



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



**LUCAS CORDEIRO RIBEIRO**

**CARACTERÍSTICAS DOS FLOCOS FORMADOS COM A  
UTILIZAÇÃO DE *MORINGA OLEIFERA* COMO COAGULANTE EM  
ÁGUA PRODUZIDA COM COR ELEVADA**

Uberlândia, 2021

**LUCAS CORDEIRO RIBEIRO**

**CARACTERÍSTICAS DOS FLOCOS FORMADOS COM A  
UTILIZAÇÃO DE *MORINGA OLEIFERA* COMO COAGULANTE EM  
ÁGUA PRODUZIDA COM COR ELEVADA**

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

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

Uberlândia, 2021

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

R484 2021	<p>Ribeiro, Lucas Cordeiro, 1993- Características dos flocos formados com a utilização de Moringa oleifera como coagulante em água produzida com cor elevada [recurso eletrônico] / Lucas Cordeiro Ribeiro. - 2021.</p> <p>Orientador: André Luiz de Oliveira. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.420">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.420</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia civil. I. Oliveira, André Luiz de, 1973- (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós- graduação em Engenharia Civil. III. Título.</p> <p>CDU: 624</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 263, PPGE				
Data:	20 de agosto de 2021	Hora de início:	14:00 h	Hora de encerramento:	16:30 h
Matrícula do Discente:	11912ECV014				
Nome do Discente:	Lucas Cordeiro Ribeiro				
Título do Trabalho:	Características dos flocos formados com a utilização de <i>Moringa oleifera</i> como coagulante em água produzida com cor elevada				
Área de concentração:	Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Recursos Hídricos e Saneamento				
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: Rosângela Bergamasco – DEQ/UEM, Fábio Augusto do Amaral – IQ/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 **Andre Luiz de Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/08/2021, às 16:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Augusto do Amaral, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/08/2021, às 10:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosângela Bergamasco, Usuário Externo**, em 24/08/2021, às 08:48, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2927204** e o código CRC **2DE7619D**.



## AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia por toda experiência e ensino adquiridos durante o mestrado;

Ao professor Dr. André Luiz de Oliveira pela orientação e ensinamentos dados durante todo esse período;

À Escola Municipal de Educação Infantil do Bairro Marta Helena pela disponibilização das sementes de *Moringa oleifera*;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de mestrado;

Por fim, agradeço a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação.

## RESUMO

As sementes de *Moringa oleifera* vem sendo foco de pesquisas em diversas áreas do conhecimento e inclusive utilizadas como coagulante natural no tratamento de água. Nessa perspectiva, a presente pesquisa busca aprofundar os conhecimentos no que diz respeito ao potencial coagulante e as características morfológicas dos flocos formados pela *Moringa oleifera* em água produzida com cor aparente elevada ( $107 \pm 1$  mg Pt-Co/L). Inicialmente fez-se uma comparação entre a eficiência de remoção de cor aparente utilizando técnica de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) e sedimentação. Os resultados mostraram melhor desempenho utilizando-se a FAD e por isso ela foi utilizada nas demais etapas da pesquisa. Posteriormente foram realizados ensaios de coagulação/ floculação/ FAD utilizando diversas dosagens de coagulante e pH de coagulação para elaboração de diagramas de coagulação para diferentes velocidades de flotação. Em seguida foram selecionados seis pontos desses diagramas para os ensaios de quebra e refloculação utilizando-se diferentes gradientes médios de floculação ( $G_f$ ) e gradientes de ruptura ( $G_{rup}$ ) de 120 e 500 s<sup>-1</sup>. Nesses ensaios foram obtidas imagens por meio de técnica não intrusiva e não destrutiva, além do acompanhamento por meio de um analisador de dispersão fotométrica (PDA), de forma a avaliar a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP) e dimensão fractal durante a formação e recrescimento de flocos, além da avaliação da força e resistência dos mesmos. A *Moringa oleifera* se mostrou eficaz na remoção de cor aparente elevada, com diversas regiões do diagrama de coagulação com eficiência de remoção acima de 70%. Quanto aos ensaios com  $G_{rup}$  de 120 s<sup>-1</sup>, os testes de análise de variância (ANOVA) mostraram que a ruptura a esse gradiente não foi suficiente para alterar significativamente a eficiência de remoção de cor aparente. Os valores de dimensão fractal variaram de 1,66 a 1,96 e tiveram variação considerável após ruptura com  $G_{rup}$  de 500 s<sup>-1</sup>, sugerindo que a estrutura exclusivamente auto similar dos flocos seja apenas um conceito ideal e que a dimensão fractal varia de acordo com as condições físicas da coagulação. Considerando-se o valor da dimensão fractal após estabilização na coagulação, observou-se que não existe diferença significativa entre os valores, para diferentes  $G_f$ , demonstrando assim que a estrutura morfológica tende a se manter independente do diâmetro e da intensidade de mistura. Os resultados evidenciaram também que não ocorreu a recuperação total do tamanho dos flocos.

**Palavras-chave:** Coagulação; Coagulante natural; Floculação; *Moringa oleifera*; Tratamento de água.

## ABSTRACT

*Moringa oleifera* seeds have been the focus of a lot of researches in many different areas of knowledge including utilization as a natural coagulant in water treatment. In this perspective, the present research aims to deepen knowledge about *Moringa oleifera* potential as a coagulant and the morphological characteristics of the flocs formed in produced water with high apparent color ( $107 \pm 1$  mg Pt-Co/L). Initially, a comparison between the apparent color removal efficiency was made utilizing Dissolved Air Flotation (DAF) and sedimentation. The results showed better performance by using DAF and thus it was used in the remaining steps of the research. Then it was used the coagulation/ flocculation/ DAF assays with different dosages of coagulant and coagulation pH to elaborate coagulation diagrams for different flotation speeds. After this, six points of those diagrams were selected for breakage and reflocculation assays using different mean velocity gradients ( $G_f$ ) and rupture gradients ( $G_{rup}$ ) of 120 and 500 s<sup>-1</sup>. In these assays, images were obtained using a non-intrusive and non-destructive technique, with the continuous analysis through a Photometric Dispersion Analyzer (PDA) to evaluate Particle Size Distribution (PSD) and fractal dimension during the formation and regrowth of flocs, including the evaluation of their strength and resistance. *Moringa oleifera* showed effectiveness in high apparent color removal, with many diagram regions over 70% results. For the assays with  $G_{rup}$  equal to 120 s<sup>-1</sup>, variance analysis tests (ANOVA) showed that rupture at this gradient was not enough to significantly alter color removal efficiency. Fractal dimension values varied between 1,66 and 1,96 and had considerable variation after the rupture  $G_{rup}$  equal to 500 s<sup>-1</sup>, suggesting that the uniquely self-similar structure of the flakes is just an ideal concept and that the fractal dimension changes according to the physical conditions of coagulation. Considering the fractal dimension value after coagulation stabilization, it was observed that there was no significant difference between the values for different  $G_f$ , showing that the morphological structure tends to keep independent of the diameter and the mixing intensity. In addition, the results traced that the flocs did not fully recover their size.

**Keywords:** Coagulation; Natural coagulant; Flocculation; *Moringa oleifera*; Water treatment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ordem de grandeza das partículas presentes na água .....	24
Figura 2.2 - Esquema da dupla camada elétrica .....	25
Figura 2.3 - Energia potencial atraente e repulsiva entre duas partículas representadas por placas planas e carga semelhante.....	26
Figura 2.4 - Crescimento, quebra e reestruturação dos flocos durante a floculação .....	31
Figura 2.5 - <i>Moringa oleifera</i> : (a) árvore; (b) flor.....	44
Figura 3.1 - Fluxograma geral das etapas de estudo .....	54
Figura 3.2 - Esquema do aparato experimental .....	59
Figura 3.3 - Parâmetros físicos utilizados nos ensaios de formação, ruptura e recrescimento de flocos .....	60
Figura 3.4 - Etapas envolvidas no processamento e análise de imagens.....	62
Figura 3.5 - Exemplo de imagem obtida, destacando a área a ser cortada.....	63
Figura 3.6 - Exemplo de imagem cortada.....	63
Figura 3.7 - Imagem após binarização.....	64
Figura 3.8 - Determinação da dimensão fractal.....	65
Figura 3.9 - Representação dos parâmetros $FI_1$ e $FI_2$ .....	66
Figura 3.10 - Determinação dos coeficientes $C$ e $\gamma$ .....	67
Figura 4.1 - Comparação entre sedimentação e FAD para concentração de <i>Moringa oleifera</i> de 80 mg/L .....	68
Figura 4.2 - Comparação entre sedimentação e FAD para concentração de <i>Moringa oleifera</i> de 140 mg/L .....	69
Figura 4.3 - Diagrama de coagulação da <i>Moringa oleifera</i> para água com cor de 107 mg Pt-Co/L e $V_f$ de 20 cm/min .....	71
Figura 4.4 - Diagrama de coagulação da <i>Moringa oleifera</i> para água com cor de 107 mg Pt-Co/L e $V_f$ de 10 cm/min .....	72
Figura 4.5 - Diagrama de coagulação da <i>Moringa oleifera</i> para água com cor de 107 mg Pt-Co/L e $V_f$ de 5 cm/min .....	72
Figura 4.6 - Variação da remoção de cor em função da dosagem de coagulante e gradiente de floculação para $V_f$ de 5,0 cm/min.....	75
Figura 4.7 - Variação da turbidez remanescente em função da dosagem de coagulante e gradiente de floculação para $V_f$ de 5,0 cm/min .....	76

Figura 4.8 - Eficiência de remoção de cor para $Gf$ de $20\text{ s}^{-1}$ e $Vf$ de $5,0\text{ cm/min}$ .....	77
Figura 4.9 - Eficiência de remoção de cor para $Gf$ de $30\text{ s}^{-1}$ e $Vf$ de $5,0\text{ cm/min}$ .....	78
Figura 4.10 - Eficiência de remoção de cor para $Gf$ de $40\text{ s}^{-1}$ e $Vf$ de $5,0\text{ cm/min}$ .....	78
Figura 4.11 - Eficiência de remoção de cor para $Gf$ de $60\text{ s}^{-1}$ e $Vf$ de $5,0\text{ cm/min}$ .....	78
Figura 4.12 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 1: $Grup = 120\text{ s}^{-1}$ .....	80
Figura 4.13 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 1: $Grup = 500\text{ s}^{-1}$ .....	80
Figura 4.14 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 2: $Grup = 120\text{ s}^{-1}$ .....	81
Figura 4.15 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 2: $Grup = 500\text{ s}^{-1}$ .....	81
Figura 4.16 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 3: $Grup = 120\text{ s}^{-1}$ .....	81
Figura 4.17 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 3: $Grup = 500\text{ s}^{-1}$ .....	82
Figura 4.18 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 4: $Grup = 120\text{ s}^{-1}$ .....	82
Figura 4.19 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 4: $Grup = 500\text{ s}^{-1}$ .....	82
Figura 4.20 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 5: $Grup = 120\text{ s}^{-1}$ .....	83
Figura 4.21 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 5: $Grup = 500\text{ s}^{-1}$ .....	83
Figura 4.22 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 6: $Grup = 120\text{ s}^{-1}$ .....	83
Figura 4.23 - Evolução temporal da $Df$ para o ponto 6: $Grup = 500\text{ s}^{-1}$ .....	84
Figura 4.24 - Relação entre o $Gf$ e a $Df$ para cada um dos pontos analisados no diagrama de coagulação .....	85
Figura 4.25 - Relação entre dimensão fractal e Diâmetro de Feret médio para diferentes $Gf$ : (a) $Gf = 20\text{ s}^{-1}$ ; (b) $Gf = 30\text{ s}^{-1}$ ; (c) $Gf = 40\text{ s}^{-1}$ e (d) $Gf = 60\text{ s}^{-1}$ .....	86
Figura 4.26 - Relação entre dimensão fractal e Diâmetro de Feret médio para todos os gradientes médios de floculação avaliados .....	87
Figura 4.27 - Relação entre a $Df$ e remoção de cor para diferentes $Gf$ : (a) $Gf = 20\text{ s}^{-1}$ ; (b) $Gf = 30\text{ s}^{-1}$ ; (c) $Gf = 40\text{ s}^{-1}$ e (d) $Gf = 60\text{ s}^{-1}$ .....	88
Figura 4.28 - DTP para $Gf$ de $20\text{ s}^{-1}$ e com $Grup$ de $120\text{ s}^{-1}$ .....	90
Figura 4.29 - DTP para $Gf$ de $20\text{ s}^{-1}$ e com $Grup$ de $500\text{ s}^{-1}$ .....	91
Figura 4.30 - DTP para $Gf$ de $30\text{ s}^{-1}$ e com $Grup$ de $120\text{ s}^{-1}$ .....	92
Figura 4.31 - DTP para $Gf$ de $30\text{ s}^{-1}$ e com $Grup$ de $500\text{ s}^{-1}$ .....	93
Figura 4.32 - DTP para $Gf$ de $40\text{ s}^{-1}$ e com $Grup$ de $120\text{ s}^{-1}$ .....	94
Figura 4.33 - DTP para $Gf$ de $40\text{ s}^{-1}$ e com $Grup$ de $500\text{ s}^{-1}$ .....	95
Figura 4.34 - DTP para $Gf$ de $60\text{ s}^{-1}$ e com $Grup$ de $120\text{ s}^{-1}$ .....	96
Figura 4.35 - DTP para $Gf$ de $60\text{ s}^{-1}$ e com $Grup$ de $500\text{ s}^{-1}$ .....	97

Figura 4.36 - Relação entre fator de força (calculado por meio de análise de imagens) e $dF$ para diferentes $Grup$ : (a) $Grup = 120 \text{ s}^{-1}$ e (b) $Grup = 500 \text{ s}^{-1}$ .....	100
Figura 4.37 - Relação entre fator de força (calculado por meio de PDA) e $dF$ para diferentes $Grup$ : (a) $Grup = 120 \text{ s}^{-1}$ e (b) $Grup = 500 \text{ s}^{-1}$ .....	100
Figura 4.38 - Relação entre $\sigma$ e $Df$ para diferentes gradientes médios de floculação: (a) $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ ; (b) $Gf = 30 \text{ s}^{-1}$ ; (c) $Gf = 40 \text{ s}^{-1}$ e (d) $Gf = 60 \text{ s}^{-1}$ .....	101
Figura 4.39 - Evolução temporal do $dF$ para diferentes $Gf$ e $Grup$ : (a) $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ e $Grup = 120 \text{ s}^{-1}$ ; (b) $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ e $Grup = 500 \text{ s}^{-1}$ ; (c) $Gf = 30 \text{ s}^{-1}$ e $Grup = 120 \text{ s}^{-1}$ e (d) $Gf = 30 \text{ s}^{-1}$ e $Grup = 500 \text{ s}^{-1}$ .....	102
Figura 4.40 - Evolução temporal do $dF$ para diferentes $Gf$ e $Grup$ : (a) $Gf = 40 \text{ s}^{-1}$ e $Grup = 120 \text{ s}^{-1}$ ; (b) $Gf = 40 \text{ s}^{-1}$ e $Grup = 500 \text{ s}^{-1}$ ; (c) $Gf = 60 \text{ s}^{-1}$ e $Grup = 120 \text{ s}^{-1}$ e (d) $Gf = 60 \text{ s}^{-1}$ e $Grup = 500 \text{ s}^{-1}$ .....	103
Figura 4.41 - Evolução temporal do Índice de Floculação para diferentes pontos do diagrama de coagulação: (a) ponto 1; (b) ponto 2; (c) ponto 3; (d) ponto 4; (e) ponto 5 e (f) ponto 6..	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química das sementes de <i>Moringa oleifera</i> .....	46
Tabela 2.2 - Resultados de turbidez residual para as três faixas de turbidez .....	52
Tabela 3.1 - Parâmetros físicos utilizados nos ensaios para determinação do tratamento .....	58
Tabela 3.2 - Configurações da câmera fotográfica.....	62
Tabela 4.1 - Teste de ANOVA realizado para comparação entre a eficiência de remoção de cor entre os ensaios de sedimentação e FAD.....	70
Tabela 4.2 - Teste de comparações múltiplas de Tukey para a eficiência de remoção de cor na comparação entre sedimentação e FAD .....	70
Tabela 4.3 - Pontos do diagrama de coagulação selecionados para os estudos de floculação, ruptura e refloculação .....	74
Tabela 4.4 - Teste de ANOVA para comparação entre a eficiência de remoção de cor entre os ensaios sem a ruptura e imediatamente após a ruptura com <i>Grup</i> de $120\text{ s}^{-1}$ .....	79
Tabela 4.5 - Teste de ANOVA para comparação da dimensão fractal para diferentes gradientes médios de floculação .....	85
Tabela 4.6 - Classes de tamanho utilizada para análise da DTP .....	89
Tabela 4.7 - Resistência média por unidade de área no plano de ruptura ( $\sigma$ ), Diâmetro de Feret ( $dF$ ) e fator de força para os pontos do diagrama de coagulação .....	98
Tabela 4.8 - Coeficiente de resistência dos flocos e constante de relação entre o diâmetro máximo e o gradiente de floculação para os pontos do diagrama de coagulação .....	99
Tabela 4.9 - Fator de recuperação e relação entre $d_3$ e $d_1$ para os pontos do diagrama de coagulação .....	106
Tabela 4.10 - Teste de ANOVA realizado para comparação entre a relação $d_3/d_1$ .....	107
Tabela 4.11 - Teste de comparações múltiplas de Tukey para a relação entre $d_3/d_1$ .....	108
Tabela 4.12 - Relação log-log entre a o $Gf$ e o $d_3$ para os <i>Grup</i> de 120 e $500\text{ s}^{-1}$ .....	108

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1.1 - Trabalhos realizados anteriormente utilizando análise de imagens digitais no acompanhamento da floculação.....	20
Quadro 2.1 - Classificação das substâncias húmicas.....	32
Quadro 3.1 - Métodos para determinação dos parâmetros físico-químicos .....	56



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_i$	- Área do objeto irregular;
$A_s$	- Área projetada
cm	- Centímetro
NaCl	- Cloreto de sódio
$A$	- Coeficiente de densidade da lei de potência
$\beta$	- Coeficiente de inclinação da lei de potência
$\gamma$	- Coeficiente de resistência do floco
$l$	- Comprimento característico dos agregados
$dN$	- Concentração do número de partículas em relação a mudança incremental no diâmetro das partículas
$C$	- Constante da relação entre o diâmetro máximo e o gradiente de floculação
Cr	- Cromo
$p_w$	- Densidade da água
$d_p$	- Diâmetro das partículas
$d_F$	- Diâmetro de Feret
$d_1$	- Diâmetro médio do floco antes da ruptura
$d_2$	- Diâmetro médio do floco após a refloculação
$d_3$	- Diâmetro médio do floco após a ruptura
$D_{fm}$	- Dimensão fractal
$D_2$	- Dimensão fractal bidimensional
$D_{fm}$	- Dimensão fractal em massa
$d_{max}$	- Dimensão máxima do floco
$d_{med}$	- Dimensão média do floco
$F(d_p)$	- Função que define a frequência de distribuição de partículas
$G_f$	- Gradiente médio de floculação
$G_{mr}$	- Gradiente médio de mistura rápida
$G_r$	- Gradiente médio de refloculação
$G_{rup}$	- Gradiente médio de ruptura
°C	- Grau Celsius
NaOH	- Hidróxido de sódio
L	- Litro
$M$	- Massa das partículas
$\mu\text{m}$	- Micrômetro

mg	- Miligrama
mm	- Milímetro
min	- Minuto
$d(d_p)$	- Mudança incremental no diâmetro das partículas.
N	- Número de partículas por agregado
ppm	- Parte por milhão
$p$	- Perímetro
kDa	- Quilodalton
kPa	- Quilopascal
$\sigma$	- Resistência média por unidade de área no plano de ruptura
rpm	- Rotação por minuto
s	- Segundo
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	- Sulfato de alumínio
$L$	- Tamanho das partículas
$r$	- Taxa de recirculação
$\varepsilon$	- Taxa local de dissipação de energia por unidade de massa
$\bar{\varepsilon}$	- Taxa média de dissipação de energia local
$t_f$	- Tempo de floculação
$t_{mr}$	- Tempo de mistura rápida
$t_{rf}$	- Tempo de refloculação
$t_r$	- Tempo de ruptura
$V_f$	- Velocidade de flotação
$V_f$	- Velocidade de sedimentação
$\nu$	- Viscosidade cinemática

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APHA	- <i>American Public Health Association</i>
CC	- Camada Compacta
CD	- Camada Difusa
COT	- Carbono Orgânico Total
CEPIS	- Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria Y Ciencias del Ambiente
DTP	- Distribuição do Tamanho de Partículas
DCE	- Dupla Camada Elétrica
FAD	- Flotação por Ar Dissolvido
IF	- Índice de Flocculação
OMS	- Organização Mundial da Saúde
PDA	- <i>Photometric Dispersion Analyzer</i>
PAC	- Policloreto de Alumínio
pH	- Potencial Hidrogeniônico
SNS	- Secretaria Nacional de Saneamento
SMEWW	- <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	23
1.1.2	<i>Objetivos específicos .....</i>	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>24</b>
2.1	SUSPENSÃO COLOIDAL.....	24
2.2	COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO.....	27
2.2.1	<i>Mecanismos de coagulação .....</i>	28
2.2.2	<i>Coagulantes.....</i>	29
2.2.3	<i>Floculação.....</i>	30
2.2.4	<i>Remoção de cor.....</i>	31
2.2.5	<i>Força, ruptura e recrescimento de flocos .....</i>	32
2.3	FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO .....	35
2.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS FLOCOS .....	37
2.4.1	<i>Dimensão fractal.....</i>	38
2.4.2	<i>Princípio da esfera equivalente e distribuição de tamanho de partículas.....</i>	40
2.5	MORINGA OLEIFERA .....	43
2.5.1	<i>Moringa oleífera utilizada como coagulante natural .....</i>	45
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>54</b>
3.1	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E <i>SOFTWARES</i> UTILIZADOS.....	54
3.2	ÁGUA DE ESTUDO .....	55
3.3	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS .....	56
3.4	PREPARO DO EXTRATO DE <i>MORINGA OLEIFERA</i> .....	56
3.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	57
3.6	ESCOLHA DO TRATAMENTO .....	57
3.7	DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO .....	58
3.8	ENSAIOS DE FORMAÇÃO, RUPTURA E RECREScimento DE FLOCOS POR MEIO DE ACOMPANHAMENTO POR ANÁLISE DE IMAGENS E PDA .....	59
3.8.1	<i>Monitoramento óptico contínuo .....</i>	61
3.8.2	<i>Processamento e análise das imagens .....</i>	61
3.8.3	<i>Determinação do diâmetro equivalente, DTP e dimensão fractal.....</i>	64

3.8.4	<i>Resistência e força dos flocos</i> .....	65
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>68</b>
4.1	ESCOLHA DO TRATAMENTO .....	68
4.2	DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO .....	71
4.3	FORMAÇÃO, RUPTURA E RECRESCIMENTO DE FLOCOS .....	75
4.3.1	<i>Remoção de cor</i> .....	75
4.3.2	<i>Dimensão fractal</i> .....	80
4.3.3	<i>Distribuição do tamanho de partículas</i> .....	88
4.3.4	<i>Resistência e força dos flocos</i> .....	98
4.3.5	<i>Recuperação dos flocos</i> .....	102
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>109</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>111</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO REALIZADOS PARA ESCOLHA DO TRATAMENTO</b> .....	<b>128</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA ELABORAÇÃO DO DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO</b> .....	<b>131</b>
	<b>APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FORMAÇÃO, RUPTURA E RECRESCIMENTO DE FLOCOS</b> .....	<b>148</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural imprescindível para a manutenção e sobrevivência dos seres vivos no planeta. O Brasil possui grandes reservas de água, possuindo cerca de 12% da disponibilidade de água doce do mundo. Porém a sua distribuição no território é desigual, dispondo a região Norte de aproximadamente 80% da quantidade total disponível e apenas 5% da população (BRASIL, 2020).

O consumo humano de água pode ser considerado o uso mais nobre, porém é necessário que a mesma atenda a padrões de potabilidade para que não ofereça risco a saúde dos usuários, tornando-se indispensável o seu tratamento. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2019) a água contaminada pode transmitir doenças como a cólera, diarreia, disenteria, hepatite A, febre tifoide e poliomielite. Estima-se que a ingestão de água contaminada cause 485000 mortes diarreicas por ano e que 785 milhões de pessoas não tenham acesso à água potável.

Quanto ao abastecimento de água no Brasil, dados da Secretaria Nacional de Saneamento (SNS) mostram que a média de domicílios que eram providas por redes de abastecimento de água no ano de 2019 era de 83,7%. Já as macrorregiões apresentam os seguintes índices: norte – 57,5%; nordeste – 73,9%; sudeste – 91,1%; sul – 90,5% e centro-oeste – 89,7% (BRASIL, 2019).

Diante dos problemas causados pela ingestão de água contaminada é importante que seja realizado seu devido tratamento, para que se torne potável. Segundo Sun et al. (2013) os métodos de coagulação e floculação, que visam a desestabilização das partículas presentes na água e posterior formação de flocos maiores, são processos importantes e amplamente utilizados, uma vez que são procedimentos simples e de baixo custo.

Segundo Oliveira et al. (2015c) é importante que seja evitado que todo o controle e monitoramento da etapa de floculação seja realizado apenas por meio de medições indiretas, como turbidez e cor aparente, já que as medições diretas, como a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP) e as características morfológicas podem oferecer informações importantes e levar a um melhor entendimento sobre os processos de separação sólido/ líquido. Desta forma, diversos pesquisadores como Xiao et al. (2011), He et al. (2012), Yao, Nan e Chen (2014),

Oliveira et al. (2015c), Ren et al. (2017) e Moruzzi et al. (2017) trabalharam com diferentes técnicas de análise de imagem com objetivo de estudar parâmetros da floculação.

A maioria das Estações de Tratamento de Água (ETA) utilizam os sais de alumínio e ferro como coagulante, sendo o sulfato de alumínio utilizado em larga escala no mundo todo, porém existe uma relação entre o alumínio e efeitos na saúde de seres humanos (QURESHI; MALMBERG, 1985; LETTERMAN; DRISCOLL, 1988), estando associado, por exemplo, à doença de Alzheimer (MCLACHLAN, 1995; SMITH, 1995; WALTON, 2013). De acordo Platts, Goode e Hislop (1977) pacientes em diálise em contato com alumínio podem apresentar encefalopatia e conforme Hoff (1977) apud Letterman e Driscoll (1988) o alumínio residual pode proteger os microrganismos e interferir no processo de desinfecção além de poder ser hidrolisado, causando a deposição nas tubulações e, conseqüentemente, diminuir sua capacidade.

Além do exposto, conforme Ferreira Filho e Waelkens (2009) uma das maiores preocupações em ETAs é a melhora no processo de coagulação e a redução dos precipitados metálicos, hidróxidos de alumínio ou ferro, que podem se formar junto com o lodo. Segundo James e O'melia (1982) o sulfato de alumínio produz um alto volume de lodo que pode ser de difícil tratamento.

Neste contexto, torna-se necessário buscar formas de reduzir o alumínio nas águas tratadas ou até mesmo sua substituição por algum coagulante alternativo. Neste raciocínio, uma possibilidade é a utilização de coagulantes naturais como o extrato das sementes de *Moringa oleifera* que possui boas eficiências de remoção de cor (MADRONA et al., 2010), turbidez (NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1998a) dentre outros, além de possuir menor produção de lodo se comparado com o sulfato de alumínio (NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995). As sementes podem ser utilizadas tanto no tratamento de água potável para abastecimento (POUMAYE et al., 2012; VARKEY, 2020), quanto em águas residuárias domésticas (VUNAIN et al., 2019) e industriais (DOTTO et al., 2019).

As sementes de *Moringa oleifera* oferecem uma facilidade para serem empregadas no tratamento de água de áreas rurais em países em desenvolvimento, devido a simplicidade que podem ser utilizadas. Uma forma de se obter água limpa é por meio da adição do pó da semente na água e após a sedimentação dos flocos formados o sobrenadante é filtrado através de um pano fino (VARKEY, 2020).

Na ETA pode ocorrer a ruptura dos flocos, que é um fator inerente ao sistema de tratamento, uma vez que a partir de determinados valores, as forças de cisalhamento que podem ocorrer em alguma etapa do processo de tratamento, normalmente em singularidades como passagem de água entre as câmaras do floculador, entrada do decantador, flotador ou filtro, dentre outros, podem provocar esta ruptura. Por isso é importante o estudo da eficiência de remoção de parâmetros característicos do tratamento de água quando os flocos são submetidos a forças de cisalhamento maiores que aquelas em que foram dimensionadas as unidades de tratamento, além de verificar se após a ruptura ocorre ou não a refloculação e como o aumento no gradiente afeta o tamanho dos flocos.

A presente pesquisa faz parte de uma linha que utiliza métodos não destrutivos e não intrusivos por meio de análise de imagens digitais para o acompanhamento da floculação aplicado no tratamento de água para abastecimento. Os principais trabalhos do grupo, listados em ordem cronológica, são mostrados no Quadro 1.1.

Embora existam muitos estudos avaliando a eficiência da *Moringa oleifera* como coagulante, não foram encontradas pesquisas utilizando-se medições diretas para o acompanhamento da floculação. Considerando as pesquisas mostradas no Quadro 1.1, este trabalho se insere na mesma linha e busca avaliar a floculação da *Moringa oleifera* como coagulante em água produzida com cor aparente elevada utilizando-se de um método de análise de imagens obtidas por método não intrusivo e não destrutivo para assim avaliar a DTP, dimensão fractal, resistência, formação e recrescimento dos agregados formados.



Quadro 1.1 - Trabalhos realizados anteriormente utilizando análise de imagens digitais no acompanhamento da floculação

(continua)

<b>Período</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Nível de pesquisa</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Trabalhos publicados</b>
2001 - 2004	Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi	Doutorado	Estudo de partículas e microbolhas por meio da análise de imagem digital em estação de tratamento em escala piloto.	Santos et al. (2004); Moruzzi (2005); Moruzzi e Reali (2007); Moruzzi e Reali (2010).
2012 - 2015	Prof. Dr. Marcelo de Júlio, Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi, Prof. Dr. John Gregory, Prof. Dr. Luiza Cintra Campos	Projeto de Pesquisa em parceria com Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), University College of London (UCL) e UNESP outorgado e financiado pelo edital FAPESP/SABESP	Implementação de sistema de monitoramento contínuo de partículas flocculentas em estações de tratamento que empregam coagulação e floculação.	Moruzzi et al. (2016); Moruzzi et al. (2017).
2013 - 2014	Ma. Pamela Moreno	Mestrado	Aplicação da lama vermelha no tratamento de água e emprego de técnica dedicada de análise de imagem no desempenho da floculação.	Moreno (2014); Moreno et al. (2015); Moreno et al. (2016).
2014 - 2015	Prof. Dr. André Luiz de Oliveira	Pós-doutorado	Estudo de partículas flocculentas e monitoramento contínuo da floculação.	Oliveira et al. (2014); Oliveira et al. (2015a); Oliveira et al. (2015b); Oliveira et al. (2015c).
2013 - 2017	Me. Pedro Augusto Grava da Silva	Iniciação Científica e Mestrado	Avaliação da resistência, refloculação e geometria não euclidiana no tratamento de água.	Silva (2016); Silva, P. A. G. (2017).

(continua)

<b>Período</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Nível de pesquisa</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Trabalhos publicados</b>
2015 - 2017	Me. Luan Serafim Mendes Gonçalves	Mestrado	Análise da evolução do diâmetro fractal de agregados formados na floculação de água de baixa turbidez utilizando técnicas de obtenção e tratamento de imagem digital.	Gonçalves (2017).
2015 - 2017	Me. Ricardo Henrique de Andrade Dutra	Mestrado	Obtenção de parâmetros cinéticos de floculação utilizando técnicas de obtenção e tratamento de imagem digital.	Dutra (2017).
2015 - 2017	Me. Yuri Cardoso Mendes	Mestrado	Análise da evolução da Distribuição do Tamanho de Partículas na floculação de água de baixa turbidez.	Mendes (2017); Mendes et al. (2020).
2015 - 2017	Juliana Carvalhinho Büll	Iniciação Científica	Investigação de parâmetro da floculação, utilizando o monitoramento contínuo da floculação por dispersão de luz.	Büll, Silva e Moruzzi (2016); Büll (2017).
2016 - 2017	Adolfo Freitas Terra Silva	Iniciação Científica	Avaliação da Distribuição de Tamanho de Partículas em água com cor aparente elevada empregando técnica de análise de imagens.	Silva, A. F. T. (2017).
2016 - 2017	Thaís de Almeida	Iniciação Científica	Investigação da eficiência de separação sólido-líquido no tratamento de águas de abastecimento monitorado por análise de imagem e dispersão de luz.	Almeida (2017)
2016 - 2018	Ma. Alessandra da Silva Oliveira	Mestrado	Avaliação da morfologia e da DTP para pontos distintos do diagrama de coagulação/ floculação.	Oliveira, A. S. (2018); Oliveira et al. (2018).

(conclusão)

<b>Período</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Nível de pesquisa</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Trabalhos publicados</b>
2016 - 2018	Me. Ricardo Fonseca de Oliveira	Mestrado	Obtenção das constantes cinéticas de agregação e ruptura antes e após quebra dos flocos, em água com cor elevada.	Oliveira, R. F. (2018).
2016 - 2018	Me. Marcelo Vandenberg Barbosa Borges	Mestrado	Avaliação da eficiência de remoção de cor em função da DTP e no fator de força.	Borges (2018).
2017 - 2019	Me. Sabrina de Oliveira Anício	Mestrado	Determinação de relação entre parâmetros representativos da DTP, dimensão fractal e o IF obtido por meio do equipamento de análise de dispersão fotométrica	Anício (2019).
2018 - 2020	Me. Filipe Augusto Silva de Almeida	Mestrado	Análise a influência da porosidade e massa específica nas velocidades de sedimentação de agregados fractais formados por meio de sulfato de alumínio e policloreto de alumínio.	Almeida (2020).

Fonte: O autor.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 *Objetivo Geral*

Investigar as características dos flocos formados com a utilização de *Moringa oleifera* como coagulante em água produzida com cor elevada.

### 1.1.2 *Objetivos específicos*

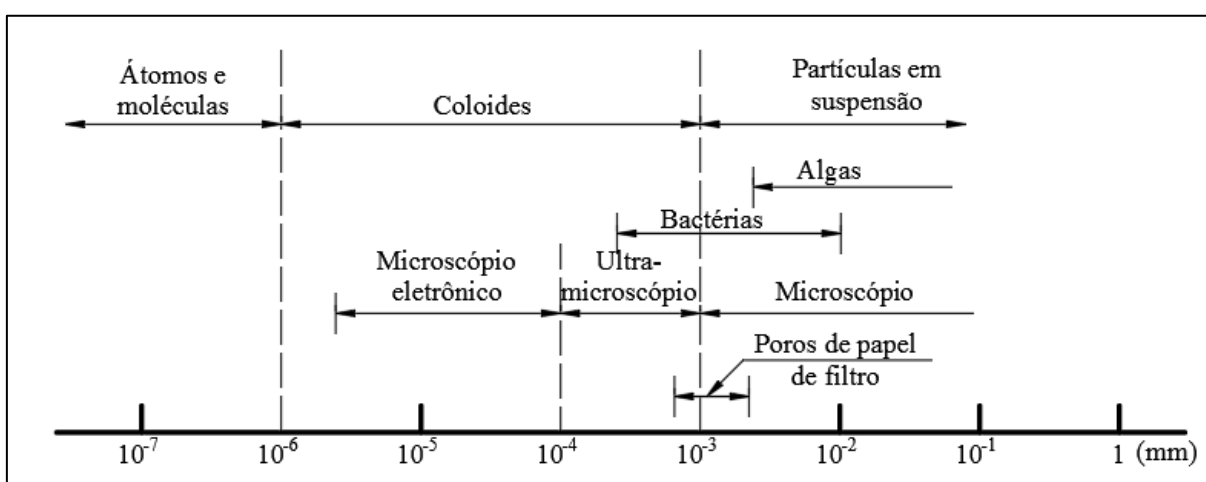
- Comparar a eficiência da *Moringa oleifera* utilizada como coagulante em água com cor aparente elevada por meios das técnicas de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) e sedimentação;
- Estabelecer e avaliar o diagrama de coagulação da *Moringa oleifera*;
- Avaliar a resistência, força e recuperação dos flocos quando rompidos a dois gradientes médios de ruptura diferentes;
- Avaliar a distribuição temporal da DTP e da dimensão fractal em diferentes pontos do diagrama de coagulação e sob diferentes gradientes de floculação, antes e após ruptura;
- Analisar a distribuição temporal do diâmetro médio dos flocos, por meio de análise de imagens e pelo Índice de Floculação (IF), antes e após ruptura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SUSPENSÃO COLOIDAL

Os recursos hídricos superficiais, como rios e lagos, contêm quantidades consideráveis de material coloidal que não são removidos facilmente por agregação e sedimentação uma vez que seu tamanho, concentração e propriedades de superfície são desfavoráveis (TSE et al., 2011). As partículas coloidais possuem tamanho entre  $10^{-6}$  e  $10^{-3}$  mm conforme pode ser observado na Figura 2.1, que apresenta a ordem de grandeza das partículas que podem estar presentes na água.

Figura 2.1 - Ordem de grandeza das partículas presentes na água



Fonte: Adaptado de Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 1973).

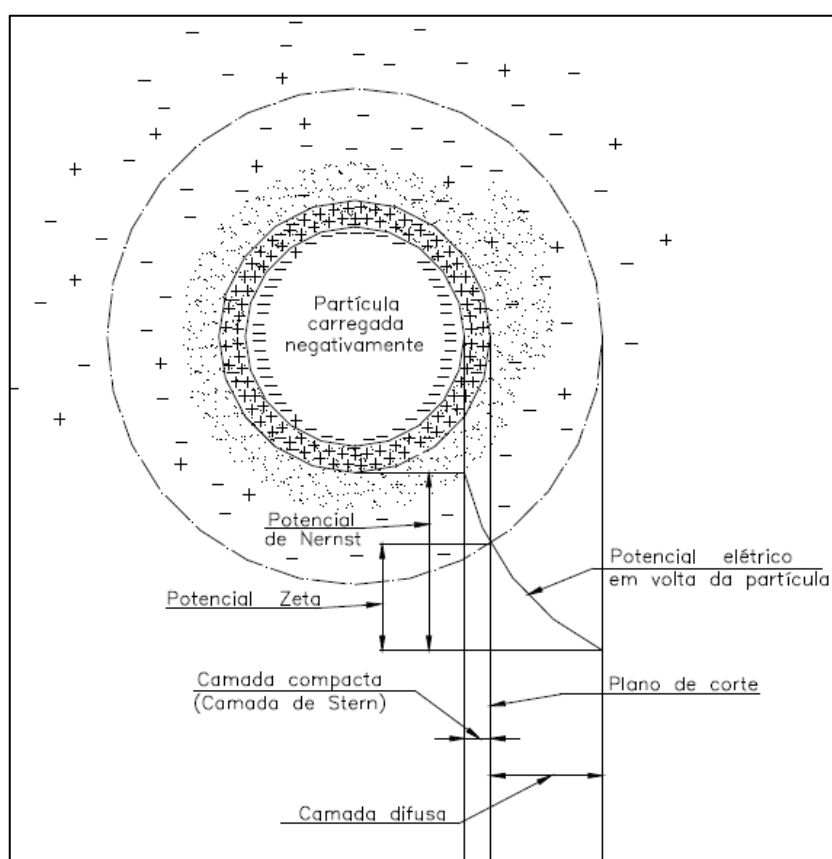
As partículas coloidais presentes na água geralmente apresentam cargas negativas em sua superfície fazendo com que ocorra repulsão entre elas, o que impede que sejam agrupadas em partículas maiores, dificultando a sua remoção. Com isso é necessário a utilização de produtos químicos ou naturais que melhorem a cinética e a agregação de partículas em flocos (TSE et al., 2011).

Os arranjos estruturais e associação de coloides estão divididos em sistemas dispersos, coloides hidrofílicos, redes coloidais, associação de coloides e complexos coloidais. Já as forças de interação entre coloides podem ser classificadas em seis categorias: dupla camada elétrica; atração de superfície ou London-van der Waals; estérica; hidrofóbica; molecular de repulsão

ou repulsão de Born e força de hidratação e de solvatação (BOTARI; DI BERNARDO; DANTAS, 2012).

A junção do movimento Browniano com a carga superficial do coloide faz com que ocorra a formação da Dupla Camada Elétrica (DCE). A dupla camada é dividida em duas regiões: Camada de Stern ou Camada Compacta (CC) e a Camada Difusa (CD), conforme apresentado na Figura 2.2 (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Figura 2.2 - Esquema da dupla camada elétrica



Fonte: Adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005)

Devido a carga negativa da superfície da partícula coloidal ocorre o acúmulo de cátions que se ligam fortemente na superfície da partícula, formando a CC que tem cerca de 0,5 nm. Os íons negativos se aproximam da CC e atraem íons positivos, formando a CD. Dependendo das características da solução a DCE pode ter até 30 nm de extensão (HOWE et al., 2012).

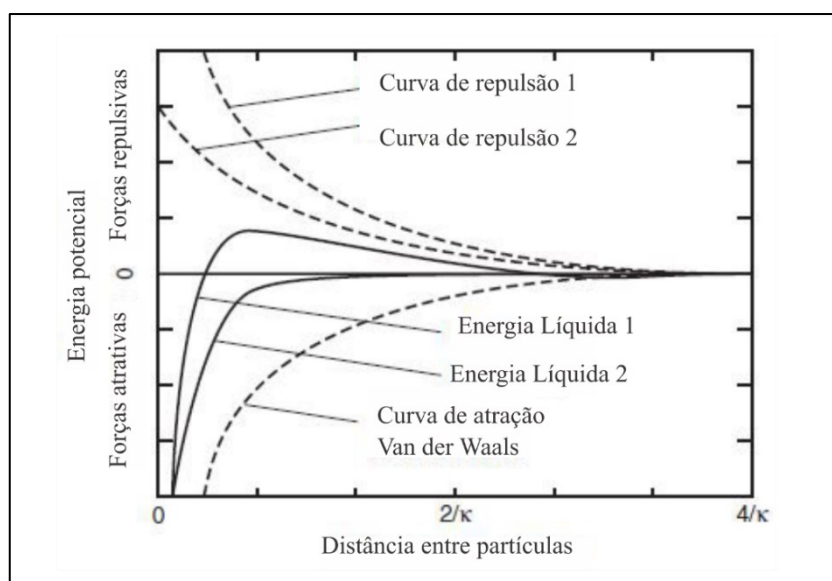
Quando uma partícula carregada é submetida a um campo magnético entre dois eletrodos, a partícula carregada positivamente se move em direção ao eletrodo negativo, e vice versa. O

movimento da partícula faz com que parte da água caminhe junto com ela, representando o plano de cisalhamento. O plano de cisalhamento real se encontra na camada difusa à direita do plano de cisalhamento definido pela CC. O potencial medido no plano de cisalhamento entre a partícula e a solução é chamado de potencial zeta (CRITTENDEN et al., 2012).

Uma boa forma de realizar o controle do comportamento dos coloides é por meio do potencial zeta, visto que ele indica mudanças no potencial da superfície e a força de repulsão entre eles, sendo uma maneira de avaliar o favorecimento do pH e dosagem de coagulantes no tratamento de água (LEDÓ, 2008).

A coagulação tem por objetivo principal tornar prevacentes as forças de ligação em detrimento das forças de repulsão. A teoria de DLVO proposta pelos pesquisadores Derjaguin, Landau, Verwey e Overbeek propõe que a interação entre partículas de uma suspensão coloidal depende da interação das forças repulsivas, geradas pela DCE e as forças atrativas de van der Waals (CRITTENDEN et al., 2012). A Figura 2.3 apresenta um diagrama teórico do modelo DLVO, que ilustra a interação entre duas partículas representadas por placas planas e cargas semelhantes.

Figura 2.3 - Energia potencial atraente e repulsiva entre duas partículas representadas por placas planas e carga semelhante



Fonte: Adaptado de Crittenden et al. (2012).

A diferença entre as forças de repulsão e atração é a energia total líquida representadas pelas linhas contínuas para duas situações. Na situação 1, as forças de atração predominarão em distâncias muito curtas e longas, a força líquida que mantém as partículas unidas é fraca e os flocos formados podem ser facilmente rompidos. Já na situação 2 a extensão da força repulsiva é reduzida consideravelmente e não existe uma barreira de energia a ser superada (CRITTENDEN et al., 2012).

O entorno do coloide pode ser alterado de diversas maneiras, como abaixamento do potencial zeta, por meio de alterações no pH, na atmosfera iônica; ou com o fornecimento de energia cinética ao sistema para que o número de colisões entre partículas seja maximizado (LEDÓ, 2008).

## 2.2 COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

No tratamento de água, a coagulação objetiva a desestabilização das partículas coloidais e suspensas realizada por meio de ações físicas e reações químicas, com curta duração (LIBÂNIO, 2010). O processo é muito rápido, podendo durar décimos de segundo a cerca de 100 s, de acordo com os demais parâmetros que podem alterar o processo. Em seguida é necessário que o gradiente de velocidade seja reduzido para que ocorram choques entre as partículas para que as mesmas se aglomerem e formem flocos, sendo esta etapa denominada de floculação (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A coagulação é uma das etapas mais importantes em uma ETA, visto que as demais dependem dela. Conforme Cleasby et al. (1989) apud Budd et al. (2004) em pesquisas realizadas em estações de tratamento nos Estados Unidos mostraram que o processo de coagulação é mais importante que as características físicas dos filtros para remoção de partículas. Portanto é indispensável que o processo seja compreendido e caracterizado com certa precisão de forma a otimizar a ETA.

A coagulação é um fenômeno complexo e de acordo com Amirthrajah e O'Mélia (1990) pode ser afetada pelos seguintes fatores: dosagem de coagulante, pH, cor ou concentração de substâncias húmicas presentes na água, turbidez, ânions e cátions, intensidade da mistura rápida, gradiente de velocidade da mistura lenta, temperatura da água e mobilidade eletroforética das partículas ou potencial zeta.



### *2.2.1 Mecanismos de coagulação*

Os mecanismos que podem ocorrer para a desestabilização das partículas são os seguintes: compressão da dupla camada elétrica, adsorção e neutralização de carga, varredura, adsorção e formação de pontes, os quais serão descritos a seguir. De acordo com Howe et al. (2012), embora os mecanismos possam ser discutidos separadamente, a desestabilização das partículas geralmente ocorre com mais de um mecanismo simultâneo.

**Compressão da dupla camada elétrica:** de acordo com Di Bernardo e Dantas (2005) a adição de íons de carga contrária num sistema coloidal provoca o aumento da densidade de cargas na CD causando uma redução na dupla camada elétrica e permitindo que as partículas se aproximem uma das outras. Panavelli (2001) descreve que este mecanismo é observado no encontro da água de um rio com o mar, ocorrendo o aumento da força iônica e consequentemente a formação de depósitos. Segundo Howe et al. (2012) o aumento da força iônica não é prático no tratamento de águas.

**Adsorção e neutralização de carga:** dependendo do pH do meio ocorre a formação de espécies hidrolisadas de carga positiva que podem ser adsorvidas na superfície das partículas, fazendo com que elas desestabilizem. Caso a superfície da partícula não tenha carga a DCE não existirá, portanto, as forças de van der Waals podem causar a junção das partículas (LIBÂNIO, 2010).

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005) este mecanismo é de grande importância em ETAs que utilizam filtração direta, uma vez que não é necessário a formação de flocos para sedimentarem, já que para a tecnologia de tratamento citada é necessário apenas que as partículas sejam desestabilizadas para que sejam removidas no leito filtrante.

**Varredura:** dependendo da dosagem de coagulante, pH da mistura e concentração de íons, poderá ocorrer a formação de precipitados insolúveis, como hidróxido de alumínio e hidróxido de ferro III, a depender do coagulante utilizado (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Segundo Packham (1964) a concentração de coagulante para que se tenha o mecanismo de varredura não é diretamente proporcional a concentração de coloides, as condições ótimas de coagulação não correspondem ao ponto de mínimo potencial zeta.

De acordo com Libânio (2010) o mecanismo é muito utilizado em estações de tratamento que possuem a etapa de sedimentação anterior aos filtros, já que os flocos formados são de maior peso e consequentemente possuem maiores velocidades de sedimentação se comparado com os flocos formados pelo mecanismo de adsorção e neutralização de cargas.

**Adsorção e formação de pontes:** segundo Di Bernardo e Dantas (2005) o mecanismo de adsorção e formação de pontes envolve o uso de polímeros com grandes cadeias moleculares que servem como pontes entre a superfície a que estão aderidos e outras partículas. De acordo com Amirthrajah e O'Mélia (1990) a desestabilização ocorre quando segmentos de um polímero adsorvem mais de uma partícula. No momento em que um polímero entra em contato com uma partícula coloidal, alguns dos grupos reativos do polímero adsorvem a superfície da partícula, deixando outras porções se estendendo para a solução.

### *2.2.2 Coagulantes*

Muitos coagulantes são amplamente utilizados para o tratamento de água, eles são classificados como inorgânicos, polímeros orgânicos sintéticos e coagulantes naturais, sendo o sulfato de alumínio, um sal inorgânico, o mais utilizado em estações de tratamento no Brasil (OKUDA et al., 1999; LO MONACO et al., 2010; LEMOS; AGUIAR FILHO; CAVALLINI, 2020). Segundo Howe et al. (2012) outros coagulantes inorgânicos extensivamente usados são o cloreto de alumínio, íons férricos e sais pré - hidrolisados desses dois metais.

De acordo com Guzmán et al. (2013) os polímeros sintéticos orgânicos possuem alta massa molecular e boa eficiência de remoção de impurezas em uma ampla faixa de pH, porém devido ao alto custo eles são utilizados como auxiliares de coagulação com os coagulantes inorgânicos. Eles podem ser classificados como catiônicos, aniônicos e não iônicos. Conforme Lima (2007) os flocos gerados com a utilização de coagulante inorgânico metálico e um polímero aniônico têm maior densidade devido a menor quantidade de água nos flocos.

Já os coagulantes naturais são uma alternativa para o tratamento de águas, pois evita o uso de produtos químicos e são mais compatíveis com o meio ambiente. De acordo com Choy et al. (2013) os coagulantes naturais possuem, além de agentes clarificadores, propriedades microbianas e em alguns casos, remoções de metais pesados.

Existem diversos trabalhos utilizando diferentes coagulantes naturais para o tratamento de águas, tanto águas de abastecimento quanto residuárias, como exemplo: Quitosana (MORAES et al. 2008; DÍAZ et al., 2015), Tanino (ÖZACAR; ŞENGİL, 2003; SÁNCHEZ-MARTÍN; GONZÁLEZ-VELASCO; BELTRÁN-HEREDIA, 2010), *Moringa oleifera* (NKURUNZIZA et al., 2009; BELTRÁN-HEREDIA; SÁNCHEZ-MARTÍN; BARRADO-MORENO, 2012), *Cactus latifolia* e *Prosopis juliflora* (DÍAZ et al. 1999), *Margaritarea discoidea* (OLADOJA et al. 2017), *Jatropha curcas* (ABIDIN et al., 2012), *Phaseolus vulgaris* – feijão (ANTOV; ŠĆIBAN; PETROVIĆ, 2010), quiabo (LIMA, 2007; THAKUR; CHOUBEY, 2014), castanha da Índia e algumas espécies da família *Fagaceae* (ŠĆIBAN et al., 2009).

### 2.2.3 Floculação

Após as partículas serem desestabilizadas na etapa de coagulação, a água a ser tratada pode ser encaminhada a um sistema de floculação, onde as partículas serão induzidas a terem contatos entre si para que ocorra a formação de flocos que podem ser removidos futuramente por sedimentação, flotação ou filtração (BRATBY; MILLER; MARAIS, 1977). A floculação pode ocorrer devido a três mecanismos: interação pericínética, interação ortocínética e sedimentação diferencial e são descritas a seguir:

**Interação pericínética:** ocorre devido ao movimento Browniano que faz com que as partículas entrem em contato umas com as outras. A interação ocorre em um curto período de tempo e o tamanho do floco é limitado entre 0,1 a 1,0  $\mu\text{m}$  aproximadamente (BRATBY; MILLER; MARAIS, 1977). Devido ao tamanho das partículas presentes no tratamento de água, de acordo com Moruzzi et al. (2016) a interação pericínética é insignificante se comparada aos demais mecanismos de floculação.

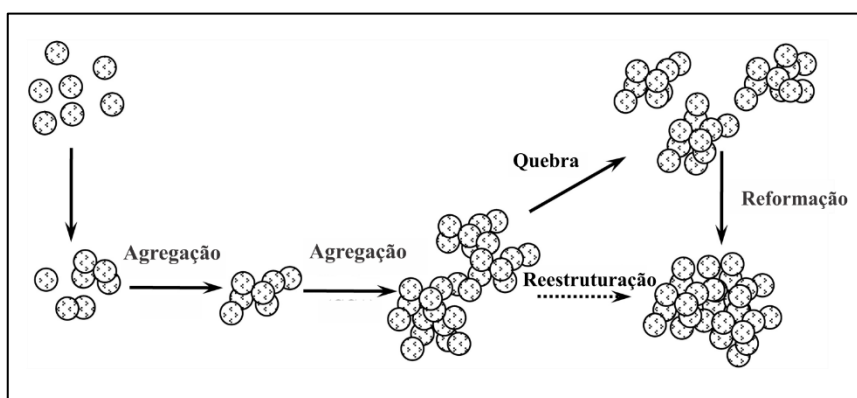
**Interação ortocínética:** após o término da interação pericínética, para que ocorra o contato entre as partículas é necessário que se crie um movimento na massa líquida que é feito através da aplicação de gradientes de velocidade. Quanto maior o gradiente de velocidade, maior será o contato entre as partículas, porém o tamanho final do floco será menor já que ocorre a quebra dos flocos maiores. Logo, existe um tempo limite de floculação no qual os flocos não apresentarão crescimento adicional (BRATBY; MILLER; MARAIS, 1977). De acordo com Mühle (1993) apud Yukselen e Gregory (2004a) pode ocorrer um estado estacionário entre o crescimento e quebra do floco, em função do gradiente de velocidade aplicado.

Conforme Gregory e Rossi (2001) em alguns casos o floco pode atingir um tamanho limite, porém pode ocorrer que eles aumentem e depois diminuam de tamanho, sob as mesmas condições de gradiente de velocidade. As razões ainda não são claras, mas infere-se que ocorra a compactação do floco devido ao gradiente de velocidade.

**Sedimentação diferencial:** é possível que as partículas colidam por possuírem diferentes velocidades de sedimentação, fazendo com que ocorra o aumento do floco e a melhoria em sua sedimentabilidade (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

O processo de agregação, quebra e reestruturação dominam o desenvolvimento da estrutura e do tamanho do floco. Inicialmente, as partículas desestabilizadas entram em contato uma com as outras, gerando pequenos aglomerados. Estes se juntam e formam flocos maiores com uma estrutura mais ramificada e são susceptíveis a ruptura devido ao gradiente de velocidade aplicado, sendo que posteriormente esses flocos rompidos são reestruturados. Após um determinado período de tempo a ruptura e a reformação podem levar a flocos mais fortes e compactos, conforme apresentado na Figura 2.4 (HE et al., 2012).

Figura 2.4 - Crescimento, quebra e reestruturação dos flocos durante a floculação



Fonte: Adaptado de Spicer, Keller e Pratsinis (1996).

#### 2.2.4 Remoção de cor

O mecanismo de coagulação de partículas de cor é diferente para as partículas de turbidez. Isso ocorre devido à diferença nas características das substâncias que as causam. A cor é produzida principalmente pelas substâncias húmicas, que abrange diversos compostos químicos complexos, de peso molecular variável, estão em estado coloidal e têm origem na decomposição

da matéria orgânica. As substâncias húmicas são classificadas em quatro faixas: ácido húmico, ácido fúlvico, ácido himatomelânico e huminas, sendo o ácido fúlvico a fração mais solúvel (CEPIS, 1972). As características de cada classificação são apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Classificação das substâncias húmicas

<b>Faixa</b>	<b>Característica</b>
Ácido fúlvico	Solúvel em hidróxido de sódio e ácidos minerais
Ácido húmico	Solúvel em hidróxido de sódio e insolúvel em ácidos minerais e álcool
Ácido himatomelânico	Solúvel em hidróxido de sódio e álcool e insolúvel em ácidos minerais
Huminas	Insolúvel em água e em hidróxido de sódio

Fonte: Hall e Packham (1965).

De acordo com Mendes (1989) os compostos orgânicos presentes na água podem gerar diversos problemas em sua utilização para consumo humano e industrial, já que são os principais compostos responsáveis pela cor, sendo capaz de causar sabor e odor na água, interferir nos processos de desmineralização, na oxidação de ferro e manganês e proporcionar o crescimento de microrganismos.

#### 2.2.5 *Força, ruptura e recrescimento de flocos*

A força do floco é um parâmetro de grande importância para os estudos de coagulação. O desenvolvimento de uma técnica de quantificação da resistência do floco se torna difícil, devido a variação do tamanho, forma e composição do floco, além de possuírem duas formas de ruptura: erosão superficial e fragmentação em larga escala. A primeira é a remoção de pequenas partículas na superfície do solo, já a outra ocorre a fratura dos flocos que geram partículas de tamanhos semelhantes (JARVIS et al., 2005).

Uma vez que ocorra o aumento do gradiente de velocidade pode haver uma ruptura dos flocos que foram formados. Essa ruptura decorre da intensidade do cisalhamento e da resistência do floco (YUKSELEN; GREGORY, 2004a). Nas ETAs os flocladores são dimensionados de forma a minimizar a quebra dos flocos, porém essa condição ideal pode não acontecer na prática, podendo ocorrer zonas com forças de cisalhamento altas que podem levar os flocos a se romperem (MCCURDY; CARLSON; GREGORY, 2004).

De acordo com Voltan (2007) não existe motivo para que esses flocos rompidos não se formem outra vez, já que os fenômenos de interação entre as partículas são físicos. Segundo Yukselen e Gregory (2004a) em relação ao mecanismo de coagulação, os flocos formados por adsorção e formação de pontes, utilizando-se polímeros de cadeias longas, podem gerar flocos muito fortes se comparado aos flocos advindos da desestabilização por sais inorgânicos, que formam flocos mais fracos.

A resistência do floco contra a ruptura em relação a um gradiente de velocidade pode ser calculada pelo fator de força, conforme Equação 1. O fator de força mede a sensibilidade do floco ao aumento das forças de cisalhamento em sua superfície (FRANÇOIS, 1987). De acordo com Jarvis et al. (2005) o fator de força é um método fácil e rápido para a determinação da força do floco, sendo um indicativo do tamanho que o floco terá após o aumento do gradiente de velocidade.

Já o fator de recuperação mede a capacidade de recuperação de um floco após ser rompido por um determinado gradiente de velocidade e é mostrado na Equação 2. Este fator indica a sensibilidade do floco quanto à intensidade da mistura em relação à capacidade de refloculação (FRANÇOIS, 1987).

$$Fator\ de\ força = \frac{d_2}{d_1} \times 100 \quad (1)$$

$$Fator\ de\ recuperação = \frac{d_3 - d_2}{d_1 - d_2} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

$d_1$  o diâmetro médio do floco antes da ruptura;

$d_2$  o diâmetro médio do floco após a ruptura;

$d_3$  o diâmetro médio do floco após refloculação.

Yukselen e Gregory (2004b) estudaram o efeito da mistura rápida na formação, quebra e refloculação em água com turbidez utilizando sulfato de alumínio e um polieletrólito catiônico (polyDADMAC) como coagulantes, por meio de monitoramento óptico contínuo. Foram realizados ensaios de jarteste com os seguintes parâmetros de operação: gradiente médio de

mistura rápida ( $G_{mr}$ ) de  $518 \text{ s}^{-1}$  por 5 a 60 s; gradiente médio de floculação ( $G_f$ ) de  $23 \text{ s}^{-1}$  por 10 min. Terminado o período de floculação foi realizado a quebra dos flocos com gradiente médio de ruptura ( $G_{rup}$ ) de  $518 \text{ s}^{-1}$  por 10 s; reduziu-se novamente o gradiente de velocidade para  $23 \text{ s}^{-1}$  até que o tempo de ensaio, após a quebra dos flocos, fosse de 20 min. Por fim, após 30 min de sedimentação o sobrenadante foi coletado. Para que os resultados fossem comparados, foram realizados ensaios de sedimentação sem a quebra dos flocos, utilizando-se os mesmos parâmetros de mistura rápida e lenta apresentados.

Os resultados mostraram que a formação dos flocos durante a mistura lenta é fortemente influenciada pelo gradiente de mistura rápida. Em todas as ocorrências o valor do índice de floculação (IF) atingiu um máximo rapidamente, demonstrando o estado estacionário entre quebra e crescimento de flocos, sendo este valor maior nos períodos mais curtos de mistura rápida, o que indica flocos maiores. Após a quebra o valor do IF foi reduzido para aproximadamente o mesmo valor em todos os casos, indicando que o tamanho final do floco é em função das condições de quebra e não do modo de formação do floco. Os resultados mostraram também que a ruptura dos flocos não é totalmente reversível. Quanto a turbidez antes e depois da quebra e refloculação dos flocos observou-se queda na eficiência de remoção após a quebra e também com o aumento do tempo de mistura rápida.

Yukselen e Gregory (2004a) avaliaram o efeito do cisalhamento na formação e quebra de flocos gerados usando sulfato de alumínio, cloreto de polialumínio e dois polieletrólitos catiônicos com metodologia similar a Yukselen e Gregory (2004b), com diferença que o tempo de mistura rápida foi fixado em 10 s e a quebra do floco foi realizada em vários tempos diferentes: 10, 30, 60 e 300 s. Os resultados mostraram que a quebra dos flocos é bastante rápida, já que para os tempos entre 30 e 300 s o índice de floculação reduziu-se para valores próximos. Para o tempo de quebra de 10 s a redução foi menor, indicando que não houve tempo suficiente para completar a quebra.

Por meio de um equipamento de difração a laser, Jarvis, Jefferson e Parsons (2005) avaliaram o crescimento, quebra e refloculação em água com alta matéria orgânica e baixa turbidez e alcalinidade. Foram utilizados diferentes coagulantes e os ensaios em reatores estáticos foram realizados com os seguintes parâmetros de operação: mistura rápida a 200 rpm por 1,5 min; mistura lenta a 30 rpm por 15 min. Para realizar a quebra dos flocos foi utilizado uma mistura a 200 rpm por dois tempos diferentes 30 s e 15 min. Em seguida foi realizado novamente

mistura lenta a 30 rpm por 15 min para avaliação da refloculação. Os resultados do estudo apontaram que independente do coagulante utilizado os flocos não voltaram ao tamanho que tinham antes da quebra. Observaram-se também que a quebra dos flocos foi menor quando o tempo de agitação foi menor.

## 2.3 FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

O processo de flotação é utilizado na indústria de mineração com a finalidade de separar minérios a mais de 100 anos, além de ser utilizado também nas estações de tratamento de esgoto para o adensamento do lodo. Sua aplicação em estações de tratamento de água é mais recente, iniciada a pouco mais de 40 anos na Suécia e África do Sul (RICHTER, 2009).

De acordo com Metcalf e Eddy (2007) a flotação é um processo de separação por gravidade ocasionado por bolhas de gás que se juntam com as partículas, fazendo com que a densidade bolha-partícula seja menor que a do líquido, causando sua ascensão até a superfície.

Segundo Zabel (1985) a flotação oferece diversas vantagens em relação a sedimentação, dentre elas: pode produzir água com melhor qualidade; as taxas de aplicação superficial são mais altas, resultando em plantas relativamente pequenas; pode ser iniciado rapidamente, com qualidade constante de água em 45 min.

Existem diversas técnicas de flotação dentre elas: flotação eletrolítica ou eletroflotação; flotação por ar disperso; autoflotação ou flotação espontânea e Flotação por Ar Dissolvido (FAD). De acordo com Lopes (2011) a flotação eletrolítica é realizada por eletrólise da água para a formação de bolhas de hidrogênio e oxigênio e é uma técnica utilizada para o tratamento de despejos de tintas, emulsões de pintura e efluentes de radioativos. A autoflotação pode ocorrer em suspensões de algas, que podem se tornar supersaturadas devido ao oxigênio dissolvido gerado pela fotossíntese.

Na flotação por ar disperso a separação é realizada por meio da introdução de bolhas de ar em uma suspensão aquosa, também denominada de polpa. Sendo uma técnica muito utilizada em indústrias de minério (LEDÓ, 2008).



Já na FAD as partículas são removidas por pequenas bolhas de ar que são geradas pela redução da pressão na corrente líquida saturada de ar que advém de uma câmara de saturação (RICHTER, 2009). Segundo Phan et al. (2003) a interação entre as bolhas e as partículas é um processo fundamental para a flotação, por isso segundo Lopes (2011) é importante que as microbolhas sejam distribuídas uniformemente para que exerçam sua função com máxima eficiência, sendo que, quanto maior o número de bolhas ligada aos flocos, menor a densidade do conjunto e, conseqüentemente, maior a velocidade ascensional.

O sistema de FAD pode ser utilizado por três formas diferentes e depende do método de pressurização utilizado: com pressurização total da vazão afluyente; com pressurização parcial da vazão afluyente e com recirculação pressurizada, sendo o último o mais empregado em ETAs, no qual ocorre a pressurização de parte da água que já foi tratada (LOPES, 2011).

Os principais componentes do processo de FAD são a bomba de pressurização, o sistema de adição de reagentes, o sistema de injeção de ar, a câmara de saturação, a válvula despressurizadora e a célula de flotação (SANTOS, 2014). De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005) a célula de flotação dispõe dos seguintes elementos essenciais: zona de mistura entre a água floculada e pressurizada, zona de clarificação e zona de remoção de lodo.

Segundo Rijk, Van Der Graaf e Den Blanken (1994) existem dois mecanismos possíveis para a adesão entre as bolhas de ar e os flocos. O primeiro é por meio da inclusão de bolhas de ar nos flocos, sendo facilitada quando eles forem maiores e tiverem forma mais irregular. O segundo ocorre por adsorção das bolhas pela parte externa dos flocos, sendo esta causada pela interação entre a bolha e o floco ou então por ele servir como um núcleo para a produção da bolha.

Quanto ao tamanho das bolhas formadas é importante que sejam pequenas ( $< 100\text{-}120\ \mu\text{m}$ ) pois possuem velocidade de subida menor que as grandes e, portanto, possuem maior tempo de permanência na unidade e, conseqüentemente, maior a possibilidade de colisão entre a bolha e o floco, além de aderirem ao floco com maior facilidade (RIJK; VAN DER GRAAF; DEN BLANKEN, 1994).

A formação de bolha em um sistema de flotação é realizada por meio da saturação com ar em uma câmara de saturação e posterior redução dessa pressão à atmosférica (HAHN, 1982).

Segundo Edzwald (1995) para que seja garantido pequenas bolhas a pressão na câmara de saturação deve estar entre 400 e 600 kPa. Porém de acordo com Rijk, Van Der Graaf e Den Blanken (1994) acima da pressão de 500 kPa a pressão exerce pouca influência no tamanho da bolha.

De acordo com Coutinho (2017) a taxa de aplicação superficial é um parâmetro de fundamental importância no desempenho da flotação, uma vez que está diretamente ligada a velocidade ascensional. Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) a taxa aplicada nos flotadores está entre 150 e 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, correspondendo a velocidades ascensionais de 10,41 cm/min e 20,83 cm/min. Conforme Richter (2009) a taxa de aplicação superficial pode chegar a 430 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, equivalendo a uma velocidade 29,86 cm/min.

Centurione Filho e Di Bernardo (2002) variaram os parâmetros de operação utilizando um equipamento de Flotateste. Os parâmetros analisados em laboratório foram número de algas, cor aparente e turbidez e utilizou-se sulfato de alumínio como coagulante. A pressão da câmara de saturação foi variada em 300, 400 e 500 kPa com velocidades de flotação de 15, 10, 7,5 e 5 cm/min. O tempo de pressurização foi variado em 3, 8 e 10 min e a taxa de recirculação em 5, 10, 15 e 20% para as mesmas velocidades de flotação já citadas. Quanto à pressão de saturação os melhores resultados para os parâmetros analisados foram encontrados para pressão de 400 kPa, o tempo de saturação de 8 min e taxa de recirculação de 20%, com resultados satisfatórios para 10 e 15%.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS FLOCOS

O entendimento das características físicas dos flocos, principalmente o tamanho e a estrutura, são de grande importância para a concepção e aprimoramento de unidades de separação sólido/líquido em estações de tratamento de água e efluentes (BARTIKO; JULIO, 2014; WAITE, 1999). Nos tópicos seguintes serão abordadas as características físicas de dimensão fractal, diâmetro equivalente e distribuição de tamanho de partículas (DTP).

### 2.4.1 Dimensão fractal

Com a expectativa de compreender sistemas complexos, caóticos e desordenados que não são modelados com facilidade em geometrias convencionais, foi proposto um modelo de geometria fractal pelo pesquisador Mandelbrot em 1975 (BUSHELL et al., 2002). De acordo com Chakraborti, Atkinson e Van Benschoten (2000) os conceitos de geometria fractal são de grande utilidade para descrever a superfície robusta de agregados grandes, irregulares e porosos que não são bem definidos pela geometria euclidiana.

Os flocos gerados no tratamento de água e efluentes são fractais, implicando que eles sejam auto similares e possuam variância de escala (LI et al., 2006). Os flocos são elementos fractais de massa, já que tanto estrutura interna quanto superfície possuem propriedades fractais. A representação matemática da estrutura dos fractais de massa é mostrada na Equação 3, sendo  $M$  a massa das partículas;  $L$  o tamanho das partículas e  $D_{fm}$  a dimensão fractal em massa (WAIT, 1999; BUSHELL et al., 2002; JARVIS; JEFFERSON; PARSONS, 2005). De acordo com Bushell et al. (2002) qualquer objeto que se possa encontrar em um processo físico real tem uma dimensão fractal em massa compreendida entre 1 e 3.

$$M \propto L^{D_{fm}} \quad (3)$$

Uma expressão com sentido semelhante pode ser escrita relacionando o número de partículas por agregado ( $N$ ) e o tamanho do agregado – conforme mostrado na Equação 4 (WAIT, 1999).

$$N \propto L^{D_f} \quad (4)$$

De acordo com Gregory (1997) a dimensão  $L$  pode ser definida de várias formas e geralmente é tomada como o raio de rotação do agregado. Segundo o mesmo autor, a aplicação da Equação 3 sobre uma grande quantidade de agregados demonstra uma das mais importantes características dos agregados fractais que é a autossimilaridade estrutural, ou seja, pequenas partes do agregado possuem a mesma estrutura do agregado como um todo. De acordo com Waite (1999) isso faz com que o conceito de definição fractal seja definido adequadamente apenas quando se usa um limite assintótico para comprimentos infinitamente pequenos.

De acordo com Chakraborti et al. (2003) as dimensões fractais podem ser definidas em termos lineares, planares ou volumétricos, resultando em valores unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, respectivamente. A dimensão fractal bidimensional é definida por uma relação entre a área projetada e o comprimento característicos dos agregados e pode ser calculado conforme Equação 5 (CHAKRABORTI; ATKINSON; VAN BENSCHOTEN, 2000). Outra forma de expressar a dimensão fractal bidimensional é por meio da relação entre a área projetada e o perímetro do agregado, conforme Equação 6 (BUBAKOVA; PIVOKONSKY; FILIP, 2013).

$$A_s \propto l^{D_2} \quad (5)$$

$$A_s \propto p^{D_2} \quad (6)$$

Sendo:

$A_s$  a área projetada;

$l$  o comprimento característico dos agregados;

$D_2$  a dimensão fractal bidimensional.

A suposição do floco como uma esfera equivale a  $D_2$  igual a 2 na geometria euclidiana, que expressa a área como uma medida linear elevada a segunda potência. Agregados com densidade maior possuem dimensão fractal bidimensional próximo de 2 enquanto que agregados que possuem estruturas grandes, altamente ramificadas e pouco ligadas possuem dimensões fractais menores. (CHAKRABORTI; ATKINSON; VAN BENSCHOTEN, 2000).

A partir de técnicas de análise de imagem é possível determinar a dimensão fractal pelo método da contagem de caixas, que consiste em cobrir a imagem do agregado que está sendo analisado com caixas que tenham o mesmo número de dimensões do espaço que os contém. Como as imagens são bidimensionais o agregado é coberto com quadrados de tamanho definido, usando um número mínimo para que ele seja todo coberto. Esse processo é repetido diversas vezes com quadrados menores. A dimensão fractal do agregado é dada por meio do gráfico log-log entre o número de quadrados necessários para cobrir agregado e o tamanho do quadrado (BUSHELL et al., 2002).

De acordo com Bushell et al. (2002) outra forma de determinar a dimensão fractal é por meio da técnica de caixa de areia. A técnica envolve selecionar pontos próximos ao centro da imagem e contar a quantidade de massa de flocos que fica dentro de uma caixa de tamanho determinado situada no centro do ponto selecionado. A dimensão fractal pode ser calculada conforme Equação 7, em que  $N$  é a quantidade de massa contida na caixa e  $L$  o tamanho da caixa.

$$D_f = \frac{\log(N)}{\log(L)} \quad (7)$$

Chakraborti, Atkinson e Van Benschoten (2000) analisaram a dimensão fractal para dois mecanismos de coagulação diferentes: adsorção e neutralização de cargas e varredura, utilizando sulfato de alumínio como coagulante. Foram realizados ensaios de jarteste e a dimensão fractal bidimensional foi determinada por meio do gráfico log-log entre a área projetada e a maior dimensão do agregado. Os resultados encontrados para o diâmetro fractal foram mais baixos para o mecanismo de varredura, no qual geram flocos maiores e mais irregulares.

Gonçalves (2017) utilizou imagens de alta resolução com objetivo de acompanhar a evolução do diâmetro fractal durante a floculação utilizando diferentes coagulantes inorgânicos, Policloreto de Alumínio (PAC), cloreto férrico e sulfato de alumínio em água com turbidez de 6,5 UNT. Foram realizados ensaios de jarteste com diferentes gradientes de mistura rápida. Foi observado que a dimensão fractal apresentou alta variação nos primeiros 15 min de floculação para os três coagulantes, indicando que ainda não estava definida a forma do floco. Os valores encontrados alternaram entre 1,73 e 1,86 e os resultados sugeriram que o desenvolvimento do diâmetro fractal não varia com a alteração do gradiente de velocidade.

#### *2.4.2 Princípio da esfera equivalente e distribuição de tamanho de partículas*

As impurezas encontradas em suspensão na água são estruturas tridimensionais que possuem estruturas irregulares, polidispersas e possuem diferentes propriedades físico-químicas. Os métodos disponíveis para determinar o seu tamanho fornecem um único número como resposta, no qual representa o diâmetro da partícula. A esfera é a única forma possível de ser representada por apenas um número em três dimensões distintas. (SANTOS et al., 2004).

De acordo com Santos et al. (2004) o princípio da esfera equivalente relaciona ao diâmetro da esfera a alguma das propriedades que uma partícula pode ser caracterizada, como maior ou menor dimensão, área projetada, área superficial, volume, velocidade de sedimentação, perímetro da área projetada, dentre outros, podendo assim gerar diferentes diâmetros equivalentes a depender da propriedade analisada.

Um das formas de se determinar o diâmetro equivalente é por meio do Diâmetro de Feret ( $d_F$ ) que representa o diâmetro de um objeto circular com a mesma área que o objeto irregular e é mostrado na Equação 8, em que  $A_i$  é a área do objeto irregular (JUNKER, 2006).

$$d_F = \left( \frac{4A_i}{\pi} \right)^{1/2} \quad (8)$$

A distribuição de tamanho de flocos na água é um fator crítico para que seja determinada a velocidade de sedimentação, sendo este um parâmetro fundamental no processo de coagulação, possuindo assim diversas técnicas para se determinar a DTP, tanto em campo quanto em laboratório (SHEN; MAA, 2016).

A DTP depende do gradiente médio de velocidade e do tempo em que as partículas são expostas a esse gradiente (MORENO, 2014). Ela pode ser definida com base no número de partículas, massa, diâmetro, área superficial e volume. No processo de coagulação voltada para o tratamento de água é usual sua determinação por meio de um contador do número de partículas, no qual são agrupadas por faixas de tamanho (CRITTENDEN et al., 2012).

A determinação da DTP pode ser dividida em dois grupos: com e sem fracionamento da amostra. Nas técnicas com fracionamento as partículas são retiradas da amostra por faixas de tamanho, por meio de etapas de separação e podem ser analisadas individualmente. Já nas técnicas sem o fracionamento da amostra as faixas de tamanho são determinadas por meio de uma única medição, já que não ocorre a separação (SANTOS et al., 2004).

Segundo Crittenden et al. (2012) a distribuição de frequência do número de partículas pode ser representada como a relação entre a concentração do número de partículas e o incremento em seu tamanho, conforme Equação 9.

$$F(d_p) = \frac{dN}{d(d_p)} \quad (9)$$

Sendo:

$F(d_p)$  a função que define a frequência de distribuição das partículas;

$dN$  a concentração do número de partículas em relação a mudança incremental no diâmetro das partículas;

$d(d_p)$  a mudança incremental no diâmetro das partículas.

O número de partículas aumenta quando ocorre a atenuação do tamanho das partículas e a distribuição de frequência obedece a lei de potência mostrada na Equação 10 (CRITTENDEN et al., 2012).

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

Sendo:

$A$  o coeficiente de densidade da lei de potência;

$d_p$  o diâmetro das partículas;

$\beta$  o coeficiente de inclinação da lei de potência.

Aplicando-se log dos dois lados da equação apresentada é possível determinar os coeficientes  $A$  e  $\beta$ , conforme Equação 12. De acordo com Trussel e Tate (1979) apud Crittenden et al. (2012) à medida que o valor de  $A$  aumenta, o número total de partículas em cada faixa também aumenta. Já o coeficiente  $\beta$ , o coeficiente angular do gráfico gerado pela Equação 11, é uma medida do número relativo de partículas em cada faixa de tamanho. Se  $\beta < 1$  a DTP é dominada por partículas grandes; se  $\beta = 1$ , todos os tamanhos de partículas são representados igualmente e se  $\beta > 1$  a DTP é dominada por partículas pequenas.

$$\log \left[ \frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \right] = \log A - \beta \log d_p \quad (11)$$

Mendes (2017) avaliou o processo de DTP para águas de baixa turbidez a partir de análise de imagens utilizando os coagulantes sulfato de alumínio, cloreto férrico e PAC. Foram realizados

ensaios em aparelho de jarreste submetido a diferentes gradientes de velocidade de mistura lenta. Para avaliar o tamanho dos flocos utilizou-se técnica de análise de imagens digitais por método não intrusivo e não destrutivo.

Os resultados mostraram que após determinado tempo de coagulação não ocorre variação significativa na DTP, comprovando a existência do estado estacionário e que para os coagulantes cloreto férrico e PAC o melhor gradiente de mistura lenta foi de  $60 \text{ s}^{-1}$ , o que sugere que em condições de baixa turbidez seja necessário aumentar as colisões entre as partículas para que os flocos tenham um crescimento adequado.

Com semelhanças na metodologia do trabalho descrito anteriormente, Oliveira A. S. (2018) realizou o acompanhamento da DTP para diferentes valores de pH e dosagem de sulfato de alumínio como coagulante. A água de estudo apresentava cor aparente de aproximadamente 100 uH. Os resultados apontaram que independente do mecanismo de coagulação, o aumento do gradiente de mistura promove maior quebra dos flocos e consequente achatamento no histograma da DTP, sendo que para gradientes superiores a  $60 \text{ s}^{-1}$  a distribuição de partículas não apresentou alteração significativa.

## 2.5 MORINGA OLEIFERA

A *Moringa oleifera* é uma espécie vegetal tropical pertencente à família *Moringaceae* e é nativa do noroeste da Índia, podendo ser encontrada no Egito, Filipinas, Sri Lanka, Tailândia, Malásia, Paquistão, Cingapura, Jamaica e Nigéria. A árvore possui tamanho médio, suas folhas são recompostas, pecíolo amarelo ou branco, frutos longos, com seção triangular com 20 a 30 cm de comprimento e sementes trialadas e oleaginosas (LORENZI; MATOS, 2008; RAMACHANDRAN; PETER; GOPALAKRISHNAN, 1980). A árvore e as flores são mostradas na Figura 2.5.

O seu crescimento é favorável em quase todos os tipos de solo, com exceção às argilas duras, contudo tem melhor desenvolvimento em solos arenosos e cresce bem em planícies (RAMACHANDRAN; PETER; GOPALAKRISHNAN, 1980). A árvore é resistente à seca podendo se desenvolver em regiões semiáridas quentes com precipitação anual de 250-1500



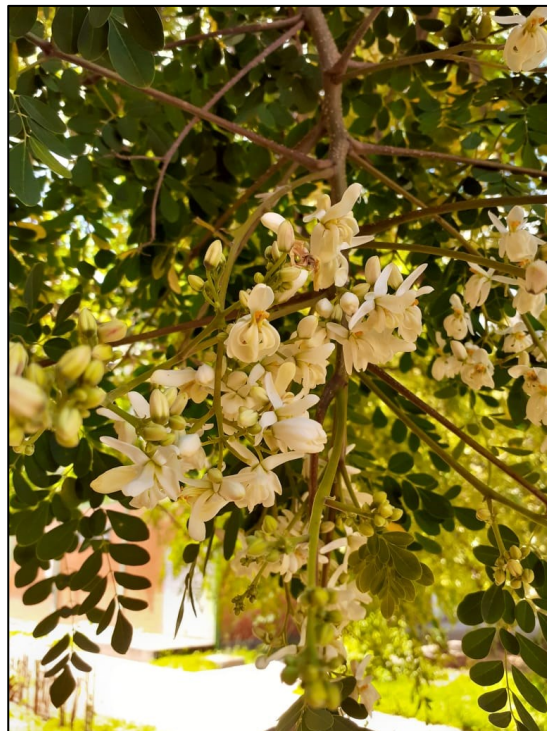
mm e em áreas húmidas com precipitação anual superior a 3000 mm (GHEBREMICHAEL, 2004).

Figura 2.5 - *Moringa oleifera*: (a) árvore; (b) flor

(a)



(b)



Fonte: O autor.

No Brasil a *Moringa oleifera* é conhecida como quiabo-de-quina, rabanete-de-cavalo ou noz-de-bem (LORENZI et al., 2003) e chegou ao país por volta de 1900, porém sua utilização como coagulante teve início em 1996 com a vinda da Dr.<sup>a</sup> Samia Al Azharia Jahn, que trabalha com a utilização da Moringa no tratamento de água em áreas rurais de países como o Sudão e Egito, e fez palestras em distintos locais no Brasil (GERDES, 1996 apud BORBA, 2001).

Devido às várias possibilidades de utilização da *Moringa oleifera* a mesma tem sido denominada como “árvore milagrosa” (HORWATH; BENIN, 2011). Vários componentes da árvore podem ser usados para os mais devidos fins, como as folhas, flores, sementes, vagens, cascas e raízes, podendo citar a seu valor nutricional, propriedades medicinais e como coagulante natural no tratamento de águas (ANWAR et al., 2007).

Quanto ao seu valor nutritivo, todas as partes da árvore de *Moringa oleifera* são comestíveis e utilizadas para alimentação do ser humano há muitos anos (KADHIM; AL-SHAMMAA, 2014). A planta possui fonte rica em vitaminas, proteínas, aminoácidos e diversos fenólicos. O seu consumo melhora o estado de saúde, a eficiência na conversão alimentar e o desempenho de crescimento (FALOWO et al., 2018). O extrato das folhas, que são ricos em sais minerais, agentes oxidantes e vitaminas é utilizado para o tratamento de desnutrição e para melhorar a produção de leite materno em mulheres que amamentam (GOPALAKRISHNAN; DORIYA; KUMAR, 2016). O óleo extraído da semente de *Moringa oleifera* contém uma alta taxa de ácidos graxos monoinsaturados, podendo então substituir o azeite em dietas (LALAS; TSAKNIS, 2002).

Várias partes da planta possuem propriedades medicinais e tem sido utilizada para o tratamento de diversas doenças na medicina indígena e no sul da Ásia, sendo capaz de atuar como estimulante cardíaco e circulatório, diurético, redutor de colesterol, tratamento de inflamação além de ter propriedades antibacteriana, antifúngica e antitérmica (ANWAR et al., 2007). A planta pode ser usada também como agente antiproliferativo, coibindo o crescimento de células cancerígenas, além de poder curar diabetes dos tipos 1 e 2 (GOPALAKRISHNAN; DORIYA; KUMAR, 2016).

De acordo com Mofijur et al. (2014) a *Moringa oleifera* mostra-se também efetiva na produção de biodiesel, tendo capacidade de substituir diretamente os combustíveis fósseis. Os autores fizeram a mistura em 10% e 20% em volume de biodiesel em um motor a diesel e encontraram redução de monóxido de carbono de 10,60% e 22,93% e de hidrocarbonetos em 9,21% e 23,68%, porém foi observado um aumento na emissão de óxido nítrico em 8,46% e 18,58%.

#### 2.5.1 *Moringa oleifera* utilizada como coagulante natural

A utilização da *Moringa oleifera* como coagulante natural para o tratamento de águas superficiais e esgotamentos sanitários domésticos e industriais tem sido estudada. Segundo Ndabigengesere, Narasiah e Talbot (1995) a ação coagulante se deve a presença de proteínas catiônicas solúveis, densamente carregadas e apresentam massa molecular 13 kDa e ponto isoelétrico entre 10 e 11. Gassenschmidt et al. (1995) demonstraram que a massa molecular da proteína é de 6,5 a 7,0 kDa e ponto isoelétrico maior que 10. Ghebremichael et al. (2005)

determinaram que o coagulante é uma proteína catiônica com massa molecular menor que 6,5 kDa e ponto isoelétrico maior que 9,6.

Em contrapartida, Okuda et al. (2001a) realizaram a purificação do componente ativo a partir da extração em solução de cloreto de sódio e concluíram que o componente ativo não possui proteína, polissacarídeo ou lipídeo, mas um polieletrólito orgânico com massa molecular de 3,0 kDa. Ghebremichael et al. (2005) sugerem que o extrato obtido com sal e com água podem ser de naturezas diferentes.

Baptista et al. (2017) fizeram o fracionamento da proteína das sementes de *Moringa oleifera*, para diferentes formas de extração, caracterizaram e avaliaram como coagulante. Foram identificadas as seguintes frações: Albumina, Globumina I, Globumina II, Prolamina, Glutenina e uma parcela insolúvel, sendo as parcelas de Globuminas e Albuminas as encontradas em maior quantidade e apresentaram melhor potencial de coagulação quando comparado à semente não fracionada. A globumina apresentou os melhores resultados sem que ocorresse o aumento de matéria orgânica.

A composição química das sementes descascadas de *Moringa oleifera* foi realizada por Gallão, Damasceno e Brito (2006) e é apresentada na Tabela 2.1, no qual pode-se observar que o composto em maior quantidade são as proteínas e lipídeos.

Tabela 2.1 - Composição química das sementes de *Moringa oleifera*

<b>Composição</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Umidade	%	6,30
Açúcares solúveis	g/100g	3,14
Oligossacarídeos	g/100g	3,31
Amido	g/100g	6,02
Proteínas	g/100g	39,30
Lipídeos	g/100g	18,80

Fonte: Gallão, Damasceno e Brito (2006).

As sementes de *Moringa oleifera* podem ser utilizadas para o tratamento de águas tanto com casca quanto descascadas, porém de acordo com Ndabigengesere, Narasiah e Talbot (1995) melhores resultados são obtidos quando se utiliza as sementes sem a casca.

Para avaliar a interferência do período de coleta na coagulação para a remoção de turbidez, Narayasamy e Saud (2014) fizeram a coleta das sementes em duas estações diferentes, estação seca e chuvosa. Após a realização de ensaios em francos cônicos utilizando água de uma lagoa, avaliou-se cor aparente, turbidez e pH para as duas coletas. Os resultados evidenciaram que as sementes coletadas no período de seca apresentaram maiores eficiências de remoção de turbidez que as coletas no período de chuva.

Em relação a extração do princípio ativo, Ndabigengesere, Narasiah e Talbot (1995) utilizaram água, éter de petróleo, acetona, clorofórmio e hexano, porém a única extração que apresentou atividade coagulante foi a extraída com água.

Okuda et al. (1999) fizeram a extração de diferentes formas, com soluções de cloreto de sódio, nitrato de potássio, cloreto de potássio, nitrato de sódio e com água destilada e concluíram que a extração com solução de cloreto de sódio apresenta atividade de coagulação com dosagens 7,4 vezes menor que a extraída apenas com água destilada. Muthuraman e Sasikala (2014) realizaram extração com cloreto de sódio, hidróxido de sódio e água destilada, sendo que as melhores eficiências de remoção ocorreram quando se utilizou a solução salina.

Já Madrona et al. (2010) realizaram extrações em solução com diferentes concentrações de cloreto de potássio e com água destilada. A solução salina com concentração de 1 mol/L foi a que apresentou maior quantidade de proteínas e melhor eficiência na remoção de cor e turbidez. A melhoria na eficiência de coagulação por solução salina é devido ao mecanismo de salga das proteínas, em que o sal aumenta a solubilidade da proteína à medida que a força iônica do sal aumenta (OKUDA et al., 1999).

Carvalho et al. (2016) realizaram a extração por meio de duas soluções, uma de cloreto de sódio e a outra de cloreto de cálcio, ambas com concentração de sal de 1 mol/L. Foram realizados ensaios de coagulação, floculação e FAD utilizando-se água produzida em laboratório, no qual foi adicionado cloreto de potássio e cloreto de cálcio para conferir dureza; ácido húmico para conferir carbono orgânico dissolvido e cultura de *Microcystis aeruginosa* até que a turbidez da água fosse de 25 UNT. A extração do coagulante utilizando-se cloreto de cálcio apresentou melhores eficiências de remoção de cor e turbidez se comparado com a extração por cloreto de sódio, porém não foram observadas diferenças nas taxas de proteínas para as duas extrações, sugerindo assim que os íons de cálcio participaram do processo de coagulação.

Camacho et al. (2017) compararam a utilização das sementes de *Moringa oleifera* para remoção de turbidez e cianobactérias de quatro formas diferentes: apenas o pó; após remoção do óleo por método pressurizado; após remoção do óleo e extração do princípio ativo com etanol e cloreto de sódio e por extração do princípio ativo com cloreto de sódio. Os resultados apontaram que a extração do óleo não altera os resultados e que é necessário a extração do princípio ativo apenas para águas com baixa turbidez, já que em águas com alta turbidez a utilização direta do pó apresentou alta eficiência de remoção. A remoção do óleo também não demonstrou alterações nos resultados das pesquisas realizadas por Gámez, Luna-delrisco e Cano (2015).

O Processamento das sementes para se obter o pó utilizado na extração do princípio ativo pode ser realizado de diversas formas, não existindo um método padronizado para a etapa. Alguns autores utilizam o liquidificador doméstico (NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995; NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1998a; CAMACHO et al., 2017) enquanto outros utilizam processos manuais, como almofariz e pilão (OKUDA et al., 1999; OKUDA et al., 2001b). Em todos os trabalhos citados as sementes são armazenadas com casca e são descascadas apenas no momento da extração.

Com o objetivo de avaliar a eficiência do processamento em relação aos equipamentos utilizados, Arantes, Ribeiro e Paterniani (2012) fizeram por meio de quatro equipamentos diferentes: máquina de moer; pilão; liquidificador e mixer. O pó obtido da máquina de moer e do pilão foram divididos em duas partes, sendo uma delas homogeneizada em peneira de 0,8 mm. Após ensaio de sedimentação, a água tratada com os extratos que foram feitos a partir do processamento no pilão e na máquina de moer com peneiramento apresentaram melhores resultados na remoção de turbidez.

Para avaliar as condições de armazenamento das sementes na eficiência de coagulação Katayon et al. (2006) guardaram as sementes moídas de *Moringa oleifera* em dois recipientes, um fechado e outro aberto e armazenados refrigerados e a temperatura ambiente por um, três e cinco meses. Os resultados mostraram que não houve diferença significativa na coagulação entre as sementes que ficaram em recipiente aberto ou fechado e nem entre os que ficaram em temperatura ambiente ou refrigerados. Porém, a que foi mantida por um mês apresentou melhores resultados que as que foram mantidas por mais tempo.

Por outro lado, de acordo com Pritchard et al. (2010b) até os dezoito meses após a colheita das sementes não é observado queda na eficiência de remoção, porém a faixa de dosagem para garantir a máxima remoção é menor. Em seus resultados, observou-se que para sementes com doze meses de colheita uma faixa mais ampla de dosagens atingiu boas remoções de turbidez e que o desempenho foi reduzido significativamente após vinte e quatro meses.

No trabalho desenvolvido por Valverde et al. (2014) foi estudado o tempo de degradação do pó das sementes de *Moringa oleifera* armazenado a 4°C. A partir de ensaios de jarteste realizados em água coletada em uma concessionária de tratamento de água foi concluído que o pó da semente deve ser utilizado em no máximo sete dias, pois a partir desse tempo ocorre uma queda nas propriedades de coagulação/ floculação.

Por outro lado, Gámez, Luna-delrisco e Cano (2015) realizam um estudo para verificar as condições de armazenamento do coagulante após a extração do princípio ativo por diferentes formas. Ensaio de jarteste foram realizados em água coletada no rio Picacha (Colômbia). A solução coagulante foi armazenada sob duas condições de temperatura diferentes: em geladeira a 4 °C e a temperatura ambiente (24 °C) por um período de três meses. Foram verificadas também a relação entre a eficiência de remoção de cor e turbidez com o tempo de armazenamento da solução coagulante, sendo os ensaios realizados 1, 2 e 3 meses após o armazenamento da solução.

Os resultados mostraram que não houve variação significativa na remoção de turbidez entre as duas formas de armazenamento. Conclui-se também que o tempo de armazenamento não afeta a eficiência de remoção de cor e turbidez, independente da temperatura em que foram acondicionados.

Quanto aos parâmetros operacionais que possam afetar a coagulação para remoção de turbidez com a utilização de *Moringa oleifera* Ndabigengesere e Narasiah (1996) estudaram a influência da temperatura, pH, concentração de cátions e ânions, velocidade e duração das misturas rápida e lenta. Os resultados apontaram que apenas a temperatura e a velocidade e duração da mistura lenta afetaram a atividade de coagulação. Diferente de outros coagulantes, o pH não apresentou influência na coagulação, resultado encontrado também nos trabalhos de Muyibi e Evison (1995), Ndabigengesere e Narasiah (1998a) e Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia e Peres (2012). Nos trabalhos desenvolvidos por Pritchard et al. (2010b) também foi concluído que a

temperatura afeta na coagulação quando se utiliza *Moringa oleifera*, já que foi observado que quanto maior a temperatura, maior a eficiência de remoção de turbidez.

Uma das vantagens em se utilizar a semente de *Moringa oleifera* no tratamento de água é que o volume de lodo gerado nas estações de tratamento é menor em comparação com outros coagulantes, além dele ser biodegradável. Ndabigengesere e Narasiah (1998a) encontraram que o volume de lodo é de quatro a cinco vezes menor que quando utilizado sulfato de alumínio como coagulante. Valores próximos foram encontrados por Ndabigengesere e Narasiah (1998b) no lodo gerado no tratamento de águas residuárias.

Nos trabalhos desenvolvidos por Moreti et al. (2015) com o objetivo de avaliar a remoção de cianobactérias, turbidez, cor aparente e carbono orgânico dissolvido a partir do processo de coagulação/ floculação/ FAD foi avaliado também o perfil de ácidos graxos no lodo gerado após o tratamento. Os ensaios foram realizados com água deionizada misturada a uma cultura de cianobactérias. Foi encontrado um lodo biodegradável, rico em lipídeos e que poderia ser utilizado para a produção de biodiesel.

O uso de *Moringa oleifera* no tratamento de águas contribui para o aumento da matéria orgânica (NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1998a, 1998b; EMAN; TAN; MAKKY, 2014; CAMACHO et al., 2017). Segundo Ndabigengesere e Narasiah (1998a) é recomendado que as sementes só sejam usadas para o tratamento de águas após as proteínas ativas serem purificadas, já que a matéria orgânica pode reagir com o cloro residual e formar trihalometanos durante a etapa de desinfecção.

Para que a água tratada com a semente seja utilizada de forma correta é recomendado um período máximo de armazenamento de 24 horas para evitar problemas de saúde, cor, sabor e odor advindos da matéria orgânica. Esta limitação faz com que a sua utilização se torne inviável para o tratamento em grandes cidades, já que devido ao sistema de abastecimento possuir grandes redes e reservatórios não há como controlar o consumo da água no tempo sugerido, sendo viável apenas para tratamento à nível individual em cada residência (JAHN, 1986 apud NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1998a).

Poumaye et al. (2012) realizaram ensaios de coagulação/ floculação/ filtração para o tratamento de água superficial coletada no rio M'Poko (República Centro-Africana) utilizando sementes

de *Moringa oleifera* e concluíram que a etapa de filtração é de grande importância para remover a matéria orgânica incorporada devido ao coagulante.

Com o objetivo de não ocorrer o aumento da matéria orgânica em efluentes, Beltrán-heredia et al. (2012) fizeram a purificação do extrato de *Moringa oleifera* e aplicaram para o tratamento de água sintética de efluente têxtil. Os resultados mostraram que a purificação foi viável para evitar o aumento de Carbono Orgânico Total (COT) no efluente.

Já Sánchez-martín, Ghebremichael e Beltrán-heredia (2010) realizaram a purificação da proteína por meio de processos de troca iônica seguido de eluição em uma e duas etapas utilizando diferentes concentrações de cloreto de sódio. Em seguida realizaram ensaios de jarteste em água bruta coletada no rio Meuse (Holanda) e avaliaram eficiência de remoção de turbidez e carbono orgânico dissolvido. Os resultados mostraram que o coagulante purificado em duas etapas apresentou melhor eficiência de remoção e menores valores de carbono orgânico dissolvido residual.

Baptista et al. (2015) realizaram a extração salina e em água, em seguida o extrato foi submetido à ultrafiltração. Ensaio realizados com água coletada no rio Pirapora (Brasil) mostraram que quando se utilizou o coagulante produzido com a etapa de ultrafiltração, a carga orgânica dissolvida na água tratada e o volume de coagulante gasto foram menores em comparação com o extrato sem a ultrafiltração.

Existem na literatura diversos trabalhos utilizando a *Moringa oleifera* para o tratamento de vários tipos de efluentes, como exemplo: efluentes de indústrias têxteis (DOTTO et al., 2019; BELTRÁN-HEREDIA et al., 2012), concreteira (PAULA et al., 2018), tinta (BARBOSA et al., 2018), celulose (BOULAADJOUL et al., 2018), laticínios (MATEUS et al., 2017), café (GARDE et al., 2017), óleo de palma (JAGABA et al., 2021), curtume (MARICHAMY; KUMARAGURU; JONNA, 2021) e efluentes domésticos (NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1998b; BHUPTAWAT; FOLKARD; CHAUDHARI, 2007).

Quanto ao tratamento de água o efeito coagulante das sementes de *Moringa oleifera* tem sido comparado e utilizado juntamente com a de outros coagulantes tradicionais, como ao sulfato de alumínio, sulfato de ferro III e cloreto de ferro.



Pritchard et al. (2010a) fizeram a comparação entre a *Moringa oleifera*, sulfato de alumínio e sulfato de ferro III para o tratamento de diferentes amostras de água: uma de água sintética, três amostras de cursos d'água naturais e uma híbrida, contendo uma mistura dos dois anteriores. Os ensaios foram realizados em frascos de 1 L, mistura rápida de 30 s a 200 rpm, agitação lenta de 15 min a 20 rpm e 30 min de sedimentação. Após a realização dos ensaios foi observado que o coagulante natural apresentou melhor eficiência de remoção de turbidez na água de origem natural do que sintética. Os dois coagulantes químicos utilizados apresentaram melhores remoções comparado ao coagulante natural, porém após etapa em filtro de areia ocorreu melhora significativa, tornando a *Moringa oleifera* uma alternativa viável para o tratamento.

Com o objetivo de realizar o tratamento de água superficial de um córrego em uma ETA em escala piloto Muyibi e Alfugara (2003) utilizaram como coagulantes semente de *Moringa oleifera*, sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) e a combinação dos dois coagulantes. Os resultados encontrados foram comparados para três faixas de valores de turbidez: baixa (21,5 a 49,3 UNT); média (51,8 a 114,0 UNT) e alta (163,0 a 494,0 UNT) e são apresentados na Tabela 2.2. É possível observar que bons resultados de turbidez final foram encontrados. Ao fazer a combinação dos coagulantes chegou-se em resultados um pouco melhores e com redução de 40% no sulfato de alumínio.

Tabela 2.2 - Resultados de turbidez residual para as três faixas de turbidez

Faixa de Turbidez	Turbidez residual (UNT)		
	Moringa	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Combinação
Baixa	2,7	1,8	1,4
Média	2,9	1,2	1,4
Alta	1,4	1,9	0,9

Fonte: Adaptado de Muyibi e Alfugara (2003).

Valverde, Santos e Bergamasco (2013) avaliaram o processo de coagulação/ floculação utilizando a combinação de *Moringa oleifera* e cloreto de ferro para o tratamento de água coletada no rio Pirapó (Brasil). Foram realizados ensaios em jarreste com as seguintes condições de operação: mistura rápida de 100 rpm por 3 min; mistura lenta de 30 rpm por 15 min e 15 minutos de sedimentação. Os parâmetros analisados foram cor aparente, turbidez, e compostos com absorção  $\text{UV}_{254\text{nm}}$ . Os resultados apontaram uma redução de 50% na dosagem de cloreto férrico, indicando a *Moringa oleifera* como um bom auxiliar de coagulação para diminuir o consumo de coagulante químico.

Outra aplicação da *Moringa oleifera* é como adsorvente na remoção de metais pesados. Ghebremichael, Gebremedhin e Amy (2010) investigaram a remoção de cromo (Cr) nas formas Cr (III) e Cr (IV) utilizando a semente por diferentes formas. Para o Cr (III) foram encontradas remoção de 97, 94 e 99,9% quando se utilizou a semente em pó, após extração do princípio ativo e carvão ativado respectivamente. Os resultados apontaram também redução significativa no COT na água tratada para a utilização da semente após a extração do princípio ativo em comparação com as duas outras formas estudadas.

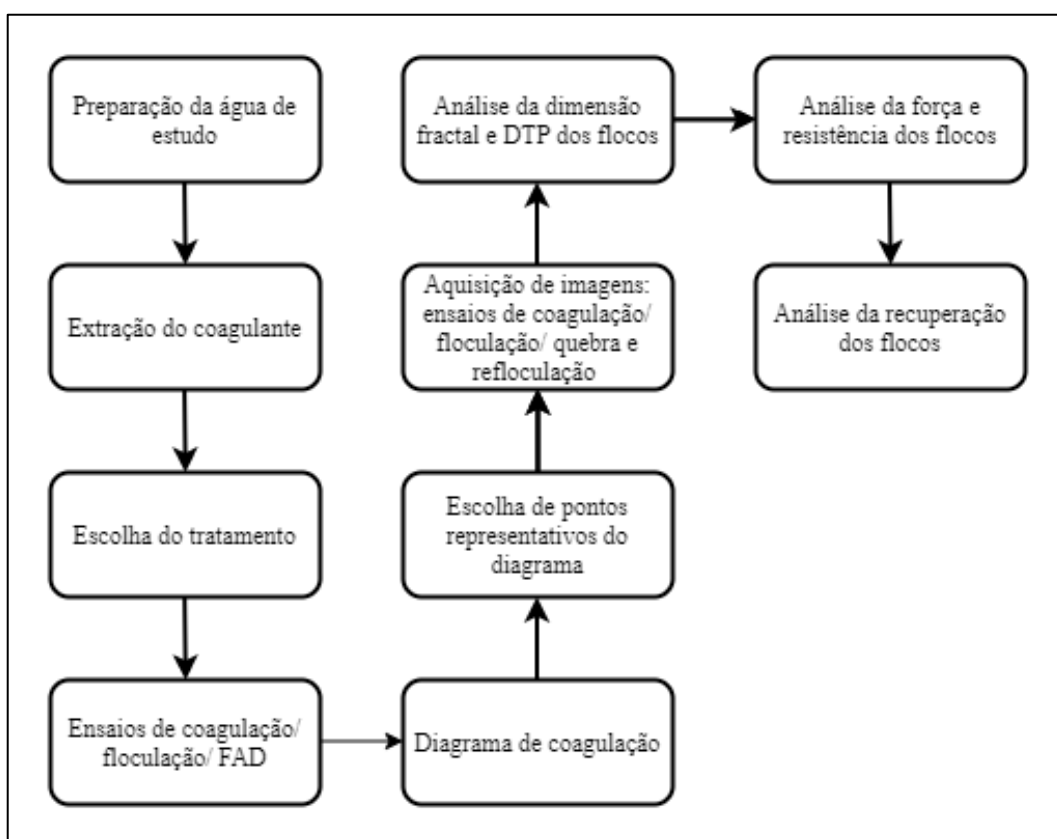
Já em comparação a outros coagulantes naturais, Thakur e Choubey (2014) avaliaram a eficiência de remoção de turbidez e sólidos dissolvidos totais em água sintética utilizando sementes de *Moringa oleifera* e quiabo. Os ensaios de jarreste foram realizados em jarros de 1 L, com mistura rápida de 100 rpm por 1 min, mistura lenta de 30 rpm por 30 min e tempo de sedimentação de 30 min. A turbidez inicial da água de ensaio foi de 150 UNT e obteve-se eficiência de remoção de turbidez de 80,7% para a moringa e 78,7% para o quiabo. Já a remoção de sólidos dissolvidos totais para a moringa e quiabo foram de 37,8% e 44,5%, respectivamente.

Muthuraman e Sasikala (2014) compararam três coagulantes naturais, *Moringa oleifera*, *Strychnos potatorum* e *Phaseolus vulgaris* (feijão) utilizando água turva sintética de água destilada misturada com caulinita. Foram realizados ensaios de jarro e coluna de sedimentação e dentre os coagulantes analisados a moringa apresentou as melhores eficiências de remoção.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os equipamentos, materiais e metodologia desenvolvida para a realização desta pesquisa, no qual são descritos os processos e as análises realizadas. O seu desenvolvimento foi realizado conforme ilustrado na Figura 3.1 e detalhado nos tópicos que se seguem.

Figura 3.1 - Fluxograma geral das etapas de estudo



Fonte: O autor.

#### 3.1 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E *SOFTWARES* UTILIZADOS

O coagulante utilizado foi a *Moringa oleifera*, em solução, extraída conforme a metodologia que será apresentada adiante. As sementes foram colhidas na Escola Municipal de Educação Infantil do Bairro Marta Helena (18°53'10"S, 48°16'21"W), situada no município de Uberlândia. Foram realizadas duas coletas de sementes, ao final do período seco, no início dos meses de outubro de 2019 e outubro de 2020.

Com finalidade de conferir cor a água foi utilizado ácido húmico comercial da marca Sigma-Aldrich. Para a correção do pH, utilizou-se solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,5 mol/L e ácido clorídrico (HCl) 0,5 mol/L. Para a preparação do coagulante utilizou-se solução de cloreto de sódio 1,0 mol/L.

Os equipamentos utilizados para execução dos ensaios e para aferir os parâmetros analisados são descritos a seguir:

- câmera digital NIKON, modelo D5500 para aquisição das imagens dos flocos;
- destilador de água, para a eliminação de impurezas e padronização dos ensaios;
- espectrofotômetro HACH, modelo DR 5000 UV-Vis;
- equipamentos diversos: agitador magnético; balança analítica; bomba de vácuo; cronômetro digital; dessecador; estufa; incubadora; reservatório de PVC com capacidade de 250 L;
- pHmetro HANNA, modelo HI 8314, para medição de pH;
- ponteiro laser utilizado como fonte de luz para formação do plano de luz necessário para aquisição das imagens;
- programas computacionais: *Action 2.9*; *Camera Control Pro 2*; *ImajeJ 1.52*; *JPEGCrops 7.5*; *Microsoft Office Excel*; *Surfer 10*;
- reator estático de bancada NOVA ÉTICA, modelo 218/6 LDB;
- vidrarias de laboratório diversas.

### 3.2 ÁGUA DE ESTUDO

Com o objetivo de padronizar os ensaios, inicialmente a água da rede de abastecimento de Uberlândia foi submetida ao processo de destilação. Preparou-se uma solução mãe de ácido húmico, com objetivo de conferir cor aparente à água de estudo. Para tal, foi adicionada solução de hidróxido de sódio 0,5 mol/L em solução de ácido húmico. Após 30 min em um agitador magnético a solução foi mantida em repouso por 1,5 h. Por fim, o sobrenadante foi coletado e posteriormente realizada filtração utilizando-se membrana de papel com porosidade de 8  $\mu\text{m}$ . O processo foi repetido na solução de ácido húmico enquanto a extração de cor da solução foi eficiente. A solução mãe de ácido húmico foi adicionada gradualmente na água destilada até que a mesma atingisse o valor de  $107 \pm 1$  mg Pt-Co/L.

Quanto a cor real e turbidez da água de estudo as mesmas tiveram os valores de  $92 \pm 3$  mg Pt-Co/L e  $2,15 \pm 0,19$  UNT, respectivamente. O parâmetro turbidez é secundário neste trabalho, cujos valores não foram controlados na obtenção da água de estudo e estão relacionados à própria constituição da substância húmica utilizada em seu preparo.

### 3.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Os parâmetros físico-químicos foram determinados de acordo com metodologia descrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW) e o método para a determinação de cada parâmetro é mostrado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Métodos para determinação dos parâmetros físico-químicos

Parâmetro	Método
Cor aparente e cor real	2120 C. - Método de espectrofotometria - comprimento de onda único
Turbidez	2130 B. - Método nefelométrico

Fonte: *American Public Health Association* (APHA, 2017).

### 3.4 PREPARO DO EXTRATO DE *MORINGA OLEIFERA*

A metodologia utilizada para o preparo do coagulante foi realizada com base nos trabalhos de Okuda et al. (1999) e Katayon et al. (2006). Inicialmente as sementes foram retiradas das vagens e secas em estufa a 50 °C por 24 horas. Após esfriarem em dessecador, ainda com as cascas, foram acondicionadas em recipientes de polipropileno devidamente fechados e mantidos em incubadora a 20 °C.

Minutos antes de iniciar o preparo do extrato, as sementes foram descascadas e pesadas. Com o intuito de padronizar as sementes, aquelas que não possuíam massa entre 0,20 e 0,25 g foram descartadas. Em seguida foram moídas em almofariz até que se formasse um pó fino. O pó foi passado em peneira de 1 mm e 10 g do passante foi misturado com 500 mL de solução de cloreto de sódio (NaCl) 1 mol/L. A solução foi levada ao agitador magnético por 25 min. Em seguida realizou-se filtração utilizando-se membrana de papel com porosidade de 8 µm. O extrato foi armazenado em recipiente de vidro devidamente fechado, deixado a temperatura ambiente e utilizado em até 5 dias.

### 3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

O tratamento estatístico dos resultados obtidos nesta pesquisa foi desenvolvido utilizando o programa computacional *Action* versão 2.9. Para a comparação entre diferentes tratamentos aplicou-se a análise de variância (ANOVA). Quando identificado a ocorrência de diferença significativa entre tratamentos aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey, com nível de significância de 5% para as duas análises.

Para as situações em que algum dos quatro pressupostos da ANOVA (aditividade, normalidade, homoscedasticidade de variâncias e independência de erros) não foram atendidos, realizou-se teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, com nível de significância de 5%.

### 3.6 ESCOLHA DO TRATAMENTO

Nesta etapa foi comparada a utilização de *Moringa oleifera* sob duas formas distintas de tratamento: por meio de sedimentação e Flotação por Ar Dissolvido (FAD). Foram escolhidas três dosagens do coagulante 40 mg/L, 80 mg/L e 140 mg/L e realizados ensaios de coagulação/ floculação/ sedimentação e coagulação/ floculação/ FAD, os dois utilizando ensaio de jarreste, sendo o último com jarros modificados. A adaptação dos jarros dentre outras informações sobre os ensaios de FAD são descritas no item 3.7. Esta etapa foi realizada somente com água produzida conforme metodologia já apresentada.

As velocidades de sedimentação e flotação utilizadas foram compatíveis com as que são utilizadas em ETAs. A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros físicos gradiente médio de mistura rápida ( $G_{mr}$ ), tempo de mistura rápida ( $t_{mr}$ ), gradiente médio de floculação ( $G_f$ ), tempo de floculação ( $t_f$ ), taxa de recirculação ( $r$ ) e as velocidades de flotação ( $V_{f1}$ ,  $V_{f2}$  e  $V_{f3}$ ) e velocidades de sedimentação ( $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$ ,  $V_{s3}$ ) utilizados nos ensaios citados. Os ensaios de FAD foram realizados conforme Centurione Filho e Di Bernardo (2003) e os de sedimentação conforme Di Bernardo, Dantas e Voltan (2002).

A partir da análise dos ensaios citados chegou-se a melhores remoções de cor aparente utilizando a FAD como técnica de tratamento e, portanto, foi utilizada nas demais etapas desta pesquisa (conforme item 4.1).

Tabela 3.1 - Parâmetros físicos utilizados nos ensaios para determinação do tratamento

Etapa	Parâmetro	Valores	
		FAD	Sedimentação
Coagulação	$G_{mr}$	1000 s <sup>-1</sup>	1000 s <sup>-1</sup>
	$t_{mr}$	10 s	10 s
Floculação	$G_f$	20 s <sup>-1</sup>	20 s <sup>-1</sup>
	$t_f$	20 min	20 min
Flotação	$r$	10 % (200 mL)	-
	$V_{f1}$	20,0 cm/min	-
	$V_{f2}$	10,0 cm/min	-
	$V_{f3}$	5,0 cm/min	-
Sedimentação	$V_{s1}$	-	2,5 cm/min
	$V_{s2}$	-	1,0 cm/min
	$V_{s3}$	-	0,5 cm/min

Fonte: O autor.

### 3.7 DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO

Os ensaios de FAD foram realizados em equipamento de jarteste com jarros modificados conforme Centurione Filho e Di Bernardo (2002). Os jarros eram de acrílico transparente com base quadrada e dimensões 115x115 mm<sup>2</sup>. A base do jarro era composta por duas placas espaçadas em 5 mm, sendo a inferior constituída de pequenos canais que conduzem a água saturada com maior rapidez e de forma homogênea, de forma a preencher o espaço situado abaixo da placa superior. Já a placa superior possuía orifícios de 2 mm de diâmetro espaçados de 10 mm com a finalidade de distribuir uniformemente a água saturada e proporcionar perda de carga suficiente para a distribuição.

Os ensaios foram realizados em batelada, com água produzida de acordo com item 3.2. Foram utilizadas 17 dosagens diferentes de coagulante na faixa de 20 mg/L a 180 mg/L com variação a cada 10 mg/L. Já o pH de coagulação variou de 3,46 a 9,60 com espaçamento de  $0,45 \pm 0,15$  para cada dosagem de coagulante. A saturação da água com ar na câmara de pressurização foi realizada com pressão entre 40 e 50 mca por 10 min. Os parâmetros físicos utilizados foram os mesmos dos apresentados na Tabela 3.1.

Com base nos resultados de cor aparente remanescente calculou-se a eficiência de remoção para cada velocidade de flotação, conforme Equação 12, e construiu-se os diagramas de coagulação

para a *Moringa oleifera*. Os resultados dos ensaios foram inseridos em planilha do *Microsoft Office Excel* e em seguida foram exportados para o *software Surfer 10*, onde foi realizada a interpolação dos dados e a geração de curvas com a mesma porcentagem de remoção de cor aparente. O método escolhido para a interpolação dos dados no *Surfer 10* foi o de kriging.

$$E = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100 \quad (12)$$

Sendo:

$E$  a eficiência de remoção, em %;

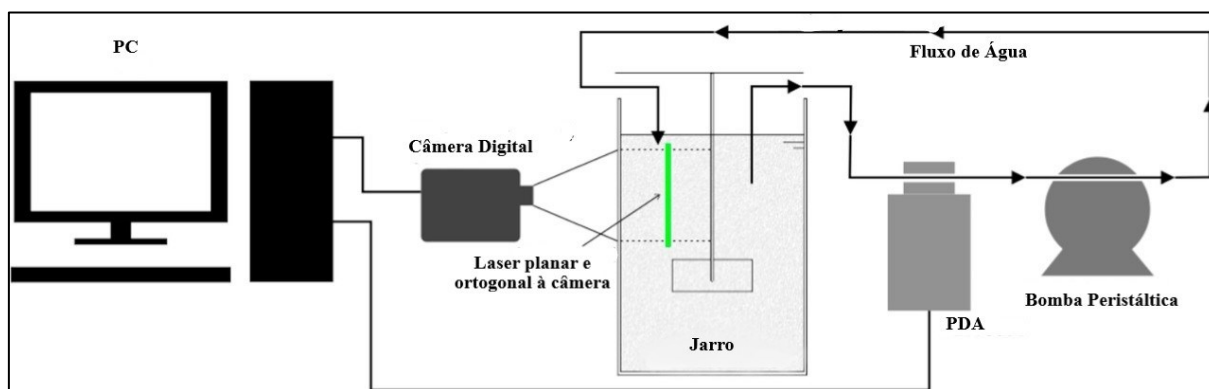
$C_0$  a cor aparente inicial mg Pt-Co/L;

$C_f$  a cor aparente final, em mg Pt-Co/L.

### 3.8 ENSAIOS DE FORMAÇÃO, RUPTURA E RECRESCEMENTO DE FLOCOS POR MEIO DE ACOMPANHAMENTO POR ANÁLISE DE IMAGENS E PDA

Os ensaios foram realizados usando jarreste com jarros modificados acoplado a um sistema de captura de imagens não destrutivo e não intrusivo e interligado também a um Analisador de Dispersão Fotométrica (PDA). A metodologia utilizada foi adaptada de Yukselen e Gregory (2002), Moruzzi (2005), Moruzzi e Reali (2007) e Oliveira et al. (2015c). A Figura 3.2 mostra um esquema do aparato experimental.

Figura 3.2 - Esquema do aparato experimental

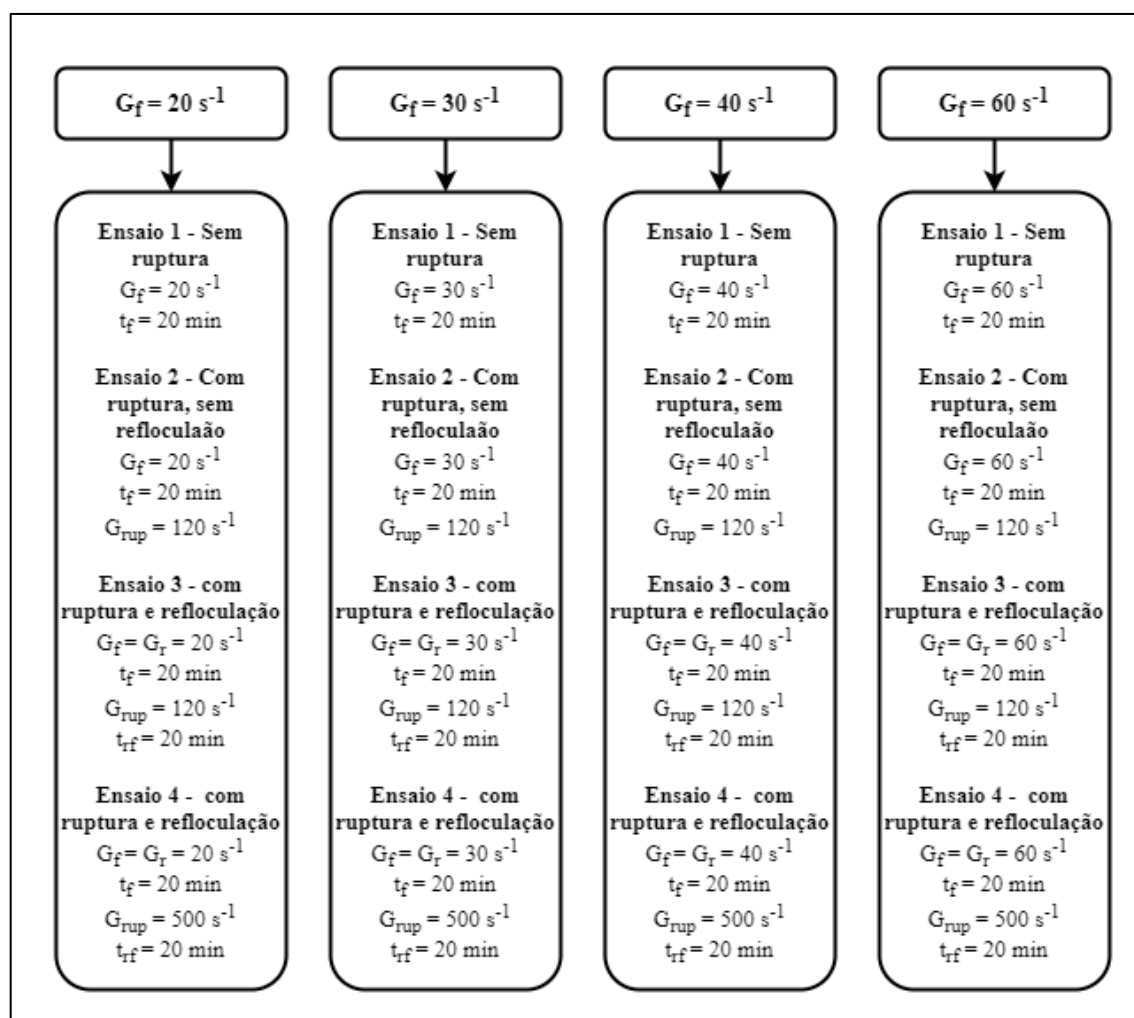


Fonte: Adaptado de Silva, P. A. G. (2017).



Foram escolhidos 6 pontos distintos do diagrama de coagulação e para cada um desses pontos foram realizados 16 ensaios. Os pontos foram selecionados considerando-se diversas regiões do diagrama, independente da eficiência de cor observada, de forma a observar a influência do pH e da dosagem de coagulante nas características dos flocos formados. A Figura 3.3 apresenta os parâmetros físicos utilizados em cada um desses ensaios, dado que em todos eles o  $G_{mr}$  foi de  $1000 \text{ s}^{-1}$ ,  $t_{mr}$  de 10 s e que  $t_{rf}$ ,  $G_{rup}$  e  $G_r$  se referem ao tempo de refloculação, gradiente médio de ruptura e gradiente médio de refloculação, respectivamente.

Figura 3.3 - Parâmetros físicos utilizados nos ensaios de formação, ruptura e recrescimento de flocos



Fonte: O autor.

Ao final de cada ensaio foi aplicado FAD com os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 3.1, com exceção que a coleta foi feita apenas para  $V_f$  de 5,0 cm/min e realizadas as leituras dos parâmetros cor aparente e turbidez.

### 3.8.1 Monitoramento óptico contínuo

De acordo com Gregory (2004) o PDA mede a intensidade da luz que é transmitida através de uma suspensão fluida. A razão entre a luz transmitida e a recebida pelo sensor do equipamento é denominado de Índice de Floculação (IF) e está relacionado com o estado de agregação das partículas. O valor sempre aumenta à medida que ocorre a agregação e diminui quando os flocos são quebrados.

No decorrer de todo o ensaio uma amostra foi circulada por meio de um tubo de plástico transparente a uma vazão de aproximadamente 25 mL/min mediante uma bomba peristáltica. A bomba estava localizada à jusante do equipamento de PDA de forma a evitar que a quebra dos flocos pela bomba não afetasse os resultados. As leituras eram realizadas pelo equipamento a cada 3 s e os valores armazenados para posterior geração de gráficos e análise dos IF gerados pelo equipamento.

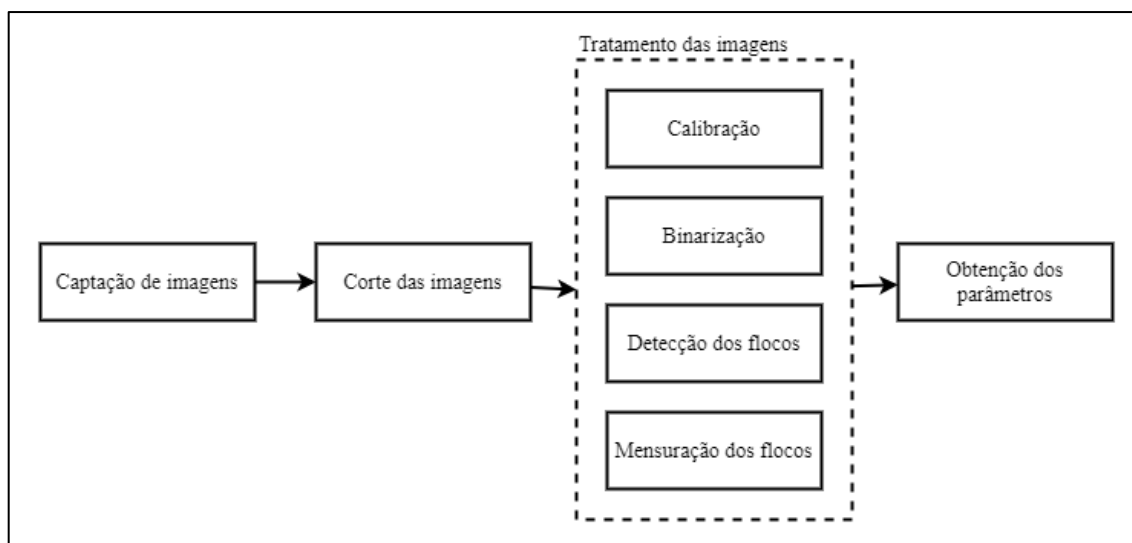
Com a finalidade de estabelecer as leituras de estado estacionário, o equipamento de PDA foi configurado para iniciar 1 min antes da adição do coagulante e início da agitação.

### 3.8.2 Processamento e análise das imagens

Durante a floculação foram captadas trinta imagens (dez cliques, três imagens por clique) em cada um dos seguintes tempos: 1 min; 3 min; 5 min; 10 min; 15 min e 20 min, já para a refloculação os tempos foram de 0 min; 3 min; 5 min; 10 min; 15 min e 20 min. As imagens foram obtidas em sala fechada sem qualquer interferência de luz no ambiente e após devido tratamento, utilizadas para a obtenção dos parâmetros de interesse. As etapas envolvidas no processamento e análise das imagens são apresentadas no esquema da Figura 3.4.

O sistema de captura de imagens consistia em um plano de luz gerado por um laser incidindo sobre o jarro e a captura de imagens dos flocos, utilizando uma câmera digital. O laser utilizado possuía potência de 98000 mW, comprimento de onda de 532 nm e 2 mm de espessura; já a câmera fotográfica digital apresentava resolução de 6000 x 4000 *pixels* e velocidade máxima do obturador de 1/4000 s. A câmera estava posicionada a cerca de 50 cm do jarro e o laser a 10 cm e as imagens eram obtidas por meio do *software* Camera Control Pro 2. As configurações da câmera utilizada para a aquisição das imagens são mostradas na Tabela 3.2.

Figura 3.4 - Etapas envolvidas no processamento e análise de imagens



Fonte: O autor.

Tabela 3.2 - Configurações da câmera fotográfica

Parâmetro	Valor utilizado
Abertura do obturador	F 5.3
Compensação de exposição	+ 1 1/3 EV
Sensibilidade ISO	5000
Velocidade de captura do obturador	1/640 s
Resolução	6000 x 4000 <i>pixels</i>

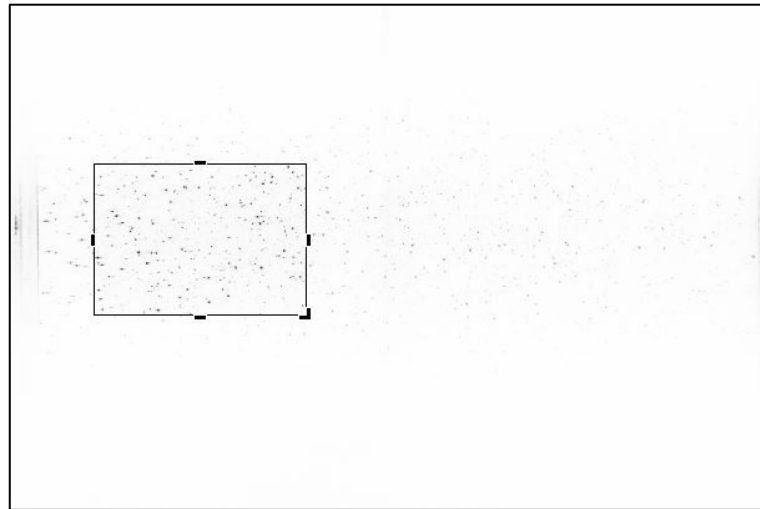
Fonte: O autor.

Para que fossem obtidas imagens homogêneas dos flocos no interior dos jarros, todas as imagens, inclusive a de calibração, foram cortadas nas mesmas dimensões (1671 x 1188 *pixels*) e posição utilizando-se o *software JPEG Crops*. A Figura 3.5 ilustra uma das imagens antes do tratamento, destacando a área a ser cortada e efetivamente utilizada nas análises. Já a Figura 3.6 apresenta a mesma imagem após ser cortada. Depois de serem cortadas realizou-se o tratamento das imagens utilizando o *ImageJ 1.52*, que conforme indicado na Figura 3.4 foi composto pelas seguintes etapas: calibração, binarização, detecção e mensuração dos flocos.

Antes de iniciar o primeiro ensaio foi realizada a aquisição de uma imagem, com as mesmas definições na câmera que seriam utilizadas para a captura das imagens dos flocos, de uma régua graduada em centímetros como referência. A imagem da régua foi inserida no *software* e a realizado a calibração, podendo assim transformar a unidade de *pixel* em mm. Todos os ensaios

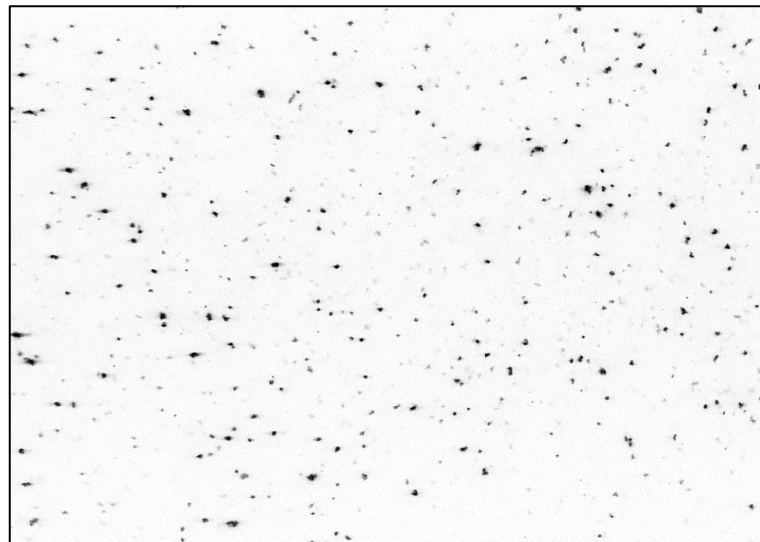
foram realizados com os equipamentos posicionados no mesmo lugar, de forma a garantir a mesma calibração.

Figura 3.5 - Exemplo de imagem obtida, destacando a área a ser cortada



Fonte: O autor.

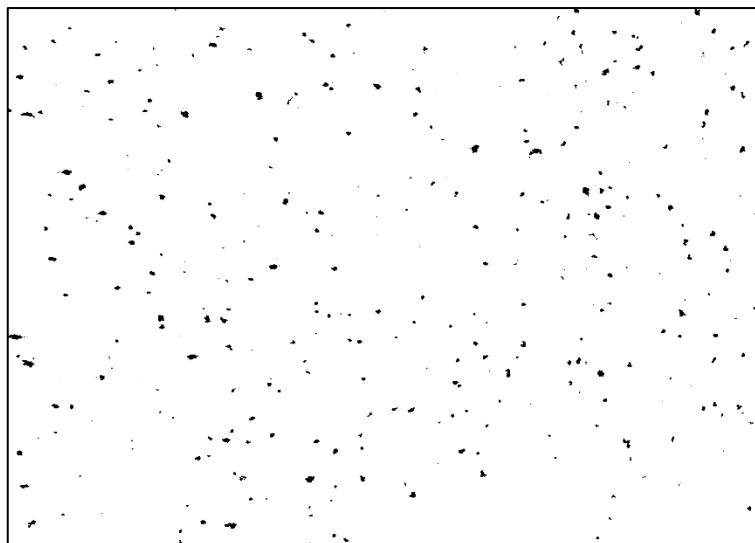
Figura 3.6 - Exemplo de imagem cortada



Fonte: O autor.

A etapa de binarização tinha por objetivo destacar os flocos que estavam mais iluminados, portanto aqueles que se encontravam no plano de luz criado pelo laser. Para isso as imagens foram convertidas em 1 bit, ou seja, preto e branco. O limiar de binarização, que varia de 0 a 255 tonalidades de cinza, foi determinado para cada grupo de imagens obtidas em cada ensaio. A Figura 3.7 apresenta a Figura 3.6 após binarização.

Figura 3.7 - Imagem após binarização



Fonte: O autor.

Após a binarização, realizou-se a detecção de feições e obtenção dos parâmetros de caracterização dos flocos, sendo obtidos os seguintes: área superficial, perímetro e eixos maior e menor da elipse de melhor ajuste do floco.

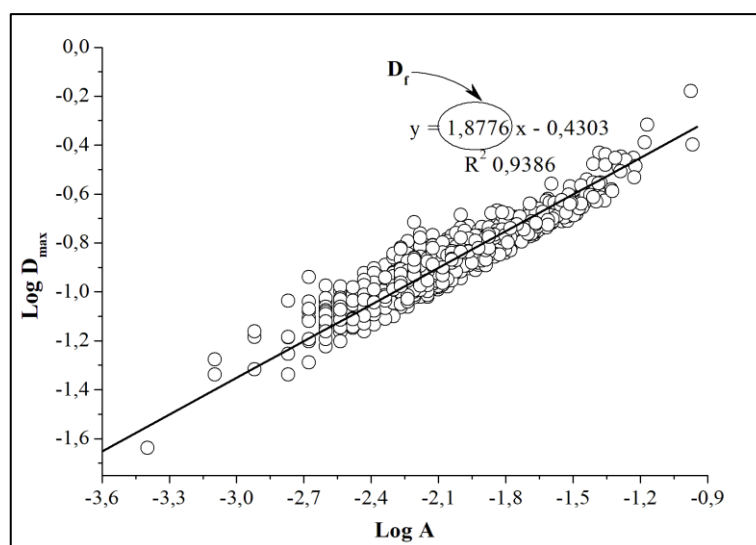
### 3.8.3 Determinação do diâmetro equivalente, DTP e dimensão fractal

Os parâmetros diâmetro equivalente, DTP e dimensão fractal foram determinados a partir dos dados obtidos das imagens para cada um dos tempos de aquisição durante a floculação e refloculação (30 imagens por avaliação). O diâmetro equivalente foi determinado por meio do Diâmetro de Feret ( $d_F$ ), mostrado na Equação 8 e representa o diâmetro de um objeto circular que representa a mesma área superficial do objeto irregular.

A DTP foi determinada a partir da distribuição de frequência dos diâmetros equivalentes, no qual foram determinadas 10 classes de tamanho. Devido ao pequeno número de flocos maiores que 0,3 mm e menores que 0,73 mm (maior floco encontrado nos ensaios) a última classe de tamanho foi construída com uma amplitude maior que as demais visto que caso todas as classes apresentassem a mesma amplitude, as seis últimas classes apresentariam frequência relativa próximo de zero em todos os ensaios, dificultando assim uma discussão apropriada dos dados.

Já a dimensão fractal ( $D_f$ ) foi determinada utilizando-se a Equação 5 e construindo-se um gráfico log-log entre a área projetada e o diâmetro máximo, sendo a dimensão fractal a declividade da reta de tendência ajustada. O processo para a determinação da dimensão fractal é apresentado na Figura 3.8, que apresenta a  $D_f$  calculada para a concentração de *Moringa oleifera* de 40 mg/L, gradiente de mistura rápida de 60 s<sup>-1</sup> e tempo de floculação de 1 min.

Figura 3.8 - Determinação da dimensão fractal

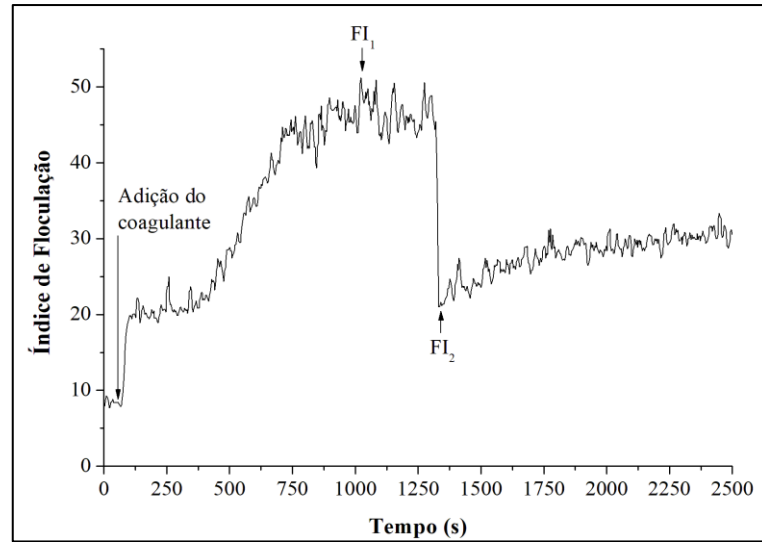


Fonte: O autor.

#### 3.8.4 Resistência e força dos flocos

O fator de força e o fator de recuperação foram calculados de acordo com as Equações 1 e 2 respectivamente, sendo que os diâmetros médios foram determinados a partir dos dados obtidos pelas imagens.

Para que fosse realizada a comparação entre os métodos de análise de imagem e PDA, o fator de força foi calculado também a partir dos sinais gerados pelo PDA, conforme Yukselen e Gregory (2002). Foram obtidos dois parâmetros que correspondem ao tamanho do floco:  $FI_1$  e  $FI_2$ , que correspondem ao máximo valor do IF na fase estacionária da floculação e ao ponto de menor valor do IF no instante em que ocorreu a quebra do floco, respectivamente. A representação esquemática dos parâmetros é apresentada na Figura 3.9. A partir da obtenção dos parâmetros o fator de força foi calculado conforme Equação 13.

Figura 3.9 - Representação dos parâmetros FI<sub>1</sub> e FI<sub>2</sub>

Fonte: O autor.

$$Fator\ de\ força = \frac{FI_2}{FI_1} \times 100 \quad (13)$$

A força do floco foi calculada por meio de um método teórico proposto por Bache et al. (1999), no qual a resistência média por unidade de área no plano de ruptura ( $\sigma$ ), em N/m<sup>2</sup>, pode ser calculada por meio da Equação 14.

$$\sigma = \frac{4\sqrt{3}}{3} \frac{p_w \varepsilon^{3/4} d_{med}}{v^{1/4}} \quad (14)$$

Sendo:

$p_w$  a densidade da água, em kg/m<sup>3</sup>;

$\varepsilon$  a taxa local de dissipação de energia por unidade de massa (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>);

$v$  a viscosidade cinemática, em (m<sup>2</sup>/s);

$d_{med}$  a dimensão média do floco, em m.

O parâmetro  $\varepsilon$  pode ser substituído por  $\bar{\varepsilon}$ , que é a taxa média de dissipação de energia local calculado através da Equação 15 (LI et al., 2007).

$$\bar{\varepsilon} = v G_f \quad (15)$$

Já a resistência do floco foi determinada pela Equação 16 que relaciona a dimensão máxima do floco ( $d_{max}$ ) e sua resistência para um determinado gradiente de velocidade e foi proposta inicialmente por Parker, Kaufman e Jenkins (1972).

$$d_{max} = C G_f^{-\gamma} \quad (16)$$

Sendo:

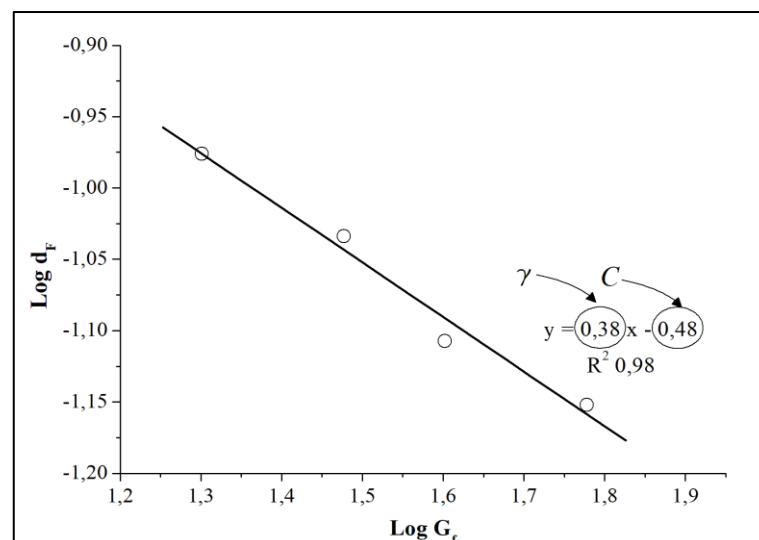
$C$  é a constante da relação entre o diâmetro máximo e o gradiente de floculação;

$G_f$  o gradiente médio de floculação;

$\gamma$  o coeficiente de resistência do floco.

De acordo com Leentvaar e Rebhun (1983) coeficiente de resistência do floco pode ser obtido utilizando-se a média, mediana e a maior dimensão dos flocos. Nesta pesquisa, utilizou-se o Diâmetro médio de Feret no tempo de floculação de 20 min. Os coeficientes  $C$  e  $\gamma$  foram determinados a partir da construção do gráfico  $\log d_F \times \log G_f$ , no qual foi adicionada uma linha de tendência linear, sendo  $C$  e  $\gamma$  os coeficientes linear e angular da reta, respectivamente (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Determinação dos coeficientes  $C$  e  $\gamma$



Fonte: O autor.



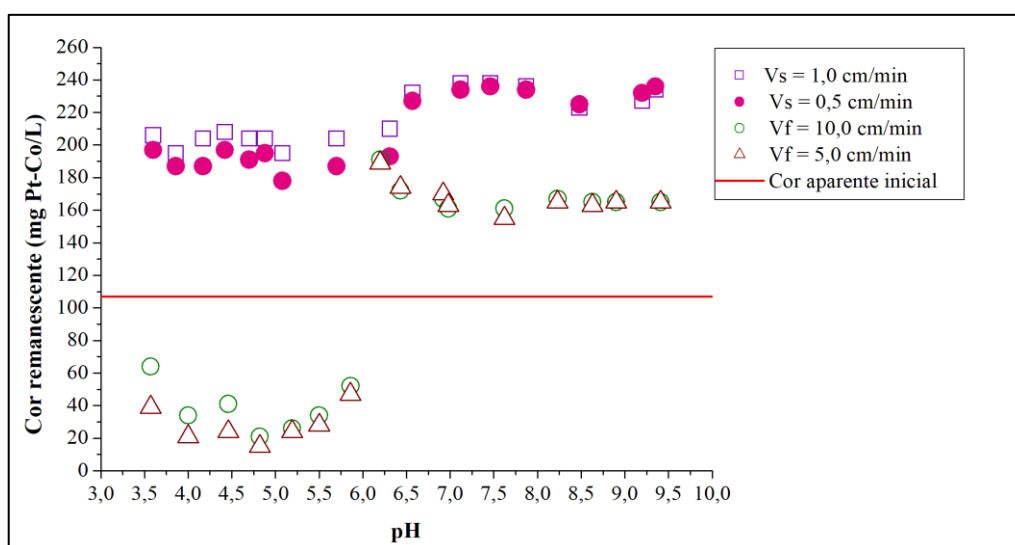
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados encontrados nesta pesquisa. Primeiramente são apresentados os resultados relativos à escolha do tratamento a ser simulado: Flotação por Ar Dissolvido (FAD) ou sedimentação. Em seguida são apresentados os diagramas de coagulação/ floculação/ FAD que nortearam a escolha dos valores de pH de coagulação x dosagem de coagulante utilizados na etapa 2 desta pesquisa (pontos dos diagramas), relativa ao estudo da formação, ruptura e recrescimento dos flocos por meio de técnica de análise de imagens não destrutiva e não intrusiva e por meio de PDA.

### 4.1 ESCOLHA DO TRATAMENTO

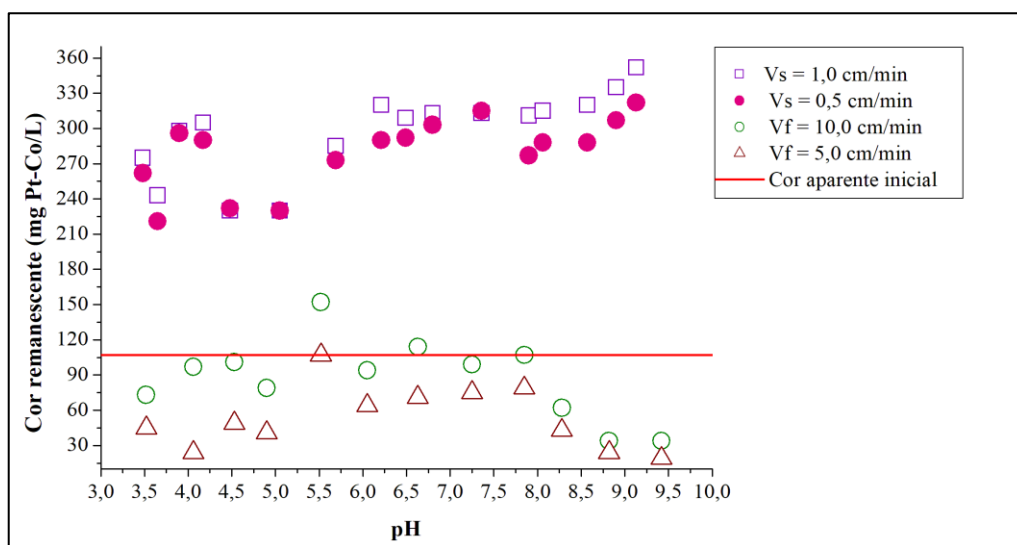
Os resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ sedimentação são apresentados no Apêndice A. Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentados os valores de cor remanescente para os ensaios de FAD (Apêndice B) e sedimentação, considerando as velocidades de flotação ( $V_f$ ) e sedimentação ( $V_s$ ), respectivamente. Além dos dados apresentados, foi utilizada também a concentração de *Moringa oleifera* de 40 mg/L, entretanto, os resultados não foram apresentados em gráficos, pois a formação de flocos ocorreu apenas para os valores de pH de 3,55 e 3,98. O monitoramento foi realizado considerando-se a cor aparente da água.

Figura 4.1 - Comparação entre sedimentação e FAD para concentração de *Moringa oleifera* de 80 mg/L



Fonte: O autor.

Figura 4.2 - Comparação entre sedimentação e FAD para concentração de *Moringa oleifera* de 140 mg/L



Fonte: O autor.

Observa-se que os flocos formados não apresentaram boa sedimentabilidade para nenhuma das velocidades de sedimentação avaliadas, uma vez que em toda faixa de pH estudada os valores de cor foram superiores aos da água de estudo. Porém observa-se menores resultados de cor remanescente com a diminuição da velocidade de sedimentação, indicando que os flocos formados apresentaram baixas velocidades de sedimentação, porém fora dos limites aceitáveis para os experimentos conduzidos no presente trabalho. Isso indica que caso a velocidade de sedimentação avaliada fosse menor poderia ter ocorrido remoção, como observado nos trabalhos desenvolvidos por Madrona et al. (2010) e Varkey (2020) que utilizaram a *Moringa oleifera* no tratamento de água de abastecimento com emprego do processo de sedimentação.

Madrona et al. (2010) realizam ensaios de jarteste em água coletada no ponto de captação de uma ETA utilizando a *Moringa oleifera* como coagulante. O tempo de sedimentação avaliado foi de 60 min e, considerando-se a extração do princípio ativo com solução salina de cloreto de potássio 1 mol/L, obteve-se 96% de remoção de turbidez e 82% de cor. Varkey (2020) também realizou ensaios usando jarros com volume útil de 1 L, no tratamento de água de um curso natural aplicando a *Moringa oleifera* como coagulante e acompanhou a sedimentação por 6 horas obtendo redução de turbidez de 6,5%, 66,1%, 86,1% e 87,0% nos tempos de sedimentação de 1, 2, 3 e 4 horas, respectivamente. Após 4 horas os valores de turbidez residual mantiveram-se praticamente constantes.

A partir dos dados obtidos realizou-se o teste de variância (ANOVA), com intervalo de 95% de confiança, para as eficiências de remoção de cor utilizando-se velocidades de flotação ( $V_f$ ) de 10,0 e 5,0 cm/min e velocidades de sedimentação ( $V_s$ ) de 1,0 e 0,5 cm/min, descartando-se aqueles ensaios em que não ocorreu a coagulação. A Tabela 4.1 apresenta os dados da ANOVA, no qual conclui-se que existe diferença significativa em pelo menos uma das médias dos tratamentos, já que o p-valor foi menor que 0,05 para todas as concentrações de coagulante analisadas.

Tabela 4.1 - Teste de ANOVA realizado para comparação entre a eficiência de remoção de cor entre os ensaios de sedimentação e FAD

	Concentração (mg/L)	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estatística F	p-valor
Tratamento	40,0	3	19190	6397	140,2	0,00
Resíduos		4	183	46		
Tratamento	80,0	3	173358	57786	679,6	0,00
Resíduos		26	2211	85		
Tratamento	140,0	3	579597	193199	217,2	0,00
Resíduos		52	46254	890		

Fonte: O autor.

Para a determinação de quais médias são diferentes, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey. Os resultados mostraram, para as três concentrações analisadas, que as médias de remoção de cor são iguais entre as duas velocidades de sedimentação assim como são iguais para as duas velocidades de flotação, porém são diferentes entre si, conforme a Tabela 4.2. É possível concluir também que para as três concentrações a média de remoção foi maior quando as velocidades de sedimentação e flotação foram menores.

Tabela 4.2 - Teste de comparações múltiplas de Tukey para a eficiência de remoção de cor na comparação entre sedimentação e FAD

Concentração de <i>Moringa oleifera</i>						
Fator	40,0 mg/L		80,0 mg/L		140,0 mg/L	
	Médias	Grupo	Médias	Grupo	Médias	Grupo
$V_f = 5,0$ cm/min	80,84	a	73,56	a	50,08	a
$V_f = 10,0$ cm/min	78,04	a	63,68	a	18,54	a
$V_s = 0,5$ cm/min	-13,08	b	-77,45	b	-162,03	b
$V_s = 1,0$ cm/min	-23,36	b	-89,25	b	-177,69	b

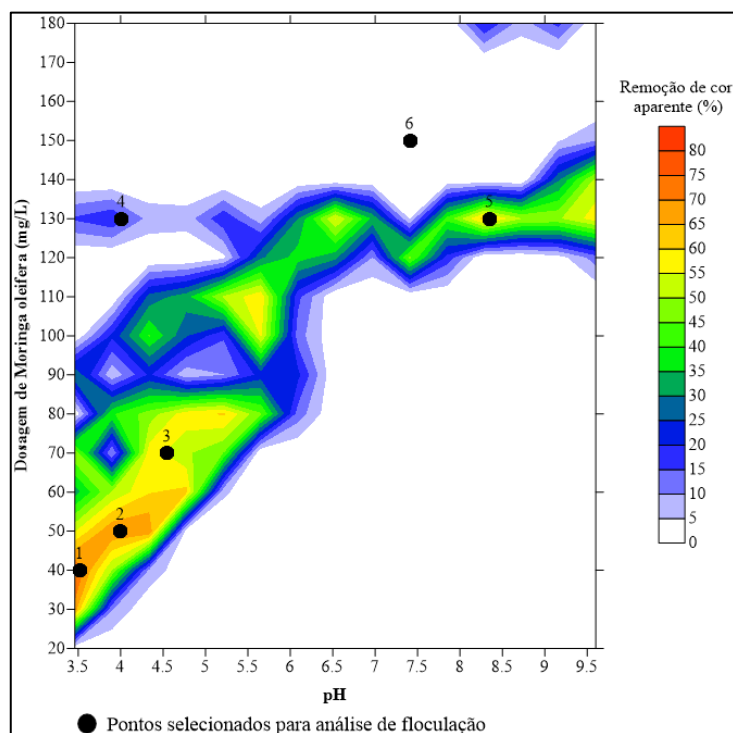
Fonte: O autor.

A partir da análise do teste de Tukey é observada diferença significativa entre a média de remoção de cor residual nos dois tratamentos, sendo que ao se utilizar a sedimentação não foram encontradas remoções de cor e a FAD se apresentou como alternativa mais adequada. Por esse motivo, a FAD foi utilizada nas demais etapas desta pesquisa.

## 4.2 DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO

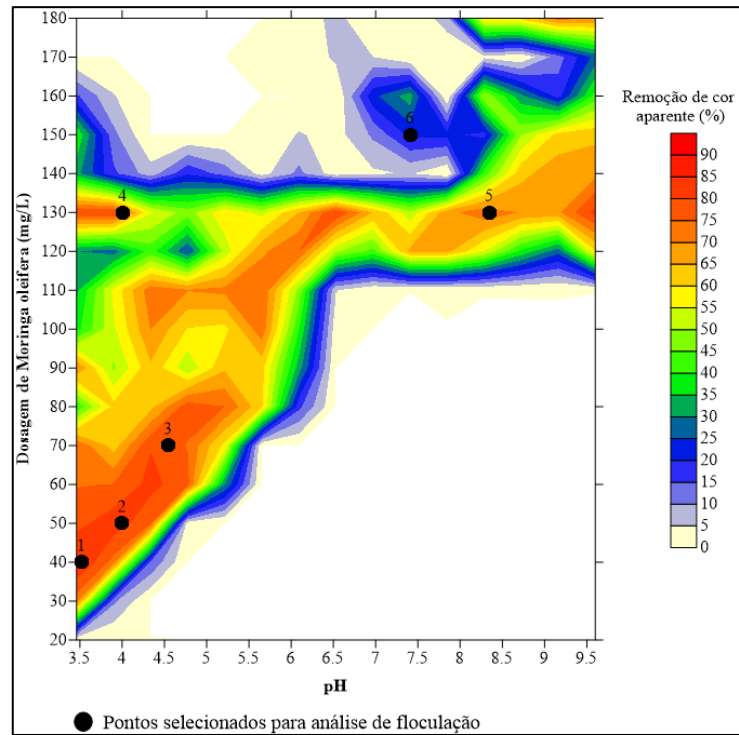
Os resultados dos ensaios realizados para a construção do diagrama de coagulação são apresentados no Apêndice B. Foram obtidos 238 pares de valores de pH x concentração de coagulante e com base nos resultados foram traçados os gráficos de mesma remoção de cor remanescente para velocidades de flotação ( $V_f$ ) de 20, 10 e 5 cm/min. As Figuras 4.3 a 4.5 apresentam os diagramas de coagulação, construídos com a mesma escala de cores, para as três velocidades de flotação avaliadas. Com o propósito de facilitar a leitura dos diagramas os pontos em que a cor residual foi maior que a inicial, ou seja, nos pontos em que a porcentagem de remoção foi negativa, considerou-se 0% de remoção.

Figura 4.3 - Diagrama de coagulação da *Moringa oleifera* para água com cor de 107 mg Pt-Co/L e  $V_f$  de 20 cm/min



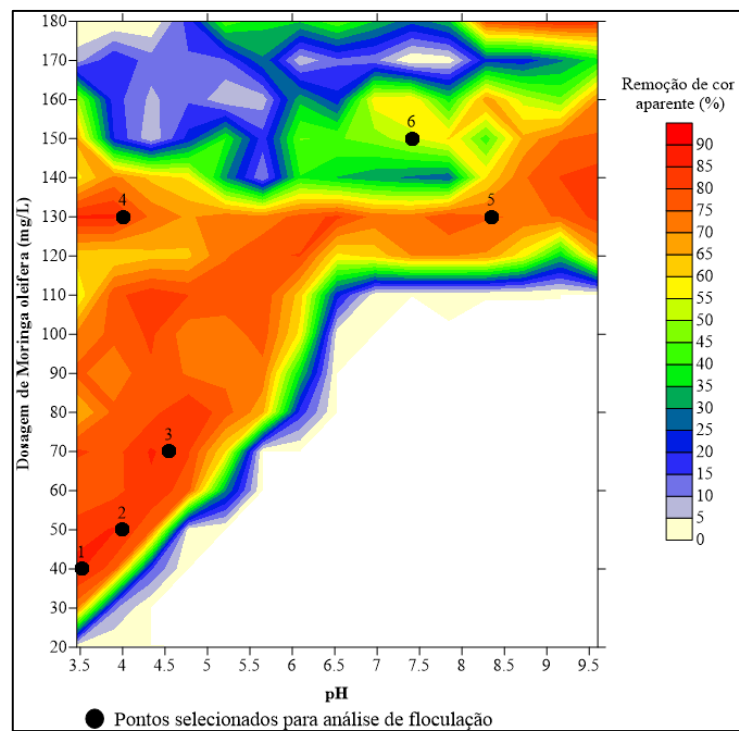
Fonte: O autor.

Figura 4.4 - Diagrama de coagulação da *Moringa oleifera* para água com cor de 107 mg Pt-Co/L e  $V_f$  de 10 cm/min



Fonte: O autor.

Figura 4.5 - Diagrama de coagulação da *Moringa oleifera* para água com cor de 107 mg Pt-Co/L e  $V_f$  de 5 cm/min



Fonte: O autor.

Avaliando-se a Figura 4.3 é possível observar que apenas uma pequena faixa de valores pH x concentração de coagulante apresentou bons resultados de remoção de cor e que essa faixa aumentou nos demais diagramas, indicando melhor eficiência de remoção com velocidades de flotação mais baixas, como esperado. Eficiências de remoção da ordem de 60% são verificadas em diversos pontos do diagrama, em regiões de  $\text{pH} < 7$  para dosagens de *Moringa oleífera* menores e em regiões de  $\text{pH} > 7$  para dosagens maiores.

Com o aumento de concentração de *Moringa oleífera*, observa-se, para as velocidades de flotação de 10,0 e 5,0 cm/min, que a eficiência de remoção de cor ocorre em uma faixa maior de pH, sendo que para as concentrações de 120,0 a 140,0 mg/L, há remoção em toda a faixa de pH avaliada. Em concentrações superiores a esta, a remoção de cor ocorreu para faixas mais reduzidas de valores pH.

No Brasil, a qualidade da água deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos na Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021, do Ministério da Saúde, que trata tanto dos procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano quanto dos padrões de potabilidade.

De acordo com a portaria, o valor máximo permitido de cor na água para abastecimento público é de 15 mg Pt-Co/L (BRASIL, 2021). Para a água de estudo desta pesquisa este valor representa uma porcentagem de remoção de 85%. Essa remoção foi encontrada em poucos pontos do diagrama, porém os resultados são bons, visto que os diagramas de coagulação se referem às etapas de coagulação/ FAD, que geralmente precedem à etapa de filtração em estações de tratamento de água.

Conforme mencionado no item 2.5.1, são encontrados diversos trabalhos com utilização de *Moringa oleífera* como coagulante natural no tratamento de água nos quais o pH de coagulação não apresenta influência significativa na etapa de coagulação. Ndabigengesere e Narasiah (1996) avaliaram a remoção de turbidez de água sintética produzida à base de caulinita na faixa de pH de 4,0 a 9,0 e concluíram que o parâmetro não afeta a eficiência da coagulação. Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia e Peres (2012) realizaram ensaios de jarteste e variaram o pH de 3,0 a 9,0 e avaliaram a remoção de turbidez de água do rio Guadiana (Espanha). Os autores concluíram que a variação do pH não altera significativamente o processo, porém resultados um pouco melhores foram encontrados quando a coagulação ocorreu em meio ácido.

Em contrapartida Madrona et al. (2010) realizaram ensaios com água coletada no rio Pirapó (Brasil) e avaliaram a remoção de cor e turbidez. Os valores de pH de coagulação foram 4,0, 6,0 e 8,0 e as concentrações de coagulante variaram de 50 a 600 ppm. Os autores observaram que quanto maior o pH, maiores as eficiências de remoção de cor e turbidez.

Os resultados obtidos no diagrama de coagulação/ floculação da presente pesquisa diferem dos resultados encontrados por Ndabigengesere e Narasiah (1996), Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia e Peres (2012) e Madrona et al. (2010) já que em diversos pares de valores de pH x concentração de coagulante não ocorreu a coagulação. Quanto à máxima eficiência de remoção, foram encontradas altas taxas de remoção tanto em pH de coagulação ácido quando em neutro e básico para valores distintos de dosagem de coagulante.

Após a elaboração dos diagramas de coagulação foram selecionados seis pares de valores de pH de coagulação x dosagem de coagulante. Os pontos foram selecionados considerando-se diversas regiões dos diagramas a fim de se observar a influência do pH e da dosagem de coagulante nas características dos agregados formados, independente da eficiência de remoção de cor observada. Para tanto, foram conduzidos estudos de floculação, ruptura e refloculação, por meio de análise de imagens e equipamento de monitoramento contínuo, para os pontos indicados nos diagramas e discriminados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Pontos do diagrama de coagulação selecionados para os estudos de floculação, ruptura e refloculação

<b>nº</b>	<b>pH</b>	<b>Dosagem (mg/L)</b>
1	3,52 ± 0,02	40,0
2	4,00 ± 0,01	50,0
3	4,55 ± 0,01	70,0
4	4,01 ± 0,01	130,0
5	8,35 ± 0,03	130,0
6	7,41 ± 0,02	150,0

Fonte: O autor.

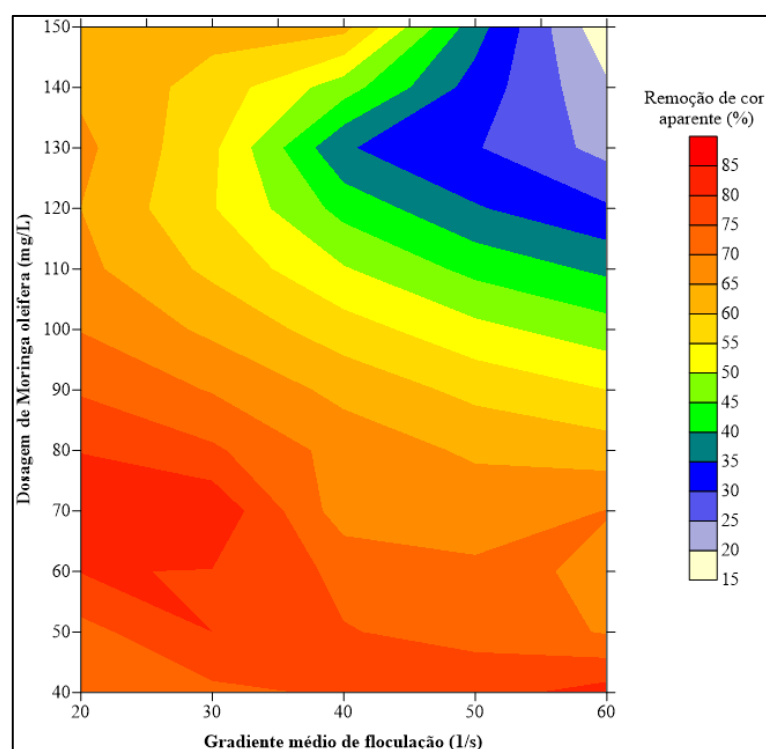
### 4.3 FORMAÇÃO, RUPTURA E RECRESCIMENTO DE FLOCOS

#### 4.3.1 Remoção de cor

Para cada um dos pontos apresentados na Tabela 4.3 realizou-se 16 ensaios referentes à formação, ruptura e recrescimento de flocos, para quatro gradientes de floculação distintos conforme descrito no item 3.8. Em cada um dos ensaios foram coletadas amostras para medida de cor e turbidez remanescentes, que subsidiaram a avaliação do comportamento dos parâmetros em função do gradiente de floculação e em relação aos resultados de ruptura e refloculação para cada um dos pontos selecionados. Os resultados são apresentados no Apêndice C.

As Figura 4.6 e 4.7 apresentam as curvas de isoefficiência de remoção de cor e turbidez remanescentes, respectivamente, a partir dos pares de valores de gradiente de velocidade x dosagem de coagulante. Para a construção das curvas, utilizou-se os ensaios 1 de cada gradiente de floculação, discriminados na Figura 3.3.

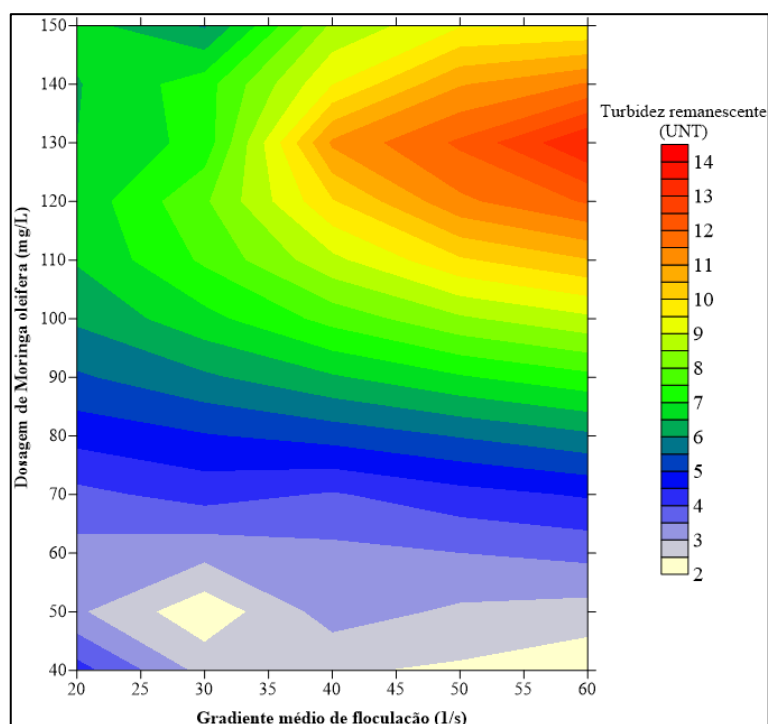
Figura 4.6 - Variação da remoção de cor em função da dosagem de coagulante e gradiente de floculação para  $V_f$  de 5,0 cm/min



Fonte: O autor.



Figura 4.7 - Variação da turbidez remanescente em função da dosagem de coagulante e gradiente de floculação para  $V_f$  de 5,0 cm/min



Fonte: O autor.

De modo geral, os melhores resultados de remoção ocorreram para o gradiente médio de floculação ( $G_f$ ) de  $20 \text{ s}^{-1}$  e que quanto maior o gradiente, menor é a remoção de cor para  $V_f$  de 5,0 cm/min. Uma exceção ocorreu para a dosagem de 40,0 mg/L, em que a maior remoção ocorreu no maior  $G_f$  avaliado. Os resultados convergem com os encontrados por Ndabigengerese e Narasiah (1996), que realizaram ensaios de jarreste em água sintética e avaliaram a remoção de turbidez por sedimentação e concluíram que o  $G_f$  que promoveu as melhores eficiências de remoção de turbidez foi o de  $25 \text{ s}^{-1}$ .

Uma possível explicação para que ocorra a queda na eficiência de remoção com o acréscimo no  $G_f$  é que quanto maior o gradiente médio de velocidade aplicado, maior a possibilidade de ruptura dos flocos, fazendo com que o diâmetro das partículas seja reduzido, diminuindo a eficiência de remoção.

Nota-se também que o aumento do  $G_f$  tem maior impacto na remoção de cor quando a concentração de *Moringa oleifera* é maior que 90 mg/L e que em concentrações menores, a diferença não é tão acentuada. Resulta desta constatação que concentrações acima de 90 mg/L

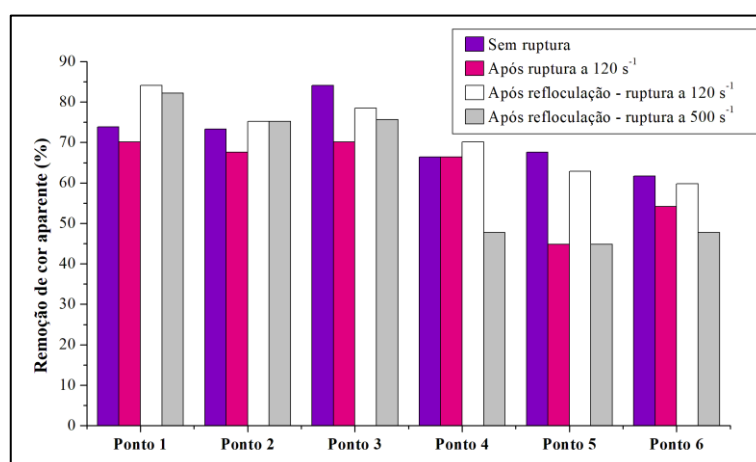
produzem flocos mais susceptíveis aos efeitos provocados pelo aumento do  $G_f$  que aqueles formados com menores dosagens de coagulante.

A turbidez inicial da água bruta foi de  $2,15 \pm 0,19$ , e, para maioria dos ensaios, observou-se aumento da turbidez após o tratamento. Ressalta-se que o parâmetro turbidez é secundário neste trabalho, cujos valores não foram controlados na obtenção da água de estudo e estão relacionados à própria constituição da substância húmica utilizada no seu preparo. Sua medida é importante no sentido de esclarecer que parte da cor medida se deve às partículas em suspensão.

Pode-se concluir também que boa parte da cor remanescente observada é devido à turbidez, que em uma estação de tratamento de água com ciclo convencional poderia ser removida por meio de filtração. Identifica-se que para as concentrações abaixo de 90,0 mg/L o  $G_f$  também não teve muito impacto nos valores de turbidez remanescente, já para concentrações superiores a 90,0 mg/L ocorreu um aumento significativo na turbidez residual com o aumento do  $G_f$ .

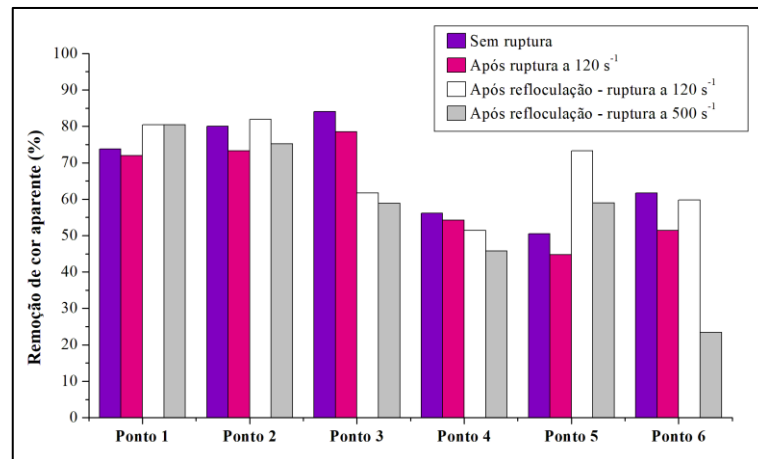
As Figuras 4.8 a 4.11 apresentam a eficiência de remoção de cor para cada uma das quatro condições em que um mesmo ponto foi avaliado em determinado  $G_f$ : (1) sem ruptura; (2) ruptura com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$  e sem refloculação; (3) ruptura com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$  seguido de refloculação e (4) ruptura com  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$  seguido de refloculação.

Figura 4.8 - Eficiência de remoção de cor para  $G_f$  de  $20 \text{ s}^{-1}$  e  $V_f$  de  $5,0 \text{ cm/min}$



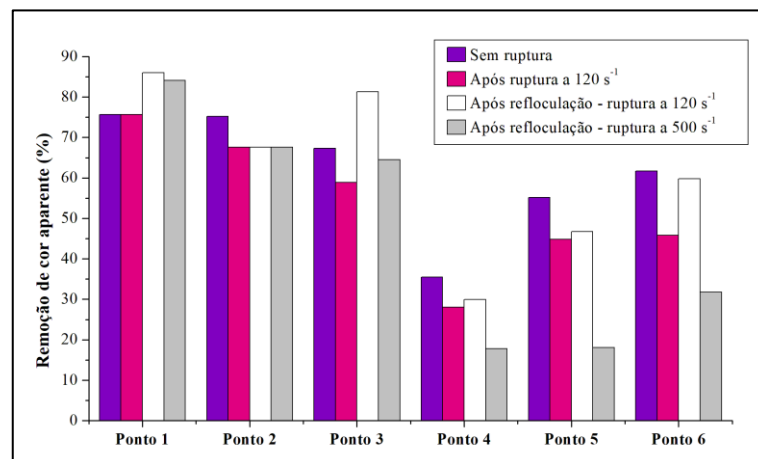
Fonte: O autor

Figura 4.9 - Eficiência de remoção de cor para  $G_f$  de  $30 \text{ s}^{-1}$  e  $V_f$  de  $5,0 \text{ cm/min}$



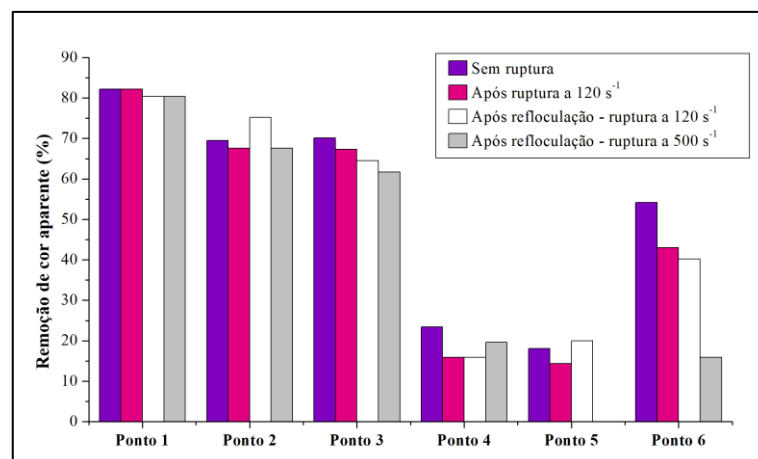
Fonte: O autor.

Figura 4.10 - Eficiência de remoção de cor para  $G_f$  de  $40 \text{ s}^{-1}$  e  $V_f$  de  $5,0 \text{ cm/min}$



Fonte: O autor.

Figura 4.11 - Eficiência de remoção de cor para  $G_f$  de  $60 \text{ s}^{-1}$  e  $V_f$  de  $5,0 \text{ cm/min}$



Fonte: O autor.

A partir da análise das imagens nota-se que em todos os pontos, a remoção de cor imediatamente após a ruptura com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$  é ligeiramente menor ou igual a antes da ruptura. A Tabela 4.4 apresenta os resultados do teste de ANOVA com intervalo de 95% de confiança, realizado para comparar a eficiência remoção entre os ensaios sem a ruptura e imediatamente após a ruptura a  $120 \text{ s}^{-1}$ . É possível concluir que a ruptura ocorrida não foi suficiente para alterar significativamente a eficiência de remoção de cor, já que o p-valor é maior que 0,05 para todos os gradientes de floculação.

Tabela 4.4 - Teste de ANOVA para comparação entre a eficiência de remoção de cor entre os ensaios sem a ruptura e imediatamente após a ruptura com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$

	<b>Gradiente (<math>\text{s}^{-1}</math>)</b>	<b>Graus de liberdade</b>	<b>Soma de quadrados</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>Estatística F</b>	<b>p-valor</b>
Tratamento	20	1	241	241	2,9	0,12
Resíduos		10	844	84		
Tratamento	30	1	85	85	0,5	0,52
Resíduos		10	1896	190		
Tratamento	40	1	207	207	0,8	0,40
Resíduos		10	2643	264		
Tratamento	60	1	62	62	0,1	0,78
Resíduos		10	7640	764		

Fonte: O autor.

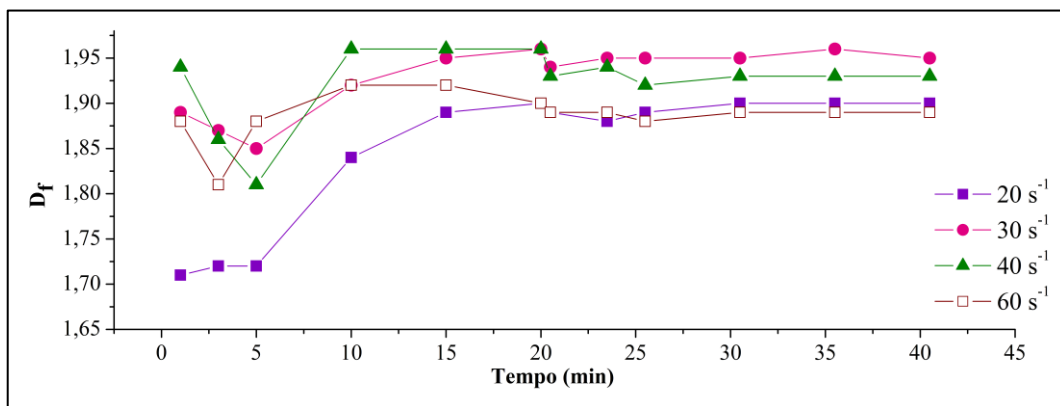
Comparando-se os resultados após a ruptura com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$  e após refloculação é possível notar que para o  $G_f$  de  $20 \text{ s}^{-1}$  (Figura 4.8) houve aumento da eficiência de remoção de cor em todos os pontos. Já considerando-se o  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$  observa-se que nos pontos 1 e 2 também se obteve melhor eficiência de remoção após refloculação, se comparado ao ensaio sem a ruptura. Para o ponto 1 correu essa melhora também para os  $G_f$  de 30 e  $40 \text{ s}^{-1}$ .

Para todos os  $G_f$  observa-se que o ponto 6 (concentração de coagulante de  $150 \text{ mg/L}$ ) foi o que mais apresentou diferença na remoção de cor se comparado aos resultados sem a ruptura a após refloculação com  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$ , indicando assim uma menor estabilidade dos flocos nessa concentração.

### 4.3.2 Dimensão fractal

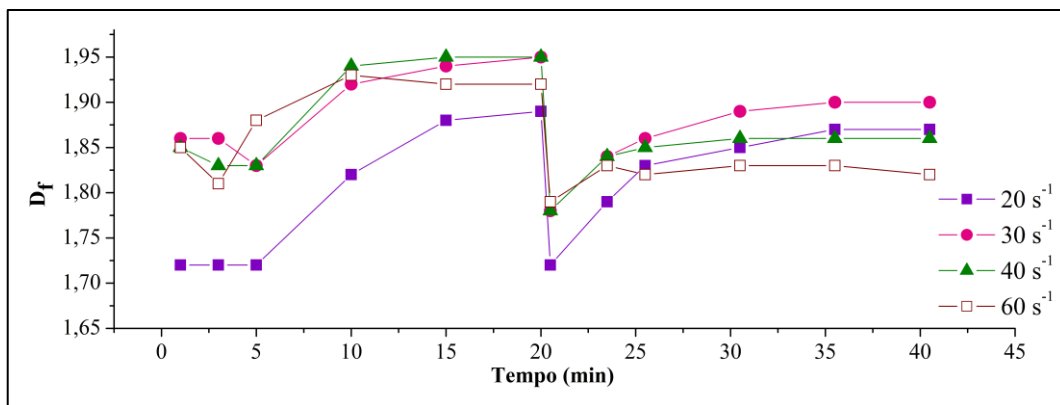
A dimensão fractal ( $D_f$ ) foi calculada em cada um dos tempos de aquisição das imagens permitindo assim a sua evolução temporal conforme apresentado nas Figuras 4.12 a 4.23, para os ensaios 3 e 4 descritos na Figura 3.3. Nota-se que no geral a dimensão fractal teve uma variação expressiva nos tempos de 1, 3, 5 e 10 min e após esse tempo ocorreu uma estabilização em termos de suas características morfológicas.

Figura 4.12 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 1:  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

Figura 4.13 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 1:  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$

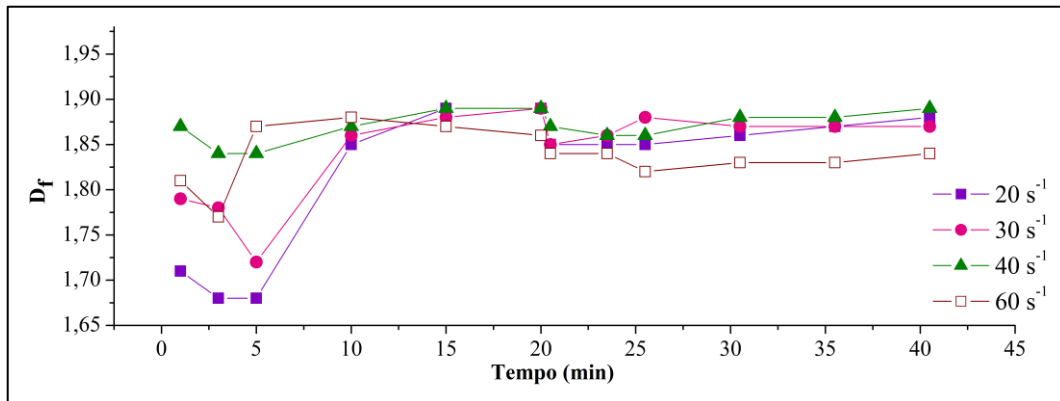


Fonte: O autor.

Para cada  $G_f$  avaliado quatro ensaios foram realizados em cada um dos pontos, sendo que nos primeiros 20 min de cada desses quatro ensaios os parâmetros físicos foram iguais (conforme Figura 3.3). A fim de verificar a consistência dos resultados fez-se teste de ANOVA (para os ensaios em que os pressupostos não foram atendidos, realizou-se teste não paramétrico de

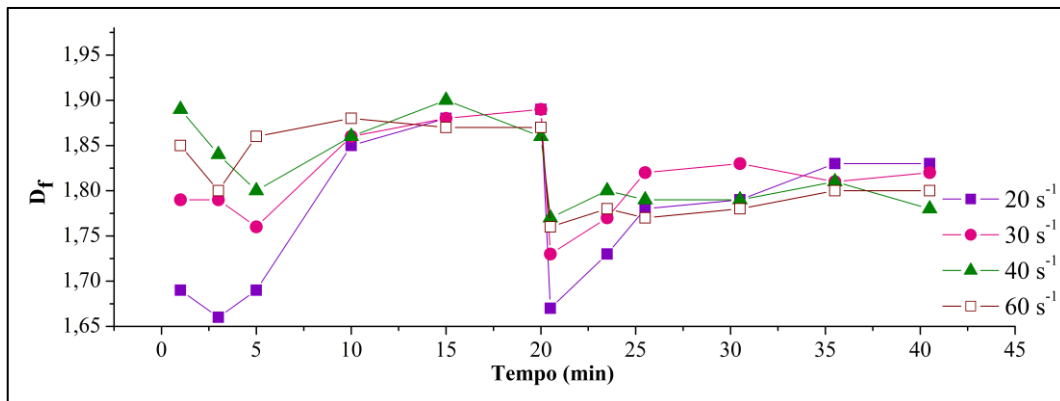
Kruskal-Wallis) para os valores de  $D_f$  desses quatro ensaios, nos primeiros 20 min de cada um deles. Os resultados dos testes evidenciaram não ter diferença significativa entre eles, dando assim confiabilidade para os resultados, com significância de 95%.

Figura 4.14 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 2:  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$



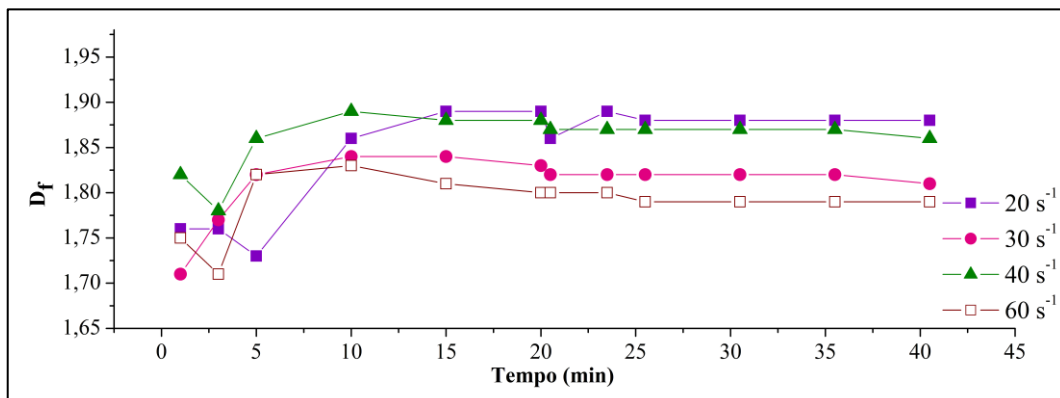
Fonte: O autor.

Figura 4.15 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 2:  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$



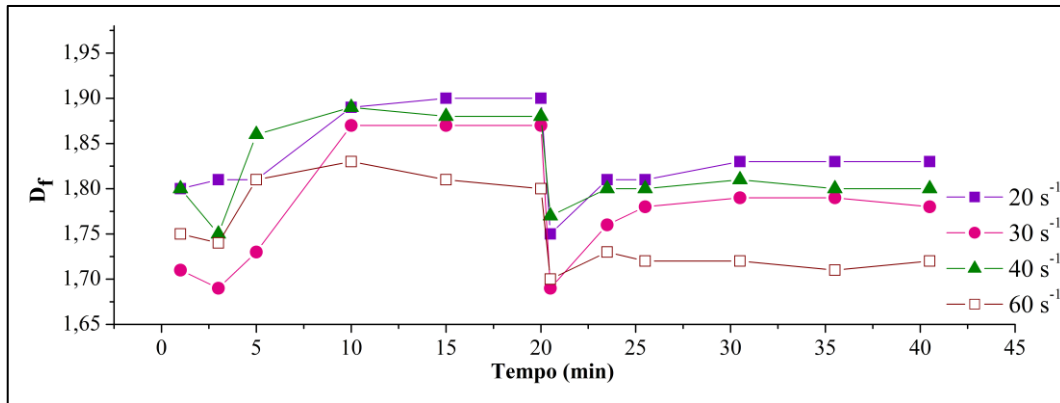
Fonte: O autor

Figura 4.16 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 3:  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$



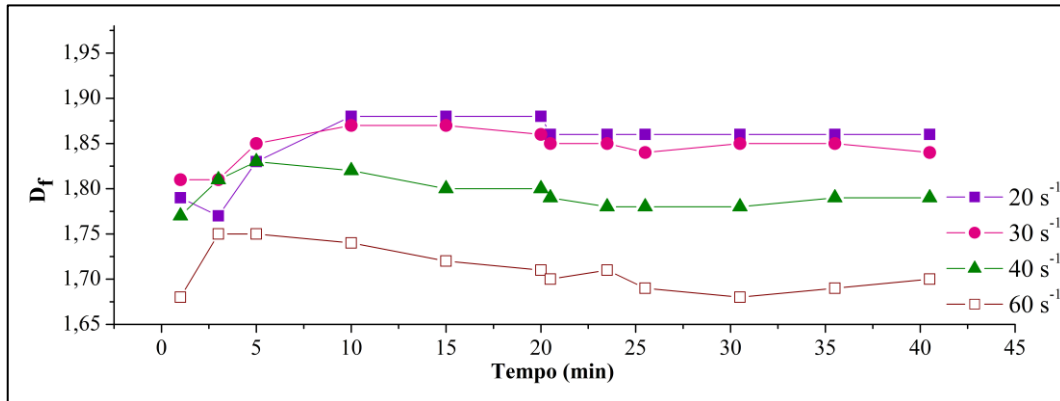
Fonte: O autor.

Figura 4.17 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 3:  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$



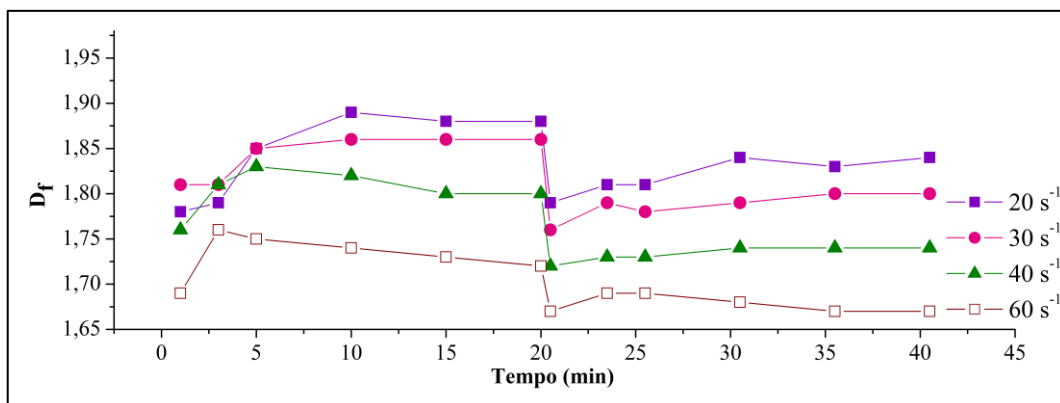
Fonte: O autor.

Figura 4.18 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 4:  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$



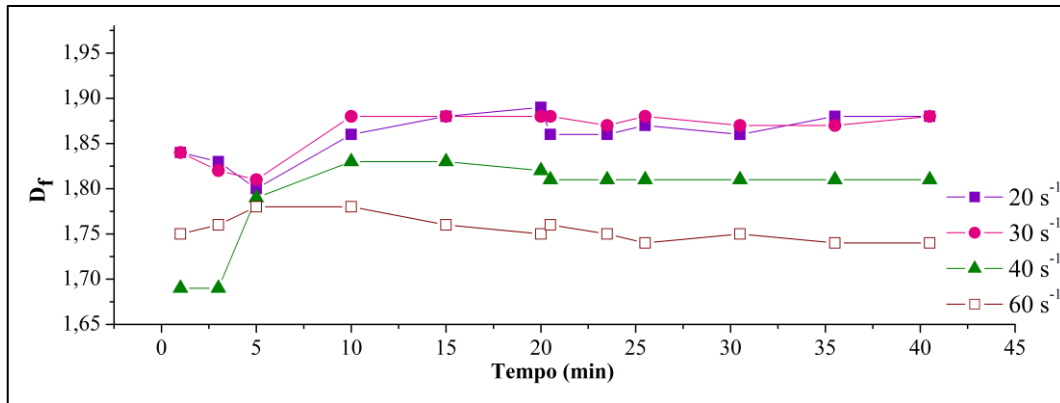
Fonte: O autor.

Figura 4.19 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 4:  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$



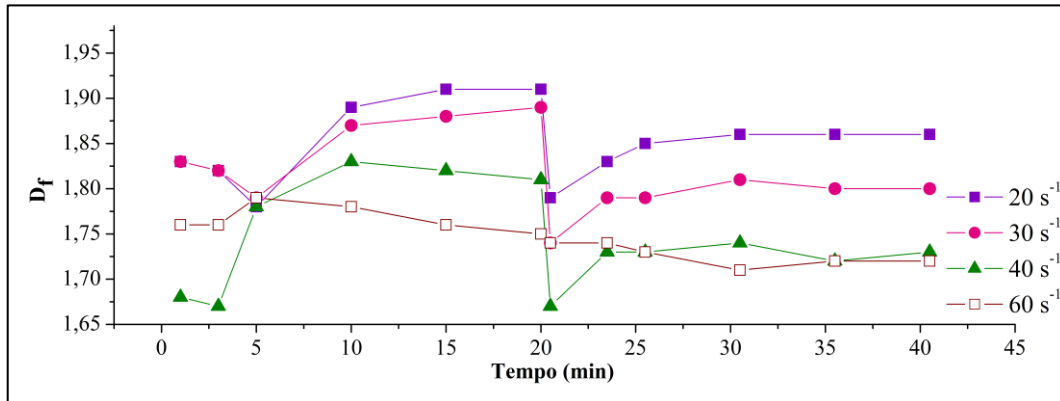
Fonte: O autor.

Figura 4.20 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 5:  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$



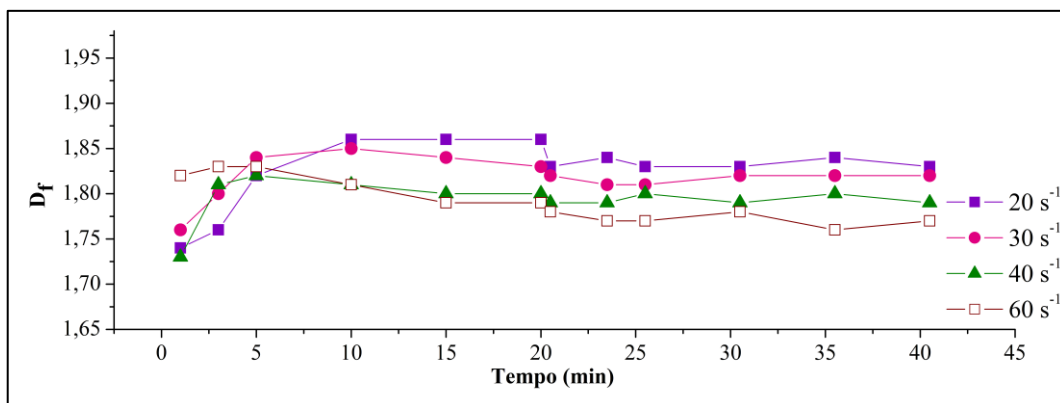
Fonte: O autor.

Figura 4.21 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 5:  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

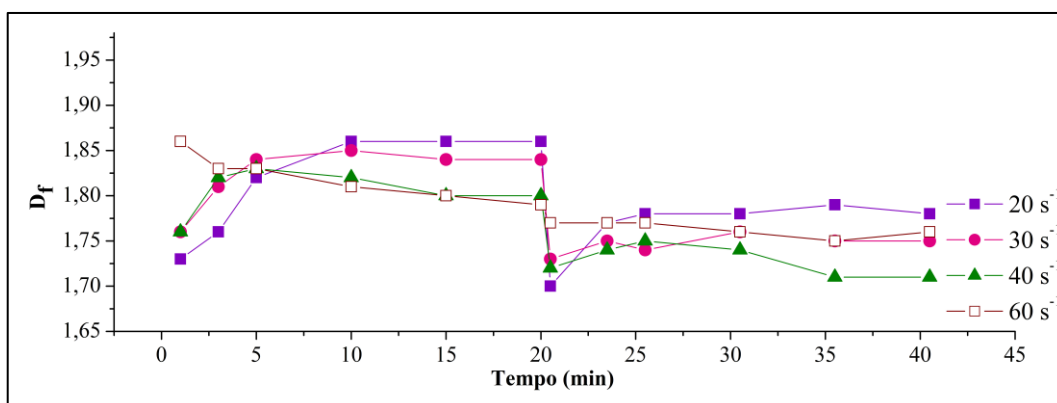
Figura 4.22 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 6:  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.



Figura 4.23 - Evolução temporal da  $D_f$  para o ponto 6:  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

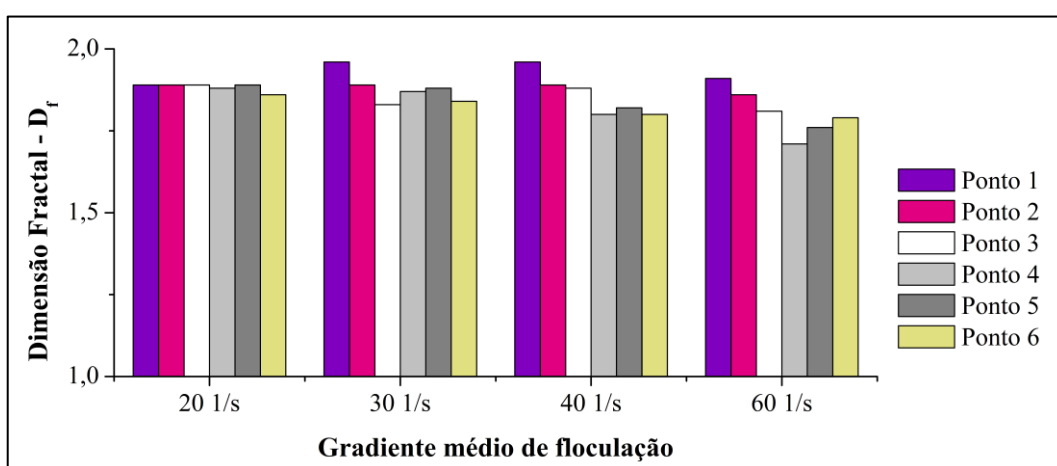
A partir da análise das Figuras 4.12 a 4.23 não foi possível perceber uma relação entre a dimensão fractal e o gradiente médio de floculação, já que na maioria dos pontos estudados o comportamento se mostra independente entre os dois parâmetros. Uma exceção ocorreu para os pontos 4 e 5, ambos com dosagem de *Moringa oleifera* de 130,0 mg/L, em que houve um decréscimo na dimensão fractal à medida em que o  $G_f$  aumentou. Isso sugere que para essa dosagem em específico, em gradientes de mistura mais altos os flocos apresentam estruturas mais ramificadas e fracamente ligadas (CHAKRABORTI; ATKINSON; BENSCHOTEN, 2000). Esses resultados são discordantes dos encontrados por Li et al. (2006), que avaliaram o comportamento do coagulante sulfato de alumínio em suspensão de caulinita e verificaram que com o aumento do  $G_f$  houve aumento da dimensão fractal.

Após a ruptura com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$  ocorreu uma queda muito pequena no valor da dimensão fractal, com média de 2,6%, 2,3%, 0,8% e 0,3% para os  $G_f$  de 20, 30, 40 e  $60 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Já para o  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$  observa-se que ocorre uma queda um pouco superior no valor da dimensão fractal e que a diferença percentual entre o  $D_f$  antes e imediatamente após a ruptura é inversamente proporcional ao  $G$ , com média de 8,2%, 7,5%, 5,9% e 3,7% para os  $G_f$  de 20, 30, 40 e  $60 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente.

Percebe-se que durante a refloculação ocorre um aumento da dimensão fractal, considerando-se os valores logo após a ruptura, porém o valor após estabilização é menor que antes da ruptura, indicando que os flocos após a refloculação são mais densos e compactos.

Os valores de  $D_f$  variaram de 1,66 a 1,96 considerando todas as condições avaliadas e estão em concordância com os resultados encontrados por Sun et al. (2013), Moruzzi et al. (2017) e Lopes et al. (2020). A Figura 4.24 apresenta a variação da dimensão fractal em função do gradiente médio de floculação para cada um dos pontos avaliados. Os valores nele presentes representam a média da dimensão fractal para os tempos de coagulação de 15 e 20 min (antes da ruptura e após estabilização).

Figura 4.24 - Relação entre o  $G_f$  e a  $D_f$  para cada um dos pontos analisados no diagrama de coagulação



Fonte: O autor.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados do teste de ANOVA com intervalo de 95% de confiança, realizado para comparar a dimensão fractal entre os diferentes  $G_f$ . A partir da mesma é possível inferir que não existe diferença significativa entre a dimensão fractal, na estabilização, para os diferentes  $G_f$ , já que o p-valor é maior que 0,05, o que denota que para este tipo de coagulante e para os  $G_f$  avaliados, a estrutura morfológica se mantém independente do diâmetro médio das partículas e da intensidade de mistura.

Tabela 4.5 - Teste de ANOVA para comparação da dimensão fractal para diferentes gradientes médios de floculação

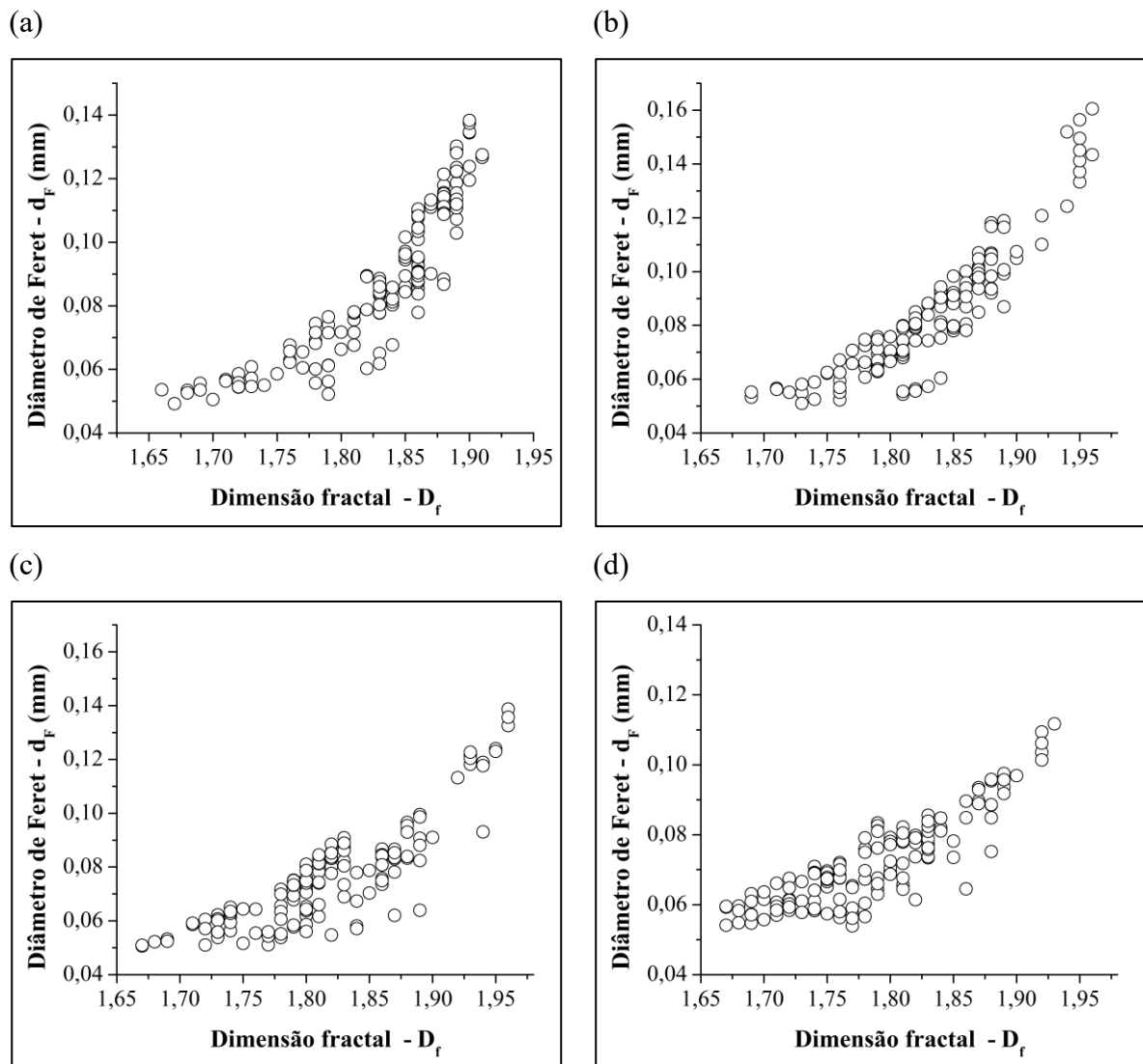
	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estatística F	p-valor
Tratamento	3	0,02	0,01	2,59	0,08
Resíduos	20	0,06	0,00		

Fonte: O autor.

A Figura 4.25 apresenta a relação entre a dimensão fractal e o Diâmetro de Feret médio calculado em cada um dos tempos de aquisição das imagens. Percebe-se que para todos os  $G_f$  avaliados existe uma tendência entre essas variáveis e que quanto maior a dimensão fractal, maior é o diâmetro médio das partículas.

Figura 4.25 - Relação entre dimensão fractal e Diâmetro de Feret médio para diferentes  $G_f$ :

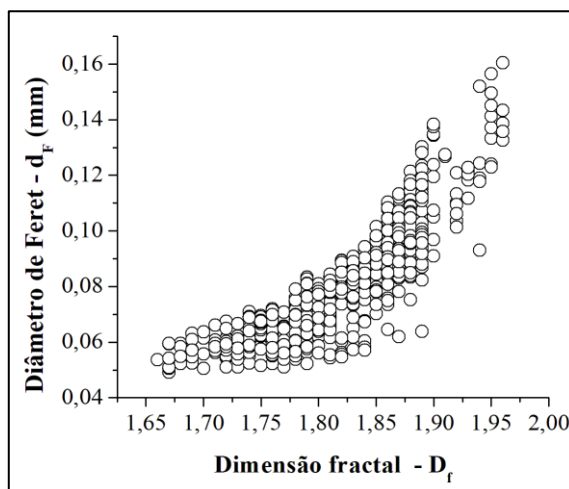
(a)  $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ ; (b)  $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ ; (c)  $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$  e (d)  $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

Avaliando-se de forma conjunta a relação entre a  $D_f$  e o  $d_F$  médio, independente do  $G_f$ , tem-se o gráfico apresentado na Figura 4.26. Percebe-se que o  $D_f$  guarda relação direta com o  $d_F$  médio independentemente do gradiente médio de velocidade de floculação.

Figura 4.26 - Relação entre dimensão fractal e Diâmetro de Feret médio para todos os gradientes médios de floculação avaliados

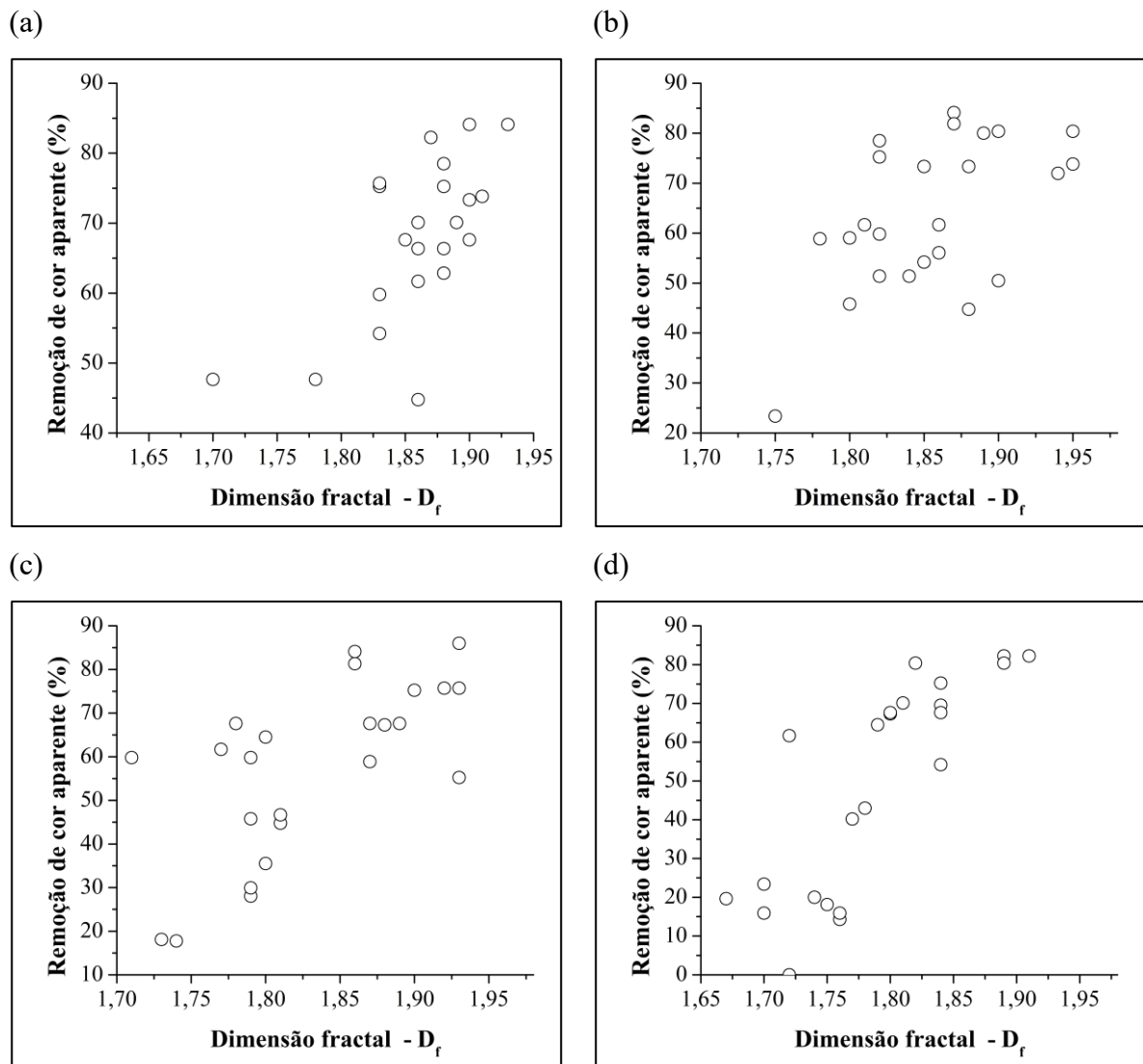


Fonte: O autor.

Com o objetivo de avaliar a existência de relação entre dimensão fractal e a remoção de cor por FAD, construiu-se os gráficos apresentados na Figura 4.27. A partir de sua análise é possível observar que existe uma fraca tendência entre os dois parâmetros, em que a remoção de cor aparente aumenta com o aumento da dimensão fractal.

A premissa de que os flocos gerados no tratamento de água e efluente apresentam geometria fractal, implica que sejam auto similares e possuam invariância de escala (LI et al., 2006), isso sugere que mesmo após a quebra, o valor da dimensão fractal se mantém constante, o que não foi observado nos resultados encontrados. Esses resultados estão similares aos encontrados por Sun et al. (2013), que avaliaram o comportamento dos coagulantes quitosana e cloridrato de quitosana. Segundo estes autores, a estrutura exclusivamente auto similar é apenas um conceito ideal e que a dimensão fractal varia de acordo com as condições físicas da floculação, com o crescimento do floco e, portanto, condicionada às mudanças nas condições externas. Ressalta-se, portanto, que a geometria fractal é um artifício para explicar o comportamento de partículas de geometria não euclidiana.

Figura 4.27 - Relação entre a  $D_f$  e remoção de cor para diferentes  $G_f$ : (a)  $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ ; (b)  $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ ; (c)  $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$  e (d)  $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

#### 4.3.3 Distribuição do tamanho de partículas

A Tabela 4.6 apresenta os limites utilizados em cada uma das 10 classes de tamanho da distribuição de frequências. As Figuras 4.28 a 4.35 apresentam a evolução da DTP ao longo do tempo para todos os pontos analisados, tanto para a ruptura com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$  quanto para  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$ . Nota-se que em todos os pontos estudados existe a formação de flocos já nos primeiros minutos de floculação.

Tabela 4.6 - Classes de tamanho utilizada para análise da DTP

Classe	Limite inferior (mm)	Limite superior (mm)
1	0,023	0,053
2	0,053	0,084
3	0,084	0,115
4	0,115	0,146
5	0,146	0,177
6	0,177	0,208
7	0,208	0,238
8	0,238	0,269
9	0,269	0,300
10	0,300	0,735

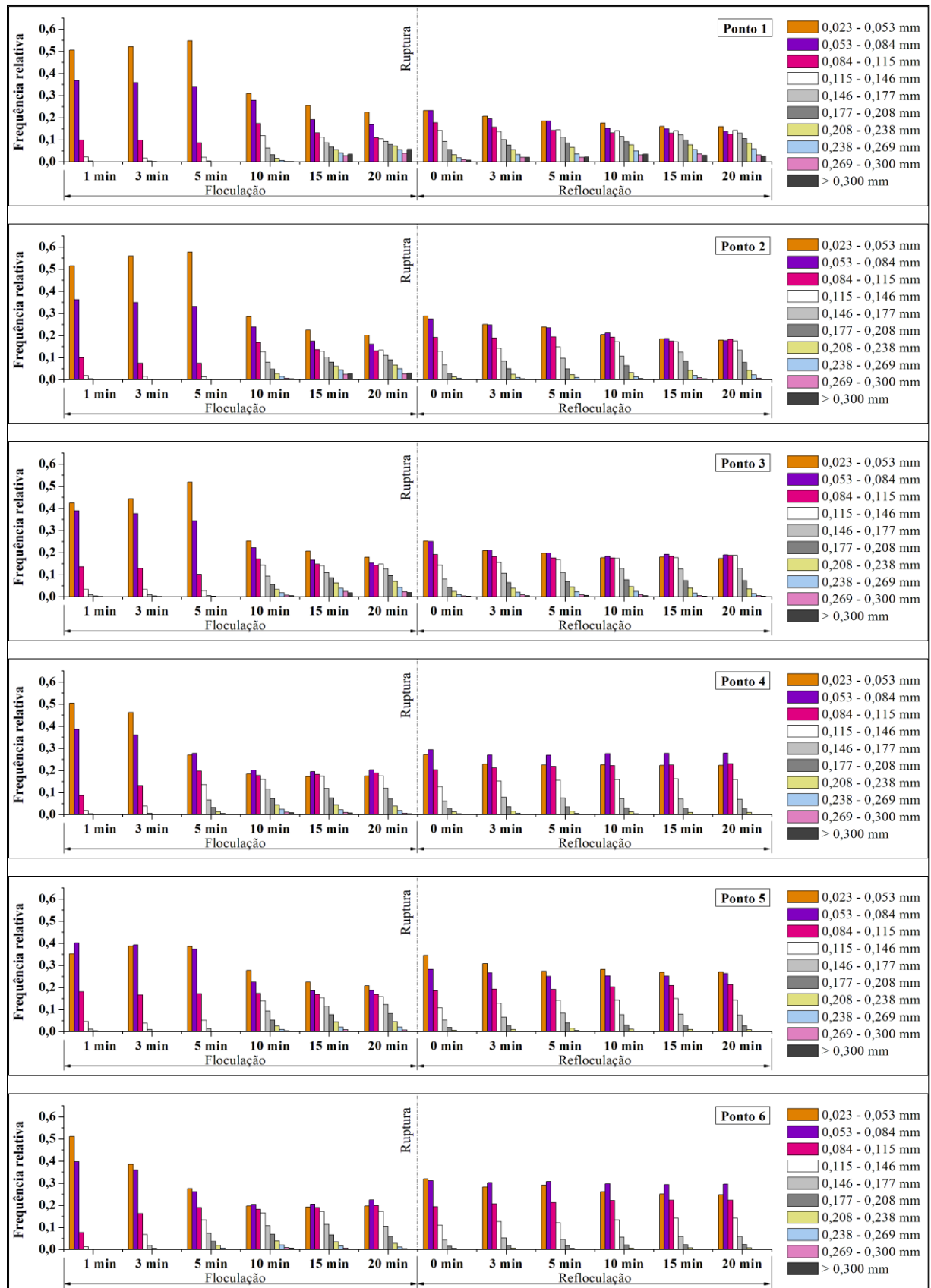
Fonte: O autor.

Considerando o  $G_f$  de  $20 \text{ s}^{-1}$  nota-se que nos primeiros 5 minutos a maioria dos flocos se concentram nas três primeiras classes, com flocos menores que 0,115 mm. Após esse tempo ocorre o crescimento dos flocos, podendo ser percebido maior composição nas demais classes. A distribuição nos tempos de 15 e 20 minutos é muito similar, indicando a ocorrência do patamar de estabilização. Em relação aos demais gradientes de velocidade avaliados, situações semelhantes foram observadas. Em alguns pontos é possível identificar que a ocorrência do patamar de estabilização ocorreu mais rápido em gradientes de velocidade maiores.

Os pontos 4 e 5, que apresentam mesma dosagem de coagulante, apresentaram distribuição de partículas diferentes ao longo do tempo de floculação, porém, observa-se que aos 20 min de floculação a distribuição de partículas é muito similar dentre os dois ensaios.

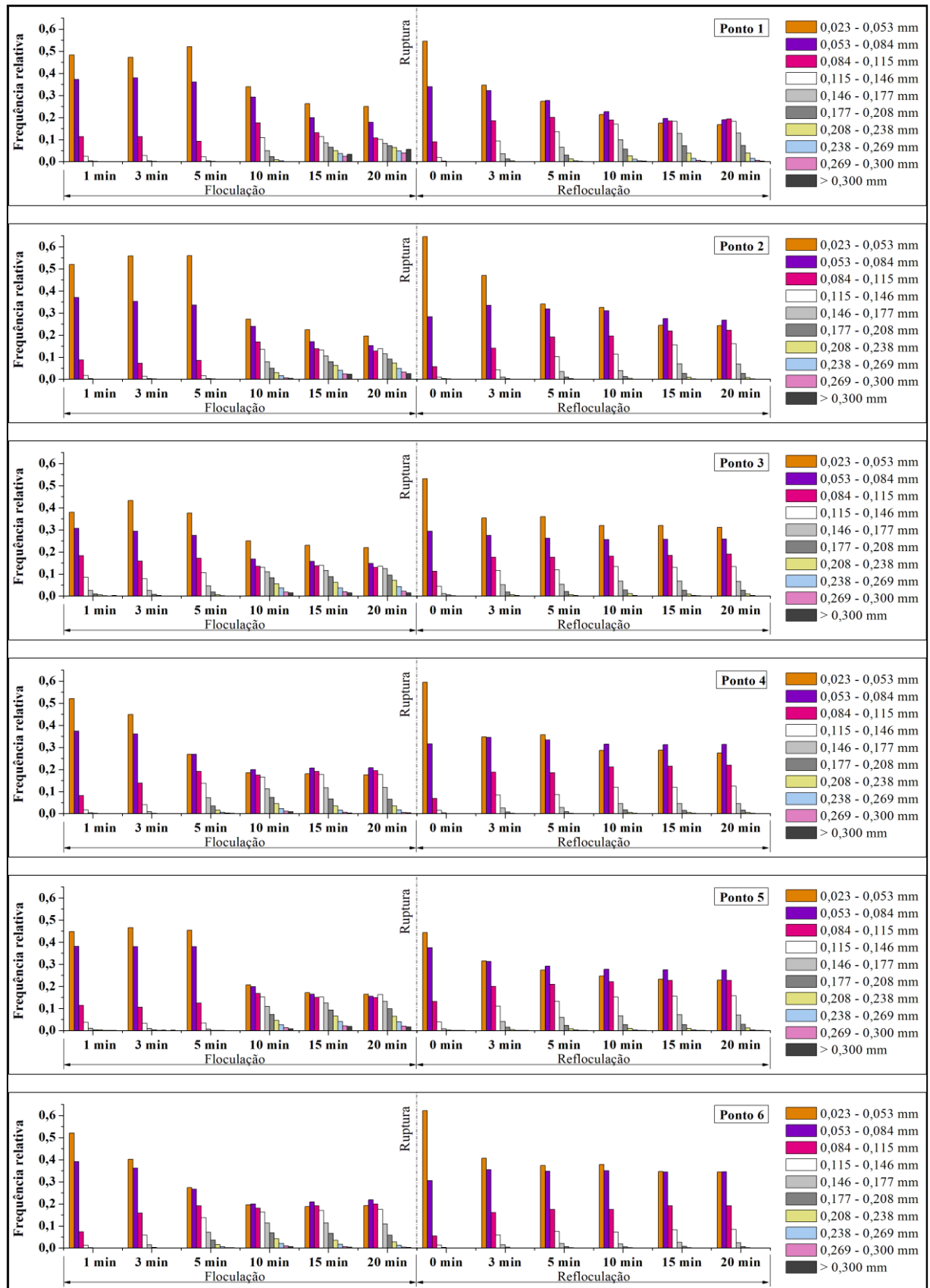
Após a ruptura com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$ , observa-se pouca alteração na distribuição do tamanho de partículas, diferentemente do que ocorre para  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$ , em que imediatamente após a ruptura ocorre o aumento nas duas primeiras classes, com flocos menores que 0,084 mm. Em seguida ocorre novamente o crescimento dos flocos, porém com uma estabilização mais rápida em comparação com a etapa de coagulação, em que pouca diferença é observada após 5 minutos de refloculação. Para o  $G_f$  de  $60 \text{ s}^{-1}$  a distribuição de tamanho de partículas manteve-se constante durante todo o período após ruptura indicando que para esse gradiente não houve recuperação dos flocos.

Figura 4.28 - DTP para  $G_f$  de  $20 \text{ s}^{-1}$  e com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

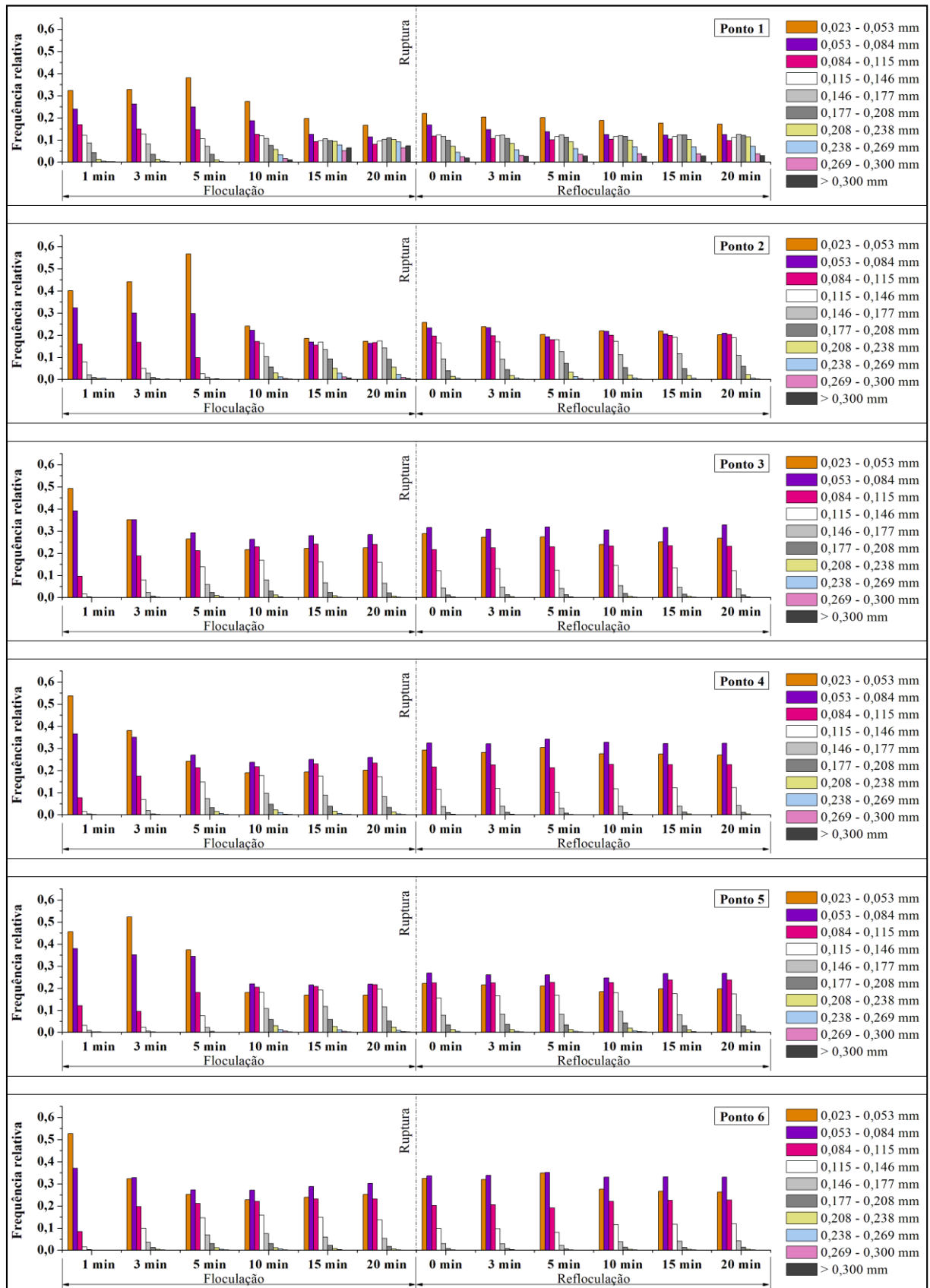
Figura 4.29 - DTP para  $G_f$  de  $20 \text{ s}^{-1}$  e com  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

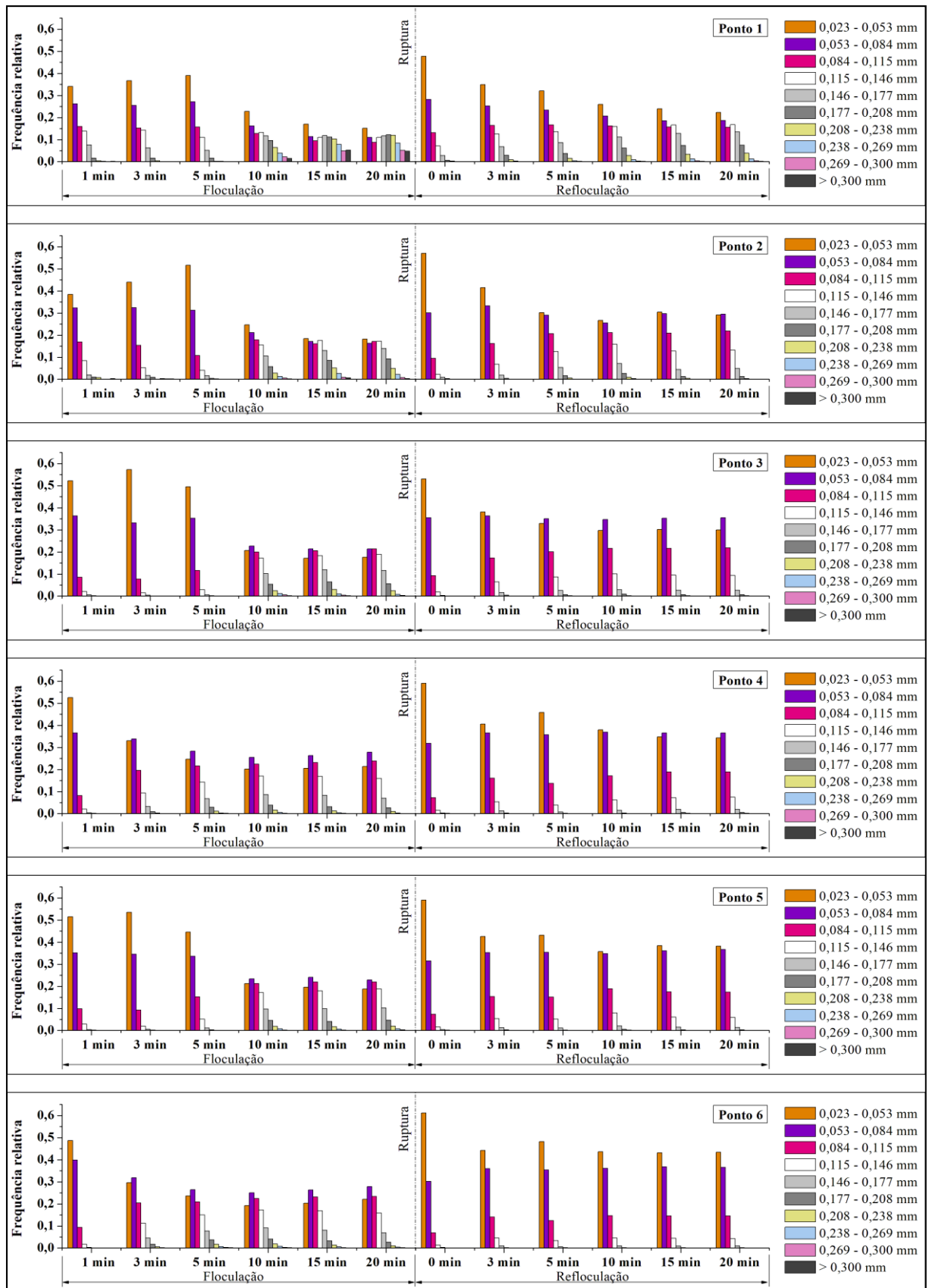


Figura 4.30 - DTP para  $G_f$  de  $30 \text{ s}^{-1}$  e com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$



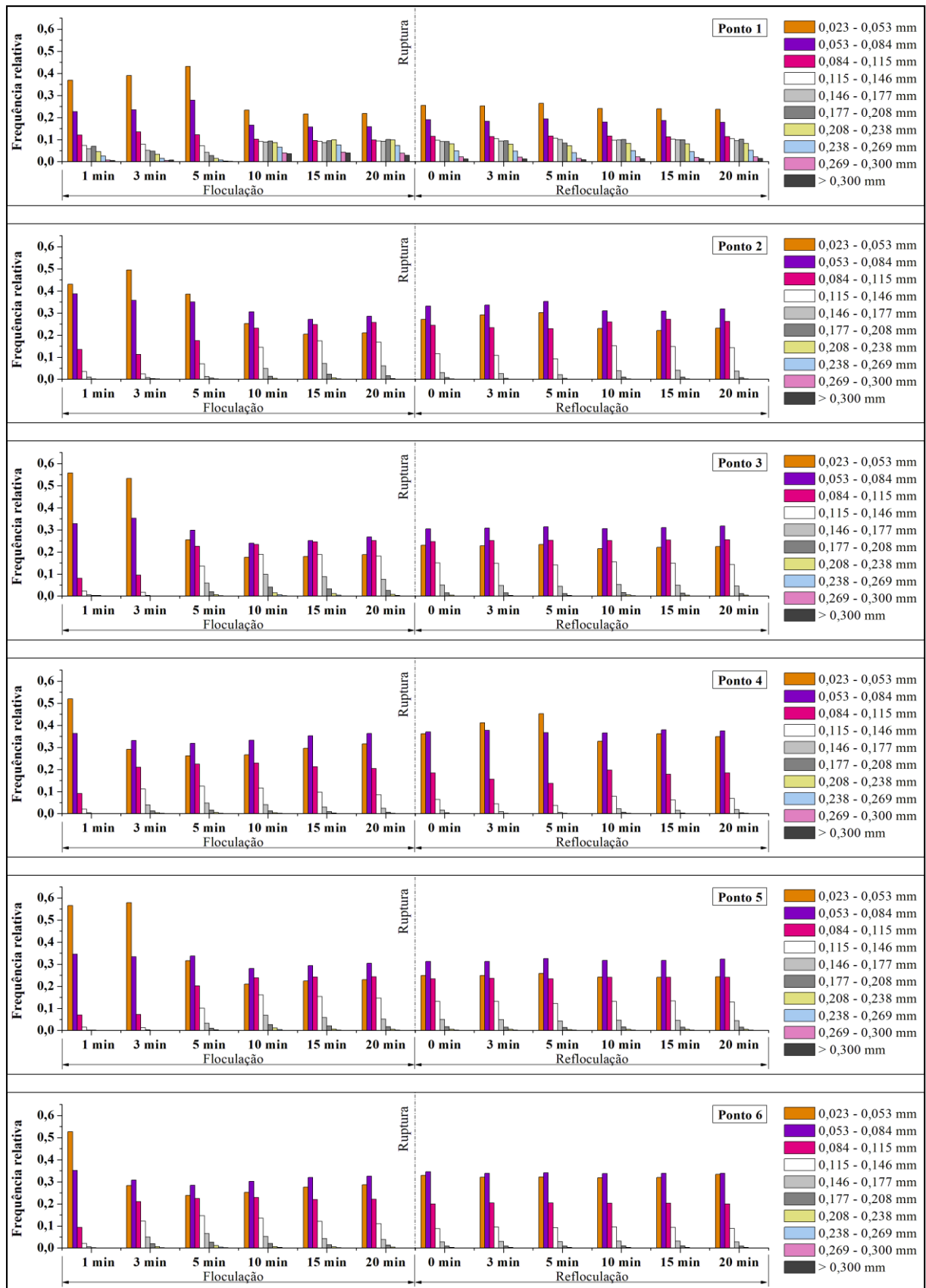
Fonte: O autor.

Figura 4.31 - DTP para  $G_f$  de  $30 \text{ s}^{-1}$  e com  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$



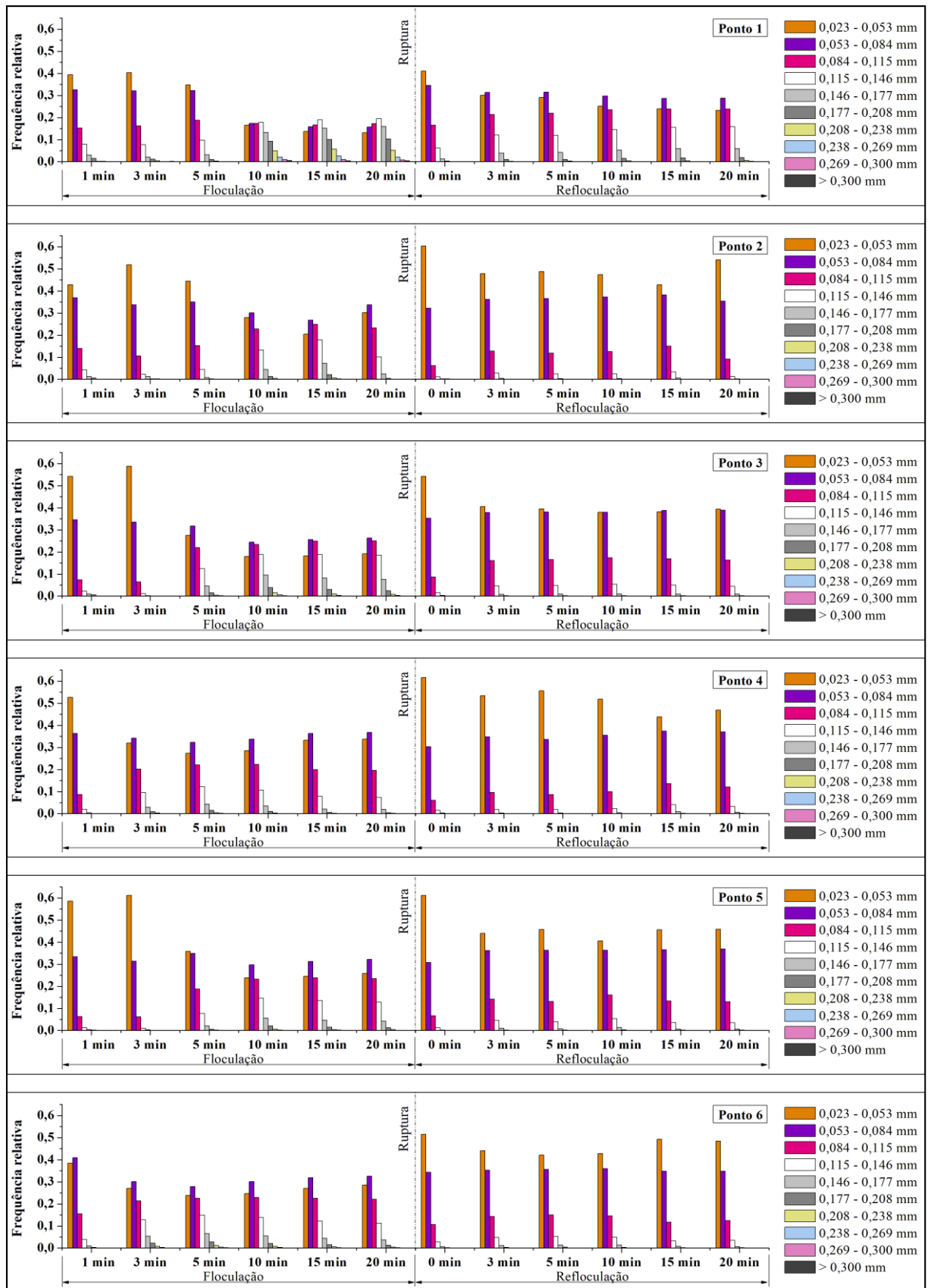
Fonte: O autor.

Figura 4.32 - DTP para  $G_f$  de  $40 \text{ s}^{-1}$  e com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$



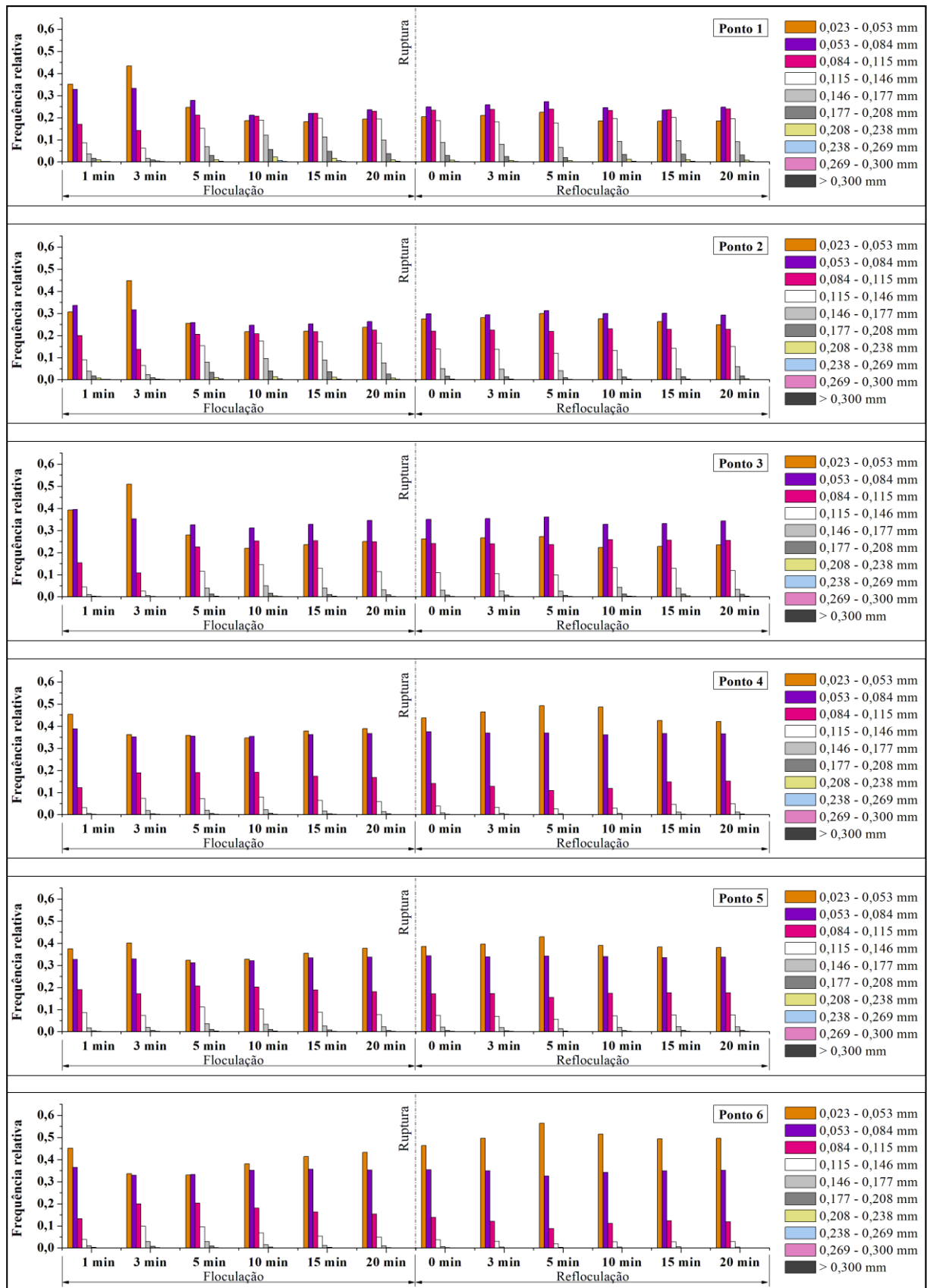
Fonte: O autor.

Figura 4.33 - DTP para  $G_f$  de  $40 \text{ s}^{-1}$  e com  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$



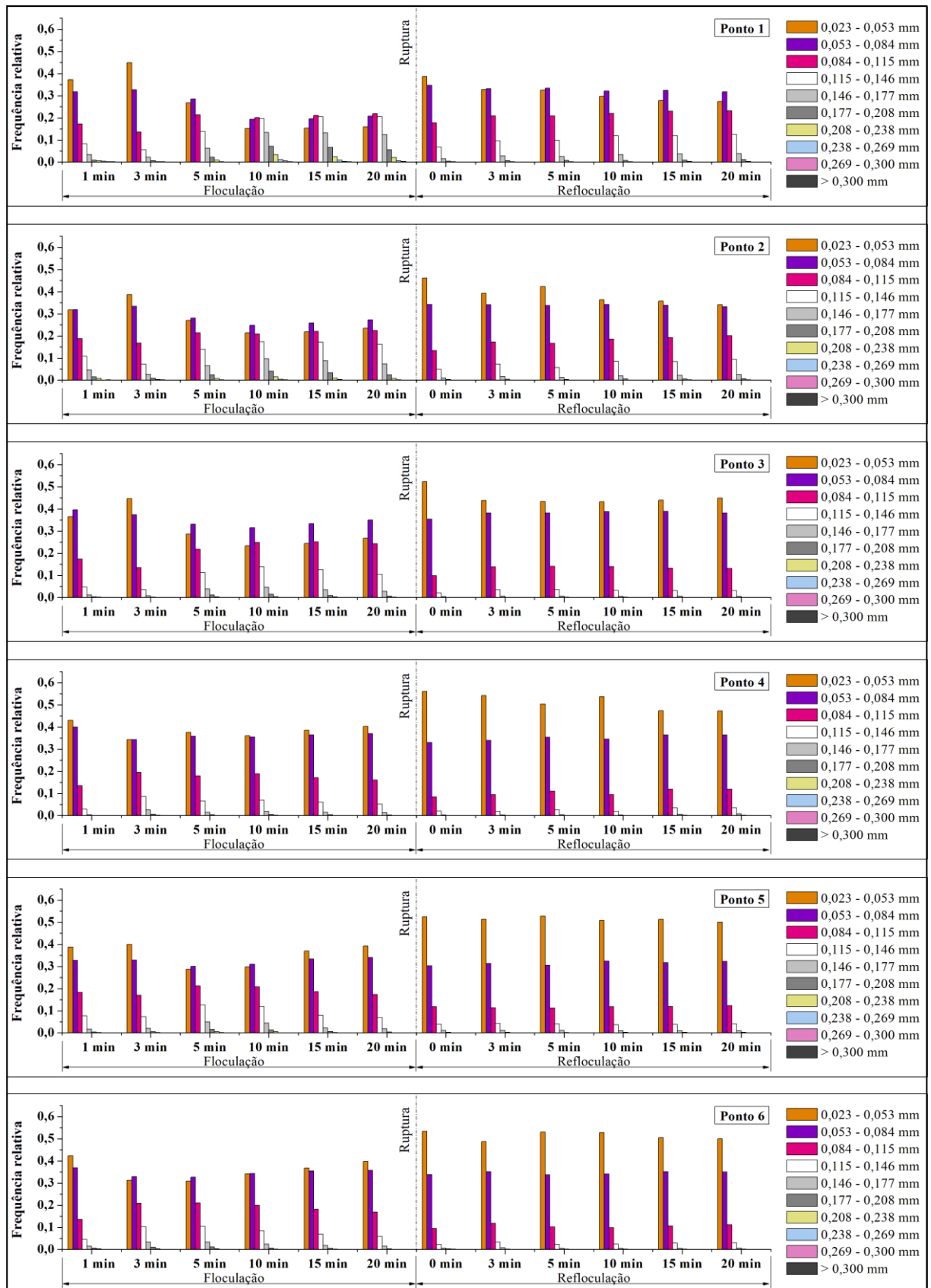
Fonte: O autor.

Figura 4.34 - DTP para  $G_f$  de  $60 \text{ s}^{-1}$  e com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

Figura 4.35 - DTP para  $G_f$  de  $60 \text{ s}^{-1}$  e com  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

#### 4.3.4 Resistência e força dos flocos

A Tabela 4.7 apresenta os resultados de resistência média por unidade de área no plano de ruptura ( $\sigma$ ), Diâmetro de Feret (calculado pela média dos quatro ensaios com mesmo  $G_f$  no tempo de floculação de 20 min) e o fator de força, calculado por meio de análise de imagens e por PDA, para os  $G_{rup}$  de 120 e 500  $s^{-1}$ .

Tabela 4.7 - Resistência média por unidade de área no plano de ruptura ( $\sigma$ ), Diâmetro de Feret ( $d_F$ ) e fator de força para os pontos do diagrama de coagulação

	$G_f$ ( $s^{-1}$ )	$\sigma$ (N/m <sup>2</sup> )	$d_F$ (mm)	Fator de força (imagens)		Fator de força (PDA)	
				120 $s^{-1}$	500 $s^{-1}$	120 $s^{-1}$	500 $s^{-1}$
Ponto 1	20	0,03	0,1440	76,62	42,26	67,37	34,68
	30	0,06	0,1563	77,47	41,27	73,94	38,02
	40	0,08	0,1306	87,10	53,27	82,61	52,81
	60	0,11	0,1031	96,74	63,72	84,97	63,99
Ponto 2	20	0,03	0,1308	66,93	37,79	68,79	41,00
	30	0,05	0,1247	77,49	47,09	81,35	50,35
	40	0,05	0,0846	88,70	68,25	78,60	57,44
	60	0,09	0,0881	91,56	69,19	82,37	63,70
Ponto 3	20	0,03	0,1289	73,86	47,35	67,10	46,10
	30	0,04	0,1000	89,52	52,79	75,59	47,50
	40	0,05	0,0911	91,22	58,43	78,58	47,01
	60	0,08	0,0774	98,56	72,18	78,39	71,52
Ponto 4	20	0,02	0,1104	76,97	47,83	74,45	46,06
	30	0,04	0,0930	82,65	57,70	82,47	55,46
	40	0,04	0,0736	93,36	72,34	73,49	62,64
	60	0,07	0,0655	93,13	83,57	85,58	71,95
Ponto 5	20	0,02	0,1150	70,29	48,00	71,46	29,79
	30	0,04	0,1090	88,12	52,15	81,41	46,36
	40	0,05	0,0801	97,84	62,71	76,84	46,69
	60	0,07	0,0683	98,70	82,88	87,31	64,83
Ponto 6	20	0,02	0,1057	75,22	48,36	76,51	46,63
	30	0,04	0,0925	88,50	56,45	79,91	48,26
	40	0,05	0,0781	92,99	72,55	83,55	78,23
	60	0,08	0,0705	95,91	85,09	76,47	84,64

Fonte: O autor.

Conforme esperado, observa-se que a  $\sigma$  é diretamente proporcional ao  $G_f$ , conforme pode ser verificado pela Equação 14. Fixando-se o gradiente de floculação observa-se que os valores de  $\sigma$  tiveram pouca variação entre os diferentes pontos do diagrama assim como o fator de força, indicando que esses parâmetros são controlados pelas condições hidráulicas e que são independentes da concentração de coagulante utilizada.

O fator de força para o  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$  foi maior que para o  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$  em todos os pontos analisados, conforme esperado. Verifica-se que o fator de força aumentou com o aumento do  $G_f$  e de modo geral o diâmetro médio diminui, demonstrando que quanto maior o gradiente médio de floculação, menor é o floco e melhor a sua capacidade em resistir às forças cisalhamento. De acordo com Boller e Blaser (1998) isso ocorre devido aos vórtices dissipadores de energia em microescala, que fazem com que os flocos maiores fiquem mais susceptíveis à ruptura.

Quanto ao coeficiente de resistência dos flocos ( $\gamma$ ), calculado para cada um dos seis pontos do diagrama de coagulação, obteve-se valores entre 0,32 e 0,51 conforme apresentado na Tabela 4.8. De acordo com Jarvis et al. (2005) quanto maior o valor de  $\gamma$ , mais propenso é a quebra dos flocos e, portanto, menor a sua resistência. Observa-se que o ponto 1 apresenta a maior resistência dentre os pontos analisados e os pontos 4 e 5, ambos com dosagem de coagulante de 130,0 mg/L, apresentam os maiores valores de  $\gamma$ , e, portanto, são os mais propensos à quebra.

Tabela 4.8 - Coeficiente de resistência dos flocos e constante de relação entre o diâmetro máximo e o gradiente de floculação para os pontos do diagrama de coagulação

Ponto	pH	Dosagem (mg/L)	$\gamma$	$C$	$R^2$
1	3,52	40,0	0,32	0,42	0,70
2	4,00	50,0	0,42	0,47	0,74
3	4,55	70,0	0,46	0,49	0,98
4	4,01	130,0	0,50	0,49	0,97
5	8,35	130,0	0,51	0,56	0,91
6	7,41	150,0	0,38	0,33	0,98

Fonte: O autor.

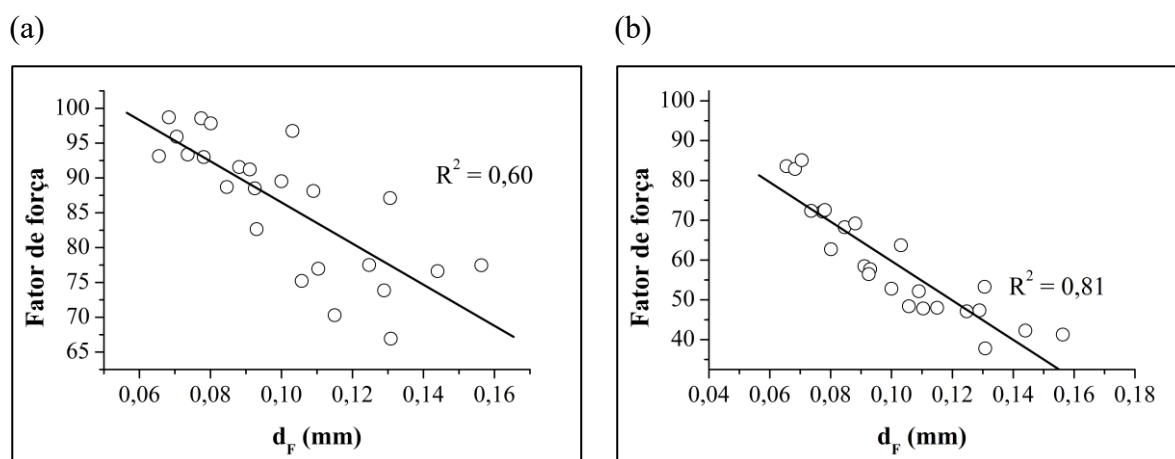
Ao comparar o fator de força obtido por análise de imagens e pelo PDA, observa-se que em geral ele foi maior quando obtido por meio de análise de imagens, com diferença percentual média entre os resultados de  $9,97 \pm 6,43 \%$  e  $10,71 \pm 9,16 \%$  para os  $G_{rup}$  de 120 e  $500 \text{ s}^{-1}$ ,



respectivamente. Essa diferença pode ser explicada pela variação de sensibilidade entre os dois métodos.

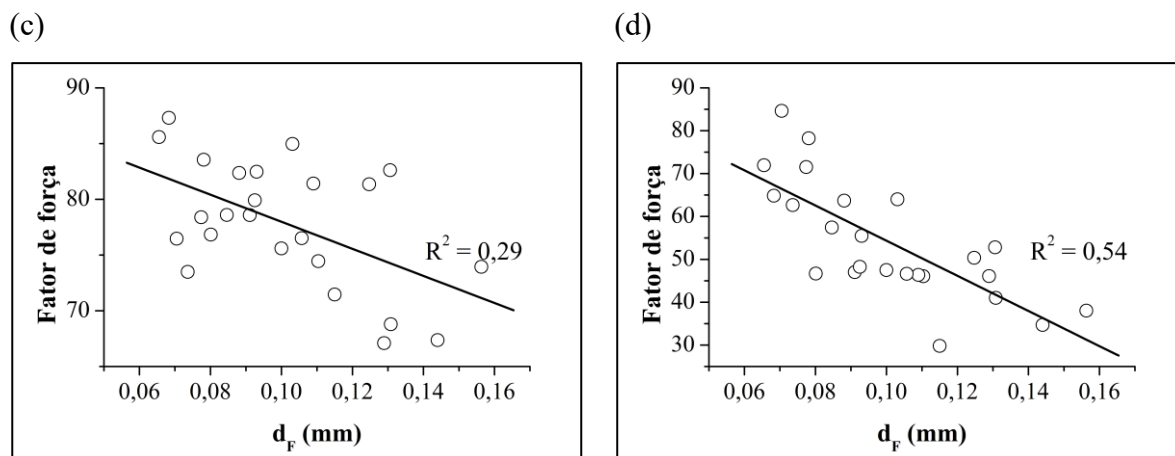
Relacionando-se o  $d_F$  com o fator de força calculado por meio de análise de imagens e por PDA, obtém-se as Figuras 4.36 e 4.37. Melhores relações de linearidade foram encontradas quando expressas por meio de análise de imagens podendo ser justificado devido aos dois parâmetros serem oriundos do mesmo método de análise. Já a relação obtida por meio de PDA tem-se uma tendência entre eles, porém com relação de linearidade fraca.

Figura 4.36 - Relação entre fator de força (calculado por meio de análise de imagens) e  $d_F$  para diferentes  $G_{rup}$ : (a)  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$  e (b)  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

Figura 4.37 - Relação entre fator de força (calculado por meio de PDA) e  $d_F$  para diferentes  $G_{rup}$ : (a)  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$  e (b)  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$

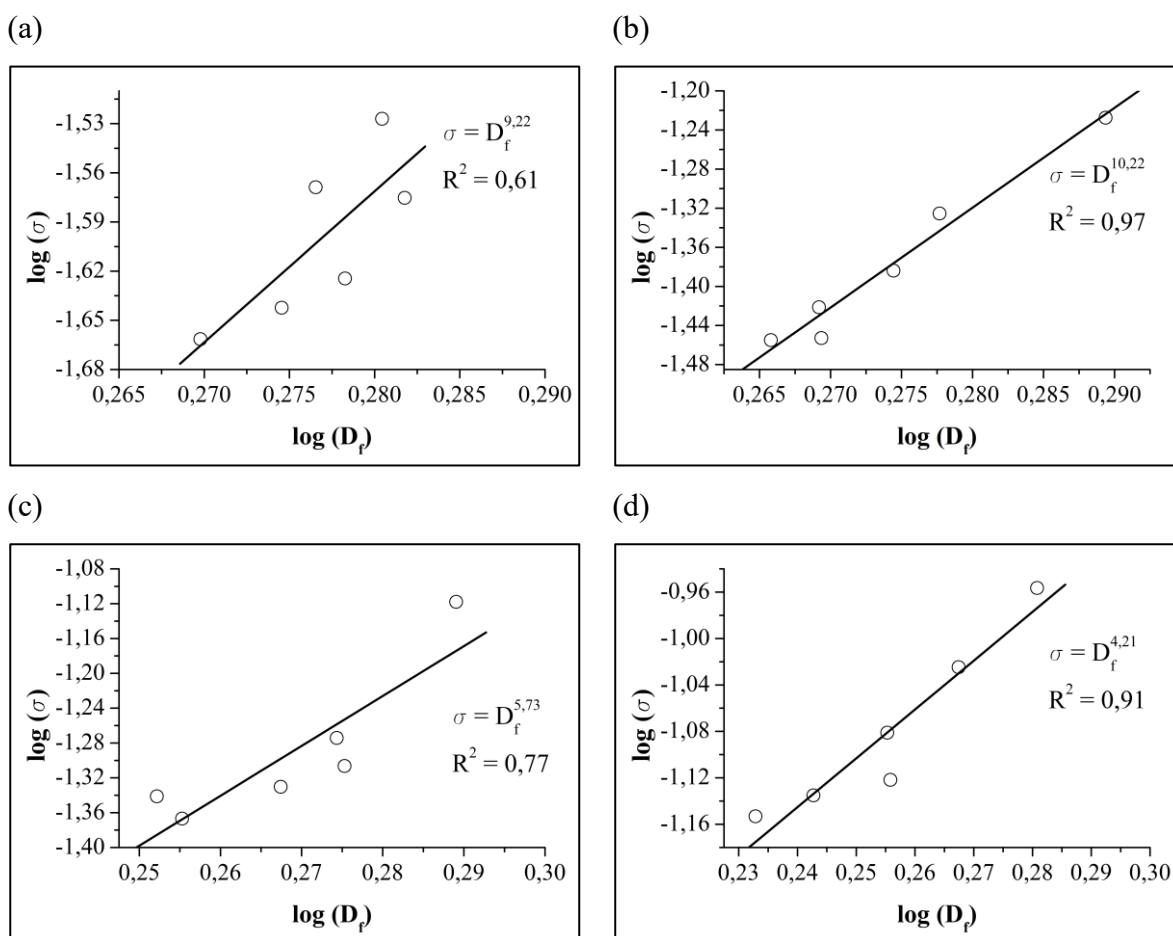


Fonte: O autor.

A relação entre o  $d_F$  com o fator de força calculado por meio de PDA diferem dos resultados obtidos por Moruzzi et al. (2019), que encontram boas relações entre o fator de força calculado por meio de PDA e  $d_F$  por análise de imagens, ao utilizar sulfato de alumínio como coagulante em dois tipos de água diferentes: com ácido húmico e caulinita.

A Figura 4.38 apresenta a relação log-log entre a  $\sigma$  e  $D_f$  (calculado pela média dos quatro ensaios com mesmo  $G_f$  no tempo de floculação de 20 min) para diferentes  $G_f$ . Nota-se que os parâmetros são diretamente proporcionais. Reação semelhante entre os parâmetros foram encontrados por Li et al. (2007) para flocos de caulinita utilizando sulfato de alumínio como coagulante.

Figura 4.38 - Relação entre  $\sigma$  e  $D_f$  para diferentes gradientes médios de floculação: (a)  $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ ; (b)  $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ ; (c)  $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$  e (d)  $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$

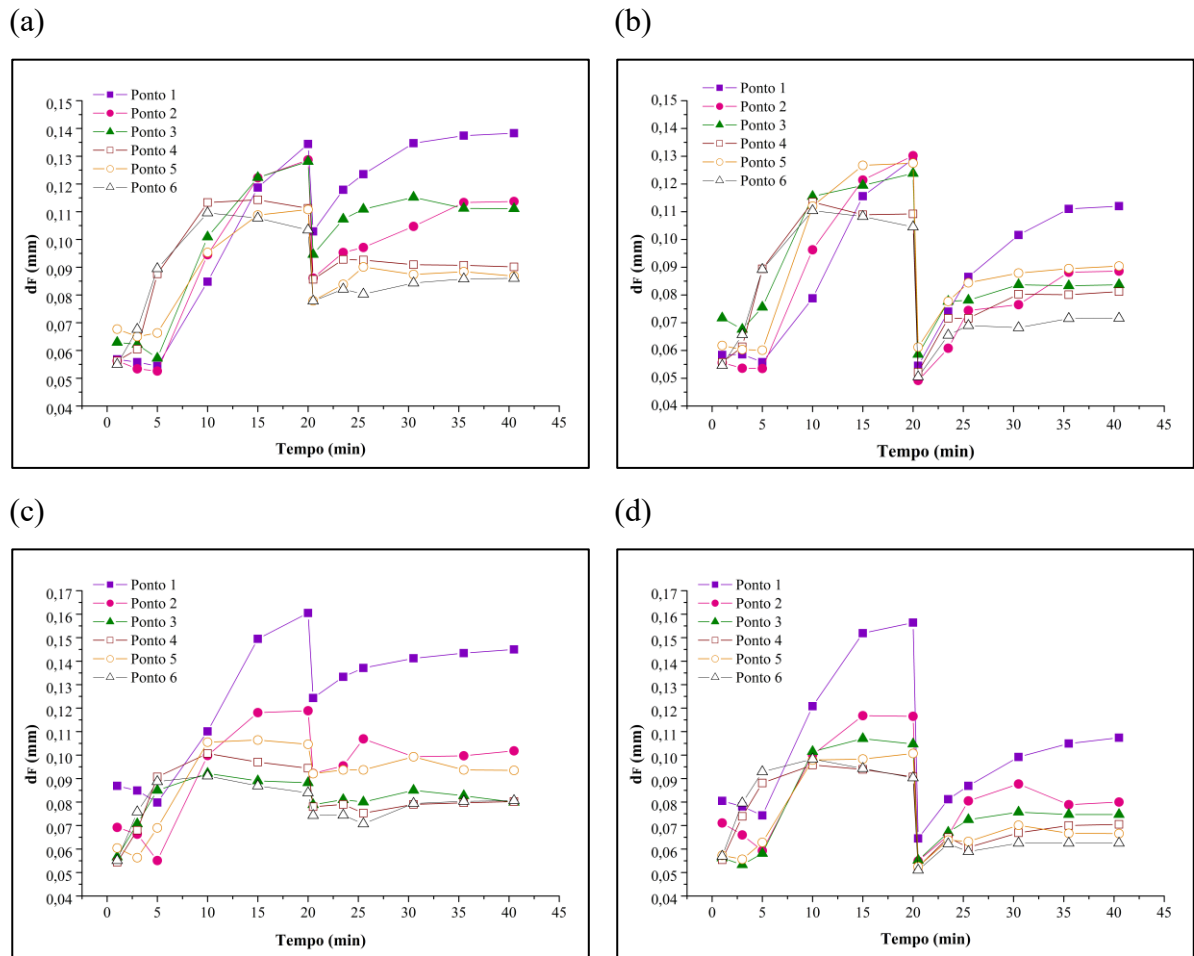


Fonte: O autor.

### 4.3.5 Recuperação dos flocos

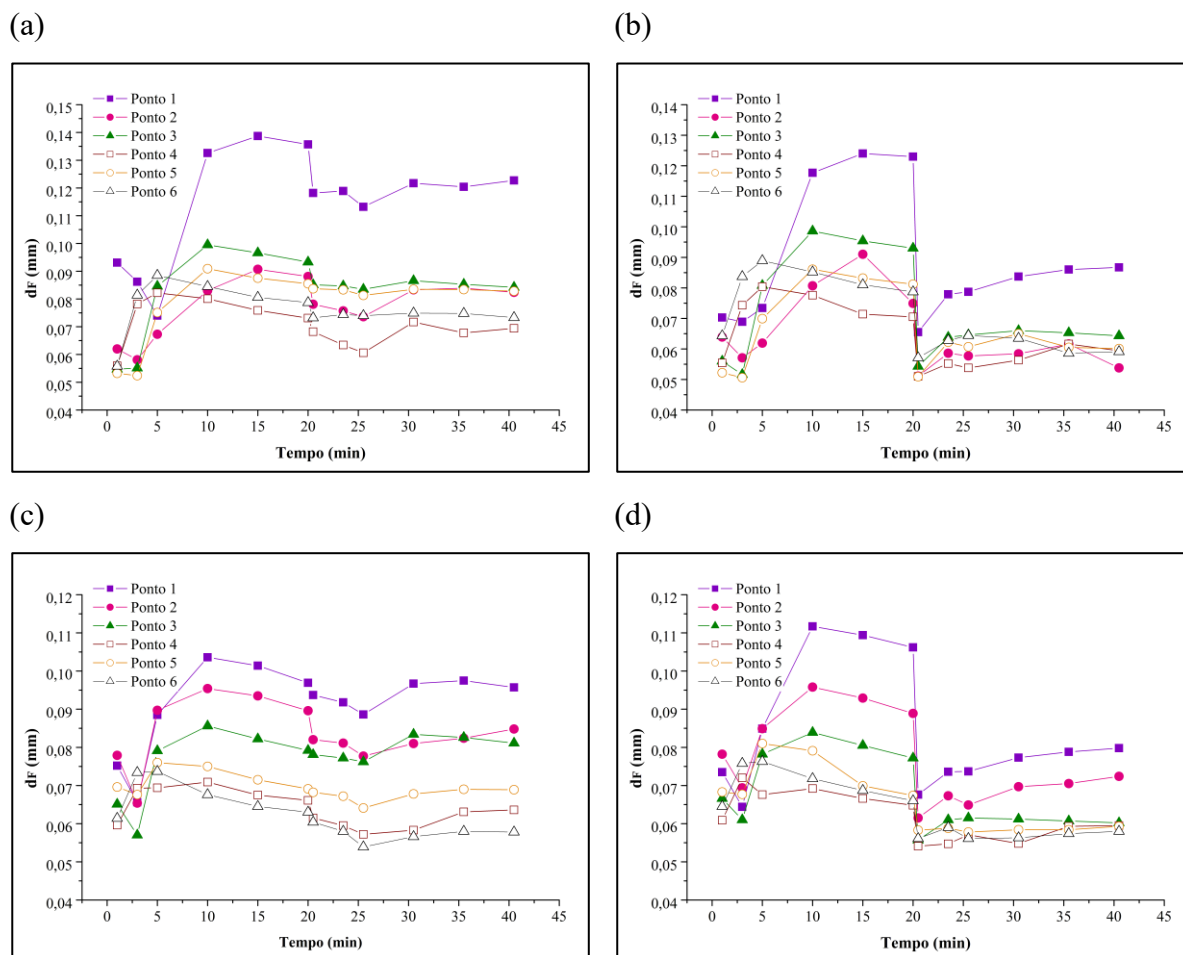
As Figuras 4.39 e 4.40 apresentam a evolução temporal do Diâmetro médio de Feret ( $d_F$ ) em cada um dos tempos de aquisição das imagens. Nos 5 primeiros minutos ocorreu pouca alteração no diâmetro médio e após esse tempo um crescimento considerável é observado. Em alguns experimentos verificou-se uma queda do diâmetro médio nesses minutos iniciais que de acordo com Silva (2018) pode ser explicado pela ruptura de partes frágeis dos flocos inicialmente formados, devido às forças cisalhantes formadas devido ao gradiente de velocidade.

Figura 4.39 - Evolução temporal do  $d_F$  para diferentes  $G_f$  e  $G_{rup}$ : (a)  $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$  e  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$ ; (b)  $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$  e  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$ ; (c)  $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$  e  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$  e (d)  $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$  e  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

Figura 4.40 - Evolução temporal do  $d_F$  para diferentes  $G_f$  e  $G_{rup}$ : (a)  $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$  e  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$ ; (b)  $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$  e  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$ ; (c)  $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$  e  $G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$  e (d)  $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$  e  $G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$



Fonte: O autor.

Observa-se que o ponto 1 (concentração de coagulante de 40,0 mg/L) foi o que apresentou os maiores diâmetros médios e que de forma geral foi diminuindo com o aumento da concentração. Fixando-se o  $G_f$  e fazendo a relação de linearidade entre a concentração de coagulante e o  $d_F$  médio máximo, encontra-se os seguintes coeficientes de Pearson: 0,94; 0,82; 0,53 e 0,79 para os gradientes médios de floculação de 20, 30, 40 e 60  $\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

Em determinadas concentrações e  $G_f$ , observou-se que após atingir um diâmetro máximo, ocorreu uma queda no diâmetro, resultados similares foram encontrados por Peng e Williams (1994), Moruzzi e Silva (2018) e Silva (2018). De acordo com Gregory e Rossi (2001) infere-se que isso ocorra devido à compactação do floco devido ao gradiente de velocidade.

Para  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$  observa-se que os valores tendem a um mesmo valor após a ruptura, o que não ocorre para o  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$ , indicando que o tempo necessário para que tenha a ruptura dos flocos nesse gradiente seja maior.

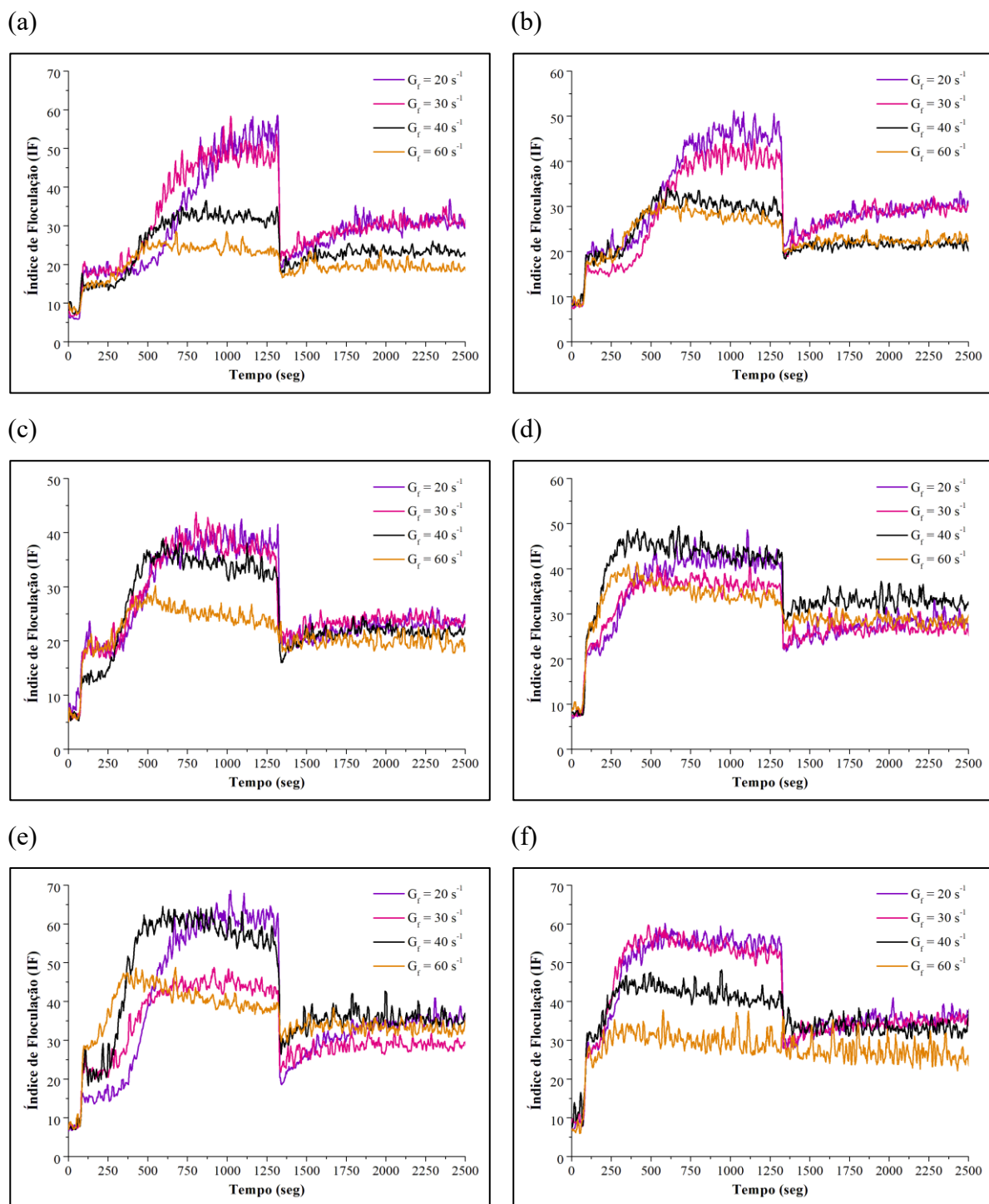
Após a ruptura, observa-se que os flocos voltaram a crescer até um novo patamar de estabilização. Da mesma forma que ocorreu na etapa de floculação, em alguns ensaios, durante a refloculação os flocos atingiram um valor máximo e em seguida ocorreu uma diminuição em seu valor.

Os resultados do acompanhamento da floculação por meio do PDA para os ensaios com  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$  são apresentados na Figura 4.41. Conforme já discutido em 4.3.3 é revelado a ocorrência de um patamar de estabilização, ou seja, um equilíbrio entre o crescimento e a quebra dos flocos. Fica evidenciado também um crescimento mais rápido dos flocos com o aumento do  $G_f$ .

É observada, para alguns pontos, diferença significativa no comportamento da evolução temporal do diâmetro médio e do Índice de Floculação em determinados pontos, que pode ser justificada pela diferença entre os métodos utilizados, uma vez que a análise por meio de imagens digitais ser uma medida direta, enquanto que o equipamento de PDA é uma medida indireta e que pode sofrer interferência de possíveis bolhas no sistema e de partículas que eventualmente possam estar presas na tubulação no ponto de medida.

A partir da análise das Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 percebe-se que para o  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$ , no qual o tempo necessário para a ruptura foi atingido, a recuperação dos flocos foi limitada, indicando assim que a ruptura dos flocos de *Moringa oleifera* nas condições estabelecidas não é totalmente reversível. De acordo com Yukselen e Gregory (2004b) a ruptura irreversível indica uma quebra das ligações químicas durante a ruptura dos flocos, uma vez que quando a interação entre os flocos é de natureza física, não existe uma razão explícita para que os flocos não se formem novamente após serem rompidos.

Figura 4.41 - Evolução temporal do Índice de Floculação para diferentes pontos do diagrama de coagulação: (a) ponto 1; (b) ponto 2; (c) ponto 3; (d) ponto 4; (e) ponto 5 e (f) ponto 6



Fonte: O autor.

A Tabela 4.9 apresenta o fator de recuperação e a relação entre o diâmetro médio após refloculação ( $d_3$ ) e o diâmetro médio antes da ruptura ( $d_1$ ).

Tabela 4.9 - Fator de recuperação e relação entre  $d_3$  e  $d_1$  para os pontos do diagrama de coagulação

	$G_f$ ( $s^{-1}$ )	Fator de recuperação		$d_3/d_1$ (%)	
		$G_{rup} = 120 s^{-1}$	$G_{rup} = 500 s^{-1}$	$G_{rup} = 120 s^{-1}$	$G_{rup} = 500 s^{-1}$
Ponto 1	20	112,70	77,21	102,97	86,84
	30	57,28	46,63	90,37	68,66
	40	25,71	36,93	90,42	70,53
	60	63,06	31,47	98,80	75,14
Ponto 2	20	64,77	48,64	88,35	68,05
	30	36,00	40,73	85,60	68,64
	40	42,71	11,28	93,53	71,83
	60	36,56	39,85	94,65	81,47
Ponto 3	20	49,16	38,48	86,71	67,60
	30	10,45	39,34	90,62	71,36
	40	-	25,84	90,27	69,17
	60	259,15	20,96	102,3	78,01
Ponto 4	20	17,79	50,81	81,07	74,34
	30	13,34	47,29	84,97	77,70
	40	23,38	43,10	94,91	84,26
	60	44,48	50,38	96,19	91,85
Ponto 5	20	27,18	44,00	78,37	70,88
	30	11,09	29,23	89,43	66,14
	40	-	30,52	96,84	74,09
	60	82,88	11,28	99,78	88,00
Ponto 6	20	32,15	39,13	83,19	68,57
	30	66,50	29,13	96,03	69,14
	40	1,27	9,59	93,08	75,18
	60	-	18,97	91,72	87,92

Fonte: O autor.

Devido à sensibilidade da metodologia aplicada, o fator de recuperação para os ensaios que foram utilizados  $G_{rup}$  de  $120 s^{-1}$  ficaram inconsistentes (em determinadas situações apresentando valores negativos), uma vez que este fator é obtido com o diâmetro médio dos flocos antes e imediatamente após a ruptura. Conforme pode ser observado pela análise da DTP (Figuras 4.28 a 4.35), pouca alteração na distribuição do tamanho de partículas foi observada ao se utilizar esse  $G_{rup}$ . A atenuação do diâmetro médio dos flocos durante a ruptura não foi observada ou por limitação dos equipamentos de aquisição e análise de imagens utilizados, ou devido à utilização de gradiente médio de velocidade insuficiente para quebra dos flocos.

Verifica-se que quando foi utilizado  $G_{rup}$  de  $500\text{ s}^{-1}$  o fator de recuperação apresentou comportamento distinto dentre os pontos analisados. Para os pontos 1 e 3 observa-se uma relação inversamente proporcional entre o  $G_f$  e o fator de recuperação, já nos demais pontos esse comportamento não é observado. Em contrapartida, o maior valor encontrado, em todos os pontos analisados, foi para o  $G_f$  de  $20\text{ s}^{-1}$ , indicando que nesse gradiente os flocos apresentam melhor capacidade de recuperação após serem rompidos, se comparado aos demais gradientes médios de floculação avaliados neste trabalho.

Com o intuito de analisar a relação  $d_3/d_1$  entre os diferentes gradientes médios de floculação, realizou-se teste de ANOVA, com intervalo de 95 % de confiança. A partir do teste conclui-se que existe diferença significativa em pelo menos uma das médias da relação analisada, uma vez que p-valor foi menor que 0,05 para os dois gradientes de ruptura analisados (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 - Teste de ANOVA realizado para comparação entre a relação  $d_3/d_1$

	<b>Gradiente de ruptura (<math>\text{s}^{-1}</math>)</b>	<b>Graus de liberdade</b>	<b>Soma de quadrados</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>Estatística F</b>	<b>p-valor</b>
Tratamento	120	3	372	124	4,4	0,02
Resíduos		20	567	28		
Tratamento	500	3	626	209	5,9	0,00
Resíduos		20	711	36		

Fonte: O autor.

Avaliando-se o teste de comparações múltiplas de Tukey (Tabela 4.11), constata-se que para o  $G_{rup}$  de  $120\text{ s}^{-1}$  quanto maior o gradiente médio de floculação maiores são as médias da relação entre  $d_3/d_1$ , portanto, o aumento do  $G_f$  faz com que diferença entre o diâmetro dos flocos após e antes a quebra sejam menores, para as mesmas condições de mistura e quebra. Resultados similares foram encontrados para o  $G_{rup}$  de  $500\text{ s}^{-1}$ , com exceção que a média para o  $G_f$  de  $20\text{ s}^{-1}$  foi maior que para o de  $30\text{ s}^{-1}$ , porém com médias estatisticamente iguais entre eles.

Analisou-se a relação log-log entre o  $G_f$  e o  $d_3$  para os dois gradientes de ruptura utilizados nesta pesquisa, conforme apresentado na Tabela 4.12. Observa-se que, com exceção do ponto 2 ( $G_{rup}$  de  $500\text{ s}^{-1}$ ), ocorreu um bom ajuste entre os parâmetros, assim como ocorreu para a relação entre o  $G_f$  e  $d_1$  (Tabela 4.8), indicando que a relação entre a resistência às forças de cisalhamento e à resistência dos flocos não foi perdida após a ruptura.



Tabela 4.11 - Teste de comparações múltiplas de Tukey para a relação entre  $d_3/d_1$ 

Fator	$G_{rup} = 120 \text{ s}^{-1}$		$G_{rup} = 500 \text{ s}^{-1}$	
	Médias	Grupo	Médias	Grupo
$G_f = 20 \text{ s}^{-1}$	86,78	a	72,71	a
$G_f = 30 \text{ s}^{-1}$	89,50	ab	70,27	a
$G_f = 40 \text{ s}^{-1}$	93,18	ab	74,18	ab
$G_f = 60 \text{ s}^{-1}$	97,24	b	83,73	b

Fonte: O autor.

Tabela 4.12 - Relação log-log entre a o  $G_f$  e o  $d_3$  para os  $G_{rup}$  de 120 e 500  $\text{s}^{-1}$ 

Ponto	Ruptura a 120 s-1			Ruptura a 500 s <sup>-1</sup>		
	Coefficiente angular	Coefficiente linear	R <sup>2</sup>	Coefficiente angular	Coefficiente linear	R <sup>2</sup>
1	-0,35	-0,37	0,77	-0,34	-0,50	0,9
2	-0,32	-0,53	0,86	-0,26	-0,74	0,31
3	-0,27	-0,66	0,58	-0,31	-0,67	0,96
4	-0,33	-0,62	0,98	-0,30	-0,71	0,87
5	-0,22	-0,74	0,64	-0,38	-0,58	0,82
6	-0,36	-0,58	0,92	-0,19	-0,91	0,87

Fonte: O autor.

As relações entre  $G_f$  e o  $d_3$  encontradas nesta pesquisa diferem daquelas encontradas por Moruzzi e Silva (2018), que avaliaram a formação de flocos formados com sulfato de alumínio em duas águas produzidas diferentes: uma com ácido húmico e a outra com caulinita. Os resultados encontrados pelos autores mostraram que houve um ajuste ruim entre as duas variáveis para as duas águas de estudo.

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento desta pesquisa colaborou no entendimento do processo de floculação ao se utilizar a *Moringa oleifera* como coagulante, em água com cor aparente elevada, permitindo as seguintes conclusões:

- A aplicação de *Moringa oleifera* como coagulante, de forma não combinada com outros coagulantes, em uma estação de tratamento de água não é indicada para processos de separação de fases por sedimentação e se apresenta eficaz caso seja aplicada, após etapa de floculação, o processo de separação de fases por flotação por ar dissolvido;
- A *Moringa oleifera* apresentou potencial para utilização como coagulante para o tratamento de água com cor elevada, visto que em diversas regiões do diagrama de coagulação foram encontradas eficiências de remoção superiores a 70%;
- Em relação aos resultados envolvendo a ruptura dos flocos com  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$  não foi observada diferença significativa na eficiência de remoção de cor entre os ensaios sem e imediatamente após a ruptura. Isso sugere que as forças de cisalhamento aplicadas não foram suficientes para provocar alterações significativas na estrutura destes flocos e, consequentemente, alterar a remoção de cor da água de estudo, indicando que os flocos formados são resistentes aos possíveis aumentos dos gradientes médios de velocidade observados em singularidades de ETAs como passagens, comportas e canais de distribuição de água floculada;
- Já em relação ao  $G_{rup}$  de  $500 \text{ s}^{-1}$  houve maior diferença entre a eficiência de remoção sem a ruptura e após refloculação se comparado ao  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$ , sendo maior quanto maiores as concentrações de *Moringa oleifera* indicando menor estabilidade dos flocos nessas condições. Além disso, em alguns pontos analisados observou-se um pequeno aumento na eficiência de remoção após refloculação, tanto para o  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$  quanto de  $500 \text{ s}^{-1}$ .
- Foi observada relação entre a dimensão fractal e o diâmetro médio dos flocos, tendo uma tendência diretamente proporcional entre eles, entretanto, após o alcance do patamar de estabilização (considerado ao final do tempo de floculação/refloculação) a dimensão fractal não apresentou diferença significativa entre os diferentes  $G_f$  analisados;

- Ao se utilizar o  $G_{rup}$  de  $120 \text{ s}^{-1}$  foi observada pouca variação, tanto na dimensão fractal quanto na DTP, indicando que para o tempo de ruptura de 10 s, esse gradiente não foi suficiente para a quebra dos flocos;
- Os resultados obtidos para o ponto 1 do diagrama de coagulação (dosagem de 40 mg/L e pH de 3,52) apresentaram os melhores valores de resistência dentre os pontos analisados, sendo este o ponto de menor dosagem e pH avaliado. Já a dosagem em que se obteve remoções significativas em toda a faixa de pH avaliada (130 mg/L) apresentou flocos mais propensos a quebra, se comparado aos demais pontos avaliados, tanto que meio ácido (ponto 4, pH igual a 4,01) quanto em meio alcalino (ponto 5, pH igual a 8,35);
- Os resultados mostraram que não ocorreu a recuperação total do tamanho dos flocos, mesmo assim, não houve alteração significativa na remoção de cor, talvez em função do processo de separação de fases utilizado;
- A relação entre o diâmetro médio após a refloculação e antes da ruptura foram diretamente proporcionais ao gradiente médio de floculação, concluindo-se assim que quanto maior o gradiente de floculação, menor a diferença entre o diâmetro médio dentre as duas situações.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho são feitas as seguintes recomendações para estudos futuros:

- Realização de estudos que permitam compreender melhor a porosidade e estrutura dos flocos em diferentes dosagens de coagulante e diferentes águas de estudo, de modo a entender as baixas velocidades de sedimentação encontradas nesta pesquisa (o que suscitou a escolha da FAD como processo de separação de fases);
- Estudos de comparação entre a FAD e sedimentação, utilizando a *Moringa oleifera* como auxiliar de coagulação juntamente com um coagulante inorgânico, de modo a compreender as características dos flocos formados e avaliar a eficiência de sua aplicação;
- Aplicação da *Moringa oleifera* no tratamento de água natural, com respectivo estudo do crescimento, ruptura e recrescimento dos flocos formados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIDIN, Z. Z.; SHAMSUDIN, S. M; MADEHI, N.; SOBRI, S. Optimisation of a method to extract the active coagulant agent from *Jatropha curcas* seeds for use in turbidity removal. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v. 41, p.319-323, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.003>.

ALMEIDA, F. A. S. **Influência da porosidade e massa específica na velocidade de sedimentação de agregados fractais de água com turbidez moderada**. Orientador: André Luiz de Oliveira. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

ALMEIDA, T. **Avaliação do desempenho da flotação por ar dissolvido (FAD) e da sedimentação e sua relação com a distribuição do tamanho de partículas e fractal**. Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2017.

AMIRTHRAJAH, A.; O’MÉLIA, C. R. Coagulation processes: destabilization, mixing and flocculation. In: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1990. p. 269-365.

ANÍCIO, S. O. **Determinação de relação entre parâmetros representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP), Dimensão fractal ( $D_f$ ) e o Índice de Floculação (IF) obtido por meio de equipamento de análise de dispersão fotométrica (PDA)**. Orientador: André Luiz de Oliveira. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

ANTOV, M. G.; ŠĆIBAN, M. B.; PETROVIĆ, N. J. Proteins from common bean (*Phaseolus vulgaris*) seed as a natural coagulant for potential application in water turbidity removal. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 101, n. 7, p.2167-2172, 2010. DOI: [10.1016/j.biortech.2009.11.020](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.020).

ANWAR, F.; LATIF, S.; ASHRAF, M.; GILANI, A. H. *Moringa oleifera*: a food plant with multiple medicinal uses. **Phytotherapy Research**, [s.l.], v. 21, n. 1, p.17-25, 2007. DOI: [10.1002/ptr.2023](https://doi.org/10.1002/ptr.2023).

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23ed., Washington, 2017.

ARANTES, C. C.; RIBEIRO, T. A. P.; PATERNIANI, J. E. S. Processamento de sementes de *Moringa oleifera* utilizando-se diferentes equipamentos para obtenção de solução coagulante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 16, n. 6, p.661-666, 2012. DOI: [10.1590/S1415-43662012000600011](https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000600011).

BACHE, D. H.; RASOOL, E.; MOFFAT, D.; MCGILLIGAN, F. J. On the Strength and Character of Alumino-Humic Floccs. **Water Science and Technology**, London, v.40, p.81-88, 1999.

BAPTISTA, A. T. A.; COLDEBELLA, P. F.; CARDINES, P. H. F.; GOMES, R. G.; VIEIRA, M. F.; BERGAMASCO, R.; VIEIRA, A. M. S. Coagulation–flocculation process with ultrafiltered saline extract of *Moringa oleifera* for the treatment of surface water. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 276, p.166-173, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.045>.

BAPTISTA, A. T. A.; SILVA, M. O.; GOMES, R. G.; BERGAMASCO, R.; VIEIRA, M. F.; VIEIRA, A. M. S. Protein fractionation of seeds of *Moringa oleifera* lam and its application in superficial water treatment. **Separation and Purification Technology**, [s.l.], v. 180, p.114-124, 2017.

BARBOSA, A. D.; SILVA, L. F.; PAULA, H. M.; ROMUALDO, L. L.; SADOYAMA, G.; ANDRADE, L. S. Combined use of coagulation (*M. oleifera*) and electrochemical techniques in the treatment of industrial paint wastewater for reuse and/or disposal. **Water Research**, [s.l.], v. 145, p.153-161, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.022>.

BARTIKO, D.; JULIO, M. Estudo da quebra e recrescimento de flocos empregando um equipamento de monitoramento contínuo da floculação. **Ciência e Engenharia**, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 101-108, 2014. DOI: <https://doi.org/10.14393/19834071.2014.26032>.

BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; BARRADO-MORENO, M. Long-chain anionic surfactants in aqueous solution. Removal by *Moringa oleifera* coagulant. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 180, p.128-136, 2012. DOI: 10.1016/j.cej.2011.11.024.

BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; MUÑOZ-SERRANO, A.; PERES, J. A. Towards overcoming TOC increase in wastewater treated with *Moringa oleifera* seed extract. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 188, p.40-46, 2012. DOI: 10.1016/j.cej.2012.02.003.

BHUPTAWAT, H.; FOLKARD, G. k.; CHAUDHARI, S. Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating *Moringa oleifera* seed coagulant. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 142, n. 1-2, p.477-482, abr. 2007. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.08.044.

BORBA, L. R. **Viabilidade do uso da *Moringa oleifera* Lam no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades**. Orientadora: Carmem Lucia Moreira Gadelha. 2001. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2001.

BORGES, M. V. B. **Avaliação da eficiência de remoção de cor em função da distribuição de tamanho dos flocos e no fator de força**. Orientador: André Luiz de Oliveira. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

BOTARI, A.; DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Análise e modelação matemática da interação entre partículas na filtração direta utilizando a teoria coloidal. **Engenharia**

**Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 17, n. 1, p.81-94, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522012000100012>.

BOLLER, M.; BLASER, S. Particles under stress. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 37, n. 10, p.9-29, 1998. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1998.0367>.

BOULAADJOUL, S.; ZEMMOURI, H.; BENDJAMA, Z.; DROUCHE, N. A novel use of *Moringa oleifera* seed powder in enhancing the primary treatment of paper mill effluent. **Chemosphere**, [s.l.], v. 206, p.142-149, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.123>.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Quantidade de água**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>. Acesso em: 30 mar. 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**. Brasília, 2019. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnosticos>. Acesso em: 27 jan. 2021.

BRASIL. **Portaria GM/ MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, [2021]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 13 mai. 2021.

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

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

BUDD, G. C.; HESS, A. F.; SHORNEY-DARBY, H.; NEEMANN, J. J.; SPENCER, C. M.; BELLAMY, J.D.; HARGETTE, P.H. Coagulation applications for new treatment goals. **Journal - American Water Works Association**, [s.l.], v. 96, n. 2, p.102-113, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2004.tb10559.x>.

BÜLL, J. C. **Determinação da força e recrescimento do floco de águas de abastecimento**. Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2017.

BÜLL, J. C.; SILVA, P. A. G.; MORUZZI, R. Determinação da força do floco e da refloculação de águas de abastecimento. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 28., 2016, Rio Claro. **Anais [...]**. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2016. p. 1.

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**, [s.l.], v. 95, n. 1, p.1-50, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00078-6](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00078-6).

CAMACHO, F. P.; SOUZA, V. S.; BERGAMASCO, R.; TEIXEIRA, R. R. The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 313, p.226-237, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.031>.

CARVALHO, M. S.; ALVES, B. R. R.; SILVA, M. F.; BERGAMASCO, R.; CORAL, L.A.; BASSETTI, F. J. CaCl<sub>2</sub> applied to the extraction of *Moringa oleifera* seeds and the use for *Microcystis aeruginosa* removal. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 304, p. 469-475, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.101>.

CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS). **Teoria, diseño y control de los procesos de clarificación del agua**. Lima: Miscellaneous, 1972. 558 p.

CENTURIONE FILHO, P. L.; DI BERNARDO, L. Procedimento para execução de ensaios de flotação/ filtração em equipamento de bancada. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v.8, n.1, p.39-44, 2002.

CHAKRABORTI, R. K.; ATKINSON, J. F.; VAN BENSCHOTEN, J. E. Characterization of Alum Flocc by Image Analysis. **Environmental Science and Technology**, [s.l.], v. 34, n. 18, p.3969-3976, 2000. DOI: 10.1021/es990818o.

CHAKRABORTI, R. K.; GARDNER, K. H.; ATKINSON, J. F.; VAN BENSCHOTEN, J. E. Changes in fractal dimension during aggregation. **Water Research**, [s.l.], v. 37, n. 4, p.873-883, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00379-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00379-2).

CHOY, S. Y.; PRASAD, K. M. N.; WU, T. Y.; RAMANAN, R.N. A review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants in water clarification. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s.l.], v. 12, n. 1, p.367-390, 2013. DOI: 10.1007/s13762-013-0446-2.

COUTINHO, W. **Emprego da flotação a ar dissolvido no tratamento de cursos d'água: avaliação de desempenho da estação de tratamento dos Córregos Ressaca e Sarandi afluentes à Represa da Pampulha**. Orientador: Marcos von Sperling. 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLOUS, G. **Water treatment: principles and desing**. Hoboken, New Jersey: John Wiley e Sons, 2012.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2 ed. V. 1, São Carlos: Rima, 2005.

DI BERNARDO, L. DANTAS, A. D. B., VOLTAN, P. E. N. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RiMa, 2002.

DIAZ, A.; RINCON, N.; ESCORIHULA, A.; FERNANDEZ, N.; CHACIN, E.; FORSTER, C. F. A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. **Process Biochemistry**, [s.l.], v. 35, n. 3-4, p.391-395, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00085-0](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00085-0).

DÍAZ, Y. J. R.; FRÍAS, G. A. C.; MENA, W. E. L.; VALDÉS, L. R.; GUTIÉRREZ, M. L. M. Uso de un polímero natural (quitosano) como coagulante durante el tratamiento de agua para consumo. **Ingeniare**, Universidad Libre-Barranquilla, n. 19, p.25-32, 2015.

DOTTO, J.; FAGUNDES-KLEN, M. R.; VEIT, M. T.; PALÁCIO, S.R.; BERGAMASCO, R. Performance of different coagulants in the coagulation/ flocculation process of textile wastewater. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 208, p.656-665, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.112>.

DUTRA, R. H. A. **Obtenção dos parâmetros cinéticos da floculação com utilização de técnica de análise de imagem**. Orientador: André Luiz de Oliveira. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

EDZWALD, J. K. Principles and applications of dissolved air flotation. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 31, n. 3-4, p.1-23, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00200-7](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00200-7).

EMAN, N. A.; TAN, C. S.; MAKKY, E. A. Impact of *Moringa oleifera* Cake Residue Application on Waste Water Treatment: A Case Study. **Journal of Water Resource and Protection**, [s.l.], v. 06, n. 07, p.677-687, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.67065>.

FALOWO, A. B.; MUKUMBO, F. E.; IDAMOKORO, E. M.; LORENZO, J. M.; AFOLAYAN, A.J; MUCHENJE, V. Multi-functional application of *Moringa oleifera* Lam. in nutrition and animal food products: A review. **Food Research International**, [s.l.], v. 106, p.317-334, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.079>.

FERREIRA FILHO, S. S.; WAELKENS, B. E. Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua disposição em estações de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 14, n. 3, p.317-326, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000300005>.

FRANÇOIS, R. J. Strength of aluminium hydroxide flocs. **Water Research**, [s.l.], v. 21, n. 9, p.1023-1030, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(87\)90023-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(87)90023-6).

GALLÃO, M. I.; DAMASCENO, L. F.; BRITO, E. S. Avaliação química e estrutural das sementes de moringa. **Revista Ciência Agronômica**, [s.l.], v. 37, n. 1, p. 106-109, 2006.

GÁMEZ, L. L. S.; LUNA-DELRISCO, M.; CANO, R. S. Effect of storage and preparation methods of *Moringa oleifera* seeds during the coagulation process. **Desalination and Water Treatment**, [s.l.], v. 57, n. 35, p. 16376-16383, 2015. DOI: [10.1080/19443994.2015.1081630](https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1081630).

GARDE, W. K.; BUCHBERGER, S. G.; WENDELL, D.; KUPFERLE, M. J. Application of *Moringa oleifera* seed extract to treat coffee fermentation wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 329, p.102-109, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.01.006>.

GASSENSCHMIDT, U.; JANY, K. D.; TAUSCHER, B.; NIEBERGALL, H. Isolation and



characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects**, [s.l.], v. 1243, n. 3, p.477-481, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-4165\(94\)00176-X](https://doi.org/10.1016/0304-4165(94)00176-X).

GHEBREMICHAEL, K. A. ***Moringa* seed and pumice as alternative natural materials for drinking water treatment**. KTH Land and Water Resources Engineering. 2004.

GHEBREMICHAEL, K.; GEBREMEDHIN, N.; AMY, G. Performance of *Moringa oleifera* as a biosorbent for chromium removal. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 62, n. 5, p.1106-1111, 2010. DOI: 10.2166/wst.2010.413.

GHEBREMICHAEL, K. A.; GUNARATNA, K. R.; HENRIKSSON, H.; BRUMER, H.; DALHAMMAR, G. A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. **Water Research**, [s.l.], v. 39, n. 11, p.2338-2344, 2005. DOI: 10.1016/j.watres.2005.04.012.

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

GOPALAKRISHNAN, L.; DORIYA, K.; KUMAR, D. S. *Moringa oleifera*: A review on nutritive importance and its medicinal application. **Food Science and Human Wellness**, [s.l.], v. 5, n. 2, p.49-56, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fshw.2016.04.001>.

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

GREGORY, J. Monitoring floc formation and breakage. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 50, n. 12, p.163-170, 2004. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0709>.

GREGORY, J.; ROSSI, L. Dynamic testing of water treatment coagulants. **Water Supply**, [s.l.], v. 1, n. 4, p. 65-72, 2001. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2001.0068>.

GUZMÁN, L.; VILLABONA, A.; TEJADA, C.; GARCÍA, R. Reduccion de la turdidez del agua usando coagulantes naturales: uma revisión. **U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica**. [s.l.], v. 16, n. 1, p.253-262, 2013.

HAHN, H. H. Wastewater treatment. In: IVES, J. K. **The scientific basis of flotation**. Cambrige: 1982. p.379-414.

HALL, E. S.; PACKHAM, R. F. Coagulation of organic color with hydrolyzing coagulants. **American water works association**, [s.l.], v. 57, n. 9, p.1149-1166, 1965. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1965.tb01506.x>.

HE, W.; NAN, J.; LI, H.; LI, S. Characteristic analysis on temporal evolution of floc size and structure in low-shear flow. **Water Research**, [s.l.], v. 46, n. 2, p.509-520, 2012. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.040.

HORWATH, M.; BENIN, V. Theoretical investigation of a reported antibiotic from the

“Miracle Tree” *Moringa oleifera*. **Computational and Theoretical Chemistry**, [s.l.], v. 965, n. 1, p. 196-201, 2011. DOI: 10.1016/j.comptc.2011.01.045.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Principles of water treatment**. Hoboken, New Jersey: John Wiley e Sons, 2012.

JAGABA, A. H.; KUTTY, S. R. M.; HAYDER, G.; BALOO, L.; GHALEB, A. A. S.; LAWAL, I. M.; ABUBAKAR, S.; AL-DHAWI, B. N.s.; ALMAHBASHI, N. M. y.; UMARU, I. Degradation of Cd, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn by *Moringa-oleifera*, zeolite, ferric-chloride, chitosan and alum in an industrial effluent. **Ain Shams Engineering Journal**, [s.l.], v. 12, n. 1, p. 57-64, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2020.06.016>.

JAMES, C. R.; O'MELIA, C R. Considering sludge production in the selection of coagulants. **Journal - American Water Works Association**, [s.l.], v. 74, n. 3, p.148-151, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1982.tb04875.x>.

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

JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; PARSONS, S. A. Breakage, Regrowth, and Fractal Nature of Natural Organic Matter Floccs. **Environmental Science and Technology**, [s.l.], v. 39, n. 7, p.2307-2314, 2005. DOI: 10.1021/es048854x.

JUNKER, B. Measurement of bubble and pellet size distributions: past and current image analysis technology. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 29, n. 3, p.185-206, 2006. DOI: 10.1007/s00449-006-0070-3.

KADHIM, E. J.; AL-SHAMMAA, D. A. Phytochemical characterization using GC-MS analysis of methanolic extract of *Moringa oleifera* (family Moringaceae) plant cultivated in Iraq. **Chemistry and Materials Research**, [s.l.], v. 6, n. 5, p.9-26, 2014.

KATAYON, S; NOOR, M. M.; ASMA, M.; ABDUL GHANI, L. A.; THAMER, A. M.; AZNI, I.; AHMAD, J.; KHOR, B. C.; SULEYMAN, A. M. Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* seeds on its performance in coagulation. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 97, n. 13, p.1455-1460, 2006. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.07.031.

LALAS, S.; TSAKNIS, J. Characterization of *Moringa oleifera* Seed Oil Variety “Periyakulam 1”. **Journal of Food Composition and Analysis**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.65-77, 2002. DOI: 10.1006/jfca.2001.1042.

LEDÓ, P. G. S. **Flotação por ar dissolvido na clarificação de águas com baixa turbidez utilizando sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera* como coagulantes**. Orientador: João Bosco de Araújo Paulo. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

LEENTVAAR, J.; REBHUN, M. Strength of ferric hydroxide floccs. **Water Research**, [s.l.], v. 17, n. 8, p. 895-902, 1983. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90163-x](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(83)90163-x).

LEMOS, K. S.; AGUIAR FILHO, S. Q.; CAVALLINI, G. S. avaliação comparativa entre os coagulantes sulfato de alumínio ferroso e policloreto de alumínio para tratamento de água: estudo de viabilidade econômica. **Desafios - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 109-119, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20873/uftv7-7824>.

LETTERMAN, R. D.; DRISCOLL, C. T. Survey of Residual Aluminum in Filtered Water. **Journal - American Water Works Association**, [s.l.], v. 80, n. 4, p. 154-158, 1988. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/j.1551-8833.1988.tb03020.x>.

LI, T.; ZHU, Z.; WANG, D.; YAO, C.; TANG, H. Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms. **Powder Technology**, [s.l.], v. 168, n. 2, p.104-110, 2006. DOI: 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**, [s.l.], v. 82, n. 1, p. 23-29, 2007. DOI: 10.1016/j.minpro.2006.09.012.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010. 494 p.

LIMA, G. J. A. **Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto**. Orientador: Gandhi Giordano. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

LO MONACO, P. A. V.; MATOS, A. T.; RIBEIRO, I. C. A.; NASCIMENTO, F. S.; SARMENTO, A. P. Use of extract of moringa seeds as coagulant agent in treatment of water supply and wastewater. **Ambiente e Água**, [s.l.], v. 5, n. 3, p. 222-231, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.164>.

LOPES, M. A. **Avaliação de diferentes coagulantes para remoção de sólidos por flotação e sedimentação de água residuária de uma indústria de metal-mecânica**. Orientador: Eduardo Cleto Pires. 2011. Dissertação (Mestrado em ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

LOPES, V. S.; SILVA, L. M. A.; MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L. Estudo da coagulação/floculação de água com turbidez moderada na sedimentação e flotação por ar dissolvido. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 25, n. 4, p.567-572, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020193514>.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008. 544 p.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, M. A. V.; BACHE, L. B. **Árvores exóticas no Brasil: madeiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2003. 368 p.

MADRONA, G. S.; SERPELLONI, G. B.; VIEIRA, A. M. S.; NISHI, L.; CARDOSO, K. C.; BERGAMASCO, R. Study of the Effect of Saline Solution on the Extraction of the *Moringa oleifera* Seed's Active Component for Water Treatment. **Water, Air, and Soil Pollution**,

[s.l.], v. 211, n. 1-4, p.409-415, 2010. DOI: 10.1007/s11270-009-0309-0.

MARICHAMY, M. K.; KUMARAGURU, A.; JONNA, N. Particle size distribution modeling and kinetic study for coagulation treatment of tannery industry wastewater at response surface optimized condition. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 297, p. 126657, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126657>.

MATEUS, G. A. P.; FORMENTINI-SCHMITT, D. M.; NISHI, L.; FAGUNDES-KLEN, M. R.; GOMES, R. G.; BERGAMASCO, R. Coagulation/ Flocculation with *Moringa oleifera* and Membrane Filtration for Dairy Wastewater Treatment. **Water, Air and Soil Pollution**, [s.l.], v. 228, n. 9, p.342-355, 2017. DOI: 10.1007/s11270-017-3509-z.

MCCURDY, K.; CARLSON, K.; GREGORY, D. Floc morphology and cyclic shearing recovery: comparison of alum and polyaluminum chloride coagulants. **Water Research**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.486-494, 2004. DOI: 10.1016/j.watres.2003.10.005.

MCLACHLAN, D. R. C. Aluminium and the risk for alzheimer's disease. **Environmetrics**, [s.l.], v. 6, n. 3, p.233-275, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1002/env.3170060303>.

MENDES, C. G. N. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. Orientador: Luiz Di Bernardo. 1989. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

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

MENDES, Y. C.; GONÇALVES, L. S. M.; DUTRA, R. H. A.; MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L. Análise da floculação por meio da distribuição do tamanho de partículas. **Revista Dae**, [s.l.], v. 221, n. 68, p. 12-19, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2020.002>.

METCALF & EDDY. **Water reuse: Issues, technologies, and application**. New York: Mc Graw Hill, 2007.

MOFIJUR, M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; ATABANI, A. E.; ARBAB, M. I.; CHENG, S. F.; GOUK, S.W. Properties and use of *Moringa oleifera* biodiesel and diesel fuel blends in a multi-cylinder diesel engine. **Energy Conversion and Management**, [s.l.], v. 82, p.169-176, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.073>.

MORAES, L. C. K.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. G.; HENNIG, D.; BONGIOVANI, M. C. GPE 2007 - Utilization of the coagulation diagram in the evaluation of the natural organic matter (NOM) removal for obtaining potable water. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**. [s.l.], v. 6, n. 1, p.-., 2008.

MORENO, P. **Emprego de técnica dedicada de análise de imagem na avaliação do produto GT no desempenho da floculação**. Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista

“Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2014.

MORENO, P.; OLIVEIRA, A. L.; SILVA, P. A. G.; DE JÚLIO, M.; MORUZZI, R. B. Investigação do efeito do número de camp (NC) na distribuição de tamanho de partículas (DTP). *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. ABES. v.1, 2015.

MORENO, P.; CONCEIÇÃO, F. T.; ANTUNES, M. L. P.; LOPES, M. S.; MORUZZI, R. B. Aplicação de lama vermelha como nucleador de floco. **Hydro**, São Paulo, v. 12, p. 46-48, 2016.

MORETI, L. O. R.; COLDEBELLA, P. F.; CAMACHO, F. P.; BONGIOVANI, M. C.; SOUZA, A. H. P.; GOHARA, A. K.; MATSUSHITA, M.; SILVA, M. F.; NISHI, L.; BERGAMASCO, R. Removal of *Anabaena flos-aquae* in water treatment process using *Moringa oleifera* and assessment of fatty acid profile of generated sludge. **Environmental Technology**, [s.l.], v. 37, n. 11, p.1408-1417, 2015. DOI: 10.1080/09593330.2015.1117144.

MORUZZI, R. B. **Avaliação da influência da distribuição de Tamanho de Partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação no desempenho da flotação com utilização de sonda ultrassônica e técnica de análise por imagem**. Orientador: Marco Antonio Penalva Reali. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MORUZZI, R. B.; SILVA, P. A. G. Reversibility of al-kaolin and al-humic aggregates monitored by stable diameter and size distribution. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [s.l.], v. 35, n. 3, p.1029-1038, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20180353s20170098>.

MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; CONCEIÇÃO, F. T.; GREGORY, J.; CAMPOS, L. C. Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 609, p.807-814, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.194>.

MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; DE JULIO, M.; DUTRA, R. H. A.; SILVA, P. A. G. Flocculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 21, n. 4, p.817-824, 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016144959.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 61, n. 1, p.253-262, 2010. DOI: 10.2166/wst.2010.784.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 12, n. 3, p.273-283, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000300007>.

MORUZZI, R. B.; SILVA, P. G.; SHARIFI, S.; CAMPOS, L. C.; GREGORY, J. Strength assessment of Al-Humic and Al-Kaolin aggregates by intrusive and non-intrusive methods.

**Separation and Purification Technology**, [s.l.], v. 60, p.265-273, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.02.033>.

MUTHURAMAN, G.; SASIKALA, S. Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [s.l.], v. 20, n. 4, p.1727-1731, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.08.023>.

MUYIBI, S.; ALFUGARA, A. Treatment of surface water with *Moringa oleifera* seed extract and alum – a comparative study using a pilot scale water treatment plant. **International Journal of Environmental Studies**, [s.l.], v. 217, n. 6, p.617-626, 2003. DOI: 10.1080/723032000087925.

MUYIBI, S. A.; EVISON, L. M. *Moringa oleifera* seeds for softening hardwater. **Water Research**, [s.l.], v. 29, n. 4, p.1099-1104, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00250-B](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00250-B).

NARAYASAMY, S.; SAUD, H. M. Water Phytoremediation by Sedimentation Using *Moringa oleifera* Seed Powder to Remove Water Turbidity in Malaysia. **Journal of Agricultural Chemistry and Environment**, [s.l.], v. 03, n. 02, p.74-79, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jacen.2014.32009>.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S. Influence of Operating Parameters on Turbidity Removal by Coagulation with *Moringa oleifera* Seeds. **Environmental Technology**, [s.l.], v. 17, n. 10, p.1103-1112, 1996. DOI: 10.1080/09593331708616479.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S. Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. **Water Research**, [s.l.], v. 32, n. 3, p.781-791, 1998a. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00295-9).

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S. Use of *Moringa oleifera* Seeds as a Primary Coagulant in Wastewater Treatment. **Environmental Technology**, [s.l.], v. 19, n. 8, p.789-800, ago. 1998b. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593331908616735>.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S.; TALBOT, B. G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, [s.l.], v. 29, n. 2, p.703-710, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00161-Y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-Y).

NKURUNZIZA, T.; NDUWAYEZU, J. B.; BANADDA, E.N.; NHAPI, I. The effect of turbidity levels and *Moringa oleifera* concentration on the effectiveness of coagulation in water treatment. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 59, n. 8, p.1551-1558, 2009. DOI: 10.2166/wst.2009.155.

OKUDA, T.; BAES, A.U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M. Improvement of extraction method of coagulation active components from *Moringa oleifera* seed. **Water Research**, [s.l.], v. 33, n. 15, p.3373-3378, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00046-9).

OKUDA, T.; BAES, A.U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M. Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution. **Water Research**, [s.l.], v. 35, n. 2, p.405-410, 2001a. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00290-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00290-6).

OKUDA, T.; BAES, A.U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M. Coagulation Mechanism of Salt Solution-Extracted Active Component in *Moringa oleifera* Seeds. **Water Research**, [s.l.], v. 35, n. 3, p.830-834, 2001b. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00296-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00296-7).

OLADOJA, N. A.; SALIU, T. D.; OLOLADE, I. A.; ANTHONY, E.T.; BELLO, G. A. A new indigenous green option for turbidity removal from aqueous system. **Separation and Purification Technology**, [s.l.], v. 186, p.166-174, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.05.054>.

OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G.; DE JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Análise da distribuição do tamanho de partículas em função do tempo de floculação. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28., 2015a, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. ABES. v.1. 2015a.

OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G.; JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Avaliação da melhor distribuição de tamanho de partículas para a sedimentação mantendo-se fixo o número de Camp. Monterrey - Mexico. In: Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental - Aspirando a un ambiente sostenible, 34., 2014, Mexico. **Anais [...]**. AIDIS. v.1. 2014. p. 1.

OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; DUTRA, R. H. A.; JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Avaliação de Parâmetros Representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas Presentes em Coleções Hídricas / Evaluation of Particle Size Distribution in Hydro Collections. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 20, n. 4, p.1084-1092, 2015b. DOI: 10.21168/rbrh.v20n4.p1084-1092.

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**, [s.l.], p.1-12, 2015c. DOI: 10.1080/19443994.2015.1081833.

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

OLIVEIRA, A. S.; LOPES, V. S.; COUTINHO FILHO, U.; MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L. Neural network for fractal dimension evolution. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 78, n. 4, p. 795-802, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2018.349>.

OLIVEIRA, R. F. **Obtenção das constantes cinéticas de agregação e ruptura de flocos obtidos a partir de água com cor elevada**. Orientador: André Luiz de Oliveira. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Água potável**, 2019. Disponível em: <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>. Acesso em: 16 abr. 2020.

ÖZACAR, M.; ŞENGİL, İ. A. Evaluation of tannin biopolymer as a coagulant aid for coagulation of colloidal particles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s.l.], v. 229, n. 1-3, p.85-96, 2003. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2003.07.006.

PACKHAM, R. F. Some studies of the coagulation of dispersed clays with hydrolyzing salts. **Journal of Colloid Science**, [s.l.], v. 20, n. 1, p. 81-92, 1964. DOI: [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(65\)90094-2](https://doi.org/10.1016/0095-8522(65)90094-2).

PANAVELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. Orientador: Luiz Di Bernardo. 2001. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PARKER, D. S.; KAUFMAN, W. J.; JENKINS, D. Floc Breakup in Turbulent Flocculation Processes. **Journal of The Sanitary Engineering Division**, [s.l.], v. 98, n. 1, p. 79-99, 1972. DOI: <http://dx.doi.org/10.1061/jseai.0001389>.

PAULA, H. M.; ILHA, M. S. O.; SARMENTO, A. P.; ANDRADE, L. S. Dosage optimization of *Moringa oleifera* seed and traditional chemical coagulants solutions for concrete plant wastewater treatment. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 174, p.123-132, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.311>.

PENG, S. J.; WILLIAMS, R.A. Direct Measurement of floc breakage in flowing suspensions. **Journal of Colloid Interface Science**, [s.l.], v. 166, p.321-332, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1006/jcis.1994.1302>.

PHAN, C. M.; NGUYEN, A. V.; MILLER, J. D.; EVANS, G. M.; JAMESON, G. J. Investigations of bubble-particle interactions. **International Journal of Mineral Processing**, [s.l.], v. 72, n. 1-4, p.239-254, 2003. DOI: 10.1016/S0301-7516(03)00102-9.

PLATTS, M. M.; GOODE, G. C.; HISLOP, J. S. Composition of the domestic water supply and the incidence of fractures and encephalopathy in patients on home dialysis. **British Medical Journal**, [s.l.], v. 2, n. 6088, p.657-660, 1977. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.2.6088.657>.

POUMAYE, N.; MABINGUI, J.; LUTGEN, P.; BIGAN, M. Contribution to the clarification of surface water from the *Moringa oleifera*: Case M'Poko River to Bangui, Central African Republic. **Chemical Engineering Research and Design**, [s.l.], v. 90, n. 12, p.2346-2352, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.05.017>.

PRITCHARD, M.; CRAVEN. T.; MKANDAWIRE, T.; EDMONDSON, A. S.; O'NEILL. A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries. **Physics and Chemistry of The Earth, Parts A/b/c**, [s.l.], v. 35, n. 13-14, p.798-805, 2010a. DOI: 10.1016/j.pce.2010.07.014.

PRITCHARD, M.; CRAVEN. T.; MKANDAWIRE, T.; EDMONDSON, A. S.; O'NEILL. A study of the parameters affecting the effectiveness of *Moringa oleifera* in drinking water purification. **Physics and Chemistry of The Earth, Parts A/b/c**, [s.l.], v. 35, n. 13-14, p.791-



797, 2010b. DOI: 10.1016/j.pce.2010.07.020.

QURESHI, N.; MALMBERG, R. H. Reducing Aluminum Residuals in Finished Water. **Journal - American Water Works Association**, [s.l.], v. 77, n. 10, p.101-108, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1985.tb05627.x>.

RAMACHANDRAN, C.; PETER, K. V.; GOPALAKRISHNAN, P. K. Drumstick (*Moringa oleifera*): A Multipurpose Indian Vegetable. **Economy Botany**, Bronx, v.34, p. 276-283, 1980.

REN, P.; NAN, J.; ZHANG, X.; ZHENG, K. Analysis of floc morphology in a continuous-flow flocculation and sedimentation reactor. **Journal of Environmental Sciences**, [s.l.], v. 52, p. 268-275, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.04.007>.

RIBEIRO, J. V. M.; ANDRADE, P. V.; REIS, A. G. Moringa oleifera seed as a natural coagulant to treat low-turbidity water by in-line filtration. **Ambiente e Agua**, [s.l.], v. 14, n. 6, p. 1-9, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2442>.

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

RIJK, S. E.; VAN DER GRAAF, J. H. J. M.; DEN BLANKEN, J. G. Bubble size in flotation thickening. **Water Research**, [s.l.], v. 28, n. 2, p.465-473, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90284-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90284-4).

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; BELTRÁN-HEREDIA, J.; PERES, J. A. Improvement of the flocculation process in water treatment by using *Moringa oleifera* seeds extract. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [s.l.], v. 29, n. 3, p. 495–501, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-66322012000300006>.

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; GHEBREMICHAEL, K.; BELTRÁN-HEREDIA, J. Comparison of single-step and two-step purified coagulants from *Moringa oleifera* seed for turbidity and DOC removal. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 101, n. 15, p. 6259-6261, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.072.

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; GONZÁLEZ-VELASCO, M.; BELTRÁN-HEREDIA, J. Surface water treatment with tannin-based coagulants from Quebracho (*Schinopsis balansae*). **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 165, n. 3, p.851-858, 2010. DOI: 10.1016/j.cej.2010.10.030.

SANTOS, H. R.; PRADO, G. S.; VIDAL, C. M. S.; MORUZZI, R. B.; CAMPOS, J. R. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 9, n. 4, p.291-300, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522004000400005>.

SANTOS, M. A. **A flotação por ar dissolvido como alternativa ao tratamento de efluente mineral visando ao reúso da água e à melhoria do processo de flotação de apatita**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

ŠĆIBAN, M.; KLAŠNJA, M.; ANTOV, M.; ŠKRBIĆ, B. Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 100, n. 24, p.6639-6643, dez. 2009. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.06.047.

SHEN, X.; MAA, J. P.-Y. A camera and image processing system for floc size distributions of suspended particles. **Marine Geology**, [s.l.], v. 376, p.132-146, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2016.03.009>.

SILVA, A. F. T. **Acompanhamento da evolução da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) no processo de floculação de água com cor elevada**. Orientador: André Luiz de Oliveira. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SILVA, L. M. A. **Avaliação da eficiência de sedimentação em função da resistência, ruptura e recrescimento de flocos obtidos a partir de água com turbidez elevada**. Orientador: André Luiz de Oliveira. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SILVA, P. A. G. **Estudo da resistência do floco e da refloculação visando o tratamento de águas de abastecimento utilizando técnica de monitoramento por análise de imagem digital e dispersão de luz**. Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2017.

SILVA, P. A. G. **Força e dimensão fractal para floco de caulinita coagulado com sal de alumínio aplicado ao tratamento de água para abastecimento**. Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi. 2016. Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2016.

SMITH, L. F. Public health role, aluminium and Alzheimer's disease. **Environmetrics**, [s.l.], v. 6, n. 3, p.277-286, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1002/env.3170060304>.

SPICER, P. T.; KELLER, W.; PRATSINIS, S. E. The Effect of Impeller Type on Floc Size and Structure during Shear-Induced Flocculation. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s.l.], v. 184, n. 1, p. 112-122, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0601>.

SUN, J.; QIN, L.; LI, G.; KANG, Y. Effect of hydraulic conditions on flocculation performances and floc characteristics in Chinese herbal extracts by chitosan and chitosan hydrochloride. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 225, p. 641-649, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.03.108>.

THAKUR, S. S.; CHOUBEY, S. Assessment of coagulation efficiency of *Moringa oleifera* and Okra for treatment of turbid water. **Scholars Research Library**, [s.l.], v.6, n.2, p. 24-30, 2014.

TSE, I. C.; SWETLAND, K.; WEBER-SHIRK, M. L.; LION, L. W. Fluid shear influences on the performance of hydraulic flocculation systems. **Water Research**, [s.l.], v. 45, n. 17, p. 5412-5418, 2011. DOI: 10.1016/j.watres.2011.07.040.

VALVERDE, K. C.; COLDEBELLA, P. F.; NISHI, L.; MADRONA, G. S.; CAMACHO, F. P.; SANTOS, T. R. T.; SANTOS, A. A.; BERGAMASCO, R. Avaliação do tempo de degradação do coagulante natural *Moringa oleifera* Lam em pó no tratamento de água superficial. **e-xacta**, Belo Horizonte, v. 7, n. 1, p. 75-82, 2014.

VALVERDE, K. C.; SANTOS, O. A. A.; BERGAMASCO, R. Avaliação do processo de clarificação da água bruta por meio de diagramas de coagulação, empregando a associação *Moringa oleifera* Lam e cloreto férrico. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s.l.], v. 9, n. 11, p.55-64, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.17271/198008279112013558>.

VARKEY, A. J. Purification of river water using *Moringa Oleifera* seed and copper for point-of-use household application. **Scientific African**, [s.l.], v. 8, p. --, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00364>.

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

VUNAIN, E.; MASOAMPHAMBE, E. F.; MPEKETULA, P. M. G.; MONJEREZI, M.; ETALE, A. Evaluation of coagulating efficiency and water borne pathogens reduction capacity of *Moringa oleifera* seed powder for treatment of domestic wastewater from Zomba, Malawi. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 7, n. 3, p. 103-118, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103118>.

WAITE, T. D. Measurement and implications of floc structure in water and wastewater treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s.l.], v. 151, n. 1-2, p.27-41, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00634-7](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00634-7).

WALTON, J. R. Aluminum Involvement in the Progression of Alzheimer's Disease. **Journal of Alzheimer's Disease**, [s.l.], v. 35, n. 1, p. 7-43, 2013. DOI: 10.3233/JAD-121909.

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**, [s.l.], v. 379, n. 1-3, p. 27-35, 2011. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.11.053.

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

YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. Breakage and Re-formation of Alum Floccs. **Environmental Engineering Science**, [s.l.], v. 19, n. 4, p. 229-236, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1089/109287502760271544>.

YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. The reversibility of floc breakage. **International Journal of Mineral Processing**, [s.l.], v. 73, n. 2-4, p.251-259, 2004a. DOI: 10.1016/S03017516(03)00077-2.

YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. The effect of rapid mixing on the break-up and re-formation of flocs. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, [s.l.], v. 79, n. 7, p.782-788, 8 jun. 2004b. DOI: 10.1002/jctb.1056.

ZABEL, T. The Advantages of Dissolved-air Flotation for Water Treatment. **Journal - American Water Works Association**, [s.l.], v. 77, n. 5, p.42-46, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1985.tb05537.x>.

## APÊNDICE A – Resultados dos ensaios de sedimentação realizados para escolha do tratamento

Tabela A.1 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ sedimentação com dosagem  
de *Moringa oleifera* de 40,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		4,00		Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		40,00		
pH água bruta		5,92		Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107		
Data		14/10/19		Temperatura da água bruta (°C)		27,10		
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>s1</sub> = 2,5 cm/min	V <sub>s2</sub> = 1,0 cm/min	V <sub>s3</sub> = 0,5 cm/min
1	3,53	-	-	0,50	0,90	133	131	122
2	3,86	-	-	0,5	0,50	142	133	120
3	3,97	-	-	0,50	0,40	137	129	122
4	4,15	-	-	0,50	0,30	139	135	116
5	4,44	-	-	0,50	0,20	144	137	120
6	5,03	-	-	0,50	0,10	161	163	163
7	5,55	-	-	0,50	0,05	142	142	142
8	5,85	-	-	-	-	137	137	139
9	6,37	0,50	0,10	-	-	135	135	135
10	6,80	0,50	0,15	-	-	142	139	139
11	7,30	0,50	0,17	-	-	137	137	137
12	7,48	0,50	0,20	-	-	142	144	144
13	8,27	0,50	0,22	-	-	144	144	144
14	8,57	0,50	0,25	-	-	144	144	144
15	8,83	0,50	0,30	-	-	144	144	144
16	9,36	0,50	0,5	-	-	144	144	144

Fonte: O autor.

Tabela A.2 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ sedimentação com dosagem de *Moringa oleifera* de 80,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		8,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		80,00			
pH água bruta		6,00	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)					107
Data		11/10/19	Temperatura da água bruta (°C)					24,20
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>s1</sub> = 2,5 cm/min	V <sub>s2</sub> = 1,0 cm/min	V <sub>s3</sub> = 0,5 cm/min
1	3,60	-	-	0,50	0,80	210	206	197
2	3,86	-	-	0,5	0,50	202	195	187
3	4,17	-	-	0,50	0,30	206	204	187
4	4,42	-	-	0,50	0,20	217	208	197
5	4,70	-	-	0,50	0,05	208	204	191
6	4,88	-	-	0,50	0,10	208	204	195
7	5,08	-	-	0,50	0,03	200	195	178
8	5,70	-	-	0,50	-	210	204	187
9	6,31	0,50	0,10	-	-	217	210	193
10	6,57	0,50	0,15	-	-	234	232	227
11	7,12	0,50	0,20	-	-	236	238	234
12	7,46	0,50	0,22	-	-	238	238	236
13	7,87	0,50	0,25	-	-	238	236	234
14	8,48	0,50	0,30	-	-	223	223	225
15	9,20	0,50	0,35	-	-	227	227	232
16	9,35	0,50	0,50	-	-	236	234	236

Fonte: O autor.

Tabela A.3 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ sedimentação com dosagem de *Moringa oleifera* de 140,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		14,00		Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		140,00		
pH água bruta		5,94		Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107		
Data		10/10/19		Temperatura da água bruta (°C)		24,70		
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>s1</sub> = 2,5 cm/min	V <sub>s2</sub> = 1,0 cm/min	V <sub>s3</sub> = 0,5 cm/min
1	3,48	-	-	0,50	1,10	279	275	262
2	3,65	-	-	0,50	0,80	240	243	221
3	3,90	-	-	0,5	0,50	318	298	296
4	4,17	-	-	0,50	0,30	318	305	290
5	4,48	-	-	0,50	0,20	217	230	232
6	5,05	-	-	0,50	0,10	230	230	230
7	5,69	-	-	0,50	-	285	285	273
8	6,21	0,50	0,10	-	-	324	320	290
9	6,49	0,50	0,15	-	-	322	309	292
10	6,80	0,50	0,20	-	-	337	313	303
11	7,36	0,50	0,25	-	-	335	313	315
12	7,90	0,50	0,27	-	-	328	311	277
13	8,06	0,50	0,30	-	-	339	315	288
14	8,57	0,50	0,35	-	-	341	320	288
15	8,90	0,50	0,4	-	-	341	335	307
16	9,13	0,50	0,50	-	-	354	352	322

Fonte: O autor.

## APÊNDICE B – Resultados dos ensaios para elaboração do diagrama de coagulação

Tabela B.1 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 20,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		2,00		Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		20,00			
pH água bruta		6,12		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		107			
Data		4/11/19		Temperatura da água bruta (°C)		27,60			
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (Pt/Co)			
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min	
1	3,55	-	-	0,50	0,90	118	116	118	
2	4,06	-	-	0,50	0,40	120	120	120	
3	4,26	-	-	0,50	0,30	118	118	116	
4	4,72	-	-	0,50	0,20	127	124	124	
5	5,26	-	-	0,50	0,10	118	116	118	
6	5,55	-	-	0,50	0,05	122	122	124	
7	5,96	-	-	-	-	124	124	124	
8	6,35	0,50	0,05	-	-	122	122	122	
9	6,73	0,50	0,10	-	-	122	122	122	
10	7,07	0,50	0,15	-	-	122	122	122	
11	7,75	0,50	0,17	-	-	120	116	116	
12	8,18	0,50	0,2	-	-	118	118	120	
13	8,80	0,50	0,30	-	-	122	122	124	
14	9,33	0,50	0,50	-	-	124	124	124	
15	9,60	0,50	0,7	-	-	127	124	127	

Fonte: O autor.



Tabela B.2 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 30,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		3,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		30,00			
pH água bruta		6,20	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107			
Data		1/11/19	Temperatura da água bruta (°C)		26,80			
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,56	-	-	0,50	0,90	34	30	30
2	3,96	-	-	0,50	0,40	124	122	120
3	4,46	-	-	0,50	0,20	122	124	122
4	5,03	-	-	0,50	0,10	120	120	120
5	5,18	-	-	0,50	0,05	127	127	124
6	5,77	-	-	-	-	124	124	122
7	6,10	0,25	0,10	-	-	122	122	122
8	6,37	0,25	0,20	-	-	127	127	129
9	6,77	0,25	0,30	-	-	124	124	127
10	7,23	0,25	0,35	-	-	129	129	129
11	7,75	0,25	0,40	-	-	127	127	127
12	8,28	0,25	0,45	-	-	127	124	127
13	8,83	0,25	0,60	-	-	129	129	131
14	9,16	0,25	0,75	-	-	127	127	129

Fonte: O autor.

Tabela B.3 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 40,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		4,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		40,00			
pH água bruta		6,20	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)				107	
Data		30/10/19	Temperatura da água bruta (°C)				26,20	
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,55	-	-	0,50	0,90	26	15	15
2	3,98	-	-	0,50	0,40	60	32	26
3	4,43	-	-	0,50	0,20	155	155	157
4	4,74	-	-	0,50	0,10	159	155	157
5	5,19	-	-	0,50	0,05	148	144	148
6	5,70	-	-	-	-	152	148	148
7	6,44	0,50	0,10	-	-	150	148	144
8	6,90	0,5	0,15	-	-	146	146	148
9	7,55	0,5	0,17	-	-	146	144	144
10	7,80	0,5	0,20	-	-	148	146	146
11	8,31	0,5	0,22	-	-	150	150	150
12	8,86	0,5	0,30	-	-	148	148	148
13	9,40	0,50	0,50	-	-	150	159	157

Fonte: O autor.

Tabela B.4 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 50,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		5,00		Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		50,00		
pH água bruta		5,98		Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107		
Data		31/10/19		Temperatura da água bruta (°C)		25,90		
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,56	-	-	0,5	0,90	49	24	19
2	3,95	-	-	0,50	0,40	30	17	15
3	4,30	-	-	0,50	0,20	26	19	19
4	4,79	-	-	0,50	0,05	163	155	155
5	5,38	-	-	0,50	0,02	135	135	135
6	5,70	-	-	-	-	150	146	146
7	6,20	0,5	0,05	-	-	137	137	137
8	6,50	0,50	0,05	-	-	142	146	142
9	6,58	0,50	0,10	-	-	146	146	146
10	7,25	0,5	0,15	-	-	146	144	142
11	7,58	0,5	0,17	-	-	144	142	144
12	8,23	0,5	0,20	-	-	146	146	146
13	8,81	0,5	0,30	-	-	152	150	152
14	9,38	0,50	0,50	-	-	155	155	155

Fonte: O autor.

Tabela B.5 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 60,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		6,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		60,00			
pH água bruta		6,20	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)				107	
Data		1/11/19	Temperatura da água bruta (°C)				26,30	
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,59	-	-	0,50	0,90	73	28	28
2	4,02	-	-	0,50	0,40	45	26	21
3	4,37	-	-	0,50	0,20	43	19	17
4	4,86	-	-	0,50	0,10	41	26	26
5	5,11	-	-	0,50	0,05	99	67	67
6	5,65	-	-	-	-	178	178	182
7	6,22	0,50	0,05	-	-	150	157	155
8	6,45	0,50	0,10	-	-	155	157	157
9	7,09	0,50	0,15	-	-	159	165	163
10	7,51	0,50	0,20	-	-	148	152	155
11	8,01	0,50	0,25	-	-	152	150	152
12	8,58	0,50	0,30	-	-	159	159	159
13	9,25	0,50	0,50	-	-	152	152	152

Fonte: O autor.

Tabela B.6 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 70,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		7,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		70,00			
pH água bruta		6,30	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107			
Data		5/11/19	Temperatura da água bruta (°C)		27,10			
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,57	-	-	0,50	0,90	54	28	21
2	3,98	-	-	0,50	0,40	107	43	24
3	4,35	-	-	0,50	0,20	43	21	15
4	4,73	-	-	0,50	0,10	54	28	21
5	5,10	-	-	0,50	0,05	41	21	19
6	5,52	-	-	-	-	185	185	182
7	5,90	0,50	0,05	-	-	167	167	167
8	6,39	0,50	0,10	-	-	163	163	165
9	6,72	0,50	0,15	-	-	161	163	163
13	7,02	0,50	0,17	-	-	157	155	155
10	7,44	0,50	0,20	-	-	155	155	157
11	8,06	0,50	0,25	-	-	157	157	159
12	8,52	0,50	0,30	-	-	155	157	155
14	9,08	0,50	0,40	-	-	159	155	157
15	9,42	0,50	0,60	-	-	165	161	161

Fonte: O autor.

Tabela B.7 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 80,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		8,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		80,00			
pH água bruta		6,06	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107			
Data		5/11/19	Temperatura da água bruta (°C)		27,50			
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,57	-	-	0,50	0,90	109	64	39
2	4,00	-	-	0,50	0,40	52	34	21
3	4,46	-	-	0,50	0,20	58	41	24
4	4,82	-	-	0,50	0,10	43	21	15
5	5,19	-	-	0,50	0,05	41	26	24
6	5,50	-	-	-	-	54	34	28
7	5,86	0,50	0,05	-	-	64	52	47
8	6,20	0,50	0,10	-	-	191	191	189
9	6,43	0,50	0,12	-	-	172	172	174
10	6,92	0,50	0,15	-	-	165	167	170
11	6,98	0,50	0,17	-	-	161	161	163
12	7,62	0,50	0,20	-	-	155	161	155
13	8,23	0,50	0,25	-	-	170	167	165
14	8,63	0,50	0,30	-	-	159	165	163
15	8,9	0,50	0,40	-	-	174	165	165
16	9,41	0,50	0,60	-	-	167	165	165

Fonte: O autor.

Tabela B.8 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 90,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		9,00		Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		90,00		
pH água bruta		6,20		Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107		
Data		25/11/19		Temperatura da água bruta (°C)		26,80		
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,57	-	-	0,50	0,90	75	32	26
2	3,98	-	-	0,50	0,40	131	60	32
3	4,38	-	-	0,50	0,20	82	36	21
4	4,92	-	-	0,50	0,15	118	58	30
5	5,28	-	-	0,50	0,10	94	34	28
6	5,61	-	-	0,50	0,05	86	41	28
7	5,96	-	-	-	-	64	41	34
8	6,24	0,50	0,05	-	-	255	240	251
9	6,48	0,50	0,10	-	-	236	232	230
10	6,67	0,50	0,15	-	-	243	234	234
11	7,13	0,50	0,20	-	-	232	223	223
12	7,57	0,50	0,25	-	-	225	219	217
13	8,23	0,50	0,30	-	-	219	215	217
14	8,94	0,50	0,40	-	-	230	223	223
15	9,40	0,50	0,60	-	-	236	225	225

Fonte: O autor.

Tabela B.9 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 100,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		10,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		100,00			
pH água bruta		6,17	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		105			
Data		26/11/19	Temperatura da água bruta (°C)		26,50			
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,65	-	-	0,50	0,90	118	67	32
2	4,19	-	-	0,50	0,40	58	28	17
3	4,75	-	-	0,50	0,20	79	43	30
4	5,37	-	-	0,50	0,15	94	45	30
5	5,56	-	-	0,50	0,10	36	21	21
6	6,03	0,50	0,05	-	-	92	58	36
7	6,55	0,50	0,15	-	-	215	215	221
8	6,98	0,50	0,20	-	-	225	212	215
9	7,15	0,50	0,25	-	-	245	236	240
10	7,70	0,50	0,30	-	-	240	240	234
11	7,97	0,50	0,35	-	-	232	225	225
12	8,58	0,50	0,40	-	-	232	227	230
13	9,23	0,50	0,60	-	-	225	223	225

Fonte: O autor.



Tabela B.10 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 110,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		11,00		Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		110,00		
pH água bruta		6,40		Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		109		
Data		2/12/19		Temperatura da água bruta (°C)		26,50		
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,51	-	-	0,50	1,10	135	71	49
2	3,96	-	-	0,50	0,40	109	43	19
3	4,26	-	-	0,50	0,30	79	28	17
4	4,70	-	-	0,50	0,20	75	32	21
5	5,39	-	-	0,50	0,10	45	30	24
6	5,91	-	-	-	-	43	24	21
7	6,16	0,50	0,05	-	-	144	67	47
8	6,50	0,50	0,10	-	-	137	101	82
9	7,02	0,50	0,15	-	-	275	264	264
10	7,40	0,50	0,20	-	-	277	255	227
11	8,06	0,50	0,25	-	-	275	253	238
12	8,52	0,50	0,30	-	-	290	277	277
13	9,02	0,50	0,40	-	-	279	258	206
14	9,44	0,50	0,60	-	-	281	273	255

Fonte: O autor.

Tabela B.11 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 120,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		12,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		120,00			
pH água bruta		6,06	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		109			
Data		3/12/19	Temperatura da água bruta (°C)		26,70			
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,50	-	-	0,50	1,10	157	75	41
2	4,12	-	-	0,50	0,40	135	79	43
3	4,17	-	-	0,50	0,30	178	71	43
4	4,56	-	-	0,50	0,20	109	49	34
5	4,69	-	-	0,50	0,10	200	86	41
6	5,15	-	-	0,50	0,05	152	54	28
7	5,73	-	-	-	-	71	30	21
8	5,95	0,50	0,05	-	-	69	19	13
9	6,47	0,50	0,10	-	-	62	47	43
10	6,71	0,50	0,15	-	-	122	69	49
11	6,87	0,50	0,17	-	-	137	67	43
12	7,36	0,50	0,20	-	-	54	36	32
13	8,13	0,50	0,23	-	-	133	36	32
14	8,25	0,50	0,25	-	-	116	47	32
15	8,67	0,50	0,33	-	-	144	62	41
16	9,07	0,50	0,50	-	-	116	88	79
17	9,48	0,50	0,70	-	-	94	43	36

Fonte: O autor.

Tabela B.12 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 130,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		13,00		Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		130,00		
pH água bruta		6,04		Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107		
Data		9/12/19		Temperatura da água bruta (°C)		26,50		
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,50	-	-	0,50	1,10	90	21	15
2	4,09	-	-	0,50	0,40	84	21	15
3	4,49	-	-	0,50	0,20	127	64	36
4	5,24	-	-	0,50	0,10	86	43	28
5	5,88	-	-	-	-	122	54	32
6	6,30	0,50	0,05	-	-	43	21	17
7	6,61	0,50	0,10	-	-	49	21	21
8	7,04	0,50	0,15	-	-	75	41	30
9	7,35	0,50	0,20	-	-	122	54	30
10	8,04	0,50	0,23	-	-	45	26	19
11	8,27	0,50	0,25	-	-	39	28	26
12	8,88	0,50	0,30	-	-	58	34	28
13	9,11	0,50	0,40	-	-	56	36	28
14	9,42	0,50	0,70	-	-	45	19	19

Fonte: O autor.

Tabela B.13 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 140,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		14,00		Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		140,00		
pH água bruta		6,54		Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107		
Data		11/12/19		Temperatura da água bruta (°C)		26,30		
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,52	-	-	0,50	1,10	127	73	45
2	4,06	-	-	0,50	0,40	161	97	24
3	4,53	-	-	0,50	0,20	189	101	49
4	4,90	-	-	0,50	0,10	155	79	41
5	5,52	-	-	-	-	247	152	107
6	6,05	0,50	0,05	-	-	204	94	64
7	6,63	0,50	0,15	-	-	178	114	71
8	7,25	0,50	0,20	-	-	180	99	75
9	7,85	0,50	0,25	-	-	172	107	79
10	8,28	0,50	0,30	-	-	124	62	43
11	8,82	0,50	0,40	-	-	139	34	24
12	9,42	0,50	0,70	-	-	52	34	19

Fonte: O autor.

Tabela B.14 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 150,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		15,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		150,00			
pH água bruta		6,20	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107			
Data		12/12/19	Temperatura da água bruta (°C)		24,40			
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,59	-	-	0,50	1,10	150	64	36
2	4,02	-	-	0,50	0,40	227	167	105
3	4,58	-	-	0,50	0,20	227	159	97
4	4,80	-	-	0,50	0,10	247	148	82
5	5,18	-	-	0,50	0,05	227	124	62
6	5,63	-	-	-	-	217	150	90
7	6,10	0,50	0,05	-	-	185	101	58
8	6,71	0,50	0,15	-	-	197	105	60
9	7,27	0,50	0,20	-	-	172	84	52
10	7,91	0,50	0,25	-	-	174	84	41
11	8,28	0,50	0,30	-	-	180	88	62
12	8,86	0,50	0,40	-	-	109	43	28
13	9,48	0,50	0,70	-	-	97	39	26

Fonte: O autor.

Tabela B.15 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 160,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		16,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		160,00			
pH água bruta		6,35	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107			
Data		12/12/19	Temperatura da água bruta (°C)		25,40			
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,54	-	-	0,50	1,10	189	90	52
2	4,08	-	-	0,50	0,40	290	206	174
3	4,60	-	-	0,50	0,20	292	135	88
4	5,21	-	-	0,50	0,10	217	161	101
5	5,58	-	-	0,50	0,05	281	178	109
6	6,01	-	-	-	-	163	107	62
7	6,38	0,50	0,05	-	-	234	116	103
8	6,73	0,50	0,10	-	-	193	112	58
9	7,21	0,50	0,15	-	-	146	56	32
10	7,84	0,50	0,20	-	-	167	112	67
11	8,39	0,50	0,25	-	-	122	41	26
12	8,98	0,50	0,40	-	-	165	99	69
13	9,58	0,50	0,70	-	-	124	62	32

Fonte: O autor.

Tabela B.16 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 170,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		17,00		Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		170,00		
pH água bruta		6,27		Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		107		
Data		13/12/19		Temperatura da água bruta (°C)		26,20		
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,54	-	-	0,50	1,10	243	144	99
2	4,13	-	-	0,50	0,40	275	137	77
3	4,45	-	-	0,50	0,20	283	197	103
4	5,00	-	-	0,50	0,10	279	176	84
5	5,42	-	-	0,50	0,05	206	124	99
6	5,94	-	-	-	-	232	101	47
7	6,11	0,50	0,05	-	-	238	167	127
8	6,76	0,50	0,15	-	-	172	97	84
9	7,21	0,50	0,20	-	-	227	137	109
10	7,81	0,50	0,25	-	-	264	170	118
11	8,26	0,50	0,30	-	-	185	103	82
12	8,84	0,50	0,40	-	-	165	116	84
13	9,50	0,50	0,70	-	-	112	79	67

Fonte: O autor.

Tabela B.17 - Resultados dos ensaios de coagulação/ floculação/ flotação com dosagem de *Moringa oleifera* de 180,00 mg/L

Volume adicionado (mL)		18,00	Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		180,00			
pH água bruta		6,13	Cor Aparente da Água bruta (mg Pt-Co/L)		109			
Data		4/12/19	Temperatura da água bruta (°C)		24,90			
Jarro N°	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Aparente Remanescente (mg Pt-Co/L)		
		Molaridade (M)	Volume (mL)	Molaridade (M)	Volume (mL)	V <sub>f1</sub> = 20 cm/min	V <sub>f2</sub> = 10 cm/min	V <sub>f3</sub> = 5 cm/min
1	3,46	-	-	0,50	1,10	275	227	202
2	4,08	-	-	0,50	0,40	288	212	148
3	4,48	-	-	0,50	0,20	247	187	122
4	5,05	-	-	0,50	0,10	232	127	71
5	5,22	-	-	0,50	0,05	266	109	60
6	5,95	0,50	0,05	-	-	193	129	73
7	6,45	0,50	0,13	-	-	215	99	58
8	7,04	0,50	0,22	-	-	161	120	71
9	7,69	0,50	0,27	-	-	247	152	84
10	7,88	0,50	0,33	-	-	182	97	67
11	8,34	0,50	0,35	-	-	82	34	17
12	8,72	0,50	0,43	-	-	99	41	19
13	9,21	0,50	0,55	-	-	88	28	15
14	9,41	0,50	0,70	-	-	107	32	17

Fonte: O autor.



## APÊNDICE C – Resultados dos ensaios de formação, ruptura e recrescimento de flocos

Tabela C.1 - Resultados dos ensaios de formação, ruptura e crescimento de flocos para o  
ponto 1 do diagrama de coagulação

Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		40			Turbidez da água bruta (UNT)	2,06
Cor aparente da água bruta (mg Pt-Co/L)		107				
Ensaio	pH	Gradientes de velocidade (s <sup>-1</sup> )			Cor aparente remanescente (mg Pt-Co/L)	Turbidez remanescente (UNT)
		Floculação	Quebra	Refloculação		
1	3,50	20	-	-	28	4,21
2	3,51	20	120	-	32	3,92
3	3,51	20	120	20	17	1,83
4	3,50	20	500	20	19	1,58
5	3,51	30	-	-	28	2,83
6	3,53	30	120	-	30	3,40
7	3,54	30	120	30	21	2,19
8	3,54	30	500	30	21	2,06
9	3,48	40	-	-	26	2,56
10	3,53	40	120	-	26	2,52
11	3,52	40	120	40	15	2,18
12	3,52	40	500	40	17	1,59
13	3,52	60	-	-	19	2,12
14	3,54	60	120	-	19	2,08
15	3,53	60	120	60	21	1,99
16	3,51	60	500	60	21	1,88

Fonte: O autor.

Tabela C.2 - Resultados dos ensaios de formação, ruptura e crescimento de flocos para o ponto 2 do diagrama de coagulação

Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		50			Turbidez da água bruta (UNT)	2,08
Cor aparente da água bruta (mg Pt-Co/L)		105				
Ensaio	pH	Gradientes de velocidade (s <sup>-1</sup> )			Cor aparente remanescente (mg Pt-Co/L)	Turbidez remanescente (UNT)
		Floculação	Quebra	Refloculação		
1	3,98	20	-	-	28	3,08
2	4,00	20	120	-	34	3,28
3	3,99	20	120	20	26	2,14
4	4,01	20	500	20	26	2,68
5	3,98	30	-	-	21	2,15
6	4,02	30	120	-	28	3,20
7	4,01	30	120	30	19	1,52
8	3,98	30	500	30	26	1,92
9	4,00	40	-	-	26	3,24
10	4,00	40	120	-	34	2,93
11	3,98	40	120	40	34	3,60
12	3,99	40	500	40	34	3,31
13	4,01	60	-	-	32	2,79
14	4,02	60	120	-	34	3,52
15	3,98	60	120	60	26	3,45
16	4,00	60	500	60	34	3,88

Fonte: O autor.

Tabela C.3 - Resultados dos ensaios de formação, ruptura e crescimento de flocos para o ponto 3 do diagrama de coagulação

Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		70			Turbidez da água bruta (UNT)	2,01
Cor aparente da água bruta (mg Pt-Co/L)		107				
Ensaio	pH	Gradientes de velocidade (s <sup>-1</sup> )			Cor aparente remanescente (mg Pt-Co/L)	Turbidez remanescente (UNT)
		Floculação	Quebra	Refloculação		
1	4,57	20	-	-	17	3,86
2	4,58	20	120	-	32	4,38
3	4,55	20	120	20	23	2,49
4	4,54	20	500	20	26	3,17
5	4,56	30	-	-	17	4,20
6	4,54	30	120	-	23	2,49
7	4,53	30	120	30	41	6,40
8	4,55	30	500	30	44	5,05
9	4,54	40	-	-	35	3,95
10	4,55	40	120	-	44	6,67
11	4,54	40	120	40	20	2,32
12	4,56	40	500	40	38	5,72
13	4,56	60	-	-	32	4,56
14	4,53	60	120	-	35	5,55
15	4,55	60	120	60	38	3,11
16	4,53	60	500	60	41	5,05

Fonte: O autor.

Tabela C.4 - Resultados dos ensaios de formação, ruptura e crescimento de flocos para o ponto 4 do diagrama de coagulação

Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		130			Turbidez da água bruta (UNT)	2,45
Cor aparente da água bruta (mg Pt-Co/L)		107				
Ensaio	pH	Gradientes de velocidade (s <sup>-1</sup> )			Cor aparente remanescente (mg Pt-Co/L)	Turbidez remanescente (UNT)
		Floculação	Quebra	Refloculação		
1	4,00	20	-	-	36	6,50
2	4,02	20	120	-	36	6,70
3	4,00	20	120	20	32	5,23
4	4,02	20	500	20	56	10,50
5	4,00	30	-	-	47	7,19
6	4,01	30	120	-	49	6,91
7	3,99	30	120	30	52	8,18
8	4,00	30	500	30	58	9,27
9	4,02	40	-	-	69	11,10
10	4,03	40	120	-	77	12,20
11	3,99	40	120	40	75	12,40
12	4,00	40	500	40	88	14,90
13	4,03	60	-	-	82	13,50
14	3,99	60	120	-	90	13,40
15	4,02	60	120	60	90	14,50
16	4,03	60	500	60	86	14,40

Fonte: O autor.

Tabela C.5 - Resultados dos ensaios de formação, ruptura e crescimento de flocos para o ponto 5 do diagrama de coagulação

Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		130			Turbidez da água bruta (UNT)	2,18
Cor aparente da água bruta (mg Pt-Co/L)		105				
Ensaio	pH	Gradientes de velocidade (s <sup>-1</sup> )			Cor aparente remanescente (mg Pt-Co/L)	Turbidez remanescente (UNT)
		Floculação	Quebra	Refloculação		
1	8,34	20	-	-	34	5,31
2	8,35	20	120	-	58	9,62
3	8,38	20	120	20	39	5,57
4	8,39	20	500	20	58	9,15
5	8,36	30	-	-	52	9,03
6	8,36	30	120	-	58	9,22
7	8,39	30	120	30	28	3,55
8	8,31	30	500	30	43	7,73
9	8,31	40	-	-	47	7,24
10	8,39	40	120	-	58	8,30
11	8,40	40	120	40	56	8,50
12	8,33	40	500	40	86	12,90
13	8,31	60	-	-	86	14,86
14	8,31	60	120	-	90	15,20
15	8,34	60	120	60	84	13,90
16	8,31	60	500	60	105	18,20

Fonte: O autor.

Tabela C.6 - Resultados dos ensaios de formação, ruptura e crescimento de flocos para o ponto 6 do diagrama de coagulação

Concentração de <i>Moringa oleifera</i> (mg/L)		150			Turbidez da água bruta (UNT)	1,96
Cor aparente da água bruta (mg Pt-Co/L)		107				
Ensaio	pH	Gradientes de velocidade (s <sup>-1</sup> )			Cor aparente remanescente (mg Pt-Co/L)	Turbidez remanescente (UNT)
		Floculação	Quebra	Refloculação		
1	7,39	20	-	-	41	6,69
2	7,42	20	120	-	49	6,75
3	7,43	20	120	20	43	6,09
4	7,43	20	500	20	56	8,51
5	7,39	30	-	-	41	5,94
6	7,40	30	120	-	52	8,13
7	7,39	30	120	30	43	6,91
8	7,39	30	500	30	82	13,40
9	7,43	40	-	-	41	8,60
10	7,41	40	120	-	58	9,63
11	7,43	40	120	40	43	7,51
12	7,39	40	500	40	73	9,70
13	7,41	60	-	-	49	9,49
14	7,40	60	120	-	61	15,70
15	7,43	60	120	60	64	13,20
16	7,43	60	500	60	90	14,60

Fonte: O autor.