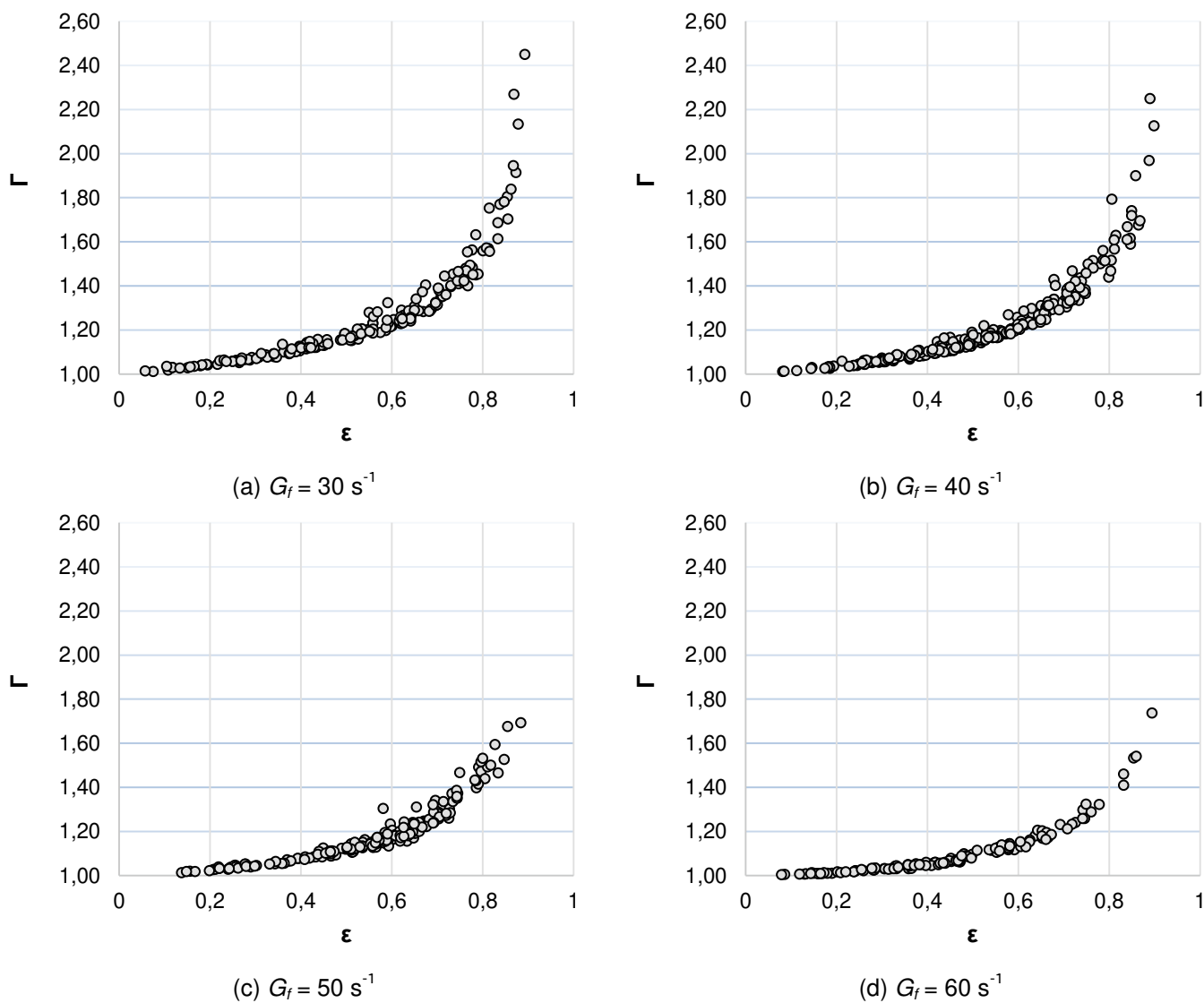
$G_f (\text{s}^{-1})$	$d_f (\text{mm})$	b	D_f	ε	$\rho (\text{kg/m}^3)$	$v_{sf} (\text{m/s})$
30	0,377	4,89	2,34	0,265	1220	0,018132
	0,124		1,33	0,869	1037	0,000745
40	0,278	3,04	2,52	0,082	1275	0,011855
	0,128		1,54	0,891	1031	0,000668
50	0,377	2,09	2,43	0,634	1109	0,009921
	0,079		1,92	0,581	1124	0,000572
60	0,384	1,37	2,84	0,131	1260	0,021242
	0,123		2,15	0,750	1074	0,000832

Portanto, assim como para os flocos formados com a utilização do sulfato de alumínio, observa-se maior influência das dimensões fractais e massas específicas dos flocos nos valores de velocidade de sedimentação do que as porosidades, visto que uma pequena

variação na porosidade não altera significativamente a sedimentação do floco, ao contrário da massa específica e da dimensão fractal.

A Figura 51 mostra a relação entre porosidade e o quociente adimensional Γ .

Figura 51 – Relação entre porosidades e quocientes adimensionais Γ dos agregados fractais formados pelo PAC.



Fonte: o Autor (2020).

Para todos os gradientes ensaiados, foram verificados valores de quociente adimensional Γ maiores do que 1,00. Isto indica que as velocidades de sedimentação dos fractais foram superiores às velocidades das esferas de Stokes para todos os flocos formados nas condições impostas nos ensaios de coagulação e floculação para o PAC.

O valor médio do quociente adimensional para $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ foi igual a 1,260, com valores que variaram de 1,010 a 2,449. Em $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$, a média dessa relação foi de 1,225, com valor mínimo de 1,011 e máximo de 2,248. Flocos submetidos ao gradiente de 50 s^{-1} apresentaram o valor médio de Γ de 1,187, com variação de 1,012 a 1,692; enquanto àqueles formados sob $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ tiveram a média de 1,104 para o parâmetro, com valor mínimo de 1,003 e máximo igual a 1,735. Portanto, conclui-se que a porosidade dos agregados contribuiu para a sedimentabilidade dos flocos, quando comparados com as esferas impermeáveis de Stokes.

4.3 SEDIMENTAÇÃO DOS FLOCOS COAGULADOS POR CLORETO FÉRRICO

No presente trabalho, foram estimadas as velocidades de sedimentação de flocos que permaneceram mais tempo nas imagens durante os ensaios. Quanto maior o número de imagens do floco, maior o detalhamento do seu formato, o que conduz a resultados mais confiáveis das velocidades e das demais propriedades. Neste contexto, devido à elevada sedimentabilidade dos flocos de cloreto férrico, os flocos não permaneceram em muitas imagens, e por isso nenhum floco de cloreto férrico foi selecionado pelo algoritmo. Neste trabalho, foram selecionados flocos que eram identificados pelo algoritmo em pelo menos quatro imagens.

Desse modo, pode-se afirmar que o cloreto férrico é o coagulante responsável pelas velocidades de sedimentação mais rápidas do presente estudo, devido à ausência de agregados em mais de quatro imagens durante os ensaios de sedimentação. Outro fator que comprova isso é a duração do ensaio de sedimentação. Enquanto que o tempo de captura de imagens foi de 15 minutos para o SA e PAC, os ensaios de sedimentação para o CF duraram 7 minutos.

Como a metodologia se baseou na seleção de flocos pelo algoritmo, então as conclusões serão levantadas conforme os cálculos para os agregados formados pela coagulação do SA e PAC.

4.4 COMPARATIVO ENTRE OS FLOCOS DE SULFATO DE ALUMÍNIO E POLICLORETO DE ALUMÍNIO

O objetivo deste item é fazer um comparativo entre os resultados obtidos para os flocos formados por sulfato de alumínio e policloreto de alumínio. Como não foram selecionados flocos do PAC para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, a comparação será feita apenas para os gradientes de velocidade iguais a 30, 40, 50 e 60 s^{-1} .

4.4.1 Tamanho dos flocos

Os valores médios dos tamanhos de flocos formados sob coagulação de sulfato de alumínio apresentaram resultados superiores aos identificados para o PAC. O valor máximo de diâmetro de Feret foi registrado para o SA, sob gradiente de floculação de 50 s^{-1} . A maior dimensão correspondeu a 1,192 mm, enquanto a maior dimensão para o PAC foi igual a 0,639 mm para 30 s^{-1} . Apesar da eficiência do SA para todos os gradientes de floculação ensaiados, os flocos formados por PAC não demonstraram valores tão discrepantes.

4.4.2 Dimensões fractais tridimensionais

A Tabela 20 estão apresentados os dados estatísticos para dimensões fractais tridimensionais dos flocos formados por SA e PAC para os gradientes de velocidade iguais a 30, 40, 50 e 60 s^{-1} .

Tabela 20 – Dados estatísticos para dimensões fractais dos flocos de SA e PAC formados sob gradientes de velocidade iguais a 30, 40, 50 e 60 s^{-1} . Fonte: o Autor (2020).

$G_f(\text{s}^{-1})$	AS					PAC				
	média	Desv.pad.	Max	Min	Int 95%	média	Desv.pad.	Max	Min	Int 95%
30	2,3480	0,1045	2,5951	1,7951	0,0128	2,067311	0,1213	2,3610	1,3323	0,0173
40	2,2262	0,1082	2,5195	1,7381	0,0080	2,163867	0,1296	2,5247	1,5390	0,0155
50	2,4070	0,1377	2,7097	1,9356	0,0220	2,299288	0,1154	2,5989	1,9050	0,0160
60	2,3079	0,1315	2,6755	1,6281	0,0117	2,545666	0,1426	2,8394	2,0132	0,0251

Para os flocos de PAC, foi observado que quanto maior o gradiente de velocidade, maior o valor médio de dimensão fractal, enquanto houve uma oscilação negativa nas dimensões fractais do SA quando o gradiente de velocidade elevou para 40 s^{-1} (portanto ocorreu uma reestruturação dos flocos). O menor valor de dimensão fractal foi para $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ do PAC, igual a $D_f = 1,33$. Isso foi explicado por Li *et al.* (2006), no qual discorre sobre o processo de desestabilização das partículas sólidas com coagulantes poliméricos, como é o caso do

PAC. As partículas sólidas se ligam fortemente, formando pontes para os gradientes de velocidade mais baixos, o que acarreta em menores valores de dimensão fractal. A maior dimensão fractal encontrada também foi para o PAC, sob gradiente de 60 s^{-1} , correspondente a 2,94.

4.4.3 Porosidades

Os flocos de SA tiveram maior variabilidade na porosidade em comparação aos flocos de PAC. Para o SA, foi observada uma porosidade mínima igual a 0,03 para o gradiente de floculação igual a 30 s^{-1} , enquanto a menor porosidade do PAC foi igual a 0,058, também para o mesmo gradiente. Destaca-se que as porosidades mais elevadas também foram observadas para o SA, cujo valor máximo registado foi de 0,943 para $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$, e o maior valor de porosidade dos flocos de PAC foi igual a 0,9, para $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$.

Para os gradientes de 30 e 40 s^{-1} , os valores médios de porosidade calculados para o SA, foram inferiores aos calculados para o PAC. Já para os gradientes de 50 e 60 s^{-1} , os flocos do SA apresentaram porosidade média superior aos agregados de PAC.

4.4.4 Massas específicas

Para os gradientes de 30 e 40 s^{-1} , os resultados para massa específica do SA e PAC se mostraram bem próximos, cujos valores médios variaram entre 1139 a 1142 kg/m^3 . Sob gradiente de floculação de 50 s^{-1} , os flocos de SA apresentaram média de 1124 kg/m^3 , enquanto esse valor para o PAC foi igual a 1132 kg/m^3 . A maior discrepância notada foi para a massa específica do PAC sob 60 s^{-1} , com 1164 kg/m^3 contra 1126 kg/m^3 do SA, sob mesmo gradiente.

4.4.5 Velocidades dos fractais

Os valores médios de velocidades calculados se mostraram melhores para o sulfato de alumínio em todos os gradientes de velocidade de mistura lenta. Foi notado um valor máximo de $67,6 \text{ mm/s}$ para um floco de SA formado a $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$. Neste estudo, foi evidenciado que o tamanho e massa específica dos agregados têm maior influência nas velocidades de sedimentação do que a porosidade e o fluxo interno nos flocos para ambos os coagulantes químicos. As maiores velocidades calculadas foram relacionados a elevadas

dimensões fractais e massas específicas, e não necessariamente aos menores valores de porosidade.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

A remoção de cor e turbidez no tratamento de água está diretamente associada ao sucesso nas etapas de coagulação, floculação e sedimentação. Por isso, é imprescindível o entendimento da formação dos agregados para que estes apresentem boa sedimentabilidade nos decantadores. Todavia, as partículas floculentas são extremamente complexas, e a previsão do comportamento não é pragmática. Além de se apresentarem em inúmeros volumes e estruturas, a força que mantém as partículas primárias é importante no estudo.

Neste trabalho foi utilizado o sistema PIV para a obtenção dos formatos dos flocos. Por meio desse método não-intrusivo, foram extraídas informações das partículas apenas em um plano, o que dificultou a definição do volume dos flocos. O volume dos flocos está totalmente ligado à dimensão fractal, à porosidade e à massa específica dos flocos e, portanto, uma estimativa errônea das dimensões dos flocos também conduz a erros no cálculo de suas propriedades morfológicas e nas velocidades de sedimentação.

A identificação visual dos flocos nas imagens é um processo muito demorado. Para selecionar os flocos do estudo, foi desenvolvido um algoritmo na linguagem VBA que mapeou a trajetória dos agregados ao longo das imagens. O código foi validado comparando-se os levantamentos visuais das imagens de maior número de flocos, para cada gradiente de velocidade estudado, com a seleção do algoritmo. Esta validação mostrou que mais de 90% dos agregados selecionados pelo algoritmo foram bem sucedidas.

Em seguida, foram estimadas as morfologias e as velocidades de sedimentação de flocos formados por dois coagulantes químicos: o sulfato de alumínio e policloreto de alumínio. Também foram feitos ensaios para os processos de coagulação, floculação e sedimentação para o cloreto férrico, entretanto foram extraídas poucas informações dos flocos, visto que a sedimentação para o sal férrico foi mais rápida do que para os demais coagulantes. Isso implicou que os flocos férricos permaneceram pouco tempo nas imagens, então foram realizados cálculos apenas para o SA e o PAC.

Para o sulfato de alumínio, foram aplicadas dosagens de 2,5 mg/L de Al^{3+} , pH de coagulação igual a 7,41; e para o PAC foram utilizados 30 mL de uma solução com

concentração de 2,3% do coagulante, com pH de coagulação igual a 8,45. Dentre a aplicação desses dois coagulantes, os maiores valores de velocidade de sedimentação foram notados para o SA. A média das velocidades de sedimentação dos flocos formados pelo coagulante foi 16 mm/s sob gradiente de floculação de 20 s^{-1} , contra 6,4 mm/s para o PAC a $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$.

A sedimentabilidade dos flocos de SA foi maior do que do PAC para todos os gradientes de velocidade. Por exemplo, para o gradiente de velocidade de 60 s^{-1} , o valor médio calculado para o PAC representou 61% da média das velocidades calculada para o SA: 3,6 mm/s para o primeiro coagulante, contra 5,9 mm/s do sal.

Foi mostrado, ainda, que a média de velocidades para o sulfato de alumínio diminuiu com o aumento do gradiente de floculação: comparando-se os resultados entre 20 e 60 s^{-1} , ocorreu uma redução de 63% na média das velocidades: 16 mm/s para 20 s^{-1} , contra 5,92 mm/s para 60 s^{-1} . Para o PAC, a maior média de velocidade de sedimentação foi calculada para o gradiente de velocidade de 30 s^{-1} , igual a 6,4 mm/s, e o valor se reduziu para 3,6 mm/s em 60 s^{-1} , representando uma queda de 43,75%.

Ao analisar os agregados fractais, a massa específica dos flocos se mostrou mais influente na sedimentação do que a porosidade: os flocos mais densos tiveram maiores velocidades de sedimentação, enquanto flocos muito porosos apresentaram baixos valores de massa específica, o que prejudicou a sedimentabilidade. Por exemplo, a velocidade de sedimentação máxima para o PAC em $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ foi de 11,85 mm/s: um floco com $D_f = 2,52$ e $\rho_f = 1275 \text{ kg/m}^3$ (neste caso específico, a velocidade máxima correspondeu ao floco de maior massa específica e maior dimensão fractal). A porosidade do agregado foi igual a 8,24%. Flocos menos porosos são mais densos, o que facilita a sedimentação.

Os resultados evidenciaram que as velocidades de sedimentação dos agregados fractais foram superiores às velocidades estimadas para as esferas impermeáveis de Stokes, para ambos os coagulantes químicos e para todos os gradientes de velocidade de floculação ensaiados. Para o SA, sob 50 s^{-1} , um floco chegou a apresentar uma velocidade de sedimentação 3,82 vezes maior do que a velocidade de Stokes. Portanto, a porosidade pode minimizar a força de arrasto, aumentando as velocidades de sedimentação dos agregados, quando comparado com uma esfera de mesmo tamanho e mesma massa específica. Os menores valores encontrados para o quociente adimensional Γ corresponderam aos flocos de menor porosidade, isto é, os flocos com porosidades

próximas a 0% apresentaram velocidades de sedimentação de fractais próximas às velocidades de Stokes.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo para o reconhecimento dos flocos nas sequências de imagens. Este algoritmo pode ser aprimorado em forma de programa computacional, para que não reconheça automaticamente os flocos em apenas uma combinação de imagens, mas também reconheça automaticamente os flocos de uma combinação para outra. Isso reduziria bastante o tempo para a seleção de dados.

Para melhorar a comparação realizada neste trabalho, também sugere-se que esses estudos sejam feitos nas dosagens ótimas de cada coagulante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C.R. **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. McGraw-Hill: 1990.

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

BUSHELL, G.C.; YAN Y.D.; WOODFIELD, D.; RAPER, J.; AMAL, R. On techniques for the measurement of the mass fractal dimension of aggregates. **Advances in Colloid and Interface Science**, p. 1-50, v. 95, n. 1, jan. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00078-6](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00078-6)

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

CHENG, W.P.; CHANG, J.N.; CHEN, P.H.; YU, R.F.; HUANG Y.W.; HSIEH, Y.J. Monitoring floc formation to achieve optimal flocculation in water treatment plants. **Environmental Engineering Science**. p. 523-530, v. 27, n. 6, jun. 2010. <https://doi.org/10.1089/ees.2010.0065>

CHING, H.W.; TANAKA, T.S.; ELIMELECH, M. Dynamics of coagulation of kaolin particles with ferric chloride. **Water Research**, p. 559-569, v. 28, n. 3, mar. 1994. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90007-8)

DALTIN, D. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2011.

DI BERNARDO, L. DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: RiMa, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522006000200001>

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

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

JOHNSON, C.P.; L,X. LOGAN, B.E. Settling velocities of fractal aggregates. **Environmental Science & Technology**, p. 1911-1918, v. 30, n. 6, maio 1996. <https://doi.org/10.1021/es950604g>

JIN, P.K.; WANG, X.C.; CHAI, H. Evaluation of floc strength by morphological analysis and PDA online monitoring. **Water Science & Technology**. p. 117-124, v. 56, n. 10, nov. 2007.
<https://doi.org/10.2166/wst.2007.781>

LI, X.; ZHAI, X.; CHU, H.P. Characterization of the flocculation process from the evolution of particle size distributions. **Journal of Environmental Engineering**. p. 369-375, v. 134, n. 5, 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))

LI, T.; ZHU, Z.; WANG, D.; YAO, C.; TANG, H. Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms. **Powder Technology**, p. 104-110, v. 168, n. 2, out. 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.07.003>

LI, T.; ZHU, Z.; WANG, D.; YAO, C.; TANG, H. The strength and fractal dimension characteristics of alum-kaolin flocs. **International Journal of Mineral Processing**. p. 23-29, v. 82, n. 1, fev. 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.012>

LIMA, R.M.F.L.; LUZ, J.A.M. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. **Revista Escola de Minas**, p. 155-159, v. 54, n. 2, abr. 2001. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672001000200014>

MENDES, C.G.N.M. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

MENDES, Y.C. **Evolução da distribuição do tamanho de partículas na floculação de água de baixa turbidez**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MERKUS, H.G. **Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality**. Springer, 2009.

MORUZZI, R.B.; BRIDGEMAN, J.; SILVA, P.A.G. A combined experimental and numerical approach to the assessment of floc settling velocity using fractal geometry. **Water Science & Technology**, v. 81, n. 5, abr. 2020. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.171>

MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, A.L.; CONCEIÇÃO, F.T.; GREGORY, J.; CAMPOS, L.C. Fractal dimension of large aggregates under different floculation conditions. **Science of the Total Environment**, p. 807-814, v. 1, n. 607, dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.194>

OLIVEIRA, A.L.; MORENO, P.; SILVA, P.A.G.; JULIO, M.; MORUZZI, R.B. Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter. **Desalination and Water Treatment**, p. 16703-16720, v. 57, n. 36, ago. 2016.

OLIVEIRA, A.S. **Avaliação da morfologia e da distribuição do tamanho das partículas para pontos distintos do diagrama de coagulação/floculação**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

PAIVA, M.M. **Bactérias redutoras de sulfato: estudo de substâncias poliméricas extracelulares e enzimas nos processos de adesão a substratos metálicos e de biocorrosão**. Tese (Doutorado) – Instituto Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2004.

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

RAFFEL, M. WILLERT, C. WERELEY, S. KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry: a practical guide**. Göttingen: Springer, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72308-0>

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

RUFINO, R.L. **Análise da velocidade crítica de escoamento e estudo reológico de polpas de caulim da bacia do rio Capim em dutos circulares**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

SÁ, C.H.M. **Avaliação experimental dos efeitos de parede da concentração de partículas e da reologia em um escoamento axial anular sólido-fluido não-newtoniano**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.

SERRA, T.; CASAMITJANA, X. Structure of the aggregates during the process of aggregation and breakup under a shear flow. **Journal of Colloid and Interface Science**, p. 505-511, v. 206, n. 2, out. 1998. <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5714>

SPICER, P.T.; PRATSINIS, S.E. Coagulation and fragmentation: universal steady-state particle-size distribution. **AIChE Journal**, p. 1612-1620, v. 42, n. 6, jun. 1996a. <https://doi.org/10.1002/aic.690420612>

SPICER, P.T.; PRATSINIS, S.E. Shear-induced flocculation: the evolution of floc structure and the shape of the size distribution at steady state. **Water Research**, p. 1049-1056, v. 30, n. 5, maio 1996b. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00253-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00253-7)

TANG, P.; GREENWOOD, J.; RAPER, J.A. A model to describe the settling behavior of fractal aggregates. **Journal of Colloid and Interface Science**, p. 210-219, v. 247, n. 1, mar. 2002. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.8028>

TERUKINA, I. El fotograma es una imagen estática... sin embargo, se mueve. **Razón y Palabra**. v. 10, n. 46, ago. 2005.

UFES. O blog da engenharia civil. Disponível em: <<https://ecivilufes.wordpress.com/>>. Acesso em: 10 ago. 2020.

UFSM. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <<http://jaraca.ufsm.br/>>. Acesso em: 18 jul. 2020.

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

WU, R.M.; LEE, D.J. Hydrodynamic drag force exerted on a moving floc and its implication to free-settling tests. **Water Research**, p. 760-768, v. 32, n. 3, mar. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00320-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00320-5)

XIAO, F.; LAM, K.; LI, X. Investigation and visualization of internal flow through particle aggregates and microbial flocs using particle image velocimetry. **Journal of Colloid and Interface Science**. p. 163-168, v. 397, mar. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.01.053>

XIAO, F.; LAM, K.M.; LI, X.Y.; ZHONG, R.S.; ZHANG, X.H. PIV characterisation of flocculation dynamics and floc structure in water treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. p. 27-35, v. 379, n.1-3, abr. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.053>

XU, W.; GAO, B.; DU, B.; XU, Z.; ZHANG, Y.; WEI, D. Influence of shear force on floc properties and residual aluminum in humic acid treatment by nano-Al₁₃. **Journal of Hazardous Materials**, p. 1-8, v. 271, abr. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.049>

YEPES, H.M.; BEDOYA, J.W.B.; ORTEGA, G.P. Clasificación de poros en carbones tratados térmicamente empleando microscopia assistida por computador. **Boletín de Ciencias de la Tierra**, n. 25, p. 81-92, jun. 2009.

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

APÊNDICE A – Algoritmo elaborado para a assimilação dos agregados para cada combinação de imagens.

```

Sub identifica_floco()

'Declaração de variáveis:

Dim Areal(3000), Area2(3000), Area3(3000), Area4(3000), Area5(3000), Area(5000) As Double
Dim Perl(3000), Per2(3000), Per3(3000), Per4(3000), Per5(3000), Per(5000) As Double
Dim Maior1(3000), Maior2(3000), Maior3(3000), Maior4(3000), Maior5(3000), Maior(5000) As Double
Dim Menor1(3000), Menor2(3000), Menor3(3000), Menor4(3000), Menor5(3000), Menor(5000) As Double
Dim AngEl1(3000), AngEl2(3000), AngEl3(3000), AngEl4(3000), AngEl5(3000), AngEl(5000) As Double
Dim Fmin1(3000), Fmin2(3000), Fmin3(3000), Fmin4(3000), Fmin5(3000), Fmin(5000) As Double
Dim Feret1(3000), Feret2(3000), Feret3(3000), Feret4(3000), Feret5(3000), Feret(5000) As Double
Dim Grau2(3000), Grau3(3000), Grau4(3000), Grau5(3000) As Double
Dim X1(3000), X2(3000), X3(3000), X4(3000), X5(3000), X(5000) As Double
Dim Y1(3000), Y2(3000), Y3(3000), Y4(3000), Y5(3000), Y(5000) As Double
Dim deslocamento(5000), teta(5000) As Double
Dim Nfloco(5000), Nfoto(5000), Nanterior(5000), Nfotoanterior(5000), contador(5000) As Integer
Dim Feretanterior(5000), DifFeret(5000) As Double
Dim distancia12, distancia23, distancia34, razao_area, razao_fmin As Double
Dim tg_teta, teta_rad, teta_grau, erro_teta, distancia_5 As Double
Dim i, n, j, w, z, k, cont, aux, flocos_foto5, flocos_contados As Integer 'contadores
Dim N1, N2, N3, N4, N5 As Integer 'número de flocos em cada imagem
Dim X_ant(300), Y_ant(300), N_ant(300), N_correspondente(5000), imprime(5000) As Double 'informações
dos flocos que aparecem na quinta foto da análise anterior

Dim floco2, floco3, floco4, floco5 As Double

Dim Nfloco2(3000), Nfloco3(3000), Nfloco4(3000), Nfloco5(3000) As Double
Dim Nfoto2(3000), Nfoto3(3000), Nfoto4(3000), Nfoto5(3000) As Double
Dim D2(3000), D3(3000), D4(3000), D5(3000) As Double
Dim Nanterior2(3000), Nanterior3(3000), Nanterior4(3000), Nanterior5(3000) As Double
Dim Nfotoanterior2(3000), Nfotoanterior3(3000), Nfotoanterior4(3000), Nfotoanterior5(3000) As Double
Dim Feretanterior2(3000), Feretanterior3(3000), Feretanterior4(3000), Feretanterior5(3000) As Double
Dim Ncorrespondente2(3000), Ncorrespondente3(3000), Ncorrespondente4(3000), Ncorrespondente5(3000) As
Double
Dim DFeret2(3000), DFeret3(3000), DFeret4(3000), DFeret5(3000) As Double
Dim imprime2(3000), imprime3(3000), imprime4(3000), imprime5(3000) As Double

'Atribuição das propriedades dos flocos que aparecem na quinta imagem da análise anterior:

i = 1
Do
    X_ant(i) = Sheets("anterior").Cells(i, 4)
    Y_ant(i) = Sheets("anterior").Cells(i, 5)
    N_ant(i) = Sheets("anterior").Cells(i, 1)
    flocos_foto5 = flocos_foto5 + 1
    i = i + 1
Loop Until (Sheets("anterior").Cells(i, 1) = 0)

'N... são os numeros de flocos contabilizados na primeira, segunda, terceira, quarta, ..., foto capturada
N1 = Sheets("Summary of Corte").Cells(2, 2)
N2 = Sheets("Summary of Corte").Cells(3, 2)
N3 = Sheets("Summary of Corte").Cells(4, 2)
N4 = Sheets("Summary of Corte").Cells(5, 2)
N5 = Sheets("Summary of Corte").Cells(6, 2)

'Atribuição dos valores para as áreas e coordenadas:

For i = 1 To N1
    Areal(i) = Sheets("Results").Cells(i + 1, 2)
    If Areal(i) > 1000 Then
        Areal(i) = Areal(i) / 1000
    End If
    X1(i) = Sheets("Results").Cells(i + 1, 6)
    If X1(i) > 1000 Then
        X1(i) = X1(i) / 1000
    End If

    Y1(i) = Sheets("Results").Cells(i + 1, 7)
    If Y1(i) > 1000 Then
        Y1(i) = Y1(i) / 1000
    End If

    Perl(i) = Sheets("Results").Cells(i + 1, 10)
    If Perl(i) > 1000 Then
        Perl(i) = Perl(i) / 1000
    End If

    Maior1(i) = Sheets("Results").Cells(i + 1, 11)

```

```

    If Maior1(i) > 1000 Then
        Maior1(i) = Maior1(i) / 1000
    End If

    Menor1(i) = Sheets("Results").Cells(i + 1, 12)
    If Menor1(i) > 1000 Then
        Menor1(i) = Menor1(i) / 1000
    End If

    AngEl1(i) = Sheets("Results").Cells(i + 1, 13)
    If AngEl1(i) > 1000 Then
        AngEl1(i) = AngEl1(i) / 1000
    End If

    Fmin1(i) = Sheets("Results").Cells(i + 1, 18)
    If Fmin1(i) > 1000 Then
        Fmin1(i) = Fmin1(i) / 1000
    End If

    Feret1(i) = Sheets("Results").Cells(i + 1, 14)
    If Feret1(i) > 1000 Then
        Feret1(i) = Feret1(i) / 1000
    End If
Next

For i = 1 To N2
    Area2(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1, 2)
    If Area2(i) > 1000 Then
        Area2(i) = Area2(i) / 1000
    End If
    X2(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1, 6)
    If X2(i) > 1000 Then
        X2(i) = X2(i) / 1000
    End If
    Y2(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1, 7)
    If Y2(i) > 1000 Then
        Y2(i) = Y2(i) / 1000
    End If

    Per2(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1, 10)
    If Per2(i) > 1000 Then
        Per2(i) = Per2(i) / 1000
    End If

    Maior2(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1, 11)
    If Maior2(i) > 1000 Then
        Maior2(i) = Maior2(i) / 1000
    End If

    Menor2(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1, 12)
    If Menor2(i) > 1000 Then
        Menor2(i) = Menor2(i) / 1000
    End If

    AngEl2(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1, 13)
    If AngEl2(i) > 1000 Then
        AngEl2(i) = AngEl2(i) / 1000
    End If

    Fmin2(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1, 18)
    If Fmin2(i) > 1000 Then
        Fmin2(i) = Fmin2(i) / 1000
    End If

    Feret2(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1, 14)
    If Feret2(i) > 1000 Then
        Feret2(i) = Feret2(i) / 1000
    End If
Next

For i = 1 To N3
    Area3(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2, 2)
    If Area3(i) > 1000 Then
        Area3(i) = Area3(i) / 1000
    End If
    X3(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2, 6)
    If X3(i) > 1000 Then
        X3(i) = X3(i) / 1000
    End If
    Y3(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2, 7)
    If Y3(i) > 1000 Then
        Y3(i) = Y3(i) / 1000
    End If

    Per3(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2, 10)
    If Per3(i) > 1000 Then

```

```

        Per3(i) = Per3(i) / 1000
    End If

    Maior3(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2, 11)
    If Maior3(i) > 1000 Then
        Maior3(i) = Maior3(i) / 1000
    End If

    Menor3(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2, 12)
    If Menor3(i) > 1000 Then
        Menor3(i) = Menor3(i) / 1000
    End If

    AngEl3(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2, 13)
    If AngEl3(i) > 1000 Then
        AngEl3(i) = AngEl3(i) / 1000
    End If

    Fmin3(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2, 18)
    If Fmin3(i) > 1000 Then
        Fmin3(i) = Fmin3(i) / 1000
    End If

    Feret3(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2, 14)
    If Feret3(i) > 1000 Then
        Feret3(i) = Feret3(i) / 1000
    End If

Next

For i = 1 To N4
    Area4(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3, 2)
    If Area4(i) > 1000 Then
        Area4(i) = Area4(i) / 1000
    End If
    X4(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3, 6)
    If X4(i) > 1000 Then
        X4(i) = X4(i) / 1000
    End If
    Y4(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3, 7)
    If Y4(i) > 1000 Then
        Y4(i) = Y4(i) / 1000
    End If
    Per4(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3, 10)
    If Per4(i) > 1000 Then
        Per4(i) = Per4(i) / 1000
    End If

    Maior4(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3, 11)
    If Maior4(i) > 1000 Then
        Maior4(i) = Maior4(i) / 1000
    End If

    Menor4(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3, 12)
    If Menor4(i) > 1000 Then
        Menor4(i) = Menor4(i) / 1000
    End If

    AngEl4(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3, 13)
    If AngEl4(i) > 1000 Then
        AngEl4(i) = AngEl4(i) / 1000
    End If

    Fmin4(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3, 18)
    If Fmin4(i) > 1000 Then
        Fmin4(i) = Fmin4(i) / 1000
    End If

    Feret4(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3, 14)
    If Feret4(i) > 1000 Then
        Feret4(i) = Feret4(i) / 1000
    End If

Next

For i = 1 To N5
    Area5(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3 + N4, 2)
    If Area5(i) > 1000 Then
        Area5(i) = Area5(i) / 1000
    End If
    X5(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3 + N4, 6)
    If X5(i) > 1000 Then
        X5(i) = X5(i) / 1000
    End If
    Y5(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3 + N4, 7)
    If Y5(i) > 1000 Then

```

```

        Y5(i) = Y5(i) / 1000
    End If
    Per5(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3 + N4, 10)
    If Per5(i) > 1000 Then
        Per5(i) = Per5(i) / 1000
    End If

    Maior5(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3 + N4, 11)
    If Maior5(i) > 1000 Then
        Maior5(i) = Maior5(i) / 1000
    End If

    Menor5(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3 + N4, 12)
    If Menor5(i) > 1000 Then
        Menor5(i) = Menor5(i) / 1000
    End If

    AngEl5(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3 + N4, 13)
    If AngEl5(i) > 1000 Then
        AngEl5(i) = AngEl5(i) / 1000
    End If

    Fmin5(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3 + N4, 18)
    If Fmin5(i) > 1000 Then
        Fmin5(i) = Fmin5(i) / 1000
    End If

    Feret5(i) = Sheets("Results").Cells(i + N1 + N2 + N3 + N4, 14)
    If Feret5(i) > 1000 Then
        Feret5(i) = Feret5(i) / 1000
    End If

Next

'Comparação entre os flocos da primeira e segunda imagens:
cont = 1

For i = 1 To N1

    For j = 1 To N2

        'Calculo da distância entre os flocos
        distancial2 = Sqr((X1(i) - X2(j)) ^ 2 + (Y1(i) - Y2(j)) ^ 2)

        If (Y1(i) - Y2(j)) <> 0 Then

            tg_teta = Abs((X1(i) - X2(j)) / (Y1(i) - Y2(j)))

            teta_rad = Atn(tg_teta)

            teta_grau = 180 * teta_rad / 3.14

            If Areal(i) > Area2(j) Then
                razao_area = Area2(j) / Areal(i)
            End If

            If Areal(i) < Area2(j) Then
                razao_area = Areal(i) / Area2(j)
            End If

            If Fmin1(i) > Fmin2(j) Then
                razao_fmin = Fmin2(j) / Fmin1(i)
            End If

            If Fmin1(i) < Fmin2(j) Then
                razao_fmin = Fmin1(i) / Fmin2(j)
            End If

            If razao_area > 0.5 And razao_fmin > 0.65 And distancial2 < 2 And Y2(j) > Y1(i) And teta_grau < 45

Then
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 1) = j + N1 - 1
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 2) = "2"
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 3) = Area2(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 4) = X2(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 5) = Y2(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 6) = Feret2(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 7) = Fmin2(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 8) = teta_grau
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 9) = distancial2
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 12) = i
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 13) = "1"
            End If
        End If
    End For
End For

```

```

        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 14) = Feret1(i)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 15) = Abs(Feret2(j) - Feret1(i))
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 16) = Per2(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 17) = Maior2(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 18) = Menor2(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 19) = AngEl2(j)
        cont = cont + 1

    End If
End If

Next
Next

'Comparação entre os flocos da segunda e terceira imagens:

For i = 1 To N2

    For j = 1 To N3

        If Area2(i) > Area3(j) Then
            razao_area = Area3(j) / Area2(i)
        End If

        If Area2(i) < Area3(j) Then
            razao_area = Area2(i) / Area3(j)
        End If

        If Fmin2(i) > Fmin3(j) Then
            razao_fmin = Fmin3(j) / Fmin2(i)
        End If

        If Fmin2(i) < Fmin3(j) Then
            razao_fmin = Fmin2(i) / Fmin3(j)
        End If

        'Calculo da distância entre os flocos
        distancia23 = Sqr((X2(i) - X3(j)) ^ 2 + (Y2(i) - Y3(j)) ^ 2)

        If (Y2(i) - Y3(j)) <> 0 Then

            tg_teta = Abs((X2(i) - X3(j)) / (Y2(i) - Y3(j)))

            teta_rad = Atn(tg_teta)

            teta_grau = 180 * teta_rad / 3.14

            If razao_area > 0.5 And razao_fmin > 0.65 And distancia23 < 2 And Y3(j) > Y2(i) And teta_grau < 45

Then
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 1) = j + N1 + N2 - 1
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 2) = "3"
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 3) = Area3(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 4) = X3(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 5) = Y3(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 6) = Feret3(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 7) = Fmin3(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 8) = teta_grau
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 9) = distancia23
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 12) = i + N1 - 1
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 13) = "2"
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 14) = Feret2(i)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 15) = Abs(Feret3(j) - Feret2(i))
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 16) = Per3(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 17) = Maior3(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 18) = Menor3(j)
                Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 19) = AngEl3(j)
                cont = cont + 1

            End If
        End If

    Next
Next

'Comparação entre os flocos da terceira e quarta imagens:

For i = 1 To N3

    For j = 1 To N4

        If Area3(i) > Area4(j) Then

```

```

        razao_area = Area4(j) / Area3(i)
    End If

    If Area3(i) < Area4(j) Then
        razao_area = Area3(i) / Area4(j)
    End If

    If Fmin3(i) > Fmin4(j) Then
        razao_fmin = Fmin4(j) / Fmin3(i)
    End If

    If Fmin3(i) < Fmin4(j) Then
        razao_fmin = Fmin3(i) / Fmin4(j)
    End If

    'Calculo da distância entre os flocos
    distancia34 = Sqr((X3(i) - X4(j)) ^ 2 + (Y3(i) - Y4(j)) ^ 2)

    If (Y3(i) - Y4(j)) <> 0 Then

        tg_teta = Abs((X3(i) - X4(j)) / (Y3(i) - Y4(j)))

        teta_rad = Atn(tg_teta)

        teta_grau = 180 * teta_rad / 3.14

    End If

    If razao_area > 0.5 And razao_fmin > 0.65 And distancia34 < 2 And Y4(j) > Y3(i) And teta_grau < 45
Then
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 1) = j + N1 + N2 + N3 - 1
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 2) = "4"
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 3) = Area4(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 4) = X4(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 5) = Y4(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 6) = Feret4(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 7) = Fmin4(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 8) = teta_grau
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 9) = distancia34
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 12) = i + N1 + N2 - 1
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 13) = "3"
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 14) = Feret3(i)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 15) = Abs(Feret4(j) - Feret3(i))
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 16) = Per4(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 17) = Maior4(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 18) = Menor4(j)
        Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 19) = AngE14(j)
        cont = cont + 1

    End If
End If

Next
Next

'Comparação entre os flocos da primeira e segunda imagens:

For i = 1 To N4

    For j = 1 To N5

        If Area4(i) > Area5(j) Then
            razao_area = Area5(j) / Area4(i)
        End If

        If Area4(i) < Area5(j) Then
            razao_area = Area4(i) / Area5(j)
        End If

        If Fmin4(i) > Fmin5(j) Then
            razao_fmin = Fmin5(j) / Fmin4(i)
        End If

        If Fmin4(i) < Fmin5(j) Then
            razao_fmin = Fmin4(i) / Fmin5(j)
        End If

        'Calculo da distância entre os flocos
        distancia12 = Sqr((X4(i) - X5(j)) ^ 2 + (Y4(i) - Y5(j)) ^ 2)

        If (Y4(i) - Y5(j)) <> 0 Then

            tg_teta = Abs((X4(i) - X5(j)) / (Y4(i) - Y5(j)))

            teta_rad = Atn(tg_teta)

```



```

teta_grau = 180 * teta_rad / 3.14

If razao_area > 0.5 And razao_fmin > 0.65 And distancial2 < 2 And Y5(j) > Y4(i) And teta_grau < 45
Then
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 1) = j + N1 + N2 + N3 + N4 - 1
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 2) = "5"
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 3) = Area5(j)
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 4) = X5(j)
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 5) = Y5(j)
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 6) = Feret5(j)
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 7) = Fmin5(j)
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 8) = teta_grau
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 9) = distancial2
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 12) = i + N1 + N2 + N3 - 1
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 13) = "4"
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 14) = Feret4(i)
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 15) = Abs(Feret5(j) - Feret4(i))
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 16) = Per5(j)
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 17) = Maior5(j)
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 18) = Menor5(j)
    Sheets("PIV").Cells(cont + 1, 19) = AngEl5(j)
    cont = cont + 1

End If
End If

Next
Next

'cont-1 é o número de flocos reconhecidos
aux = 1

For i = 1 To cont - 1

    Nfoco(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1)
    Nfoto(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2)
    Area(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3)
    X(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4)
    Y(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5)
    Feret(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6)
    Fmin(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7)
    teta(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8)
    deslocamento(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9)
    Nanterior(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12)
    Nfotoanterior(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13)
    Feretanterior(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14)
    DifFeret(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15)
    Per(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16)
    Maior(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17)
    Menor(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18)
    AngEl(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19)
    contador(i) = 0
    aux = aux + 1

Next

For i = 1 To cont - 1
    For j = 1 To cont - 1

        If i <> j And Nfoco(i) = Nfoco(j) Then

            If DifFeret(i) < DifFeret(j) Then
                Nanterior(j) = 0
            End If

            If DifFeret(i) > DifFeret(j) Then
                Nanterior(i) = 0
            End If

        End If

        If i <> j And Nanterior(i) = Nanterior(j) Then

            If DifFeret(i) < DifFeret(j) Then
                Nanterior(j) = 0
            End If

            If DifFeret(i) > DifFeret(j) Then
                Nanterior(i) = 0
            End If

        End If

    End If

End For

```

```

End If

Next

Next

For i = 1 To cont - 1
    For j = 1 To cont - 1
        If Nflocos(i) = Nanterior(j) Then
            contador(i) = 1
        End If

        If Nanterior(i) = Nflocos(j) Then
            contador(i) = 1
        End If
    Next j
Next i

Next

Next

For i = 1 To cont - 1
    If Nfoto(i) = 2 And Nanterior(i) <> 0 Then
        For j = 1 To flocos_foto5
            distancia_5 = Sqr((X(i) - X_ant(j)) ^ 2 + (Y(i) - Y_ant(j)) ^ 2)
            If distancia_5 = deslocamento(i) Then
                contador(i) = 1
                N_correspondente(i) = N_ant(j)
            End If
        Next j
    End If
Next i

Next

Sheets("PIV").Activate
Range(Cells(2, 1), Cells(6000, 20)).ClearContents

aux = 1
For i = 1 To cont - 1

    If Nanterior(i) <> 0 And contador(i) = 1 Then

        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nflocos(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = teta(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = deslocamento(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = Feretanterior(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DifFeret(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = N_correspondente(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl(i)

        aux = aux + 1

    End If

Next i

flocos_contados = aux - 1

aux = 1

For i = 1 To flocos_contados

    Nflocos(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1)
    Nfoto(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2)
    Area(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3)
    X(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4)
    Y(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5)
    Feret(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6)

```

```

Fmin(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7)
teta(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8)
deslocamento(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9)
Nanterior(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12)
Nfotoanterior(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13)
Feretanterior(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14)
DifFeret(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15)
N_correspondente(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20)
Per(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16)
Maior(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17)
Menor(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18)
AngEl(i) = Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19)
aux = aux + 1

If Nfoto(i) = 2 Then
    floco2 = floco2 + 1
End If

If Nfoto(i) = 3 Then
    floco3 = floco3 + 1
End If

If Nfoto(i) = 4 Then
    floco4 = floco4 + 1
End If

If Nfoto(i) = 5 Then
    floco5 = floco5 + 1
End If

Next

'Separação dos flocos em vetores de acordo com o número da foto
j = 1
k = 1
z = 1
w = 1

For i = 1 To flocos_contados

If Nfoto(i) = 2 Then
    Nflocos2(j) = Nflocos(i)
    Nfoto2(j) = Nfoto(i)
    Area2(j) = Area(i)
    X2(j) = X(i)
    Y2(j) = Y(i)
    Feret2(j) = Feret(i)
    Fmin2(j) = Fmin(i)
    Grau2(j) = teta(i)
    D2(j) = deslocamento(i)
    Nanterior2(j) = Nanterior(i)
    Nfotoanterior2(j) = Nfotoanterior(i)
    FeretAnterior2(j) = FeretAnterior(i)
    DFeret2(j) = DifFeret(i)
    Ncorrespondente2(i) = N_correspondente(i)
    Per2(j) = Per(i)
    Maior2(j) = Maior(i)
    Menor2(j) = Menor(i)
    AngEl2(j) = AngEl(i)
    j = j + 1
End If

If Nfoto(i) = 3 Then
    Nflocos3(z) = Nflocos(i)
    Nfoto3(z) = Nfoto(i)
    Area3(z) = Area(i)
    X3(z) = X(i)
    Y3(z) = Y(i)
    Feret3(z) = Feret(i)
    Fmin3(z) = Fmin(i)
    Grau3(z) = teta(i)
    D3(z) = deslocamento(i)
    Nanterior3(z) = Nanterior(i)
    Nfotoanterior3(z) = Nfotoanterior(i)
    FeretAnterior3(z) = FeretAnterior(i)
    DFeret3(z) = DifFeret(i)
    Ncorrespondente3(z) = N_correspondente(i)
    Per3(z) = Per(i)
    Maior3(z) = Maior(i)
    Menor3(z) = Menor(i)
    AngEl3(z) = AngEl(i)
    z = z + 1
End If

If Nfoto(i) = 4 Then
    Nflocos4(w) = Nflocos(i)
    Nfoto4(w) = Nfoto(i)

```

```

Area4(w) = Area(i)
X4(w) = X(i)
Y4(w) = Y(i)
Feret4(w) = Feret(i)
Fmin4(w) = Fmin(i)
Grau4(w) = teta(i)
D4(w) = deslocamento(i)
Nanterior4(w) = Nanterior(i)
Nfotoanterior4(w) = Nfotoanterior(i)
FeretAnterior4(w) = FeretAnterior(i)
DFeret4(w) = DifFeret(i)
Ncorrespondente4(w) = N_correspondente(i)
Per4(w) = Per(i)
Maior4(w) = Maior(i)
Menor4(w) = Menor(i)
AngEl4(w) = AngEl(i)
w = w + 1
End If

If Nfoto(i) = 5 Then
    Nflocos(k) = Nflocos(i)
    Nfoto5(k) = Nfoto(i)
    Area5(k) = Area(i)
    X5(k) = X(i)
    Y5(k) = Y(i)
    Feret5(k) = Feret(i)
    Fmin5(k) = Fmin(i)
    Grau5(k) = teta(i)
    D5(k) = deslocamento(i)
    Nanterior5(k) = Nanterior(i)
    Nfotoanterior5(k) = Nfotoanterior(i)
    FeretAnterior5(k) = FeretAnterior(i)
    DFeret5(k) = DifFeret(i)
    Ncorrespondente5(k) = N_correspondente(i)
    Per5(k) = Per(i)
    Maior5(k) = Maior(i)
    Menor5(k) = Menor(i)
    AngEl5(k) = AngEl(i)
    k = k + 1
End If

Next

Sheets("PIV").Activate
Range(Cells(2, 1), Cells(6000, 20)).ClearContents

aux = 1

For i = 1 To floco2

    If imprime2(i) = 0 Then
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nflocos2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = Grau2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = D2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = FeretAnterior2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DFeret2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = Ncorrespondente2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor2(i)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl2(i)
        aux = aux + 1
        imprime2(i) = 1

        For j = 1 To floco3

            If imprime3(j) = 0 And Nflocos2(i) = Nanterior3(j) Then
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nflocos3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = Grau3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = D3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior3(j)
                Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = FeretAnterior3(j)
            End If
        End For
    End If
End For

```

```

Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DFeret3(j)
Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = Ncorrespondente3(j)
Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per3(j)
Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior3(j)
Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor3(j)
Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl3(j)
aux = aux + 1
imprime3(j) = 1

For z = 1 To floco4

    If imprime4(z) = 0 And Nflocos3(j) = Nanterior4(z) Then
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nflocos4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = Grau4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = D4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = FeretAnterior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DFeret4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = Ncorrespondente4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl4(z)
        aux = aux + 1
        imprime4(z) = 1

    For w = 1 To floco5

        If imprime5(w) = 0 And Nflocos4(z) = Nanterior5(w) Then
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nflocos5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = Grau5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = D5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = FeretAnterior5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DFeret5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = Ncorrespondente5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl5(w)
            aux = aux + 1
            imprime5(w) = 1
        End If
    Next
End If

Next

End If

Next
aux = aux + 1
End If
Next

For j = 1 To floco3

    If imprime3(j) = 0 Then
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nflocos3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = Grau3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = D3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = FeretAnterior3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DFeret3(j)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = Ncorrespondente3(j)
    End If
End If

```

```

Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per3(j)
Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior3(j)
Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor3(j)
Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl3(j)
aux = aux + 1
imprime3(j) = 1

For z = 1 To floco4

    If imprime4(z) = 0 And Nfloco3(j) = Nanterior4(z) Then
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nfloco4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = Grau4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = D4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = FeretAnterior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DFeret4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = Ncorrespondente4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl4(z)
        aux = aux + 1
        imprime4(z) = 1

    For w = 1 To floco5

        If imprime5(w) = 0 And Nfloco4(z) = Nanterior5(w) Then
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nfloco5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = Grau5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = D5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = FeretAnterior5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DFeret5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = Ncorrespondente5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor5(w)
            Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl5(w)
            aux = aux + 1
            imprime5(w) = 1
        End If
    Next
End If

Next
aux = aux + 1
End If
Next

For z = 1 To floco4

    If imprime4(z) = 0 Then
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nfloco4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = Grau4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = D4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = FeretAnterior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DFeret4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = Ncorrespondente4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor4(z)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl4(z)
        aux = aux + 1
        imprime4(z) = 1
    End If
End If

```

```

For w = 1 To floco5

    If imprime5(w) = 0 And Nflocos4(z) = Nanterior5(w) Then
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nflocos5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = Grau5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = D5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = FeretAnterior5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DFeret5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = Ncorrespondente5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl5(w)
        aux = aux + 1
        imprime5(w) = 1
    End If
Next
aux = aux + 1
End If

Next

For w = 1 To floco5

    If imprime5(w) = 0 Then
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 1) = Nflocos5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 2) = Nfoto5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 3) = Area5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 4) = X5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 5) = Y5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 6) = Feret5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 7) = Fmin5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 8) = Grau5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 9) = D5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 12) = Nanterior5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 13) = Nfotoanterior5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 14) = FeretAnterior5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 15) = DFeret5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 20) = Ncorrespondente5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 16) = Per5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 17) = Maior5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 18) = Menor5(w)
        Sheets("PIV").Cells(aux + 1, 19) = AngEl5(w)
        aux = aux + 1
        imprime5(w) = 1
    End If

Next

aux = 1
For i = 1 To (k - 1)

    Sheets("5").Cells(aux, 1) = Nflocos5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 2) = Nfoto5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 3) = Area5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 4) = X5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 5) = Y5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 6) = Feret5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 7) = Fmin5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 8) = Grau5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 9) = D5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 12) = Nanterior5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 13) = Nfotoanterior5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 14) = FeretAnterior5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 15) = DFeret5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 20) = Ncorrespondente5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 16) = Per5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 17) = Maior5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 18) = Menor5(i)
    Sheets("5").Cells(aux, 19) = AngEl5(i)
    aux = aux + 1

Next

End Sub

```