



**ELIÃ ASAFA MELLO SUAVE**

**CARACTERÍSTICAS DE AGREGADOS RESULTANTES DE  
FLOCULAÇÃO COM TANINO COMERCIAL EM ÁGUA  
SINTÉTICA COM COR APARENTE ELEVADA**

**ELIÁ ASAFA MELLO SUAVE**

**CARACTERÍSTICAS DE AGREGADOS RESULTANTES DE  
FLOCULAÇÃO COM TANINO COMERCIAL EM ÁGUA  
SINTÉTICA COM COR APARENTE 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 / Estruturas e Construção Civil

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).

S939	Suave, Eliã Asafe Mello, 1994-
2021	Características de agregados resultantes de floculação com tanino comercial em água sintética com cor aparente elevada [recurso eletrônico] / Eliã Asafe Mello Suave. - 2021.
<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.2021.473">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.473</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>	
CDU: 624	

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: 34 3239-4137 - www.feciv.ufu.br/ppgec - posgradcivil@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil			
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 265, PPGEC			
Data:	25 de agosto de 2021	Hora de início:	14:00 h	Hora de encerramento:
Matrícula do Discente:	11912ECV004			
Nome do Discente:	Eliã Asafe Mello Suave			
Título do Trabalho:	Características de agregados resultantes de floculação com tanino comercial em água sintética com cor aparente 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: Gustavo Henrique Ribeiro da Silva – DEC/UNESP, Rodrigo Braga Moruzzi – IGCE/UNESP 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(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

#### Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Henrique Ribeiro da Silva, Usuário Externo**, em 16/09/2021, às 13:23, 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 **Andre Luiz de Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/09/2021, às 10:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **RODRIGO BRAGA MORUZZI, Usuário Externo**, em 27/09/2021, às 10:34, 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 **3044606** e o código CRC **9B9BBD72**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Capes pelo auxílio à pesquisa, ao laboratório de Saneamento da Universidade Federal de Uberlândia pelo auxílio na execução dos experimentos laboratoriais e a todos os professores que me auxiliaram e orientaram durante todo o processo.

SUAVE, E. A. M. **Características de agregados resultantes de floculação com tanino comercial em água sintética com cor aparente elevada.** Orientador: André Luiz de Oliveira. 2020. Qualificação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

## RESUMO

O Tanino é um coagulante de origem natural, extraído de diversas árvores, e é avaliado como uma alternativa aos coagulantes sintéticos utilizados nas Estações de Tratamento de Água. Diversas pesquisas demonstraram que ele gera bons resultados de remoção de turbidez e cor, é de fácil utilização e gera lodo mais biodegradável em comparação com coagulantes sintéticos. O presente trabalho teve como objetivo obter e avaliar o diagrama de coagulação para o Tanino na remoção de cor de água sintética de cor aparente elevada (107 uH), assim como avaliar morfologicamente os flocos formados durante o processo de coagulação/floculação, verificando o seu comportamento sob 4 diferentes gradientes médios de velocidade ( $G_{mv}$ ) de floculação ( $20, 30, 40$  e  $60\text{ s}^{-1}$ ) assim como em duas diferentes situações de quebra ( $G_{mv}$  de  $120$  e  $500\text{ s}^{-1}$ ). Os resultados demonstraram remoção máxima de cor de 94% e baixa influência da quebra dos flocos na eficiência de remoção. Foi verificado que para o  $G_{mv}$  de  $20$  e de  $30\text{ s}^{-1}$  a floculação ocorreu de maneira incompleta, com a presença de muitos flocos não desenvolvidos devido às menores oportunidades de choque. A quebra sob  $G_{mv}$  de  $120\text{ s}^{-1}$  foi pouco impactante, com menor fator de força de 79%, e nenhuma recuperação de flocos nos  $G_{mv}$  de  $40$  e  $60\text{ s}^{-1}$ . Já para a quebra a  $G_{mv}$  de  $500\text{ s}^{-1}$ , verificou-se fatores de força mínimo de 55%, com recuperação média de 15% para o  $G_{mv}$  de  $40\text{ s}^{-1}$  e 5,7% para o de  $60\text{ s}^{-1}$ . Foram realizadas análises estatísticas para a verificação da similaridade de comportamento entre os diferentes  $G_{mv}$  de floculação. O  $G_{mv}$  de floculação de  $20\text{ s}^{-1}$  resultou nas menores dimensões fractais, indicando que há formação de maiores cadeias para esse grau de agitação menor, enquanto que os maiores  $G_{mv}$  de floculação eram suficientes para impedir uma grande ramificação devido à erosão superficial, levando a maiores dimensões fractais.

**Palavras-chave:** Tratamento de água; Coagulação; Coagulante natural; Tanino; Morfologia do flocos.

SUAVE, E. A. M. **Characteristics of aggregates resulted from flocculation with commercial tannin in synthetic water with high apparent color.** Advisor: André Luiz de Oliveira. 2020. Qualificação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

## ABSTRACT

Tannin is a coagulant of natural origin, extracted from many different trees and is regarded as an alternative to synthetic coagulants used in Water Treatment Stations (WTS). Many researches showed it has good turbidity and color removal, is easy to use and generates a higher biodegradability sludge in comparison with other synthetic coagulants. The present work aims to create the coagulation diagram for Tannin in color removal of synthetic water with high apparent color (107 uH), morphologically evaluating flocs formed during coagulation/flocculation process verifying their behavior under 4 different slow stir mean velocity gradients ( $M_{vg}$ ) (20, 30, 40 and 60  $s^{-1}$ ) besides two different breakage situations ( $M_{vg}$ ) of 120 and 500  $s^{-1}$ ). Results showed maximum color removal efficiency of 94% and low floc-breakage influence in removal efficiency. It was verified that for  $M_{vg}$  of 20 and 30  $s^{-1}$  flocculation occurred incompletely, with the presence of many non-developed flocs due to lesser chock opportunities. Breakage under  $M_{vg}$  of 120  $s^{-1}$  didn't show much impact, with lowest strength factor of 79% and no floc recovery on  $M_{vg}$  of 40 and 60  $s^{-1}$  whereas for  $M_{vg}$  of 500  $s^{-1}$ , strength factors as low as 55%, with average recovery of 15% for  $M_{vg}$  of 40  $s^{-1}$  and 5,7% for 60  $s^{-1}$  were obtained. Statistical analysis were used to verify behavior similarities between the different slow stir  $M_{vg}$  used.  $M_{vg}$  of 20  $s^{-1}$  resulted in the lowest fractal dimensions, indicating that there is a higher floc chain formation for this lower agitation degree, while higher slow stir  $M_{vg}$  were enough to prevent big ramifications due to superficial erosion, leading to higher fractal dimensions.

**Keywords:** Water treatment; Coagulation; Natural coagulant; Tannin; Floc morphology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura proposta para o ácido húmico .....	7
Figura 2 – Camadas de uma Partícula .....	10
Figura 3 – Condensação de Mannich geral .....	13
Figura 4 – Estrutura provável do Tanfloc.....	14
Figura 5- Tipos de quebra de flocos .....	20
Figura 6 – Caracterização de matéria particulada em água natural por tipo e tamanho e métodos apropriados de tratamento .....	24
Figura 7 – Fluxograma geral .....	25
Figura 8 – Aparatos experimentais .....	28
Figura 9 – Ensaios de quebra e reflocação .....	29
Figura 10 – Foto de calibração .....	30
Figura 11 – Foto original e foto binarizada .....	31
Figura 12 – Remoção de cor para cada velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) .....	35
Figura 13– Posição dos pares de pH de coagulação x Dosagem de coagulante.....	36
Figura 14 - Remoção de cor nos ensaios realizados nos três pontos utilizando $G_{mv}$ de flocação de $20\text{ s}^{-1}$ .....	37
Figura 15 - Remoção de cor nos ensaios realizados nos três pontos utilizando $G_{mv}$ de flocação de $30\text{ s}^{-1}$ .....	37
Figura 16 – Remoção de cor nos ensaios realizados nos três pontos utilizando $G_{mv}$ de flocação de $40\text{ s}^{-1}$ .....	38
Figura 17 – Remoção de cor nos ensaios realizados nos três pontos utilizando $G_{mv}$ de flocação de $60\text{ s}^{-1}$ .....	38
Figura 18 – Valores do fator de força obtidos para cada um dos $G_{mv}$ de flocação para o $G_{mv}$ de quebra de $120\text{ s}^{-1}$ .....	39
Figura 19 – Valores do fator de força obtidos para cada um dos $G_{mv}$ de flocação para o $G_{mv}$ de quebra de $500\text{ s}^{-1}$ .....	40
Figura 20 – Imagem de agregados obtida no tempo de flocação de 20 minutos com G20 e G60 .....	41
Figura 21 – Diâmetro médio dos flocos imediatamente após quebra a $500\text{ s}^{-1}$ .....	42
Figura 22 – Diâmetro médio dos flocos ao longo do tempo nos ensaios com $G_{mv}$ de quebra a $120\text{ s}^{-1}$ .....	43

Figura 23– Testes de significância estatística de quebra dos ensaios com $G_{mv}$ de quebra de 120 $s^{-1}$ .....	45
Figura 24 - Testes de significância estatística de reflocação dos ensaios com $G_{mv}$ de quebra de 120 $s^{-1}$ .....	46
Figura 25 – Diâmetro médio dos flocos ao longo do tempo nos ensaios com $G_{mv}$ de quebra a 500 $s^{-1}$ .....	47
Figura 26– Testes de significância estatística de quebra dos ensaios com $G_{mv}$ de quebra de 500 $s^{-1}$ .....	48
Figura 27 - Testes de significância estatística de reflocação dos ensaios com $G_{mv}$ de quebra de 500 $s^{-1}$ .....	49
Figura 28 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com $G_{mv}$ de flocação de 20 e $G_{mv}$ de ruptura de 120 $s^{-1}$ .....	50
Figura 29 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com $G_{mv}$ de flocação de 30 e $G_{mv}$ de ruptura de 120 $s^{-1}$ .....	51
Figura 30 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com $G_{mv}$ de flocação de 40 e $G_{mv}$ de ruptura de 120 $s^{-1}$ .....	52
Figura 31 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com $G_{mv}$ de flocação de 60 e $G_{mv}$ de ruptura de 120 $s^{-1}$ .....	53
Figura 32 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com $G_{mv}$ de flocação de 20 e $G_{mv}$ de ruptura de 500 $s^{-1}$ .....	54
Figura 33 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com $G_{mv}$ de flocação de 30 $G_{mv}$ de ruptura de 500 $s^{-1}$ .....	55
Figura 34 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com $G_{mv}$ de flocação de 40 e $G_{mv}$ de ruptura de 500 $s^{-1}$ .....	56
Figura 35 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com $G_{mv}$ de flocação de 60 e $G_{mv}$ de ruptura de 500 $s^{-1}$ .....	57
Figura 36 – Evolução da Dimensão Fractal para os ensaios com ruptura a 120 $s^{-1}$ .....	60
Figura 37 – Evolução da Dimensão Fractal para os ensaios com ruptura a 500 $s^{-1}$ .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características da água bruta produzida .....	26
Tabela 2 – Pontos para análise nos ensaios de quebra e reflocação .....	36
Tabela 3 – Fatores de recuperação para os ensaios realizados com período de quebra de $120\text{ s}^{-1}$ .....	45
Tabela 4 – Fatores de recuperação para os ensaios realizados com período de quebra de $500\text{ s}^{-1}$ .....	48

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Trabalhos de acompanhamento do processo de floculação utilizando análise de imagens digitais (continua).....	3
Quadro 2 – Principais processos e operações unitárias de tratamento de água para abastecimento (continua).....	8

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	- Sulfato de alumínio
$G_{\text{mv}}$	- Gradiente Médio de Velocidade
$M$	- Mols por litro
$\text{mL}$	- Mililitro
$L$	- Litro
$\text{NaOH}$	- Hidróxido de Sódio
$\text{HCl}$	- Ácido Clorídrico
$\text{nm}$	- Nanômetro
$\mu\text{m}$	- Micrômetro
$\text{FeCl}_3$	- Cloreto de ferro
$^{\circ}\text{C}$	- Graus Célsius
$\text{NH}_4$	- Amônio
$m$	- Massa
$\alpha$	- Proporcionalidade
$L$	- Dimensão de Largura
$D_3$	- Dimensão fractal tridimensional de massa
$A_p$	- Área projetada
$I$	- Dimensão de Comprimento
$D_2$	- Dimensão fractal de ordem 2
$A$	- Coeficiente de densidade
$d_p$	- Diâmetro da partícula
$\beta$	- Coeficiente de inclinação
$d_2$	- Diâmetro médio dos flocos após a quebra
$d_1$	- Diâmetro médio dos flocos antes da quebra
$d_3$	- Diâmetro médio dos flocos ao final da reflocação
$V_s$	- Velocidade de sedimentação

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	- Ácido Fúlvico
AH	- Ácido Húmico
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
DTP	- Distribuição de Tamanho de Partículas
ETA	- Estação de Tratamento de Água
FF	- Fator de Força
FR	- Fator de Recuperação
MON	- Matéria Orgânica Natural
NBR	- Norma Brasileira
OMS	- Organização Mundial de Saúde
PAC	- Policloreto de Alumínio
PRC	- Portaria de Consolidação
SPD	- Subprodutos de Desinfecção

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS.....	5
1.1.1	Objetivo Geral .....	5
1.1.2	Objetivos específicos.....	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1	IMPUREZAS DA ÁGUA .....	6
2.2	TRATAMENTO DA ÁGUA .....	8
2.2.1	Coagulação/Flocação .....	9
2.3	COAGULANTES NATURAIS .....	11
2.3.1	Tanino.....	12
2.4	CARACTERÍSTICAS DOS FLOCOS .....	17
2.4.1	Força, quebra e reflocação .....	17
2.4.2	Dimensão Fractal.....	22
2.4.3	Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP) .....	23
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
3.1	ÁGUA DE ESTUDO E PRODUTOS QUÍMICOS .....	25
3.2	DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO .....	26
3.3	ENSAIOS DE QUEBRA E REFLOCULAÇÃO .....	27
3.4	ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE IMAGENS .....	29
3.5	CÁLCULOS DOS PARÂMETROS DE FLOCUAÇÃO .....	31
3.5.1	Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) .....	31
3.5.2	Dimensão Fractal.....	32
3.5.3	Força do flocos.....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
4.1	DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO .....	34
4.2	ENSAIOS DE QUEBRA E REFLOCULAÇÃO .....	36
4.2.1	Remoção de cor e turbidez .....	37
4.2.2	Força dos flocos .....	39
4.2.3	Crescimento e recuperação dos flocos .....	42
4.2.4	Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) .....	49
4.2.5	Dimensão Fractal.....	59
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DO DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DE FORÇA E REFLOCULAÇÃO .....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Até o ano de 1855, não era sabido que a água é um vetor de transmissão de doenças. Assim, só a partir dessa data começou-se a preocupação com a necessidade de tratamento de água, com ênfase na eliminação ou inativação de patógenos de forma a garantir a saúde da população (EPA, 1999). Em estudo realizado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), Prüss-Üstün *et al.* (2008) explicam que aproximadamente 10% de doenças mundiais poderiam ser prevenidas com melhorias de qualidade de água, saneamento, higiene e gerenciamento de recursos hídricos, e que a melhoria da qualidade da água poderia reduzir em média 6,3% das mortes anuais mundiais, sendo esse valor muito maior nos países em desenvolvimento.

Existe uma grande variedade de bactérias, vírus e protozoários patógenos que, excretados em fezes, podem contaminar a água e, consequentemente, causar infecções ao ser ingerida (LECLERC; SCHWARTZBROD; DEI-CAS, 2002). Algumas das doenças transmitidas por esses agentes são a cólera, diarreia, disenteria, esquistossomose, febre tifoide, hepatite A, malária e poliomielite. (OMS, 2019; PRÜSS-ÜSTÜN *et al.*, 2008).

Com o desenvolvimento da ciência, novos elementos presentes na água de rios, naturalmente ou aqueles introduzidos por descartes da indústria, foram sendo descobertos como nocivos à saúde, criando a necessidade de um sistema de tratamento eficiente para a sua remoção, além de legislações regulando os limites de concentração aceitáveis desses elementos para as águas destinadas ao consumo humano. No Brasil, todos esses limites estão dispostos na portaria GM/MS nº 888 (BRASIL, 2021).

Assim, as Estações de Tratamento de água (ETAs), a fim de remover as partículas de impureza da água se utilizam de processos que as desestabilizam e causam a sua agregação em partículas maiores, que então podem ser removidas com segurança. As ETAs convencionais utilizam uma sequência de processos de mistura, coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção da água para torná-la potável.

No entanto, pesquisas demonstraram que um dos coagulantes mais amplamente utilizados nas ETAs no mundo, o Sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) está relacionado com o desenvolvimento de doenças como o mal de Alzheimer (MCLACHLAN, 1995; SMITH, 1995). Além disso, o

seu uso gera um lodo de difícil disposição, pois, além de conter as cargas poluentes já existentes na água bruta, ainda gera subprodutos em sua reação com eles (KLUMB; FARIA, 2012). Dessa forma, novas alternativas de coagulantes têm sido pesquisadas para substituí-lo.

Uma dessas alternativas é o Tanino, coagulante de origem natural, extraído de diversas partes de árvores. Diversas pesquisas demonstraram que ele gera resultados satisfatórios de remoção de turbidez e cor, é de fácil utilização e gera lodo mais biodegradável (SÁNCHEZ-MARTÍN; GONZÁLEZ-VELASCO; BELTRÁN-HEREDIA, 2010; ÖZACAR; SENGIL, 2003; FANG, 2007).

Em um processo de coagulação/flocação, os flocos formados não terão sempre as mesmas propriedades. Diferentes impurezas interagem com diferentes coagulantes de maneiras distintas, dependendo ainda do mecanismo de coagulação ocorrido. Alguns aspectos relacionados às características dos agregados ainda não são completamente compreendidos, e variam de acordo com o coagulante utilizado. As características dos flocos formados, como o seu tamanho e densidade determinam a sua facilidade de remoção e, consequentemente, a qualidade do processo de purificação da água.

Sharp et al. (2006) explicam que as propriedades dos flocos são consideradas fundamentais para a operação dos processos de tratamento. Elas determinam a qualidade do processo de separação que deverá ser utilizado, como sedimentação, flotação por ar dissolvido e/ou filtração. (HAN; KIM; KIM, 2006)

Segundo Chakraborti, Atkinson e Van Benschoten (2000), a necessidade de determinar essas propriedades é bastante reconhecida em diversas indústrias. São características como o tamanho, forma e densidade da partícula que determinarão a eficiência das colisões, além de sua velocidade de sedimentação.

O grupo de pesquisas da qual esse trabalho faz parte utiliza métodos não destrutivos e não intrusivos por meio de análise de imagens digitais para o acompanhamento do processo de flocação no tratamento de água para abastecimento. O Quadro 1 relaciona os principais trabalhos realizados pelo grupo.

O presente trabalho se insere nessa linha e avalia o coagulante tanino, estudando as características dos flocos formados por ele e um processo de coagulação/flocação/decantação.

Quadro 1 – Trabalhos de acompanhamento do processo de flocação utilizando análise de imagens digitais (continua)

Período	Autor (es)	Nível de pesquisa	Objetivo	Trabalhos publicados
2001 - 2004	Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi	Doutorado	Estudo de partículas e microbolhas por meio da análise de imagem digital em estação de tratamento em escala piloto.	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	Implementação de sistema de monitoramento contínuo de partículas floculentas em estações de tratamento que empregam coagulação e flocação.	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 flocação.	Moreno (2014); Moreno et al. (2015); Moreno et al. (2016).
2014 - 2015	Prof. Dr. André Luiz de Oliveira	Pós-doutorado	Estudo de partículas floculentas e monitoramento contínuo da flocação.	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, reflocação e geometria não euclidiana no tratamento de água.	Silva P. (2016); Silva, P. (2017).
2015 - 2017	Me. Luan Serafim Mendes Gonçalvez	Mestrado	Análise da evolução do diâmetro fractal de agregados formados na flocação 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 flocação utilizando técnicas de obtenção e tratamento de imagem digital.	Dutra (2017).

Quadro 1 – Trabalhos de acompanhamento do processo de floculação utilizando análise de imagens digitais (conclusão)

Período	Autor (es)	Nível de pesquisa	Objetivo	Trabalhos publicados
2015 - 2017	Me. Yuri Cardoso Mendes	Mestrado	Análise da evolução da Distribuição do Tamanho de Partículas na floculação de água de baixa turbidez.	Mendes (2017).
2015 - 2017	Juliana Carvalhinho Büll	Iniciação Científica	Investigação de parâmetro da floculação, utilizando o monitoramento contínuo da floculação por dispersão de luz.	Büll, Silva e Moruzzi (2016); Büll (2017).
2016 - 2017	Adolfo Freitas Terra Silva	Iniciação Científica	Avaliação da Distribuição de Tamanho de Partículas em água com cor aparente elevada empregando técnica de análise de imagens.	Silva, A. (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).
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. (2018)
2016 - 2018	Me. Marcelo Vandemberg 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).

Fonte: do Autor, 2020.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desenvolvimento da floculação por método não intrusivo de aquisição e análise de imagens dos agregados formados à base de Tanino no tratamento de água com cor elevada.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência do Tanino como coagulante utilizado em um estudo em escala de bancada dos processos de coagulação/floculação/sedimentação para tratamento de água produzida com cor elevada;
- Estudar a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP), o Fator de Força e a Dimensão Fractal dos flocos ao longo do processo de floculação para distintos pontos do diagrama de coagulação, sob 4 diferentes gradientes médios de velocidade ( $G_{mv}$ ) de floculação;
- Avaliar as características morfológicas dos flocos após processo de ruptura, sob 2 diferentes  $G_{mv}$  de quebra, assim como sua capacidade de recrescimento;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 IMPUREZAS DA ÁGUA

As impurezas presentes na água podem ter natureza biológica ou química e podem ser classificadas de diversas formas, como por tamanho ou por origem. As de natureza biológica são os microrganismos. Eles são o risco mais comum à saúde humana, podendo ser causadores de doenças, tanto brandas quanto letais, além de outros problemas como danos e obstrução da tubulação do sistema de tratamento e distribuição de água. Já as impurezas de natureza química são elementos químicos presentes na água, e geralmente estão associadas com danos à saúde pela exposição prolongada, sendo controladas pela limitação da ingestão diária tolerável definida pelos padrões de potabilidade estabelecidos, diferentemente da necessidade de remoção total como é o caso de algumas impurezas biológicas. (PÁDUA; FERREIRA, 2010)

Essas partículas podem apresentar tamanho compreendido entre algumas dezenas de nanômetros (nm) a até centenas de micrômetros ( $\mu\text{m}$ ). No entanto, não há convenção quanto à classificação por tamanho. Segundo Letterman, Amirtharajah e O'Melia (1999), partículas coloidais são aquelas que apresentam dimensão menor que 1  $\mu\text{m}$ , enquanto as maiores podem ser divididas em suspensas ou dissolvidas (solução), normalmente definidas através da sua passagem por uma membrana de 0,45  $\mu\text{m}$ , que retém as partículas suspensas.

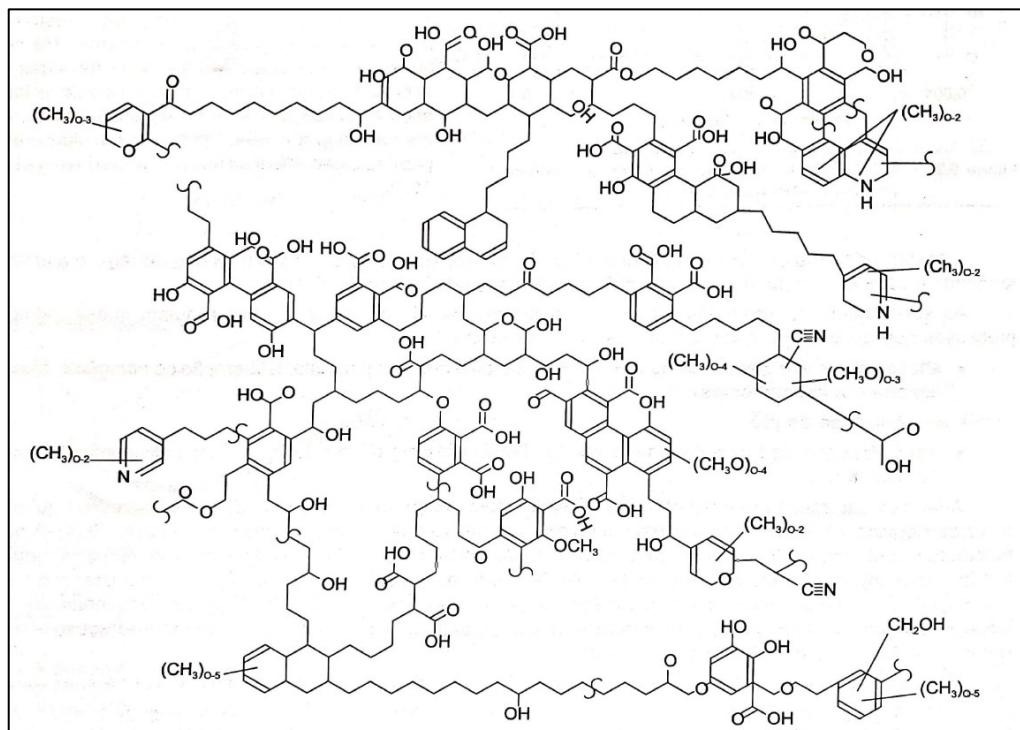
Algumas características físicas da água podem gerar rejeição do usuário, como gosto, odor, cor e turbidez. Os gostos e odores podem ser de origem biológica (actinomicetos, cianobactérias) ou química (amônia, cloretos, cobre, sólidos dissolvidos). Eles podem servir de indicação de possível contaminação. A turbidez é causada pela matéria particulada suspensa, e é um dos principais parâmetros de seleção da tecnologia de tratamento a ser utilizada. Já a cor é geralmente causada por matérias orgânicas presentes, e é também influenciada pela presença de metais como por exemplo o ferro. (PÁDUA; FERREIRA, 2010)

Essas matérias orgânicas que conferem cor à água são uma preocupação com importância crescente relativa ao tratamento de água, classificadas como Matérias Orgânicas Naturais (MONs) (LETTERMAN; AMIRTHARAJAH; O'MELIA, 1999). Segundo Park et al. (2005), as MONs são compostos quimicamente complexos formados a partir da degradação natural de

plantas, lixiviação do solo e subprodutos de microrganismos na água superficial. No tratamento convencional, a MON remanescente após o processo de coagulação/flocação pode gerar subprodutos de desinfecção (SPDs), pela reação com agentes desinfetantes. Richardson et al. (2007) verificaram em sua pesquisa que alguns dos SPDs são carcinogênicos, devendo, portanto, ser controlados.

Letterman, Amirtharajah e O'Melia (1999) explicam que a maior parte das MONs em água para abastecimento são substâncias húmicas, e essas são divididas em ácidos húmicos (AHs) e fúlvicos (AF), sendo o primeiro mais solúvel. Essas substâncias são polieletrólitos aniónicos com peso molecular baixo a médio, carregados primariamente por grupos carboxila e fenólicos, com componentes aromáticos e alifáticos. Na figura 1 pode-se observar uma possível estrutura para o ácido húmico.

Figura 1 - Estrutura proposta para o ácido húmico



Fonte: Di Bernardo e Dantas, 2005.

Wang et al. (2009) explicam também que a presença de AHs na água confere à mesma uma coloração amarelada ou marrom, e que eles possuem grande afinidade de complexação com diversos poluentes, como metais pesados e pesticidas, o que causa contaminação do solo e da água superficial, além dos problemas supracitados de SPDs.

## 2.2 TRATAMENTO DA ÁGUA

A fim de disponibilizar água para o consumo humano, ela deve sempre ser submetida a processos de tratamento de forma a atender às exigências normativas vigentes (BRASIL, 2017). Para a conformação com esses parâmetros exigidos, podem ser utilizados diferentes processos nas ETAs, dependendo da qualidade inicial da água a ser tratada. No Quadro 2 estão descritos resumidamente os principais processos e operações unitárias existentes para o tratamento de água para abastecimento público.

Quadro 2 – Principais processos e operações unitárias de tratamento de água para abastecimento (continua)

Processo/Operação unitária	Descrição/Finalidade
Micropeneiramento	Passagem da água por peneiras com malhas de pequena abertura, visando a remoção de material particulado.
Oxidação/aeração	Oxidar matéria orgânica e inorgânica presente na água, facilitando sua remoção posterior.
Adsorção	Remover compostos orgânicos e inorgânicos indesejáveis, incluindo os que causam sabor e odor, fazendo a água entrar em contato com uma substância adsorvente (em geral carvão ativado).
Troca Iônica	Destinado a remover contaminantes inorgânicos presentes na água, fazendo-a passar por uma coluna contendo material sintético especial (resina).
Coagulação	Adição de coagulante, visando desestabilizar impurezas presentes na água e facilitar o aumento do tamanho das mesmas na etapa de floculação.
Floculação	Agitação da água realizada após a coagulação, com o objetivo de promover o contato entre as impurezas e, assim, aumentar o tamanho das mesmas.
Decantação	Passagem da água por tanques, no fundo dos quais as impurezas ficam depositadas.
Flotação	Arraste das impurezas para a superfície de um tanque, por meio da ação de microbolhas.
Filtração em meio granular	Remoção de material particulado presente na água, fazendo-a passar por um leito contendo meio granular (usualmente areia e/ou antracito).
Filtração em membrana	Remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos, incluindo material dissolvido, passando a água por membranas com abertura de filtração inferior a $1\mu\text{m}$ .

Quadro 2 – Principais processos e operações unitárias de tratamento de água para abastecimento (conclusão)

Processo/Operação unitária	Descrição/Finalidade
Desinfecção	Processo destinado a inativar microrganismos patogênicos presentes na água.
Abrandamento	Processo destinado a reduzir a dureza da água e remover alguns contaminantes inorgânicos.
Fluoretação	Adição de compostos contendo o íon fluoreto, com a finalidade de combater a cárie infantil.
Estabilização química	Acondicionamento da água, com a finalidade de atenuar efeitos corrosivos ou incrustantes no sistema abastecedor e nas instalações domiciliares.

Fonte: Adaptado de Pádua, 2010

Atualmente, a Norma Brasileira (NBR) 12216:1992 especifica as condições necessárias para um projeto de uma ETA para abastecimento público. O tratamento convencional de água recomendado utiliza um agente coagulante adicionado em um processo de mistura rápida, seguido por etapas de coagulação e floculação da água, para a subsequente decantação e filtração para a remoção de partículas suspensas. Finalmente, deve ser realizada a desinfecção, para a desativação de agentes microbiológicos (ABNT, 1992).

### 2.2.1 Coagulação/Flocação

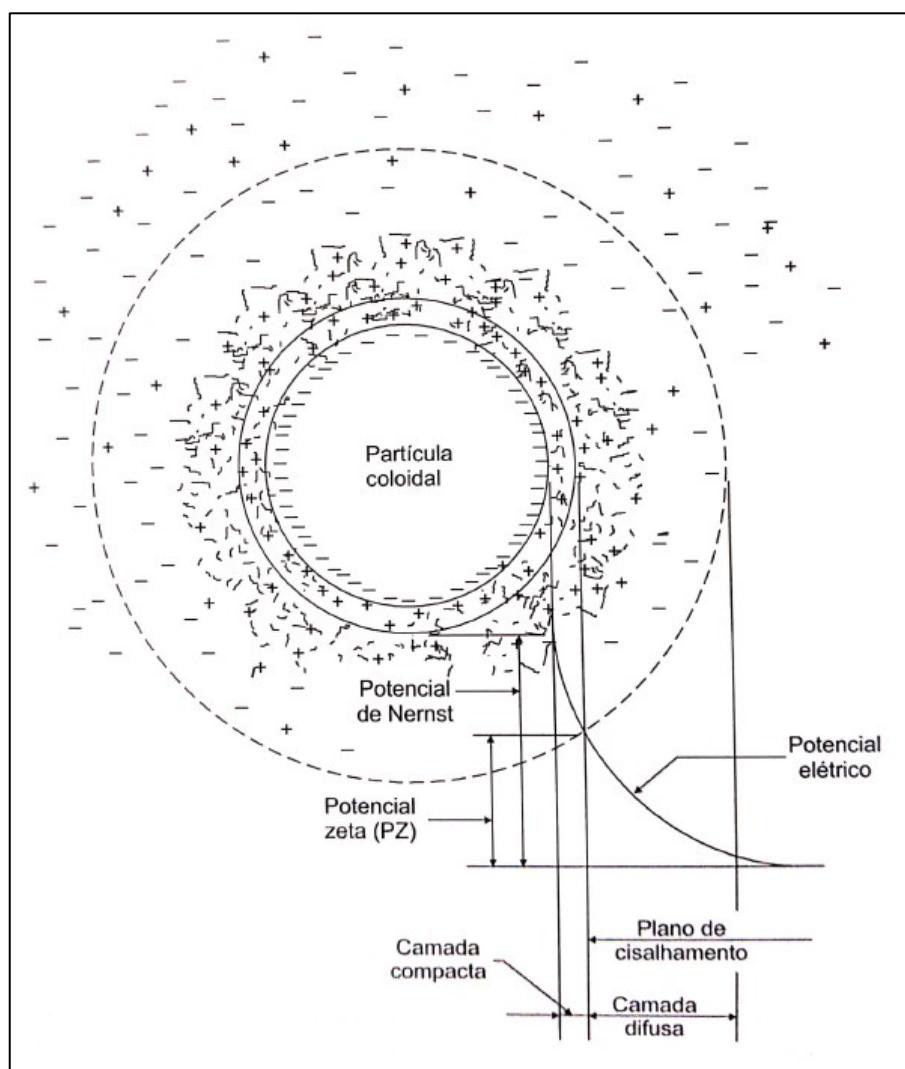
O principal processo a se otimizar a fim de melhorar o desempenho de um sistema de tratamento convencional de água é o de coagulação/flocação. Isso acontece pois uma flocação incompleta compromete o bom funcionamento de todas as unidades seguintes, uma vez que a sedimentação dos flocos será pior e a presença de muitas partículas na água pode impactar na desinfecção. Dessa forma, uma avaliação tanto técnica quanto econômica bem realizada é imprescindível para a escolha do coagulante a ser utilizado no tratamento (PÁDUA, 2010).

O processo de coagulação/flocação se inicia com a inserção de um agente coagulante que causará a neutralização das forças de repulsão elétricas das partículas presentes na água (HAMEED et al., 2016). Então é promovida a mistura da água, de forma a proporcionar o choque entre as partículas e sua consequente agregação. É um processo complexo, composto

essencialmente por três etapas: formação do coagulante, desestabilização da partícula e colisões entre partículas. (LETTERMAN; AMIRTHARAJAH; O'MELIA, 1999)

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), para desestabilizar as partículas coloidais presentes na água, é necessário alterar a força iônica do meio. A coagulação ocorre, individualmente ou de maneira combinada, por meio de quatro mecanismos: compressão da dupla camada elétrica, adsorção e neutralização, varredura, e adsorção com formação de pontes. Na Figura 2 está apresentado um esquema de uma partícula e a sua camada difusa.

Figura 2 – Camadas de uma Partícula



Fonte: Di Bernardo e Dantas, 2005.

A compressão da dupla camada ocorre devido ao aumento da densidade de cargas na camada difusa, a partir da introdução de novos íons no sistema. Isso ocorre pois, de forma a manter a

camada difusa neutra, o seu volume é reduzido, e as forças de van der Waals se tornem dominantes, eliminando a estabilização eletrostática. (DI BERNARDO; DANTAS, 2005) Letterman, Amirtharajah e O'Melia (1999) explicam que o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas ocorre pela adsorção da partícula do coagulante devido à oposição de cargas. Essa adsorção leva à neutralização da carga, eliminando as forças de repulsão e permitindo a aglomeração através de choque entre as partículas.

A varredura é um dos métodos mais amplamente utilizados, e se baseia na formação de uma rede de coloides da água bruta com grandes precipitados como hidróxidos de ferro ou alumínio, que, ao sedimentarem, agregam as partículas com a qual entram em contato. Uma grande vantagem é que, de todos os mecanismos, esse é o mais tolerante a erros de dosagem. No entanto, a demanda de coagulante é mais alta, aumentando custos com os químicos e disposição do maior volume de lodo formado. (BACHE et al., 99)

A formação de pontes ocorre pela adsorção de partículas em um polímero de grande peso molecular, unindo-as. A molécula de polímero necessita ser longa o suficiente para ultrapassar a dupla camada elétrica (para evitar a repulsão das partículas), e a partícula necessita de superfície livre para ser adsorvida (LETTERMAN; AMIRTARAJAH; O'MELIA, 1999)

Hoje, o Sulfato de Alumínio é um dos principais coagulantes utilizados no mundo. Estudos que indicam que o seu uso pode ser motivo do aumento de ocorrências de doenças como o mal de Alzheimer, devido à presença de alumínio residual na água (MCLACHLAN, 1995; SMITH, 1995). Outros coagulantes sintéticos a base de metais como o Cloreto Férrico também podem trazer problemas, uma vez que o lodo formado pelo seu uso para o tratamento de água é de difícil disposição, pois nele estão contidas as cargas poluentes removidas, o metal utilizado no coagulante e possíveis subprodutos que se formam a partir da sua reação com eles (KLUMB; FARIA, 2012). Por isso, tem-se pesquisado substitutos ao uso desses coagulantes.

## 2.3 COAGULANTES NATURAIS

De forma a encontrar alternativas aos coagulantes sintéticos metálicos usualmente utilizados, diversas pesquisas procuram coagulantes com menores impactos ambientais e na saúde. Já se obteve sucesso em produzir resultados equivalentes em escala laboratorial com o uso desses

coagulantes naturais, em comparação com os sintéticos (HAMEED et al., 2016). Esses estudos geralmente utilizam substâncias que têm como vantagem serem virtualmente livres de toxinas (ÖZACAR; ŞENGİL, 2003).

Entre os coagulantes naturais estudados atualmente estão a moringa, extraída de uma árvore (*Moringa oleifera*) (CAMACHO et al., 2017; MUYIBI; ALFUGARA, 2010), a quitosana, extraída a partir da quitina presente na carapaça de caranguejos, camarões e lagostas (CAPELETI, 2011; SPINELLI, 2001), o amido catiônico, extraído de plantas como o trigo, batata, arroz e milho e processado para a adição de grupos quaternários de amônio (PEREIRA; MEIRA; SOUSA, 2019) e o Tanino.

### 2.3.1 Tanino

O tanino é um coagulante natural que vem sendo amplamente estudado. Ele é apresentado como uma boa alternativa aos coagulantes sintéticos por ser de fácil utilização, alta eficiência de remoção e possivelmente redução de custos (SÁNCHEZ-MARTÍN; GONZÁLEZ-VELASCO; BELTRÁN-HEREDIA, 2010; ÖZACAR; ŞENGİL, 2003). Além disso, em comparação aos coagulantes metálicos, o lodo formado é mais biodegradável e mais fácil de dispor (FANG, 2007).

Tanino é um termo amplo relacionado a diferentes famílias de compostos químicos. Eles ocorrem em diferentes locais na natureza, desde cascas de árvores a frutas e folhas. A fabricação do coagulante pode ser feita a partir de diversas espécies de plantas, como *Acacia* e *Schinopsis*, *Quercus ilex*, *Castanea* e *Pinus* (BELTRÁN-HEREDIA; SÁNCHEZ-MARTÍN; GÓMEZ-MUÑOZ, 2010).

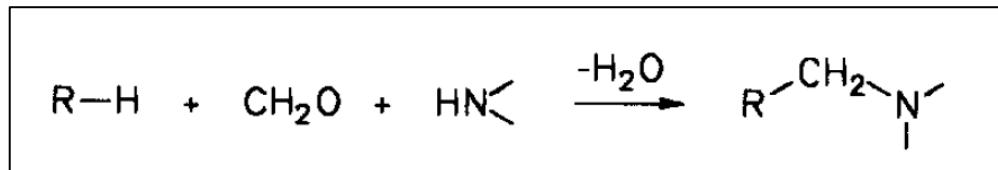
A estrutura química do tanino é muito diversa (ÖZACAR; ŞENGİL, 2003). Sua complexidade e as diferentes origens dificultam a determinação de sua estrutura química exata. Já foi confirmado que a sua eficiência como coagulante depende principalmente da sua estrutura química e o grau de modificação química que ele sofre em sua extração (HAMEED et al., 2016; ÖZACAR; ŞENGİL, 2003).

Essa modificação química realizada nos taninos adiciona grupos carregados positivamente, de forma a reagir com as partículas coloidais presentes na água, que em sua maior parte são carregadas negativamente (IBRAHIM; YASER, 2019), tornando-se, assim, capaz de neutralizar as cargas das partículas coloidais e não ser repelido. Ela é chamada de cationização.

O processo de cationização de taninos consiste em submeter o tanino a uma reação química a fim de conferir um caráter catiônico a ele. Dessa forma, as principais características como a solubilidade e estabilidade em diferentes valores de pH são mantidas, e novas são adicionadas. Essas novas características são as que conferem carga positiva e, consequentemente, a atividade coagulante. (BELTRÁN-HEREDIA; SÁNCHEZ-MARTÍN; DÁVILA-ACEDO, 2010)

Essa reação química foi descoberta accidentalmente em 1912, por um químico chamado Carl Mannich. A reação, batizada como reação de Mannich, é uma condensação com três componentes, em que um deles possui um átomo ativo de hidrogênio, que reagirá com formaldeído e uma amina (TRAMONTINI; ANGIOLINI, 1994). Na figura 3 está ilustrado o processo geral.

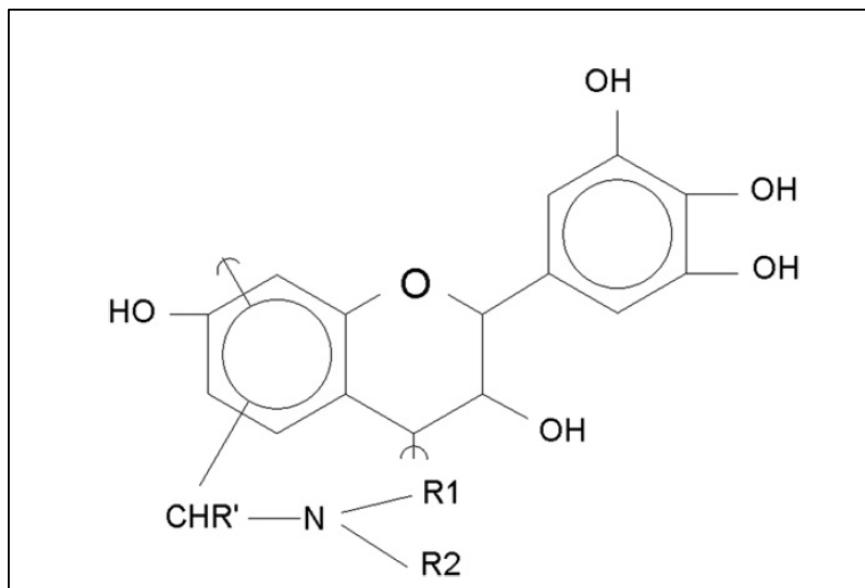
Figura 3 – Condensação de Mannich geral



Fonte: Tramontini e Angiolini, 1994.

O processo exato pelo qual os taninos comerciais são submetidos, no entanto, é protegido por patente (LAMB; DECUSATI, 2002). Dessa forma, pesquisadores podem apenas sugerir estruturas prováveis para os produtos, baseadas em pesquisas laboratoriais. Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia e Solera-Hernández (2010) propuseram uma possível estrutura para o Tanfloc (TANAC S.A), um dos taninos comerciais pesquisados. Essa estrutura pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Estrutura provável do Tanfloc



Fonte: Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia, Solera-Hernández, 2010.

Atualmente, há diversas pesquisas avaliando a eficiência de remoção de coagulantes à base de tanino, tanto de compostos diretamente extraídos de plantas e utilizados diretamente, quanto versões comerciais. Nnaji et al. (2013) utilizaram tanino extraído da planta *Anacardium occidentale* para a remoção de sólidos em suspensão de efluente obtido em indústria de fibrocimento. Os testes foram realizados em ensaios de Jarteste, e a remoção ótima obtida foi de 84%. Os autores concluíram que o extrato utilizado seria um bom substituto para coagulantes convencionais como o sulfato de alumínio.

Vaz et al. (2018) extraíram taninos da flor de *Musa sp.* e verificaram a capacidade de remoção de turbidez de um efluente de indústria de processamento de minério de ferro. Com a geração de diagramas de coagulação em ensaios de Jarteste, foi obtida remoção de 97,58% da turbidez utilizando os parâmetros ótimos encontrados em sua pesquisa.

Em outro trabalho, Beltrán-Heredia, Sánchez-Martín e Dávila-Acedo (2010) fizeram o processo de cationização de extratos naturais de tanino para verificar o seu impacto na eficiência do processo. Foram tratados quatro tipos de água: água sintética com adição de cor para simulação de efluente de indústria têxtil, água sintética com adição de surfactantes para simulação de efluente de lavanderia, água natural de um rio e efluente doméstico. Por meio de ensaios de Jarteste, foi verificado que quanto maior o grau de cationização (mais grupos amônio ( $\text{NH}_4$ )

introduzidos no coagulante), melhores os resultados da clarificação. Além disso, foi também avaliado o impacto da temperatura da água para o tratamento, e o resultado ótimo aconteceu em temperaturas próximas a 30º C.

Beltrán-Heredia, Sánchez-Martín e Gómez-Muñoz (2010) verificaram três diferentes extratos de Tanfloc (TANAC S.A.) para o tratamento de água natural de rio e efluente sintético de indústria têxtil. Foram realizados Jartestes convencionais, e os autores obtiveram remoção acima de 80%, tanto de turbidez da água do rio quanto de remoção de cor do efluente sintético. Eles verificaram, no entanto, que o volume de lodo formado foi alto, e com baixa densidade.

Beltrán-Heredia et al. (2009) avaliaram a eficiência de oito coagulantes, dentre eles quatro diferentes taninos comerciais (Silvafloc, Tanfloc, Acquapol C-1 e Acquapol S5T), na remoção de tintas utilizadas em indústrias têxteis. Em sua pesquisa, enquanto o sulfato de alumínio removeu menos de 5% da tinta nos ensaios preliminares, os taninos comerciais obtiveram resultados entre 50 e 65%. No entanto, foi verificado que a remoção depende da afinidade do coagulante com a tinta, já que foram verificadas remoções menores que 10% para a *Indigo Carmine* e maiores que 80% para a *Palatine Fast Black WAN* para o coagulante Acquapol C-1.

Beltrán-Heredia e Sánchez-Martín (2009) utilizaram o Tanfloc para o tratamento de efluente doméstico, também através de ensaios de Jarteste e obtiveram remoção quase completa de turbidez, 50% de remoção de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO, e 30% de surfactantes. Em outro trabalho, Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia e Solera-Hernández (2010) construíram uma planta piloto para o tratamento de água sintética de indústria têxtil, água sintética de lavanderia, efluente municipal e água superficial coletada de um rio. O coagulante utilizado também foi o Tanfloc. Os resultados da planta piloto foram superiores aos ensaios de Jarteste na remoção de cor (50%), surfactantes (75%), DBO<sub>5</sub> (40%) e DQO (60%), mas piores para a turbidez. No entanto, com a adição de um filtro lento de areia levou a remoção de turbidez a 100%, sendo recomendado pelos autores como agente coagulante tanto para efluentes domésticos e industriais quanto para água superficial.

Sánchez-Martín, González-Velasco e Beltrán-Heredia (2010) avaliaram a eficiência do coagulante Silvafloc (Silvateam), comparando-o com o Tanfloc, Moringa e Sulfato de alumínio na clarificação de água de rio. Por meio de ensaios de Jarteste convencionais, foram analisadas

as remoções de turbidez. Todos os coagulantes alcançaram remoção satisfatória (acima de 80%), embora a Moringa e o Tanfloc obtiveram os melhores resultados. A influência do aumento da temperatura da água foi também avaliada para o Silvaflc, em um intervalo de 10 a 40º C. Verificou-se que o processo tem maior eficiência para a menor temperatura, e se torna gradualmente pior com o aumento desta.

Grehs et al. (2019) compararam o Tanfloc com o Sulfato de Alumínio no tratamento de efluente doméstico por meio de ensaios de Jarteste. A remoção obtida pelo uso do alumínio foi de 94 e 88% para turbidez e cor, respectivamente, um pouco superior às do tanino, de 89 e 73,6%. No entanto, a dosagem de sulfato de alumínio requerida para esses resultados foi quatro vezes maior do que a de tanino. Os autores também fizeram análises microbiológicas e foi observado que a remoção de bactérias resistentes a antibióticos não foi satisfatória para o tanino.

Santos et al. (2018) compararam diferentes extratos de tanino comerciais, além do Sulfato de Alumínio para o tratamento de água residual de processamento de mandioca por meio de ensaios de Jarteste. A cor e turbidez remanescentes foram os parâmetros avaliados, e os melhores resultados obtidos foram os de Acquapol S5T (Acqua Química) e Tanfloc SL, com remoção de 77,5% e 88,5% de cor e turbidez, respectivamente.

Hameed et al. (2016) avaliaram o tratamento de um efluente doméstico. Testes preliminares foram feitos por meio de Jartestes utilizando os coagulantes Tanfloc e Policloreto de Alumínio (PAC). Os resultados de ambos os coagulantes foram comparáveis, com o PAC sendo superior apenas na remoção de fosfato. Foram feitas análises químicas para verificar a estrutura do tanino, e confirmaram aquela proposta por Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia e Solera-Hernández (Figura 4). As análises visuais dos flocos verificaram que aqueles formados pelo Tanfloc eram maiores e sedimentavam mais rapidamente. O Tanfloc foi então utilizado para o tratamento em planta piloto e os resultados obtidos de remoção foram de 90%, 63%, 60% e 60% para a turbidez, sólidos suspensos, DBO e DQO com dosagem de 35 mg/L de coagulante. Foi verificado também que o ponto ótimo de coagulação não foi aquele em que o potencial zeta estava mais próximo de zero, indicando que o mecanismo de coagulação não é o de neutralização de carga, sendo provavelmente o de formação de pontes.

Justina et al. (2018) compararam Tanfloc com PAC no tratamento de efluente de indústria de laticínios. Os experimentos foram realizados com ensaios de Jarteste. Foi verificado que o tanino consumiu menos alcalinidade da água (23,69% em comparação com o PAC), causou menor interferência na condutividade elétrica e foi eficiente em uma maior faixa de pH (5 a 10). Além disso, os flocos formados pelo tanino tiveram menor quebra durante o período de floculação. As remoções obtidas foram de aproximadamente 80, 90, 40 e 14% para cor, turbidez, DQO e Sólidos totais, respectivamente, com pequena diferença entre os dois coagulantes.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DOS FLOCOS

Segundo Chakraborti, Atkinson e Van Benschoten (2000), a necessidade de determinar as características dos flocos formados em um processo de coagulação/floculação é bastante reconhecida em diversas indústrias. São características como o tamanho, forma e densidade da partícula que determinarão a eficiência das colisões, além de sua velocidade de sedimentação. Conceitos de geometria fractal têm sido utilizadas para descrever as formas irregulares dos flocos.

Além da estrutura, outro fator importante é a força do floco. A resistência aos esforços a que ele é submetido impede a quebra em partículas menores, determinando também a eficiência da remoção de impurezas (WANG et al., 2009). As seguintes seções entrarão em detalhes quanto às propriedades citadas.

### 2.4.1 Força, quebra e reflocação

Um projeto de estrutura de unidades de floculação e decantação deve considerar a necessidade de minimizar a ocorrência de altos gradientes de velocidade, a fim de diminuir a quebra dos flocos. No entanto, regiões como a zona próxima ao rotor em uma unidade de floculação mecanizada, vertedores e cortinas de distribuição podem submeter os flocos a maiores esforços. Eles necessitam então resistir a esses esforços para evitar a quebra em partículas menores. (JARVIS et al., 2005)

Os mesmos autores explicam que, quanto à eficiência de remoção, partículas menores com mesmas características de densidade geralmente decantam com menor velocidade. Em sistemas de flotação por ar dissolvido, partículas que quebraram geralmente são capturadas menos eficientemente pelas bolhas, e quando há uso de membrana filtrante, flocos menores tendem a entupi-la.

A força do flocos é definida pela capacidade de resistir a esforços cortantes. Quando uma força aplicada a sua superfície é maior do que a força de ligação entre suas partículas, ele quebrará (HE et al., 2014). Assim, a força do flocos não é uma propriedade independente. A sua estrutura e a força da ligação entre as partículas são parâmetros inter-relacionados. Isso faz com que essa propriedade seja de mais difícil caracterização, e é um grande desafio descrever adequadamente de maneira teórica a força do flocos. (HERMAWAN et al., 2004)

Yeoung e Pelton (1996) explicam que os métodos mais comuns de medir a força do flocos são com agitação em um Jarteste, em que há certo controle quanto aos esforços a que as partículas estão submetidas. Dessa forma, a análise da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) pode ser usada para determinar o quanto os flocos foram quebrados, e assim quantificar sua força. No entanto, os autores consideram essa metodologia não muito precisa.

Assim, em sua pesquisa, esses autores verificaram a força de flocos utilizando elementos de micromecânica para quebrar flocos individualmente e medir sua força. Dessa forma, eles puderam concluir que, contrário à concepção mais comumente feita, o tamanho do flocos não possui correlação com a sua força. Flocos maiores podem ainda ser compactos o suficiente para resistir a mais esforços, e a sua quebra depende apenas da seção transversal mais estreita de ligação entre partículas e sua resistência.

Um parâmetro utilizado para quantificar a força do flocos é o Fator de Força (FF), que é definido pela razão entre o tamanho do flocos após a quebra e o tamanho original em uma taxa de agitação específica (HE et al., 2014). Sua forma está descrita na Equação 1.

$$FF = \frac{d_2}{d_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

FF é o fator de força

$d_2$  é o diâmetro médio dos flocos após a quebra

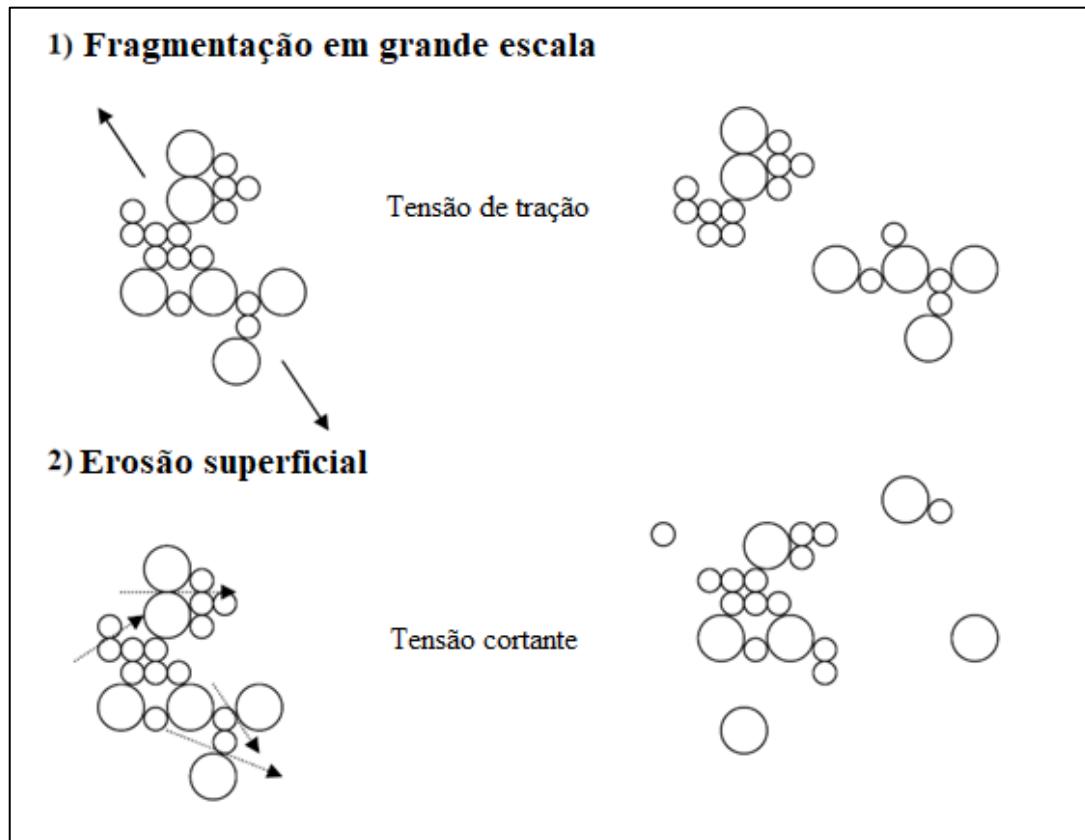
$d_1$  é o diâmetro médio dos flocos antes da quebra.

Dessa forma, um fator de força indica a redução percentual média do diâmetro dos flocos após o período de ruptura. Um fator de força maior que 100 indica ainda que o esforço maior a que os flocos foram submetidos não foi suficiente para rompê-los, e essa agitação elevada causou ainda um aumento numérico de choques entre partículas, estimulando a sua agregação.

No entanto, por esse ser um parâmetro que depende das taxas de agitação durante a quebra, comparação entre fatores de força de diferentes sistemas só é possível para condições de quebra similares (JARVIS et al., 2005). Fitzpatrick, Fradin e Gregory (2004) mostraram que o aumento da temperatura, por exemplo, afeta negativamente a força do floco.

A força do floco é determinante no tamanho dos flocos. O diâmetro máximo de um floco em um sistema é definido por duas forças opostas: as forças de ligação das partículas do floco e a força de quebra turbulenta do fluido (TAMBO, 1979). Essa quebra pode se dar por dois diferentes mecanismos, sendo eles a fragmentação em grande escala e a erosão superficial (Figura 5) (JARVIS et al., 2005).

Figura 5- Tipos de quebra de flocos



Fonte: Adaptado de Jarvis et al., 2005.

Os mesmos autores explicam que a erosão superficial é a remoção de partículas pequenas da superfície do floco, aumentando, dessa forma, a quantidade de partículas pequenas mais próximas às primárias, enquanto a fragmentação em grande escala é a divisão dos flocos em partes de tamanho similar, sem dessa forma aumentar a concentração de partículas primárias.

Ainda assim, não há impedimentos para que flocos rompidos se regenerem, dadas condições adequadas para tal, já que os fenômenos de interação que levam à sua formação são físicos (VOLTAN, 2007). Dessa forma Francois (1987) descreve a Equação 2 para quantificar a capacidade do floco de se regenerar após um novo período de reflocação. Assim como o FF, esse é um parâmetro que descreve apenas o comportamento daquele coagulante para os parâmetros de flocação e quebra em que foi analisado.

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

Onde:

FR é o fator de recuperação e

$d_3$  é o diâmetro médio dos flocos ao final da reflocação.

Um fator de 100 indica que ao final do período de reflocação, o diâmetro médio dos flocos retornou ao tamanho que possuíam antes da quebra. Um fator maior significa que os flocos não apenas voltaram ao tamanho original como conseguiram crescer ainda mais. Assim, quanto maior esse parâmetro, maior a capacidade de recrescimento do floco.

Há diversos estudos referentes à habilidade de reflocação de flocos quebrados. Yukseken e Gregory (2003), utilizando água sintética com adição de turbidez, verificaram que flocos formados por Sulfato de alumínio e PAC, quando submetido à situação de quebra, possuíam capacidade limitada de reflocação, enquanto flocos formados pelos polieletrólitos testados se regeneravam praticamente ao tamanho original. Além disso, o tempo a que os flocos ficavam submetidos a altos  $G_{mv}$  foi inversamente proporcional ao tamanho final dos flocos, indicando assim ser um fator relevante à reflocação.

Yu et al. (2011) testaram o efeito do  $G_{mv}$  de floculação no recrescimento dos flocos e verificaram que, embora o tamanho final dos flocos antes da quebra dependia tanto do tempo de mistura rápida quanto da velocidade da floculação, as condições antes da quebra tiveram muito pouco efeito na capacidade de reflocação após um período de quebra.

Yu, Gregory e Campos (2010) comprovaram uma relação entre o mecanismo de coagulação e a capacidade de reflocação. Em sua pesquisa, flocos formados por Sulfato de alumínio, quando sob mecanismo de neutralização de carga conseguem se regenerar completamente, enquanto flocos formados com dosagens mais altas (onde predomina o mecanismo de varredura) possuem capacidade limitada de reflocação. Em outro trabalho, os mesmos autores testaram o efeito da adição de novos coagulantes durante o período de quebra, e verificaram que alguns coagulantes podem levar ao recrescimento dos flocos a tamanhos até maiores do que os iniciais, enquanto outros não causavam nenhum efeito. (YU; GREGORY; CAMPOS, 2011)

#### 2.4.2 Dimensão Fractal

Quando há agregação de partículas sólidas, pode não haver coalescência e os aglomerados resultantes podem adotar várias diferentes formas. Mesmo no caso mais simples, de esferas idênticas, o agrupamento pode ser feito de diversas formas, e, quanto mais agregados, maior o número de estruturas possíveis. Em processos reais de floculação, há flocos contendo centenas ou milhares de partículas primárias e é impossível determinar detalhadamente a sua estrutura. (GREGORY, 1997)

Dessa forma, percebeu-se que os flocos formados em um processo de coagulação possuem uma característica fractal. Isso significa que ele é formado por partículas menores com forma semelhante ao todo, tornando-o invariante em diferentes escalas (LI et al., 2006). Wiesner (1992) explica que, devido a essa característica, é possível encontrar relações entre a dimensão do flocos e propriedades como densidade de massa e área superficial.

Os conceitos da geometria fractal permitem uma melhor descrição da superfície de agregados porosos, que não são bem definidos na geometria Euclidiana baseada no cálculo de volume a partir da multiplicação das dimensões de cada plano. Assim, torna-se possível definir objetos heterogeneamente formados, com fronteiras irregulares com o uso de relações não lineares. (CHAKRABORTI; ATKINSON; VAN BENSCHOTEN, 2000)

Dentro desse contexto, é possível então definir diferentes tipos de dimensão fractal. A dimensão fractal tridimensional de massa faz uma relação entre a massa do flocos ( $m$ ) e sua medida linear de tamanho ( $L$ ), como na Equação 3.

$$m \propto L^{D_3} \quad (3)$$

Onde  $D_3$  é a dimensão fractal de massa, com valor entre 1 e 3 no espaço tridimensional.

Nesse conceito, a dimensão fractal tridimensional de massa mede a escala e nível de rugosidade da estrutura, permitindo a comunicação entre conceitos:  $m$  pode representar a massa e  $L$  o raio de um agregado como todo; ou em uma escala muito menor, onde  $L$  pode representar uma fronteira esférica imaginária centrada em uma partícula primária única e  $m$  representa a

quantidade de massa contida naquela esfera. A constante de proporcionalidade será diferente, mas a escala fractal em ambos os casos é a mesma. (BUSHELL et al., 2002)

A dimensão fractal bidimensional relaciona a área projetada ( $A_p$ ) da partícula e o comprimento característico dos agregados (I), visto na Equação 4.

$$A_p \propto I^{D_2} \quad (4)$$

Onde  $D_2$  é a dimensão fractal bidimensional. Nesse conceito, agregados mais compactos possuem uma alta dimensão fractal, próxima a 2, enquanto dimensões menores indicam estruturas altamente ramificadas (CHAKRABORTI; ATKINSON; VAN BENSCHOTEN, 2000).

#### 2.4.3 Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP)

Após o processo de coagulação/flocação, são formadas partículas com uma gama de dimensões, desde coloides submicrométricos a agregados de alguns milímetros (LI; ZHANG, 2003). Lawler (1997) explica que suspensões na água têm, tipicamente, distribuições de tamanho de partículas que são essencialmente contínuas. Isso significa que, independentemente de quantos grupos de tamanhos uma amostra é dividida, haverá partículas em cada um deles.

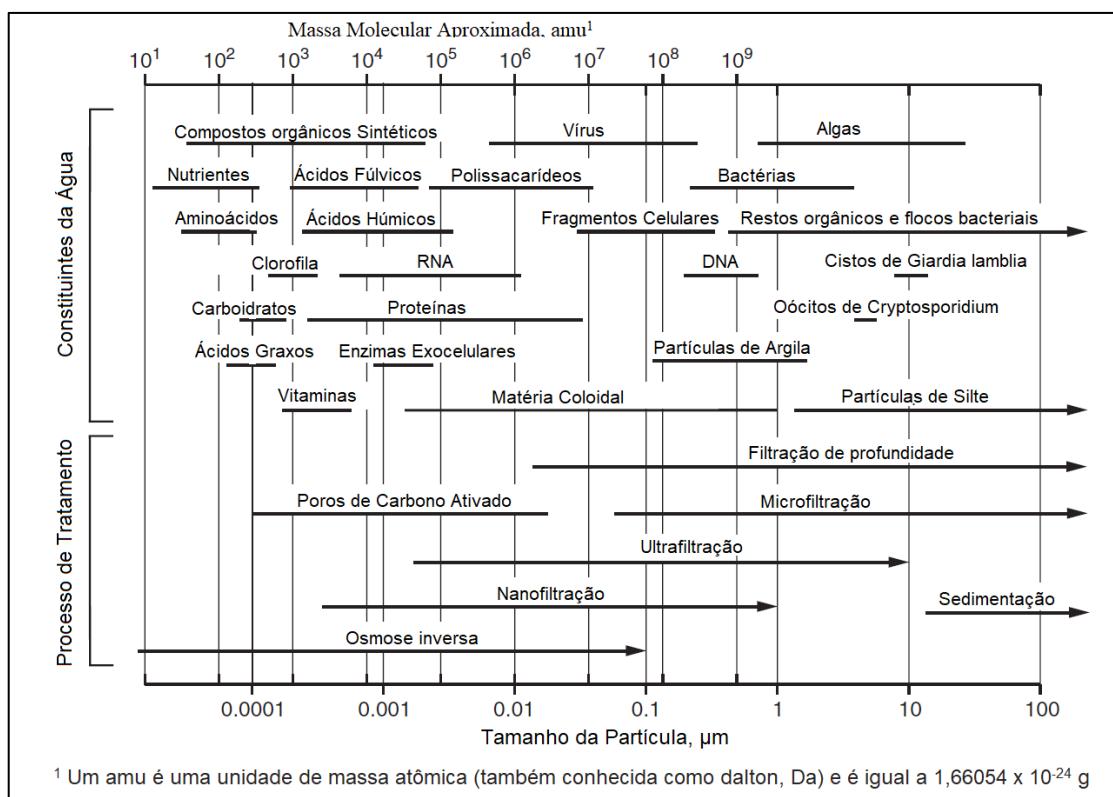
O mesmo autor então explica que uma curva da função cumulativa de concentração numérica para cada tamanho de partícula ( $N(d_p)$ ) está aumentando continuamente até que o maior tamanho de partícula seja atingido. Assim, entra o conceito da função da DTP, como a inclinação dessa curva (Equação 5).

$$\frac{d(N(d_p))}{dd_p} = A \times d_p^{-\beta} \quad (5)$$

Onde A é o coeficiente de densidade,  $d_p$  é o diâmetro da partícula e  $\beta$ , o coeficiente de inclinação.

O espectro de tamanho de partículas é uma técnica básica para descrever concentrações de partículas. Esse parâmetro é útil pois propriedades de partículas, como a sua massa e velocidade de sedimentação, são dependentes de seu tamanho (JACKSON et al., 1995). Na Figura 6 estão exemplificados os diferentes tipos de partículas e sua faixa de dimensão.

Figura 6 – Caracterização de matéria particulada em água natural por tipo e tamanho e métodos apropriados de tratamento



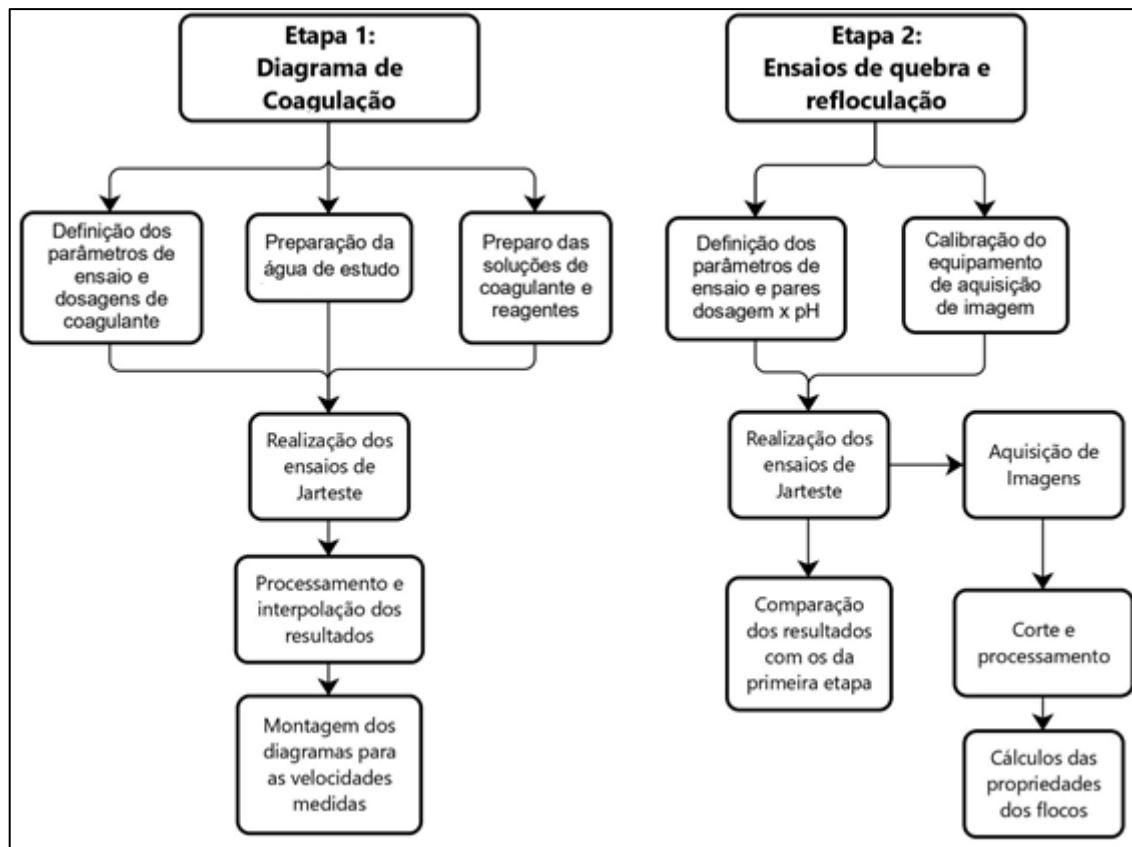
Fonte: Adaptado de Crittenden et al., 2012.

Crittenden et al. (2005) explicam que a quantificação de partículas pode ser realizada por diversos métodos, como técnicas gravimétricas, equipamentos eletrônicos de contagem de partículas e observação microscópica. Os autores enfatizam que, ainda que usualmente use-se medidas como turbidez para estimar a concentração de partículas em um processo de tratamento de água, o monitoramento delas pode auxiliar na sua compreensão e controle, uma vez que processos de tratamento são projetados baseados em sedimentação e exclusão de tamanho.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordadas as metodologias utilizadas para a realização de todas as etapas da pesquisa, assim como os materiais empregados para a sua realização. Na Figura 7 está apresentado o fluxograma geral das etapas da pesquisa.

Figura 7 – Fluxograma geral



Fonte: do Autor, 2020.

#### 3.1 ÁGUA DE ESTUDO E PRODUTOS QUÍMICOS

A água utilizada para a obtenção do diagrama de coagulação, assim como para a técnica dedicada de coleta e análise de imagens foi preparada com o uso de um deionizador e armazenada em caixa d'água de 250 litros. Para conferir cor a ela, foi usada uma água matriz. Essa matriz foi preparada pela adição de ácido húmico comercial (Sigma-Aldrich) em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), para que o ácido solubilizasse. Essa mistura foi então agitada por 30 minutos e passada por um filtro de grade 41 (Whatman), com porosidade de 8

µm, para evitar a presença de partículas causadoras de turbidez. Essa água matriz foi então adicionada à caixa d'água e a mistura foi homogeneizada até a cor aparente desejada. A cor foi medida com o espectrofotômetro DR 5000 da marca *Hach*. As medidas realizadas na água bruta produzida estão na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Características da água bruta produzida

	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Cor Aparente</b>	107 ± 1	uH (mgPt-Co/L)
<b>Cor real</b>	92 ± 3	uH (mgPt-Co/L)
<b>Turbidez</b>	2,15 ± 0,19	UNT

Fonte: Do Autor, 2021.

O Coagulante utilizado nos ensaios foi o Tanfloc SL (TANAC S.A.), em forma líquida, diluído em água destilada para uma solução 10% em volume, de forma a facilitar o manuseio. Foram também utilizadas soluções de ácido clorídrico (HCl) e Hidróxido de Sódio (NaOH) para o ajuste do valor de pH, em concentrações de 0,1 e 0,5 M.

### 3.2 DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO

O diagrama de coagulação para o Tanino foi obtido por meio de ensaios padrão de Jarteste com um aparelho da marca Nova Ética, modelo 218/6 LDB. Foram definidos o tempo de mistura rápida de 10 segundos, tempo de floculação de 20 minutos e, após o fim do tempo de floculação, a agitação foi interrompida, de forma que os flocos formados sedimentassem. Foram colhidas então amostras da água nos tempos referentes às velocidades de sedimentação de 5; 2,5 e 1 cm/min.

As dosagens de coagulante foram escolhidas de forma a encontrar a menor possível em que a coagulação ocorre, e aumentadas gradativamente para analisar as mudanças de comportamento. Elas foram: 25; 37,5; 50; 62,5; 75; 87,5; 100; 112,5; 125; 137,5; 150; 162,5; 175; 187,5; 200; 212,5; 225; 237,5; 250; 262,5; 275; 287,5 e 300 mL/L, totalizando 23 concentrações. Os valores de pH de coagulação foram medidos no pHmetro modelo HI 8315 da marca *HANNA Instruments*. Para construção do diagrama de coagulação os valores de pH foram ajustados de forma a se obter intervalos próximos a 0,5 entre eles. No entanto, devido à alteração do valor

de pH provocada pelo próprio coagulante, não foi possível padronizá-los, de forma que foram priorizados menores intervalos próximo aos pontos críticos de início e fim da faixa em que havia coagulação. Em média foram avaliadas 17 condições de pH para cada dosagem de coagulante.

Os valores de cor aparente resultantes de cada coleta foram medidos no espectrofotômetro e esses dados foram então utilizados para a elaboração dos diagramas de remoção de cor para os pares de dosagem de coagulante x pH com o auxílio do *Software Surfer 10*.

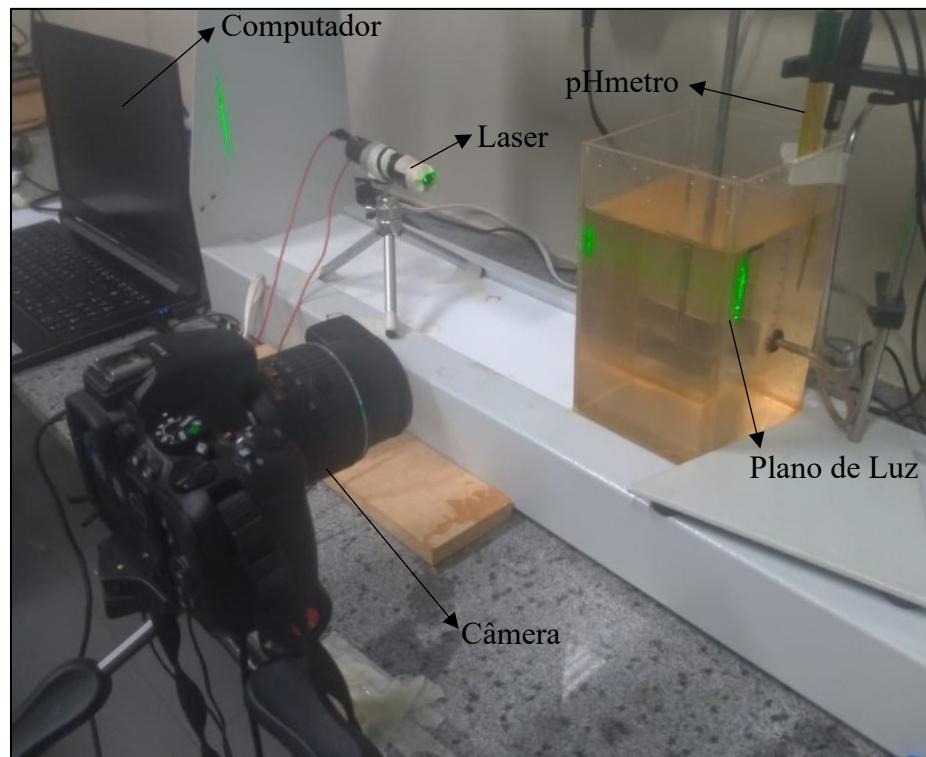
### 3.3 ENSAIOS DE QUEBRA E REFLOCULAÇÃO

Para esses ensaios, foram selecionados 5 pontos distintos do diagrama de coagulação, em diferentes pares de dosagem de coagulante x pH. Os pontos escolhidos foram aqueles em que houve remoção de cor. Ensaios de Jarteste foram novamente realizados, e os parâmetros iniciais de mistura rápida foram os mesmos utilizados para a etapa de criação do diagrama.

Junto ao jarro foram posicionados um plano de luz e uma câmera digital para a obtenção das imagens (Figura 8). Esse plano de luz foi produzido por meio de um laser com potência de 98 W, paralelo à face frontal do jarro a uma distância de 1,2 centímetros, e a sala foi totalmente escurecida para que fossem capturadas imagens apenas dos flocos onde o faixo do laser incidia. A câmera digital utilizada possui resolução de 6000x4000 *pixels* e ficou apontada para uma seção do jarro com foco no plano de luz formado.

Foi garantido que a posição da câmera fosse a mesma durante todos os ensaios. Ela ficou conectada a um computador, e por meio do *software Camera Control Pro 2*, foram feitas as configurações das imagens, os disparos e o armazenamento das fotos. A sala foi então escurecida, de forma que o plano formado pelo laser fosse a única fonte de luz, e a câmera foi programada para tirar um conjunto de 3 fotos por segundo dez vezes, nos tempos de 0:30, 1:30, 3:00, 5:00, 10:00, 15:00 e 20:00 minutos.

Figura 8 – Aparatos experimentais



Fonte: do Autor, 2020.

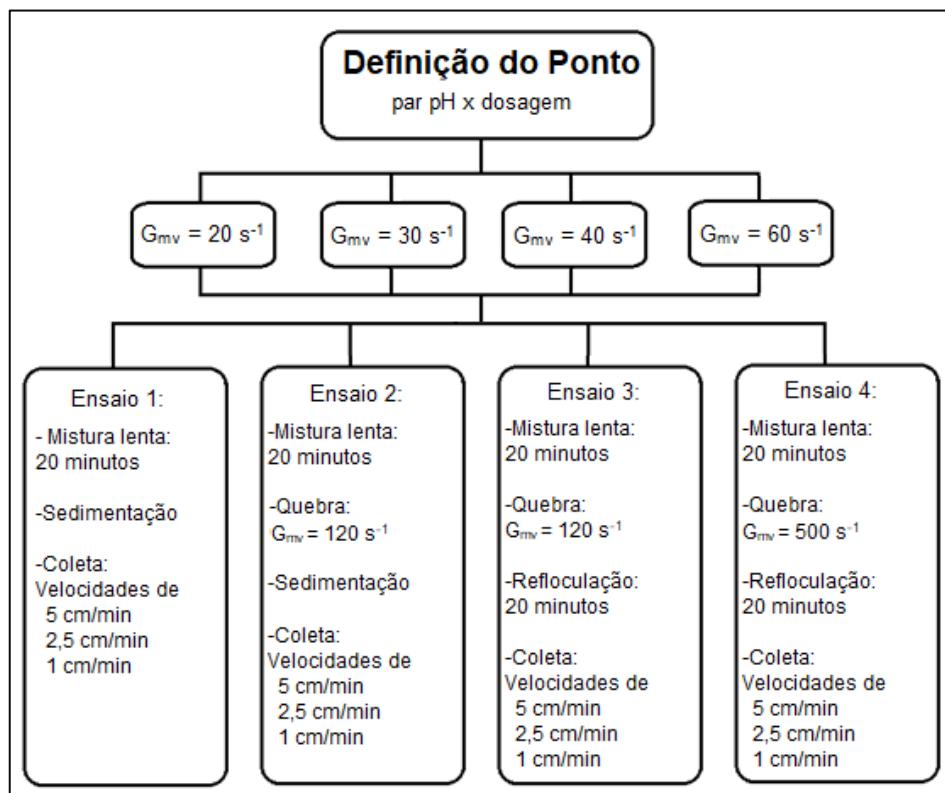
Foram realizados 16 ensaios: para cada um dos 4  $G_{mv}$  de floculação selecionados, foram realizados 4 ensaios, totalizando 48 ensaios fotografados. Os  $G_{mv}$  foram de 20, 30, 40 e 60  $s^{-1}$ , e para cada um deles foi feito um ensaio inicial idêntico ao da primeira etapa. Depois, foi realizado um segundo ensaio em que, ao final do tempo de floculação, os flocos foram quebrados com  $G_{mv}$  de 120  $s^{-1}$  e deixados para sedimentar, quando amostras foram coletadas para as mesmas velocidades de sedimentação do primeiro ensaio.

Posteriormente, foram realizados o terceiro e o quarto ensaios do ponto, referentes à quebra e reflocação, onde, ao fim da etapa inicial de floculação, os flocos foram quebrados, um a 120  $s^{-1}$  e o outro a 500  $s^{-1}$ . A duração definida para o período de quebra foi de 10 segundos. O  $G_{mv}$  de 120  $s^{-1}$  foi escolhido por representar um grau de agitação que pode ocorrer em pontos específicos de uma ETA, como cortinas de distribuição e pontos mais próximos ao rotor de um agitador mecânico. Dessa forma, pôde-se investigar se essa ocorrência teria impacto significativo na qualidade do processo de floculação. Já o gradiente maior, de 500  $s^{-1}$  foi selecionado de forma a causar uma quebra significativa dos flocos e avaliar o comportamento de reflocação.

Depois desse período de quebra, ocorreu um novo período de floculação, idêntico ao anterior, de forma a permitir o recrescimento dos flocos. Imagens foram capturadas logo após a quebra e depois nos mesmos tempos que o ensaio anterior.

Ao fim desse período de reflocação, amostras foram coletadas novamente nos mesmos tempos, e foi medida a cor e a turbidez das amostras em todos esses ensaios de forma a verificar se há alteração nos resultados de remoção com a adição dos períodos de quebra. Essa etapa está resumida na Figura 9.

Figura 9 – Ensaios de quebra e reflocação



Fonte: do Autor, 2020.

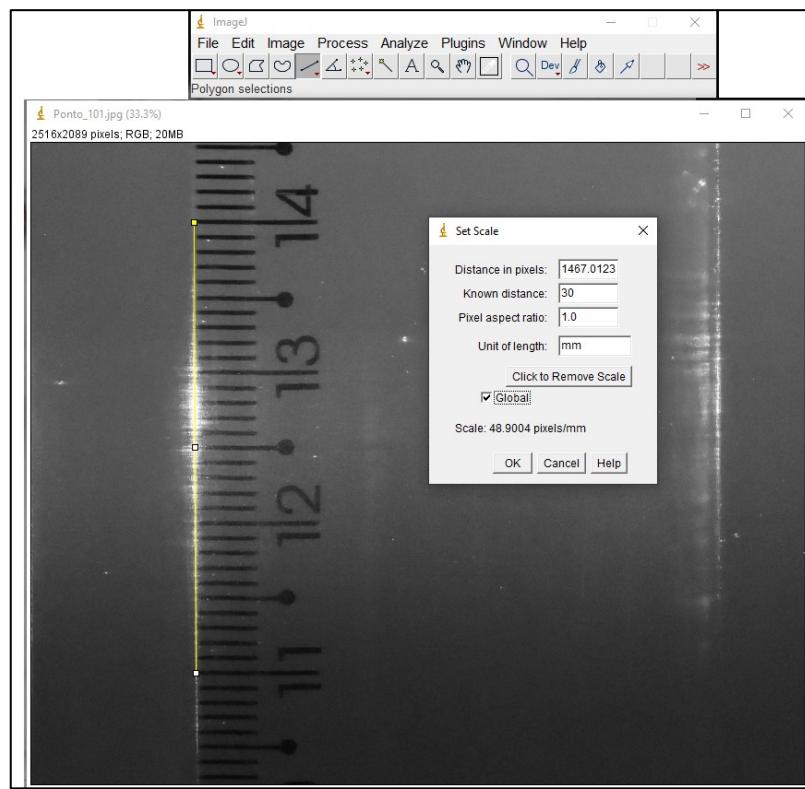
### 3.4 ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Após a execução dos ensaios de jarteste, as imagens obtidas passaram por um processo de tratamento e processamento. Inicialmente, o *software* JPEGCrops foi utilizado para o corte das fotos, de forma a remover áreas com interferência de elementos como a parede lateral do jarro

e a região da pá do misturador do aparelho. Assim, foi possível visualizar apenas a região do plano de luz formado pelo laser óptico com as os flocos iluminados.

As figuras já cortadas foram então processadas com o uso do *Software ImageJ*. Nele, com o uso das imagens de calibração feitas antes de cada um dos ensaios (Figura 10), foi possível converter as dimensões em pixels para dimensões reais, em milímetros (mm). Essa conversão se dá pela inserção de uma reta no programa, por cima da régua posicionada na calibração, e a inserção do tamanho real da reta (em milímetros). Com essa conversão, permitiu-se medir então as dimensões reais dos flocos capturados nas imagens. Além disso, o programa permite definir o nível de iluminação necessário para que um objeto seja considerado, tornando a imagem em puro preto e branco (Figura 11).

Figura 10 – Foto de calibração

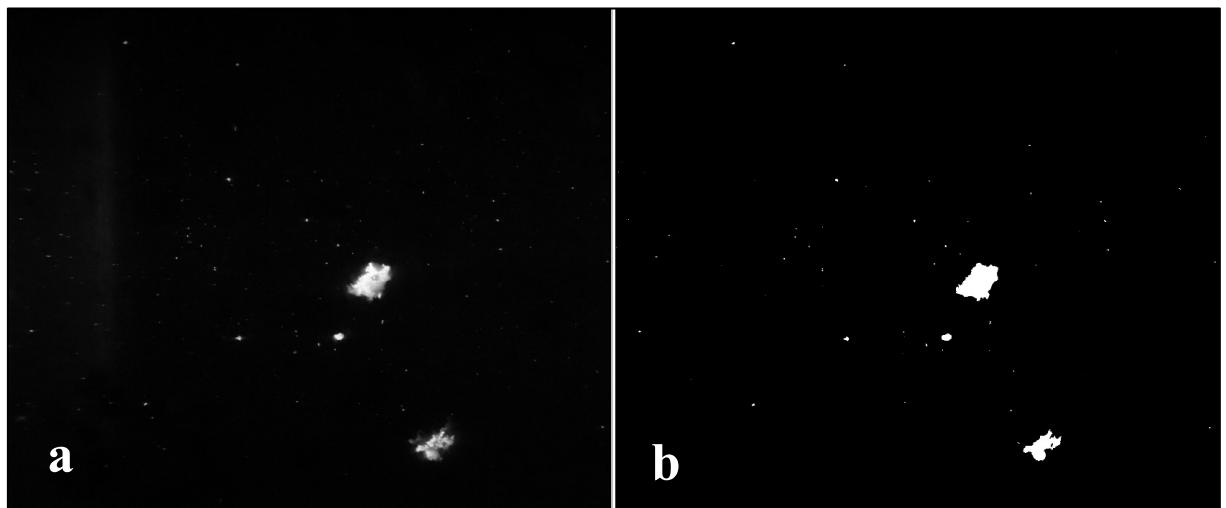


Fonte: do Autor, 2020.

Ao fim dessas etapas, foi possível então configurar as análises a serem realizadas nas imagens, como as dimensões das partículas, suas respectivas áreas, o maior e menor diâmetro, que eram apresentadas pelo programa em forma de tabela, possibilitando outros cálculos no *Software Microsoft Excel*. Para essas análises, foram desconsiderados os flocos analisados que possuíam

diâmetro menor do que dez vezes o tamanho do pixel, por estes serem mais difíceis de resolver e suas análises não ficam precisas, segundo metodologia utilizada por Moruzzi et al. (2017) e Chakraborti et al. (2003).

Figura 11 – Foto original e foto binarizada



Legenda: a) Foto original, b) Foto binarizada

Fonte: do Autor, 2020.

### 3.5 CÁLCULOS DOS PARÂMETROS DE FLOCULAÇÃO

Para os cálculos dos três parâmetros de floculação avaliados nessa pesquisa, foi criado um macro no Microsoft Excel, automatizando a separação e classificação dos flocos a partir do arquivo de saída do *software* de processamento das imagens.

#### 3.5.1 Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP)

Para o cálculo da DTP, inicialmente foi avaliado, dentre todos os tamanhos observados em todos os ensaios realizados, qual era o maior, o menor e a região em que a maioria dos flocos se encontravam. Dessa forma, foi possível determinar quais seriam os intervalos de tamanho do flocos para cada uma das faixas de DTP.

Após essa avaliação, foram contabilizados então, dentre todas as imagens de cada uma das faixas de tempo, quantos flocos se encontravam em cada uma das faixas predefinidas. Depois, ainda para cada faixa de tempo, foi calculada a frequência absoluta e acumulada das faixas de tamanho, permitindo a geração dos gráficos.

### 3.5.2 Dimensão Fractal

Foi calculada uma dimensão fractal bidimensional que relaciona o diâmetro de feret dos flocos medidos com a área que eles ocupam no plano capturado. Para o seu cálculo, foram criados gráficos log x log das dimensões avaliadas, separadas por cada tempo em cada ensaio. A dimensão fractal é então definida pela inclinação da linha de tendência dos dados, variando de 1 a 2, onde o valor máximo representa um círculo perfeito. Dessa forma, esse parâmetro relaciona a proximidade dos flocos formados com um círculo perfeito.

### 3.5.3 Força do flocos

O parâmetro de força (ou resistência) do flocos seria definido pelos dois fatores já mencionados: o FF (Equação 1) e o FR (Equação 2). No entanto, para as características dos ensaios realizados, observou-se que o FR, utilizando essa equação, não poderia ser utilizado, devido a situações em que os flocos não foram quebrados, e o tamanho médio dos flocos após o período de agitação elevada foi maior do que o anterior, gerando resultados com divisor muito próximo ou igual a 0, impossibilitando uma referência adequada para análise. Assim, foi definido como o Fator de Recuperação para esse estudo, a Equação 6 abaixo.

$$FR = \frac{d_3 - d_2}{d_1} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

FR é o fator de recuperação e

$d_3$  é o diâmetro médio dos flocos ao final da reflocação.

Para esses cálculos, foram calculados os três diâmetros médios, referentes aos tempos de 20 minutos ( $d_1$ ), imediatamente após a quebra ( $d_2$ ) e ao tempo final de 40 minutos ( $d_3$ ) dos ensaios 3 e 4 de cada  $G_{mv}$  de flocação em cada ponto. Esses diâmetros médios foram então utilizados nas equações, e representam, percentualmente, o quanto o tamanho dos flocos foi alterado em cada uma das situações a que os flocos foram submetidos.

Um FR de 0% indica que, após a quebra os flocos não cresceram novamente, se mantendo no mesmo tamanho médio ao longo de todo o período de reflocação. Valores negativos indicam

que seu tamanho reduziu ao longo dos últimos 20 minutos dos ensaios. Além disso, se a soma do FR com o FF de um determinado ensaio for igual a 100%, a regeneração dos flocos foi completa, e qualquer valor excedente indica que o floco cresceu mais durante a reflocação do que o seu tamanho ao final do período inicial de floculação.

Nesses ensaios, foram também realizadas análises estatísticas de variância (ANOVA) para a verificação da influência dos  $G_{mv}$  tanto de floculação quanto de quebra nos resultados obtidos. Quando o método ANOVA não pôde ser realizado devido às condicionantes ao seu uso foi utilizado o método não-paramétrico de Kruskal-Wallis.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados para cada etapa da pesquisa, assim como os cálculos de cada uma das propriedades do flocos estudadas. Eles são então discutidos, a fim de avaliar o comportamento do coagulante pesquisado e entender os mecanismos e as alterações causadas pelas mudanças de condição aplicadas na estrutura do flocos formado.

### 4.1 DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO

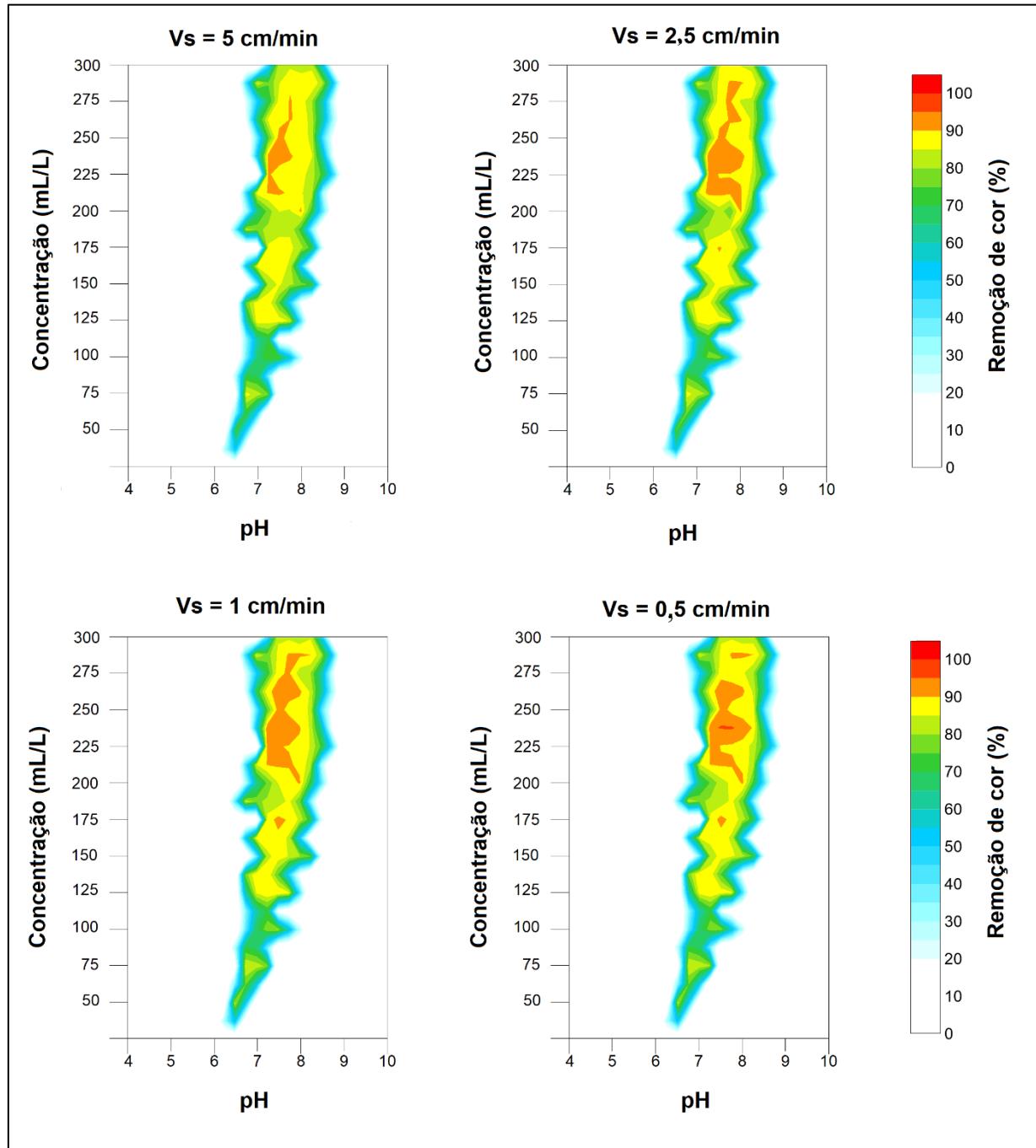
Com a elaboração dos diagramas de flocação obtidos na pesquisa, foi possível verificar que a formação de flocos se inicia na dosagem de 37,5 mL/L, apenas em valores de pH próximos a 6,42 e com remoção de 75% da cor. À medida em que a dosagem de coagulante aumenta, essa faixa de valores de pH se alarga, se deslocando para o intervalo básico, e a remoção também aumenta. A maior remoção foi encontrada na dosagem de coagulante de 250 mL/L, de 94%.

No entanto, nas últimas concentrações estudadas, verificou-se uma redução tanto da faixa de pH em que há coagulação quanto na remoção máxima encontrada. Como o coagulante confere também cor elevada à água devido à sua composição, em pontos em que não há coagulação ou esta é inadequada, a cor final pode chegar a ter um aumento de quase 300% da cor inicial. Esse fato pode explicar a redução da eficiência de remoção para concentrações mais elevadas, já que a quantidade de matéria a ser removida nesse processo é maior.

Foi observado que a adição do coagulante causa uma redução do pH da água bruta, uma vez que não há alcalinidade na água para impedir esse fenômeno, dificultando assim o ajuste para a faixa de coagulação. Essa variação se torna muito acentuada para as concentrações mais altas, aumentando também a quantidade de reagente controlador de pH utilizado para que haja a coagulação. Dessa forma, ainda que haja resultados tão elevados quanto os anteriores, o aumento da dosagem de coagulante utilizada não tem utilidade prática para esse estudo.

Na figura 12 está apresentada a remoção de cor obtida para cada tempo de coleta. Foi verificado que a maioria dos flocos têm velocidade de sedimentação acima de 2,5 cm/min, visto que o resultado possui pouca alteração nos últimos tempos de coleta. Todos os resultados obtidos utilizados para a geração do gráfico podem ser vistos no Apêndice A.

Figura 12 – Remoção de cor para cada velocidade de sedimentação ( $V_s$ )



Fonte: do Autor, 2021.

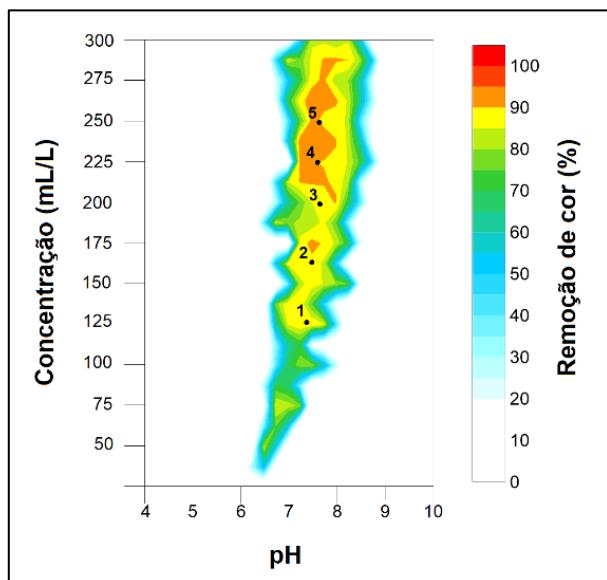
A portaria GM/MS nº 888 (BRASIL, 2021) estabelece um valor máximo aceitável de cor aparente para a água tratada de 15 uH. Esse valor representa uma eficiência de remoção de aproximadamente 86% para a água utilizada nesse estudo. Portanto, para fins de abastecimento público, verificou-se que o coagulante possui eficiência suficiente de remoção na maior parte de sua faixa de coagulação já desde a primeira velocidade de sedimentação analisada, sendo ela toda a faixa amarela e laranja dos gráficos. Portanto, para a água utilizada nessa pesquisa,

dosagens de coagulante maiores do que 225 mL/L não são vantajosas, uma vez que há um aumento de custo (referente à maior quantidade de coagulante utilizada e ajuste de valores de pH), sem haver aumento na remoção de cor obtida, e concentrações tão baixas quanto 125 mL/L já atenderiam aos requisitos normativos brasileiros.

#### 4.2 ENSAIOS DE QUEBRA E REFLOCULAÇÃO

Para os ensaios com quebra e reflocação, foram selecionados 5 pontos do diagrama de coagulação, considerando-se aqueles com boa remoção de cor (acima de 86%). Esses pontos, pares de pH de coagulação x Dosagem de coagulante, podem ser vistos na Figura 13 e estão discriminados na Tabela 1.

Figura 13– Posição dos pares de pH de coagulação x Dosagem de coagulante



Fonte: do Autor, 2021.

Tabela 2 – Pontos para análise nos ensaios de quebra e reflocação

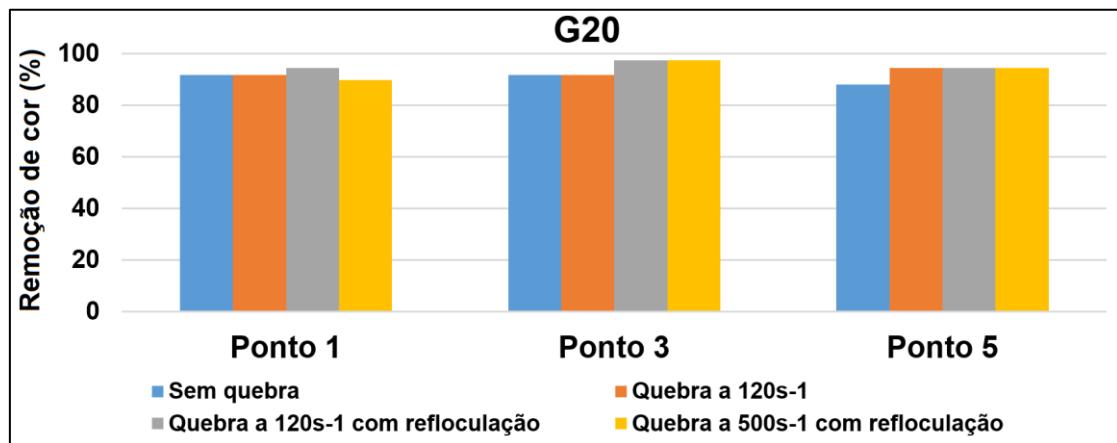
Ponto	Dosagem de Coagulante	pH de coagulação
1	125	7,40
2	162,5	7,50
3	200	7,80
4	225	7,70
5	250	7,75

Fonte: do Autor, 2021.

#### 4.2.1 Remoção de cor e turbidez

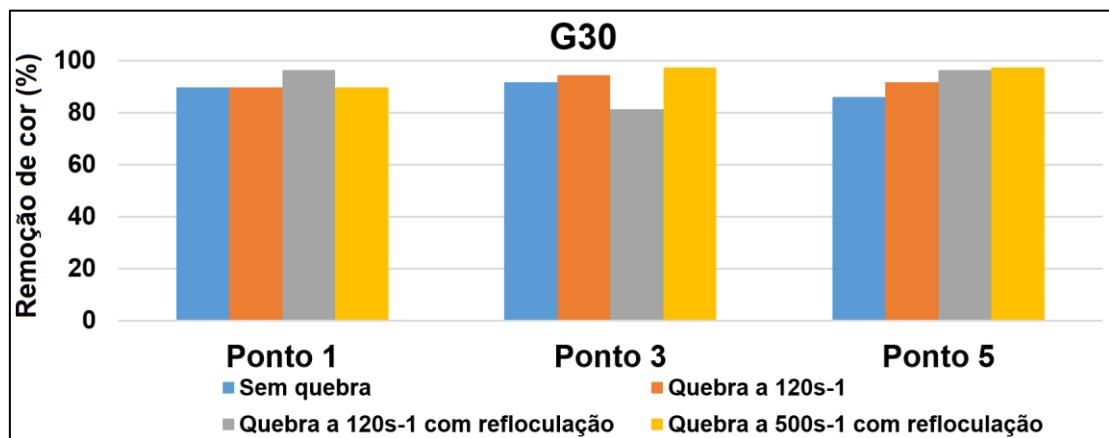
Para os pontos 1, 3 e 5 foi medida a cor final após cada um dos 4 ensaios realizados em cada um dos  $G_{mv}$  de floculação utilizados. Essa análise não foi estendida aos outros pontos devido a limitações no tempo de pesquisa. Dessa forma, foi possível verificar se o processo de clarificação da água foi afetado pelas situações de quebra a que os flocos foram submetidos. Os resultados obtidos para estes três pontos (1, 3 e 5), considerando-se cada um dos  $G_{mv}$  de floculação estudados estão dispostos nas Figuras 14, 15, 16 e 17.

Figura 14 - Remoção de cor nos ensaios realizados nos três pontos utilizando  $G_{mv}$  de floculação de  $20\text{ s}^{-1}$



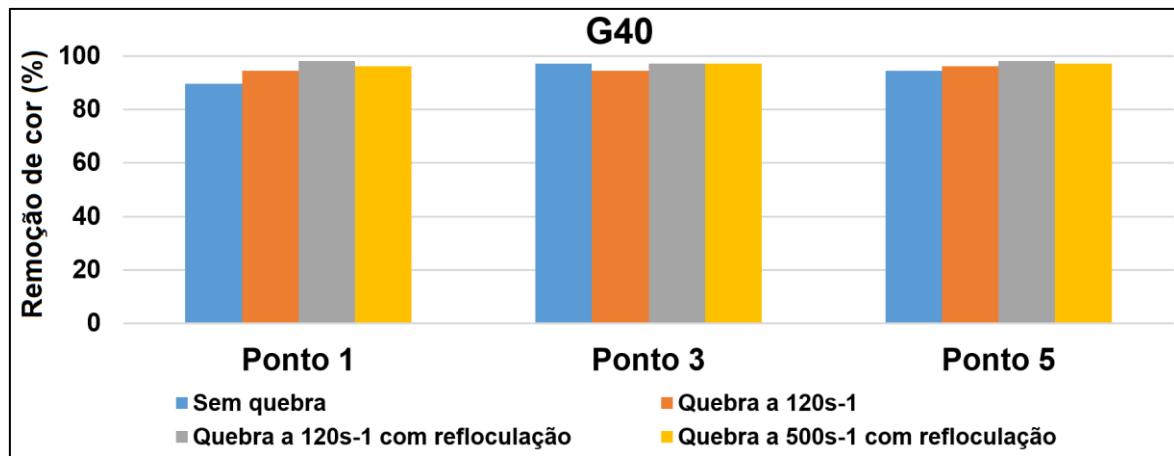
Fonte: do Autor, 2021.

Figura 15 - Remoção de cor nos ensaios realizados nos três pontos utilizando  $G_{mv}$  de floculação de  $30\text{ s}^{-1}$



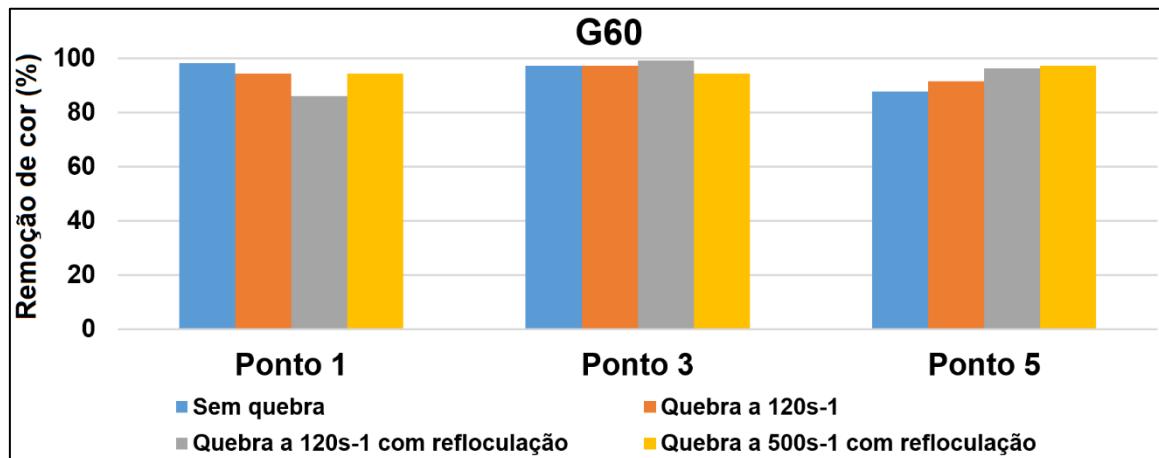
Fonte: do Autor, 2021.

Figura 16 – Remoção de cor nos ensaios realizados nos três pontos utilizando  $G_{mv}$  de flocação de  $40\text{ s}^{-1}$



Fonte: do Autor, 2021.

Figura 17 – Remoção de cor nos ensaios realizados nos três pontos utilizando  $G_{mv}$  de flocação de  $60\text{ s}^{-1}$



Fonte: do Autor, 2021.

A partir dos resultados desses ensaios, foi possível verificar que independentemente do  $G_{mv}$  de flocação utilizado, os flocos formados tiveram sedimentabilidade similar (medida em termos de cor remanescente da água), mesmo nos experimentos os quais os agregados foram submetidos aos  $G_{mv}$  de quebra. Não foi encontrada relação entre a ocorrência de quebra dos flocos e redução da eficiência de remoção de cor em nenhuma das três concentrações avaliadas (pontos 1, 3 e 5), demonstrando que eventuais singularidades (passagens e aberturas) existentes em um sistema de tratamento que utilize esse coagulante podem não prejudicar significativamente a sedimentabilidade dos flocos, consequentemente não provocando redução na eficiência do tratamento. A consistência dos dados encontrados, sem alteração de resultado

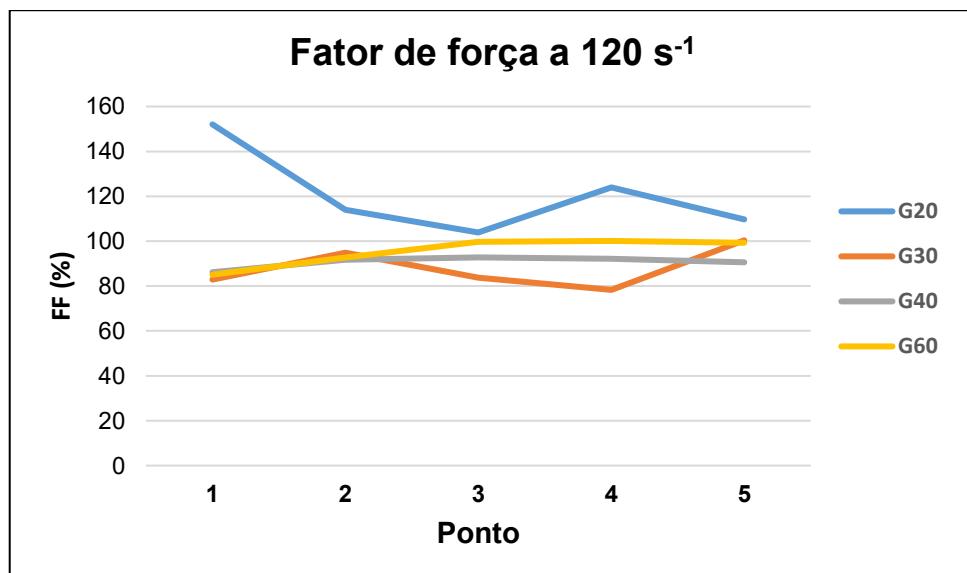
significativa entre as três concentrações, sugere também que esse comportamento ocorre de maneira similar em concentrações intermediárias às estudadas.

#### 4.2.2 Força dos flocos

Como discriminado anteriormente, a força dos flocos foi medida por meio da análise da variação dos diâmetros médios dos flocos formados em três momentos distintos do ensaio de Jarteste: o fim do processo de floculação, o momento pós-quebra e o fim do período de reflocação. A partir desses dados foram então calculados os parâmetros fator de força (FF) e fator de recuperação (FR), utilizando as Equações 1 e 6, respectivamente.

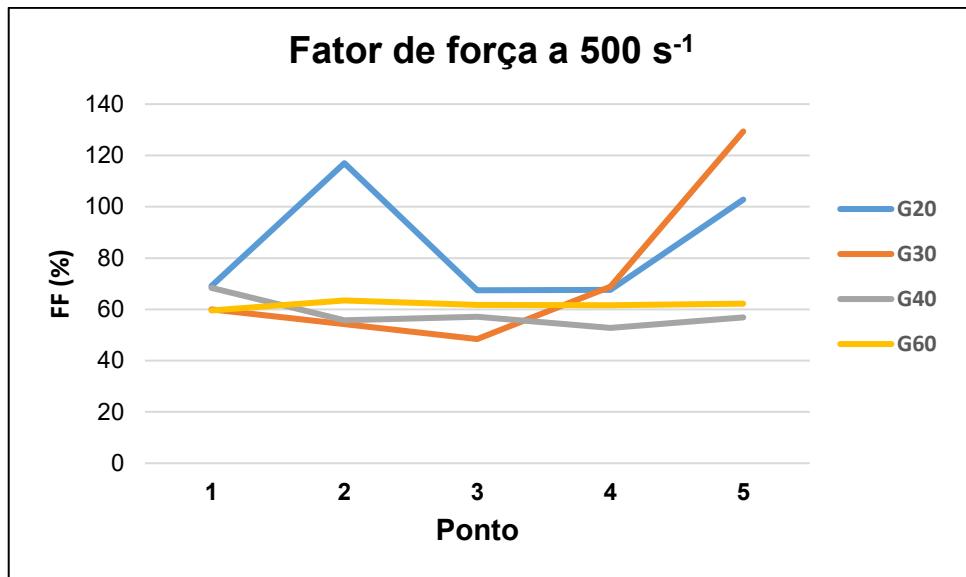
Com esses dados, foi analisado o comportamento dos flocos tanto com a variação da dosagem de coagulante como com a variação do  $G_{mv}$  de floculação. Nas Figuras 18 e 19 está apresentada a variação dos fatores de força para cada um dos  $G_{mv}$  de floculação com a mudança de dosagem de coagulante de cada um dos pontos para a quebra a  $120\text{ s}^{-1}$  e  $500\text{ s}^{-1}$  por 10 segundos, respectivamente.

Figura 18 – Valores do fator de força obtidos para cada um dos  $G_{mv}$  de floculação para o  $G_{mv}$  de quebra de  $120\text{ s}^{-1}$



Fonte: do Autor, 2021.

Figura 19 – Valores do fator de força obtidos para cada um dos  $G_{mv}$  de flocação para o  $G_{mv}$  de quebra de  $500\text{ s}^{-1}$



Fonte: do Autor, 2021.

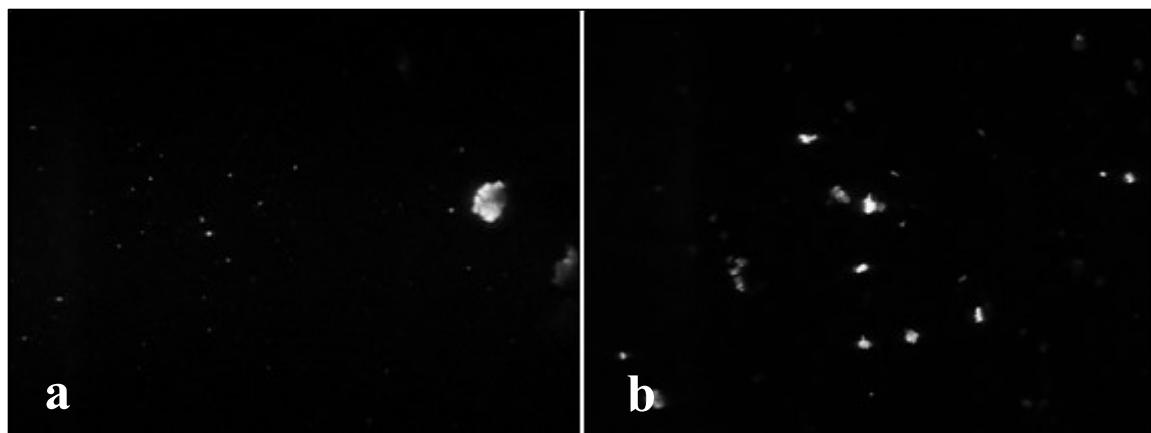
A partir dos gráficos, é possível verificar que, em geral, o menor  $G_{mv}$  resultou nos melhores fatores de força, com a única exceção sendo o ponto 5 com quebra a  $500\text{ s}^{-1}$ . Os fatores de força verificados nos ensaios com quebra a  $120\text{ s}^{-1}$  indicam que esse grau de agitação não é suficiente para a efetiva quebra dos flocos, e em alguns casos serviu como um auxílio para o desenvolvimento dos flocos menores por meio de maiores oportunidades de choque, principalmente no  $G_{mv}$  de  $20\text{ s}^{-1}$ .

No entanto, para os ensaios com quebra a  $500\text{ s}^{-1}$ , foram encontrados alguns pontos de valores extremos, como fatores de força acima de 100%, o que não é esperado, considerando-se principalmente, trabalhos de mesma natureza, entretanto, com utilização de coagulantes como o sulfato de alumínio e PAC (LI et al., 2007; WANG et al., 2009; YU et al., 2009). Os resultados de diâmetros médios dos agregados antes e após a quebra podem ser consultados no apêndice B.

Foi verificado que, em todos esses casos em que o fator de força teve um valor muito acima do esperado em relação à tendência vista em outros pontos, a discrepância se encontrava no diâmetro médio ao fim do período de flocação. Verificou-se, tanto visualmente quanto pela análise dos diâmetros que, nos ensaios com  $G_{mv}$  de  $20\text{ s}^{-1}$  (G20) e  $G_{mv}$  de  $30\text{ s}^{-1}$  (G30), houve formação de alguns flocos muito grandes (notadamente maiores do que aqueles em  $G_{mv}$  mais

altos), interpostos com uma abundância de flocos que não cresceram (Figura 20), influenciando significativamente nos valores de diâmetro médio e, consequentemente, nos fatores de força calculados.

Figura 20 – Imagem de agregados obtida no tempo de floculação de 20 minutos com G20 e G60



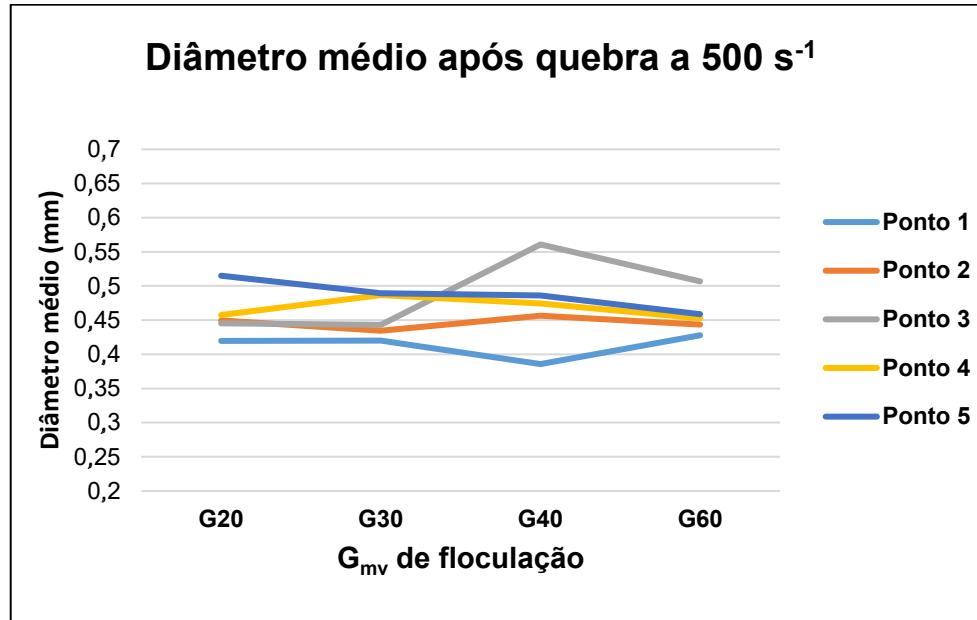
Legenda: a) G20, b) G60

Fonte: do Autor, 2021.

Esse comportamento demonstra que tanto o G20 quanto alguns ensaios com G30 não foram suficientes para o desenvolvimento completo dos flocos: a menor agitação resulta em uma menor quantidade de choques, aumentando a ocorrência de flocos que não se aglomeraram, ainda que tenha sido comprovada a sua capacidade de crescimento (pela observação de flocos de diâmetros maiores). Pode-se inferir que, para esse grau de agitação, o processo de floculação ainda não tinha atingido a estabilidade, e o  $G_{mv}$  de  $120\text{ s}^{-1}$  por 10 segundos causou uma perturbação do processo de floculação, e não a efetiva quebra dos flocos. Dessa forma, uma maior agitação permitiu a ocorrência de choques dessas partículas menores, causando o seu crescimento concomitantemente à quebra dos flocos maiores, levando a valores de diâmetros médios superiores aos calculados ao fim do período inicial de floculação.

Analizando o diâmetro médio após a quebra em todos os pontos, verificou-se para a quebra a  $500\text{ s}^{-1}$ , uma tendência dos flocos a alcançarem diâmetro médio independente tanto da dosagem de coagulante quanto do  $G_{mv}$  de floculação (Figura 21), ou seja, dependentes apenas do  $G_{mv}$  de quebra. Esse comportamento foi observado também nos trabalhos de Gregory e Rossi (2001) e Yukselen e Gregory (2004).

Figura 21 – Diâmetro médio dos flocos imediatamente após quebra a  $500 \text{ s}^{-1}$

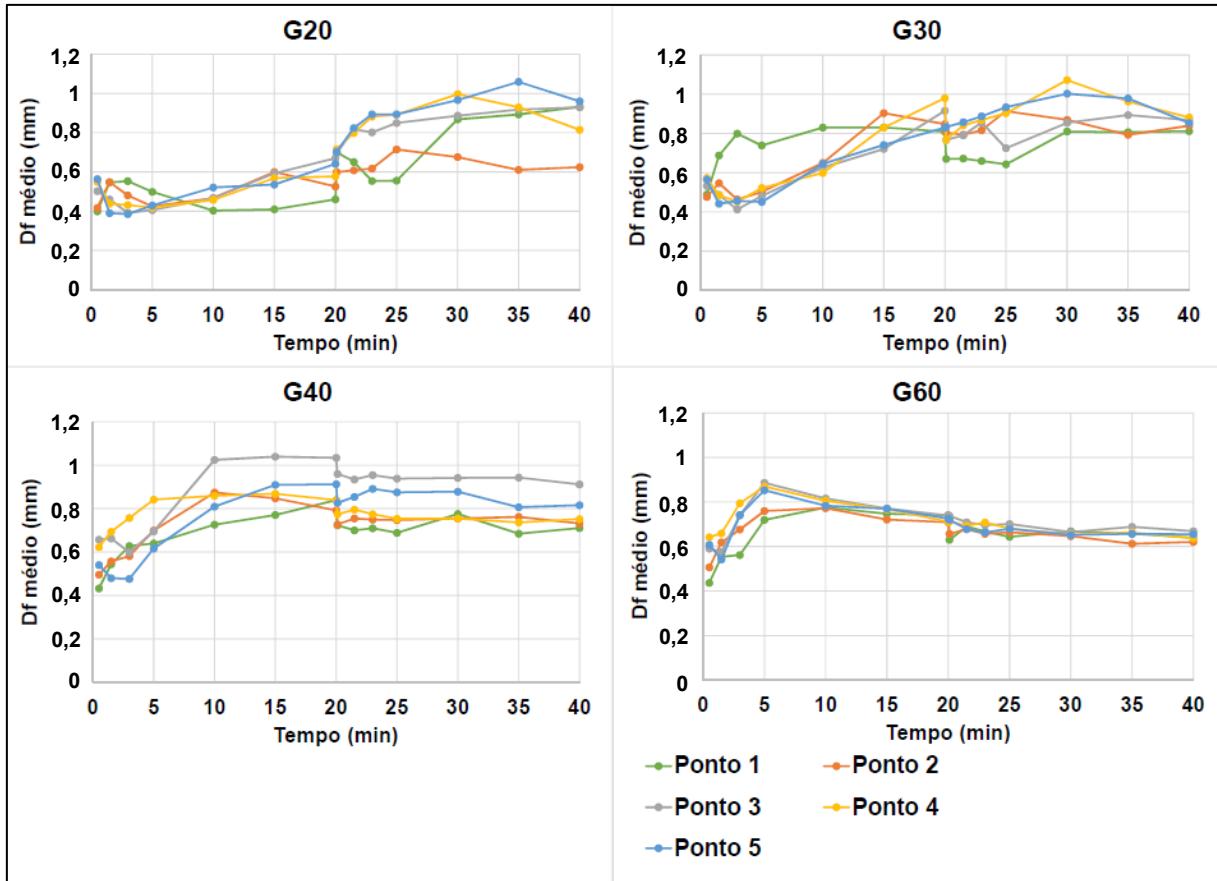


Fonte: do Autor, 2021.

#### 4.2.3 Crescimento e recuperação dos flocos

Para melhor entendimento do comportamento verificado na análise de força do floco, deve-se avaliar o seu crescimento e a sua capacidade de se recuperar após a ocorrência de quebras. Dessa forma, foi também realizada uma análise do desenvolvimento dos flocos ao longo do tempo em todos os ensaios. A Figura 22 contém os diâmetros médios (Feret) obtidos nos tempos de floculação iguais a 0,5; 1,5; 3; 5; 10; 15; 20; 20,2; 21,5; 23; 25; 30; 35 e 40 minutos com  $G_{mv}$  de quebra igual a  $120 \text{ s}^{-1}$ , para cada ponto avaliado.

Figura 22 – Diâmetro médio dos flocos ao longo do tempo nos ensaios com  $G_{mv}$  de quebra a  $120\text{ s}^{-1}$



Fonte: do Autor, 2021.

É possível verificar que o comportamento do crescimento dos flocos é diferente para cada  $G_{mv}$  estudado. O de G20 é o que possui resultados menos consistentes. Isso pode ser explicado pela maior ocorrência de flocos não desenvolvidos devido às menores chances de choque entre flocos para causar o seu crescimento, como discutido anteriormente. Dessa forma, o período de agitação maior introduzido ao fim do período de flocação, ao invés de causar a quebra dos flocos, auxiliou o seu desenvolvimento, que ocorre nos últimos minutos como um período normal de flocação, e não como uma situação de pós-quebra.

Para o G40, foi verificado um aumento gradual do diâmetro médio ao longo do tempo, e um ponto de equilíbrio de diâmetro médio foi alcançado, enquanto o primeiro ainda crescia ao final do tempo de flocação. O G30 apresentou resultados de transição entre os comportamentos verificados para o G20 e o G40. Já para o G60 foi observado que houve um crescimento mais rápido dos flocos durante os primeiros minutos (em relação aos outros  $G_{mv}$ ), atingindo o

patamar de equilíbrio entre os 5 e 10 minutos do ensaio, porém seguido de uma redução gradual do diâmetro médio até o fim do período de flocação.

Essa redução no diâmetro pode ser explicada pelo equilíbrio entre as forças atuantes no floco: a força de ligação entre as partículas diminui com o aumento da mesma devido à maior complexidade de interconexões formadas entre elas, e a força de atrito causada pela agitação do fluido e os choques sofridos pelas partículas. A ocorrência da quebra no momento em que o atrito é maior do que a força de ligação danifica a estrutura do floco e a sua limitação regenerativa impede que ele atinja novamente o tamanho inicial. Isso já foi verificado em diversas pesquisas e ainda não é completamente compreendido (GREGORY; ROSSI, 2001).

Nos ensaios com G40 e G60, que atingiram o diâmetro de equilíbrio já no primeiro período de flocação de 20 minutos, foi possível também observar que a dosagem de coagulante intermediária utilizada nos estudos (200 mL/L) foi a que resultou nos maiores diâmetros médios de flocos. Isso pode acontecer devido a uma melhor proporção entre quantidade de partículas causadoras de cor na água de estudo e de moléculas de tanino inseridas no ensaio, permitindo a formação de estruturas mais homogêneas e estáveis, resistindo melhor aos esforços cortantes. Esse resultado é visto novamente para os ensaios de quebra a  $500\text{ s}^{-1}$ , reforçando a hipótese levantada.

Os fatores de recuperação medidos nos ensaios com  $G_{mv}$  de quebra de  $120\text{ s}^{-1}$  são apresentados na Tabela 2. O resultado observado foi que ela ocorreu de maneira muito limitada para os gradientes em que os flocos já estavam em equilíbrio (G40 e G60). Isso provavelmente ocorre porque o grau de agitação não foi grande o suficiente para ruptura em larga escala dos flocos, causando pouca quebra, majoritariamente em forma de erosão superficial, e os efeitos de redução gradual do diâmetro discutidos continuaram ocorrendo.

Já para os menores gradientes (G20 e G30) verificou-se pontos com grandes fatores de recuperação. No entanto, como o equilíbrio do processo de flocação não havia sido alcançado, os resultados podem representar apenas o desenvolvimento natural dos flocos, uma vez que os flocos com pequenos diâmetros presentes na água não foram quebrados com esse grau de agitação.

Tabela 3 – Fatores de recuperação para os ensaios realizados com período de quebra de  $120\text{ s}^{-1}$ 

Ponto	G20	G30	G40	G60
1	50,34	17,52	-1,50	1,25
2	4,76	4,20	0,59	-5,08
3	34,73	11,01	-4,63	-9,32
4	17,14	11,60	-2,59	-10,61
5	39,99	2,36	-1,11	-8,99
<b>Média</b>	<b>29,39</b>	<b>9,33</b>	<b>-1,84</b>	<b>-6,55</b>

Fonte: Do Autor, 2021.

Nas Figuras 23 e 24 estão apresentados os resultados dos testes estatísticos realizados com intervalo de confiança de 95% para comparar a relação  $d_2/d_1$  e  $d_3/d_1$  dos ensaios com  $G_{mv}$  de quebra de  $120\text{ s}^{-1}$  respectivamente, de forma a verificar a semelhança estatística entre os comportamentos de quebra e de reflocação observados. Foi utilizado o teste de ANOVA para as situações em que os dados cumpriam os testes de verificação, e o método não-paramétrico de Kruskal-Wallis nos outros casos.

Figura 23– Testes de significância estatística de quebra dos ensaios com  $G_{mv}$  de quebra de  $120\text{ s}^{-1}$ 

Tabela da Anova					
	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	P-valor
<b>Fator</b>	3	3367.165	1122.388	9.068	0.001
<b>Resíduos</b>	16	1980.479	123.780		

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
<b>G30-G20</b>	-32.6765	-52.8080	-12.5450	0.0014
<b>G40-G20</b>	-30.0152	-50.1467	-9.8838	0.0030
<b>G60-G20</b>	-25.3469	-45.4784	-5.2154	0.0115
<b>G40-G30</b>	2.6612	-17.4703	22.7927	0.9809
<b>G60-G30</b>	7.3296	-12.8019	27.4611	0.7282
<b>G60-G40</b>	4.6683	-15.4632	24.7998	0.9092

Fator	Médias	Grupos
<b>G20</b>	120.7135977	a
<b>G60</b>	95.36667418	b
<b>G40</b>	90.69834985	b
<b>G30</b>	88.03711491	b

Fonte: Do Autor, 2021.

Figura 24 - Testes de significância estatística de reflocação dos ensaios com  $G_{mv}$  de quebra de  $120\text{ s}^{-1}$

Informação	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	14.87428571
Graus de Liberdade	3
P-valor	0.001927294

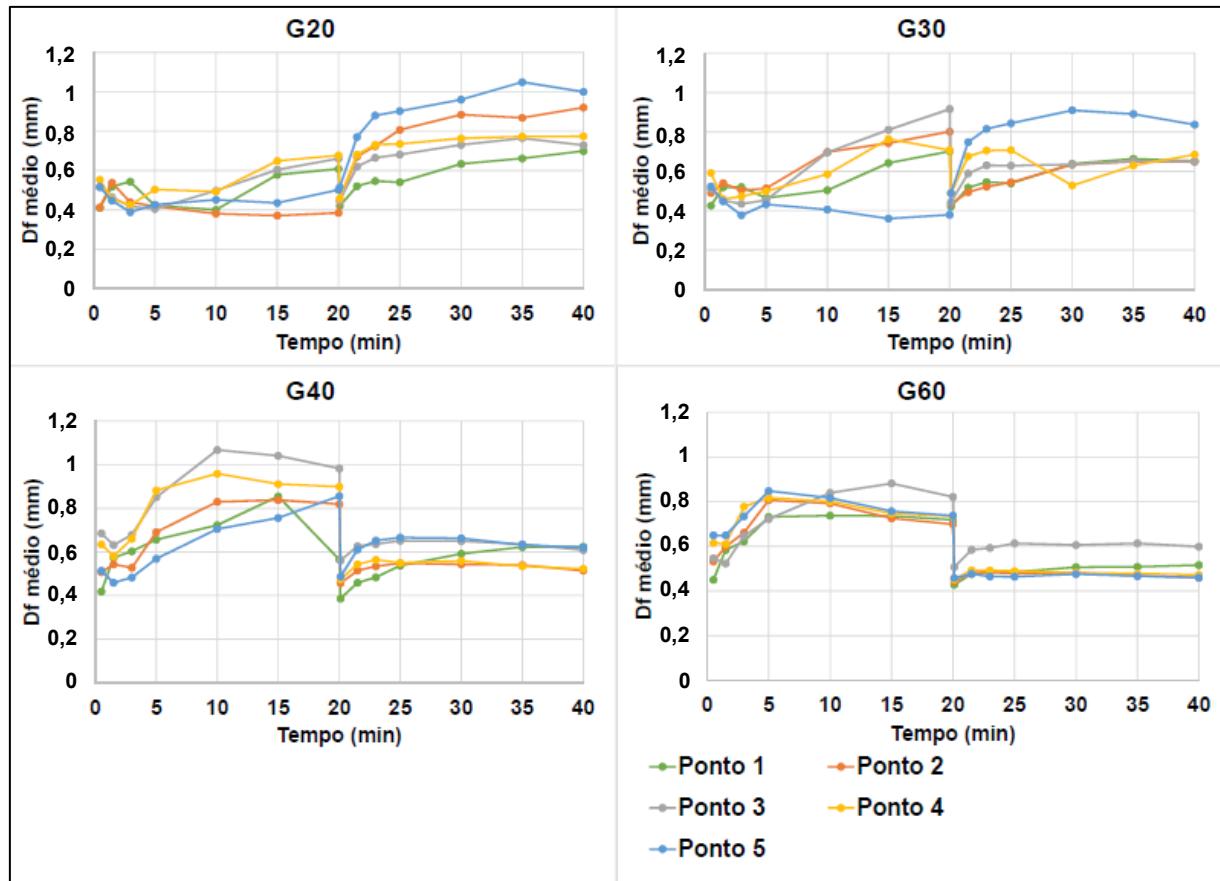
Comparações Múltiplas - Critério Padrão			
Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
G20-G30	5.6	9.8715	Não
G20-G40	12.4	9.8715	Sim
G20-G60	12	9.8715	Sim
G30-G40	6.8	9.8715	Não
G30-G60	6.4	9.8715	Não
G40-G60	0.4	9.8715	Não

Fonte: Do Autor, 2021.

Os resultados obtidos reforçam a discussão levantada, mostrando que a quebra com  $G_{mv}$  de  $120\text{ s}^{-1}$  ocorreu de maneira diferente para o G20 em relação aos demais, que tiveram comportamento estatisticamente similar entre si. Já em relação ao crescimento dos flocos, observou-se que há semelhança do G30 em relação a todos eles, enquanto o G20 se comporta estatisticamente de maneira diferente dos dois maiores gradientes, reforçando também a discussão relativa ao  $G_{mv}$  de  $30\text{ s}^{-1}$  representar um comportamento de transição entre os outros estudados.

Na Figura 25 está apresentado o comportamento dos diâmetros médios para cada tempo em cada ensaio, para os ensaios com  $G_{mv}$  de quebra a  $500\text{ s}^{-1}$ . Nesses ensaios, o comportamento verificado para o G20 foi similar ao anterior: o desenvolvimento dos flocos não foi completo nos primeiros 20 minutos, com diâmetros médios ao fim da flocação menores do que os observados para maiores  $G_{mv}$ . Dessa forma, eles ainda possuíam uma alta resistência às tensões cisalhantes introduzidas pelo período de maior agitação, e foram beneficiados pela maior quantidade de choques ocorridos nele ao invés de quebrados, conseguindo então se desenvolver adequadamente na segunda etapa de flocação.

Figura 25 – Diâmetro médio dos flocos ao longo do tempo nos ensaios com  $G_{mv}$  de quebra a  $500\text{ s}^{-1}$



Fonte: do Autor, 2021.

Para o G40 e o G60, que atingiram o equilíbrio até o fim da etapa de floculação, foi possível observar a queda no diâmetro médio com a introdução do  $G_{mv}$  de quebra, mas, diferentemente do comportamento verificado com a quebra a  $120\text{ s}^{-1}$ , os flocos se regeneraram parcialmente. Isso provavelmente ocorre porque, devido à maior agitação, os flocos foram quebrados por fragmentação em grande escala (e não por erosão superficial) e estavam em um diâmetro inferior àquele máximo discutido anteriormente que é dependente apenas do  $G_{mv}$  de quebra. Em ambos os ensaios, verificou-se que, após a quebra, os flocos recresceram de maneira similar até um diâmetro médio próximo a 0,5 mm.

Já para o G30 novamente foi observado um comportamento de transição, onde o Ponto 5 se comportou de maneira similar ao G20 e os outros se comportaram de maneira mais próxima ao G40. Os fatores de recuperação para esses ensaios podem ser vistos na Tabela 3 abaixo.

Tabela 4 – Fatores de recuperação para os ensaios realizados com período de quebra de  $500\text{ s}^{-1}$ 

Ponto	G20	G30	G40	G60
1	45,89	32,96	42,21	12,26
2	122,39	26,70	7,04	2,23
3	42,83	22,49	4,80	11,19
4	46,69	27,96	5,36	2,74
5	96,58	91,68	15,61	0,24
<b>Média</b>	70,87	40,35	15,00	5,73

Fonte: Do Autor, 2021.

As Figuras 26 e 27 apresentam os resultados dos mesmos testes estatísticos utilizados para os ensaios com  $G_{mv}$  de quebra de  $120\text{ s}^{-1}$ , dessa vez para os ensaios com quebra a  $500\text{ s}^{-1}$ . Para esses ensaios, o método ANOVA não pode ser aplicado, e foi utilizado apenas o método não-paramétrico de Kruskal-Wallis.

Figura 26– Testes de significância estatística de quebra dos ensaios com  $G_{mv}$  de quebra de  $500\text{ s}^{-1}$

Informação	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	7.228571429
Graus de Liberdade	3
P-valor	0.064958477

Comparações Múltiplas - Critério Padrão			
Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
G20-G30	6.6	9.8715	Não
G20-G40	9.8	9.8715	Não
G20-G60	6.4	9.8715	Não
G30-G40	3.2	9.8715	Não
G30-G60	0.2	9.8715	Não
G40-G60	3.4	9.8715	Não

Fonte: Do Autor, 2021.

Figura 27 - Testes de significância estatística de reflocação dos ensaios com  $G_{mv}$  de quebra de  $500\text{ s}^{-1}$

Informação	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	11.59428571
Graus de Liberdade	3
P-valor	0.008910426

Comparações Múltiplas - Critério Padrão			
Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
<b>G20-G30</b>	4.6	9.8715	Não
<b>G20-G40</b>	10.8	9.8715	Sim
<b>G20-G60</b>	10.6	9.8715	Sim
<b>G30-G40</b>	6.2	9.8715	Não
<b>G30-G60</b>	6	9.8715	Não
<b>G40-G60</b>	0.2	9.8715	Não

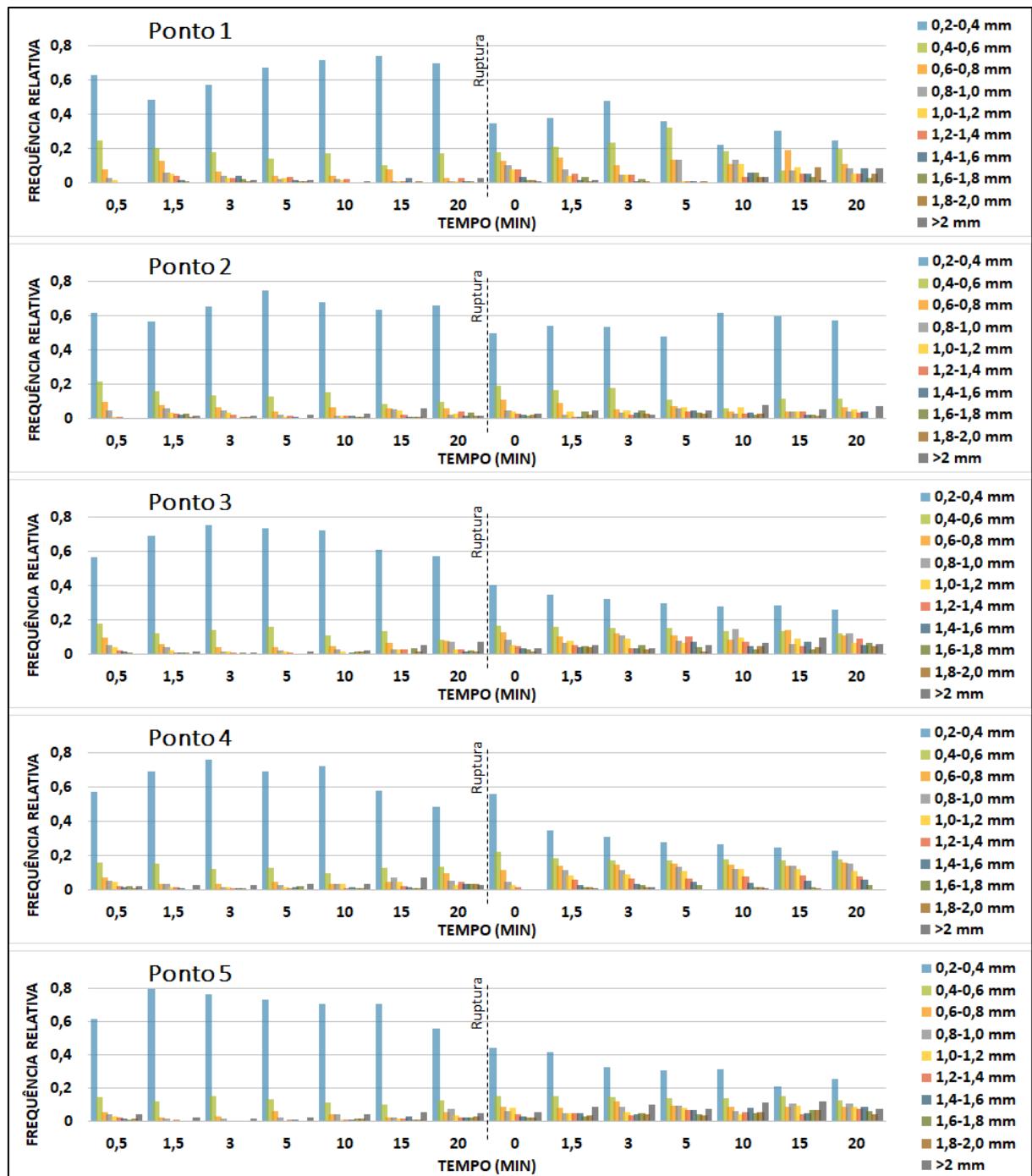
Fonte: Do Autor, 2021.

Os resultados obtidos indicam, como discutido, que em todos os casos a quebra se deu de similarmente, como esperado, uma vez que o  $G_{mv}$  de quebra utilizado foi capaz de quebrar até os menores flocos. No entanto, novamente foi verificado que a reflocação ocorreu de maneira diferente para o G20 em relação aos demais, enquanto o G30 se comportou como um  $G_{mv}$  de transição.

#### 4.2.4 Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP)

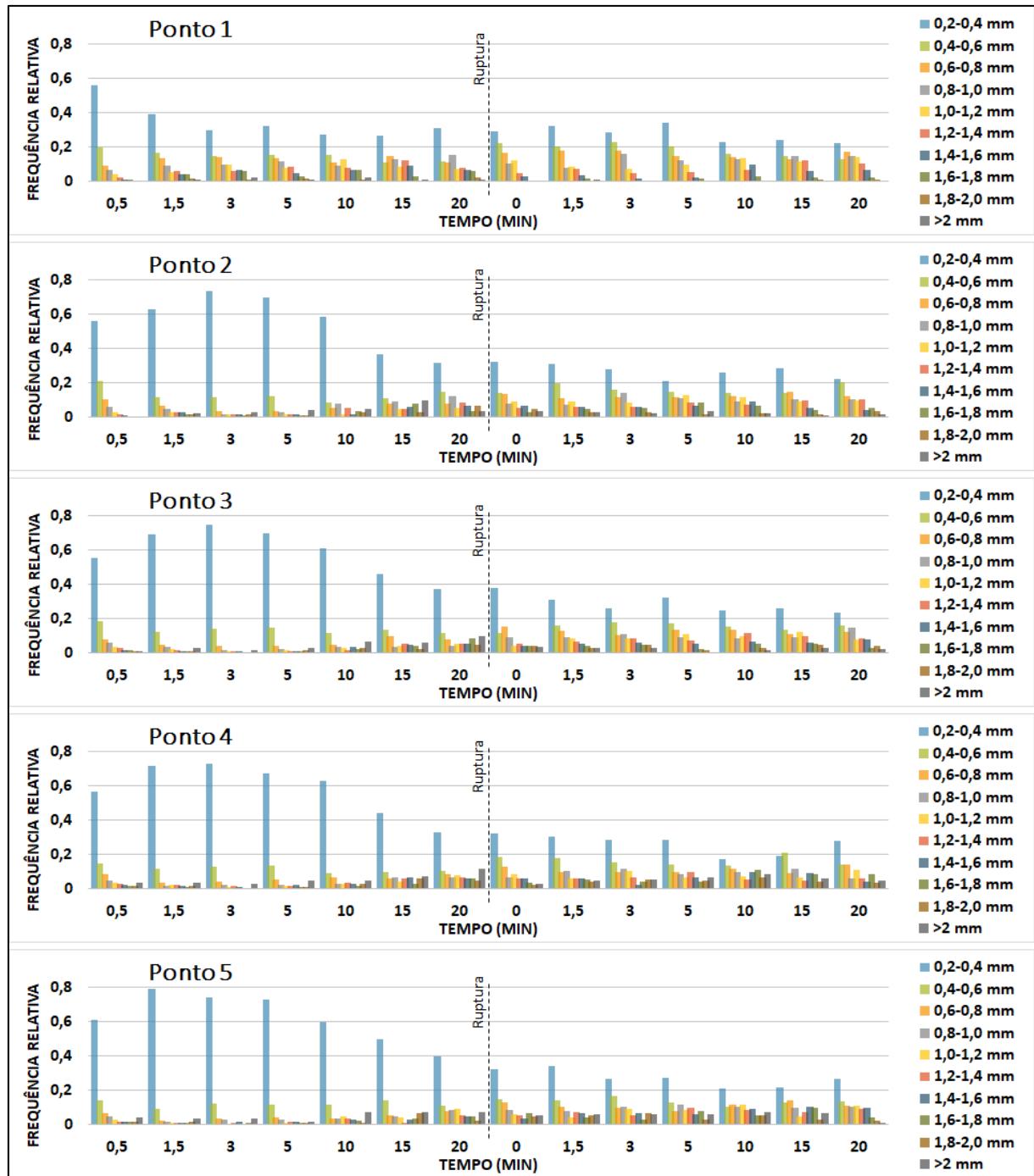
A partir dos gráficos de DTP foi possível verificar de maneira mais precisa o comportamento dos flocos ao longo do tempo, e, associado aos dados vistos anteriormente, foi possível reforçar discussão feita sobre a sua capacidade de regeneração. As Figuras 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, e 35 mostram a frequência relativa nas classes de tamanho ao longo dos tempos de flocação, quebra e recrescimento dos flocos, para cada ponto avaliado e para todos os  $G_{mv}$  de quebra.

Figura 28 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com  $G_{mv}$  de flocação de 20 e  $G_{mv}$  de ruptura de  $120\text{ s}^{-1}$



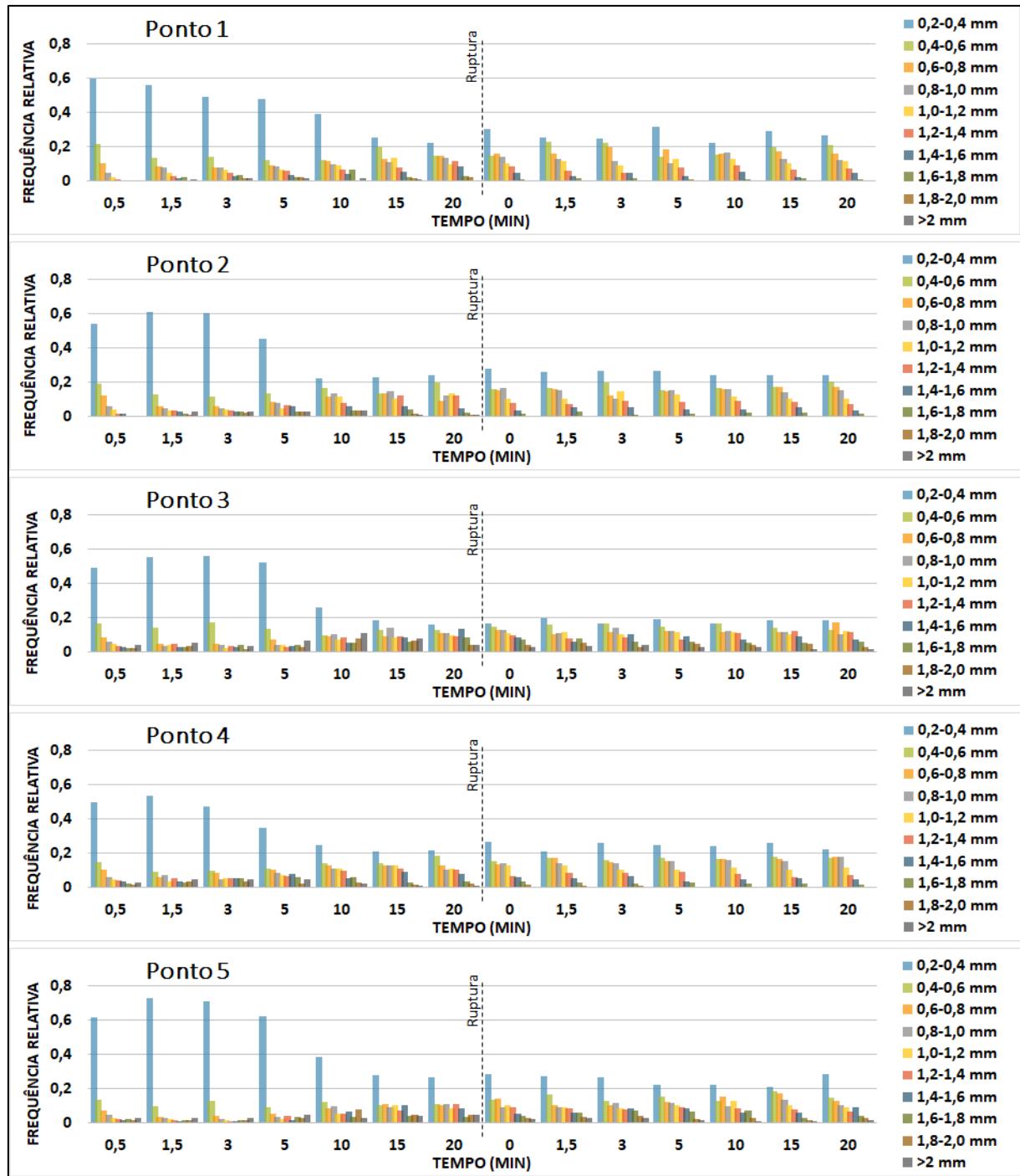
Fonte: do Autor, 2021.

Figura 29 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com  $G_{mv}$  de flocação de 30 e  $G_{mv}$  de ruptura de  $120\text{ s}^{-1}$



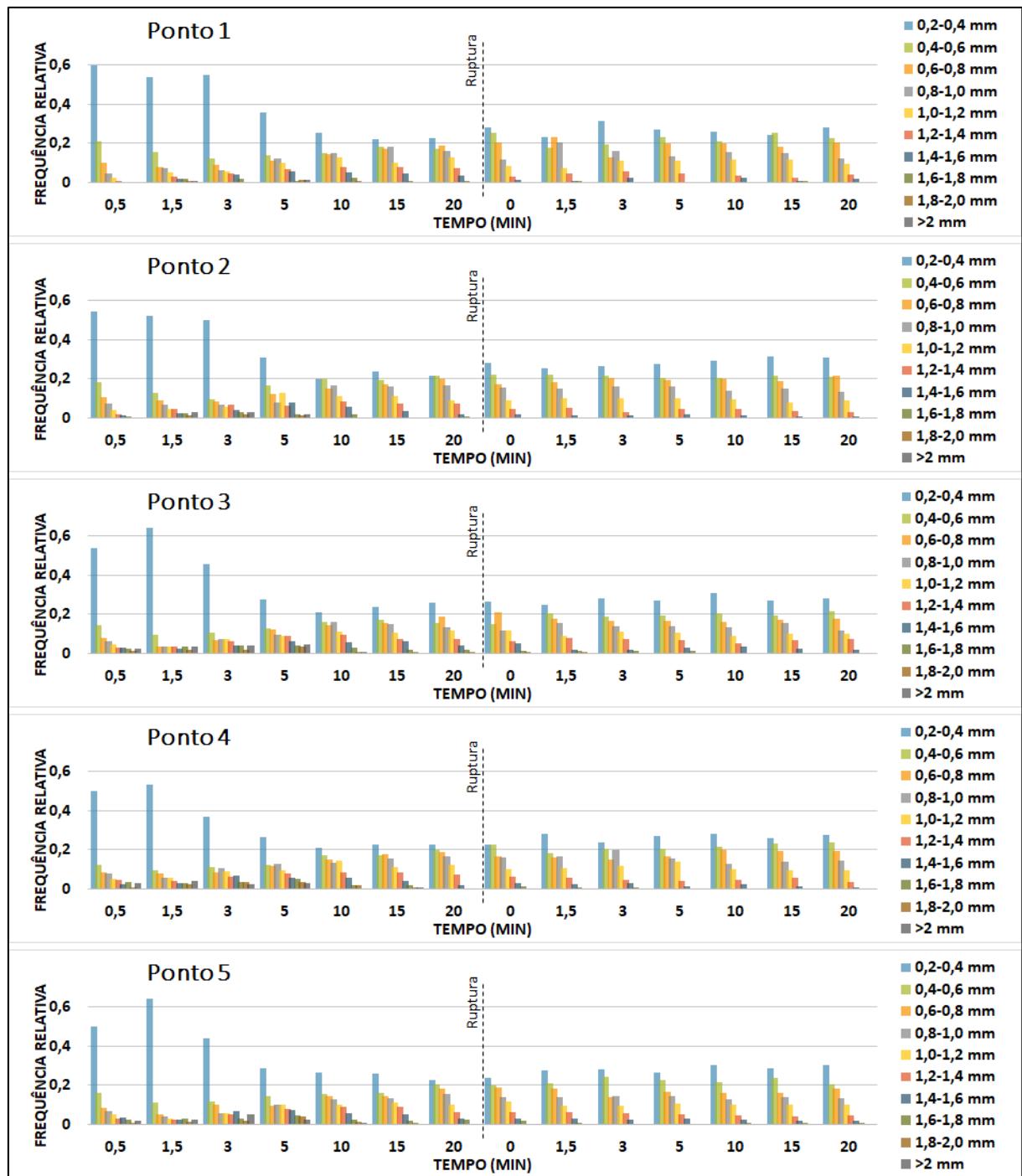
Fonte: do Autor, 2021.

Figura 30 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com  $G_{mv}$  de flocação de 40 e  $G_{mv}$  de ruptura de  $120\text{ s}^{-1}$



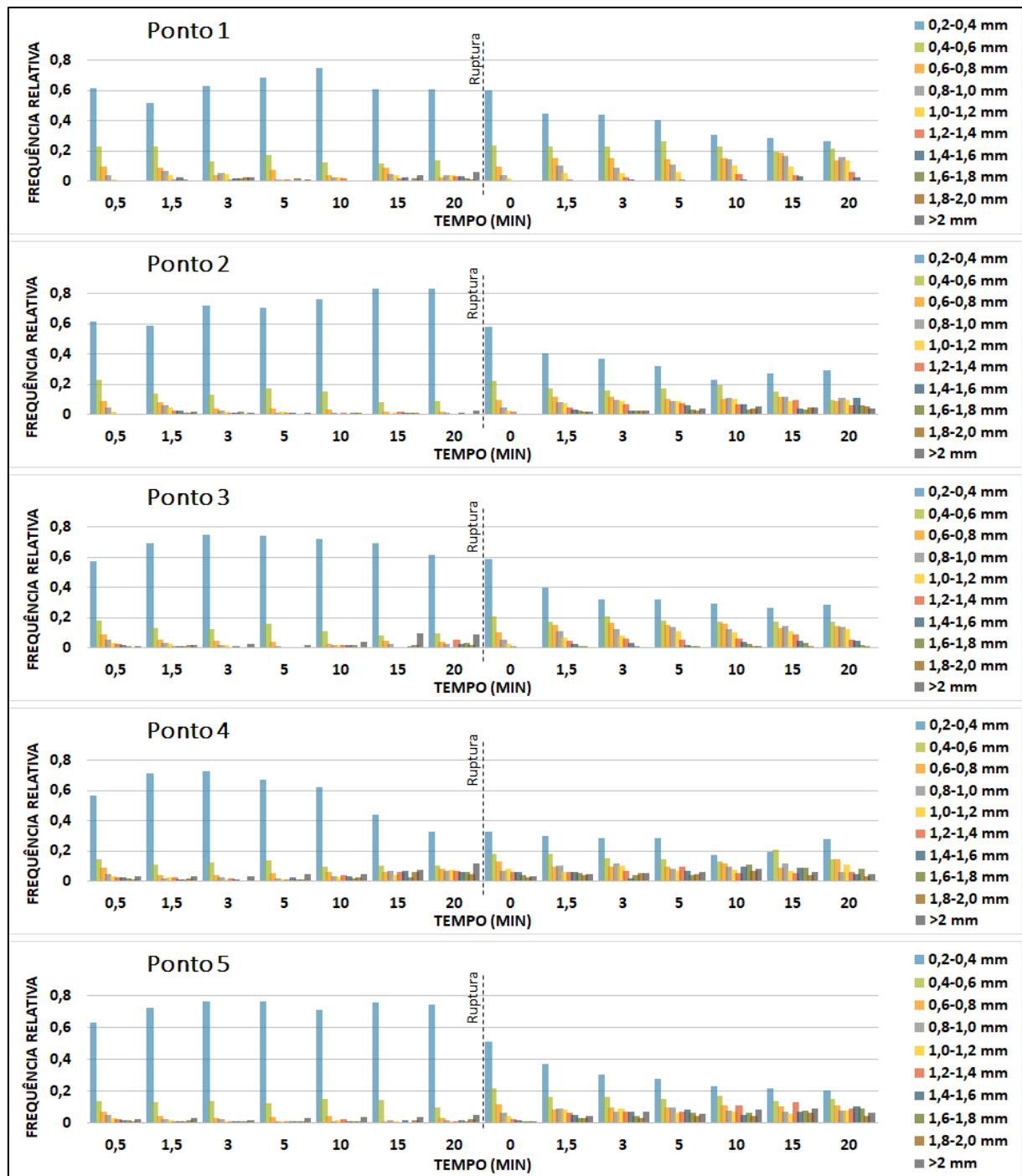
Fonte: do Autor, 2021.

Figura 31 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com  $G_{mv}$  de flocação de 60 e  $G_{mv}$  de ruptura de  $120\text{ s}^{-1}$



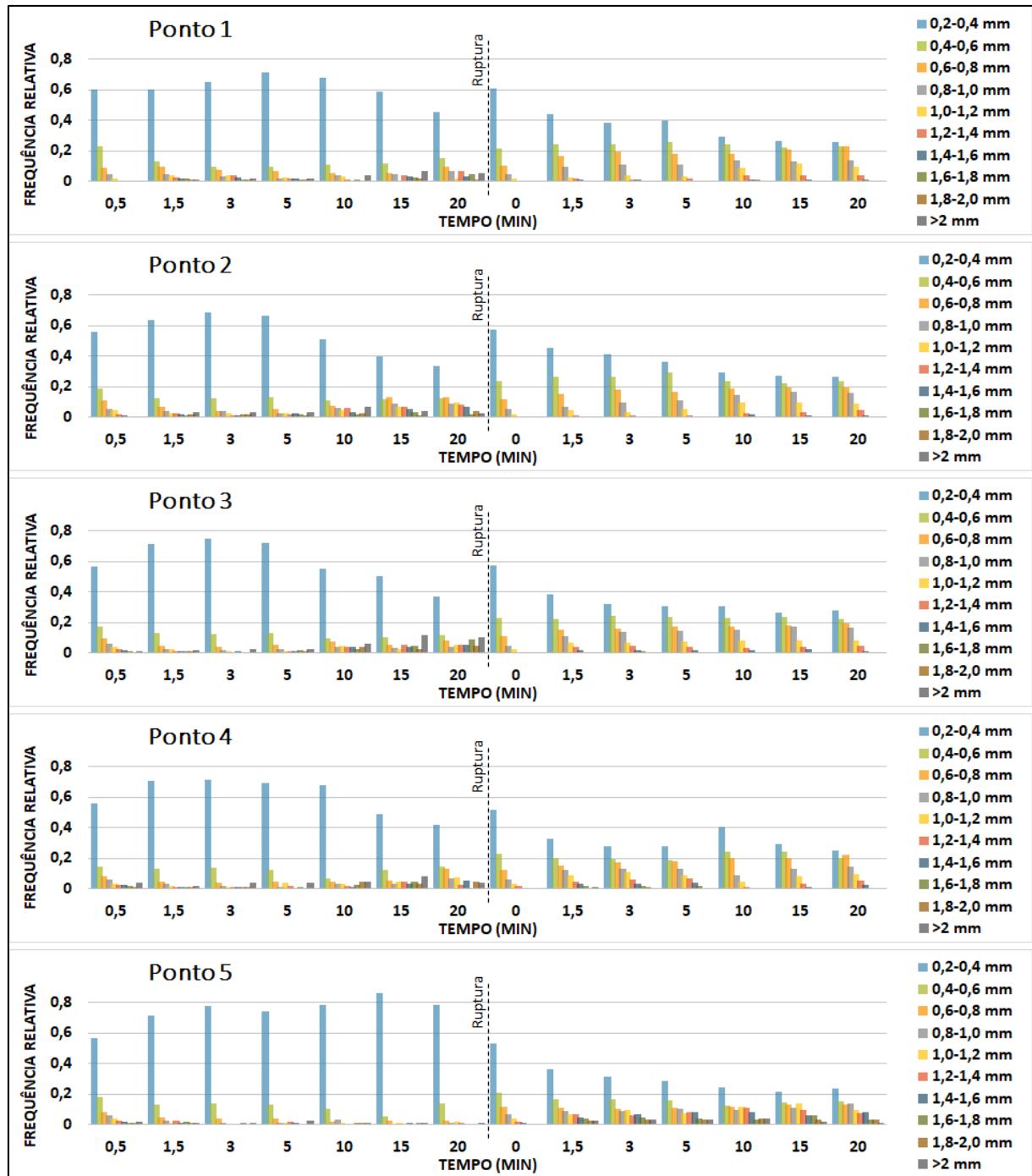
Fonte: do Autor, 2021.

Figura 32 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com  $G_{mv}$  de flocação de 20 e  $G_{mv}$  de ruptura de  $500\text{ s}^{-1}$



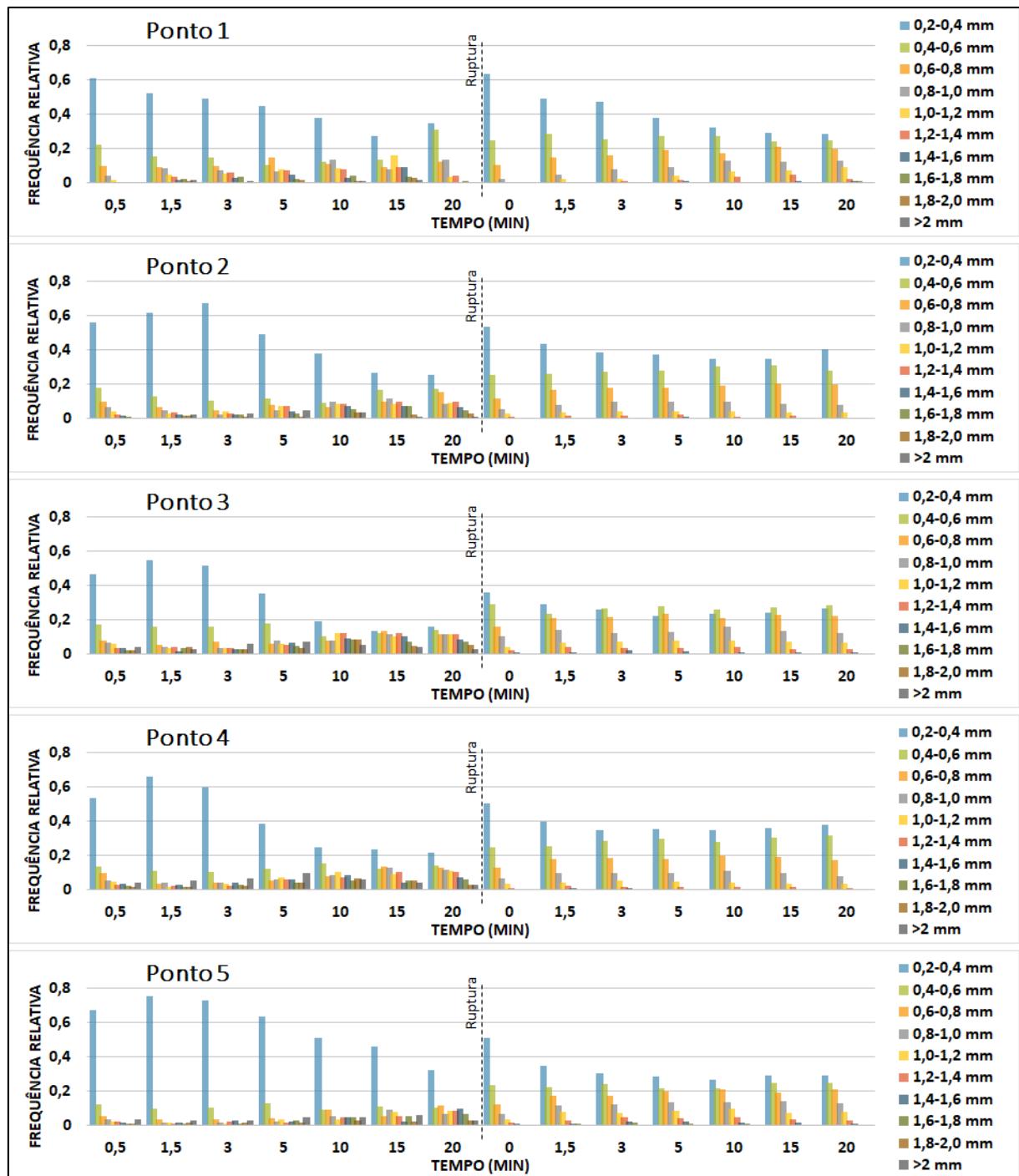
Fonte: do Autor, 2021.

Figura 33 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com  $G_{mv}$  de flocação de 30  $G_{mv}$  de ruptura de  $500\text{ s}^{-1}$



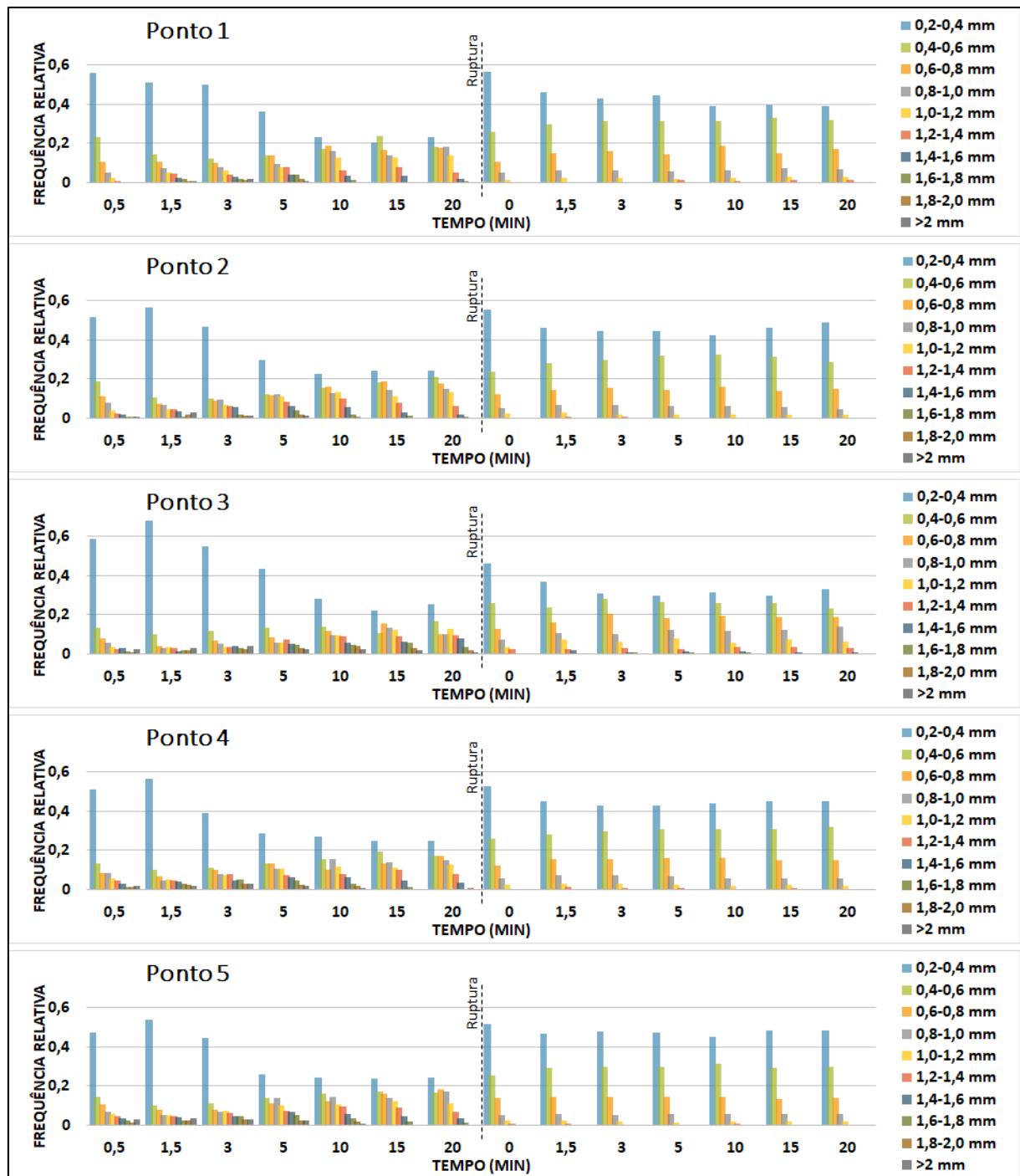
Fonte: do Autor, 2021.

Figura 34 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com  $G_{mv}$  de flocação de 40 e  $G_{mv}$  de ruptura de  $500\text{ s}^{-1}$



Fonte: do Autor, 2021.

Figura 35 – Evolução do diâmetro das partículas para os ensaios com  $G_{mv}$  de flocação de 60 e  $G_{mv}$  de ruptura de  $500\text{ s}^{-1}$



Fonte: do Autor, 2021.

A análise desses gráficos mostra o que já foi discutido anteriormente: para o G20, durante o período inicial de flocação, mais de 55% dos flocos se mantiveram na primeira faixa de tamanho, com pequena ocorrência de flocos em classes de tamanho mais altas, mesmo após tempo de flocação de 20 minutos. Verificou-se que a frequência relativa de flocos na primeira

classe foi igual ou menor logo após a ruptura em relação ao tempo final da floculação para todos os casos, com exceção do Ponto 4 com ruptura a  $120\text{ s}^{-1}$ , indicando que a maior agitação causou o desenvolvimento dos flocos, e não sua quebra.

Verificou-se também, no entanto, que em todos os pontos o G20 também possuía flocos na maior camada de tamanho. Esse resultado sugere que a maior frequência relativa de flocos na primeira faixa de tamanho pode ser explicada pelo fato de que as colisões entre os flocos estavam limitadas também em função do maior tamanho dos agregados e consequente diminuição do seu número, condição alterada pelo aumento do gradiente médio de velocidade que propiciou o aumento da oportunidade de choques.

Além disso, as conclusões tiradas anteriormente em relação à capacidade de recrescimento dos flocos puderam ser também verificadas por esses gráficos. Em todos os ensaios com  $G_{mv}$  de quebra de  $120\text{ s}^{-1}$  foi possível verificar que não houve grande alteração na distribuição das classes de tamanho após a quebra, indicando que ela não foi suficiente para causar danos significativos aos flocos. Já para os ensaios com  $G_{mv}$  de quebra de  $500\text{ s}^{-1}$ , verificou-se, para os  $G_{mv}$  de floculação iguais a 40 e 60, nos quais que os flocos já estavam estabilizados antes do período de ruptura, que não houve um grande recrescimento dos flocos após a quebra, e a maior parte dos flocos se estabilizou nas primeiras classes de tamanho, mesmo ao final do período de refloculação.

Como esperado também, para o G60, mesmo na quebra a  $120\text{ s}^{-1}$  o recrescimento observado ocorreu apenas para faixas de tamanho mais baixas em comparação com os  $G_{mv}$  menores, já que com esse grau de agitação da floculação as forças de atrito são maiores e a redução da força de ligação dos flocos causadas pela sua ruptura impede a recorrência de flocos maiores.

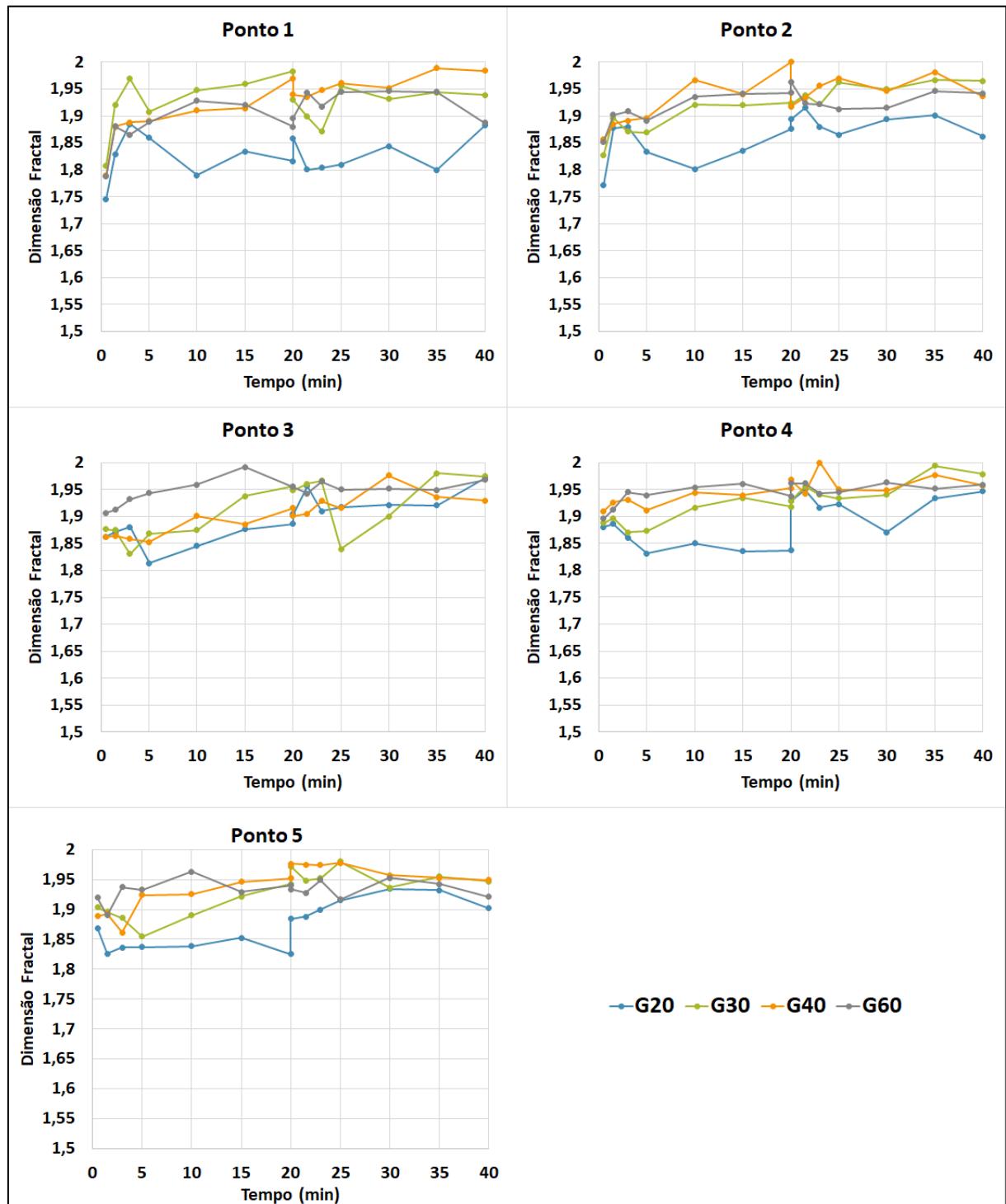
Quanto às melhores ocorrências de tamanhos grandes de flocos, a dosagem de coagulante utilizada para o Ponto 3 foi a que, na maioria dos casos, obteve melhores frequências de classes mais altas de tamanho, mesmo após a ruptura e com o  $G_{mv}$  de floculação mais alta. Depois dele, o Ponto 4 foi o que obteve algumas das maiores frequências de tamanho mais altos. Assim, estima-se que uma dosagem de coagulante próxima do intervalo de 200 a 225 mL/L seja a dosagem ótima para a formação de flocos maiores e mais estáveis, ainda que os resultados de

remoção indiquem que o coagulante possui eficiência similar de remoção mesmo nas regiões do diagrama em que os flocos ficam pequenos.

#### *4.2.5 Dimensão Fractal*

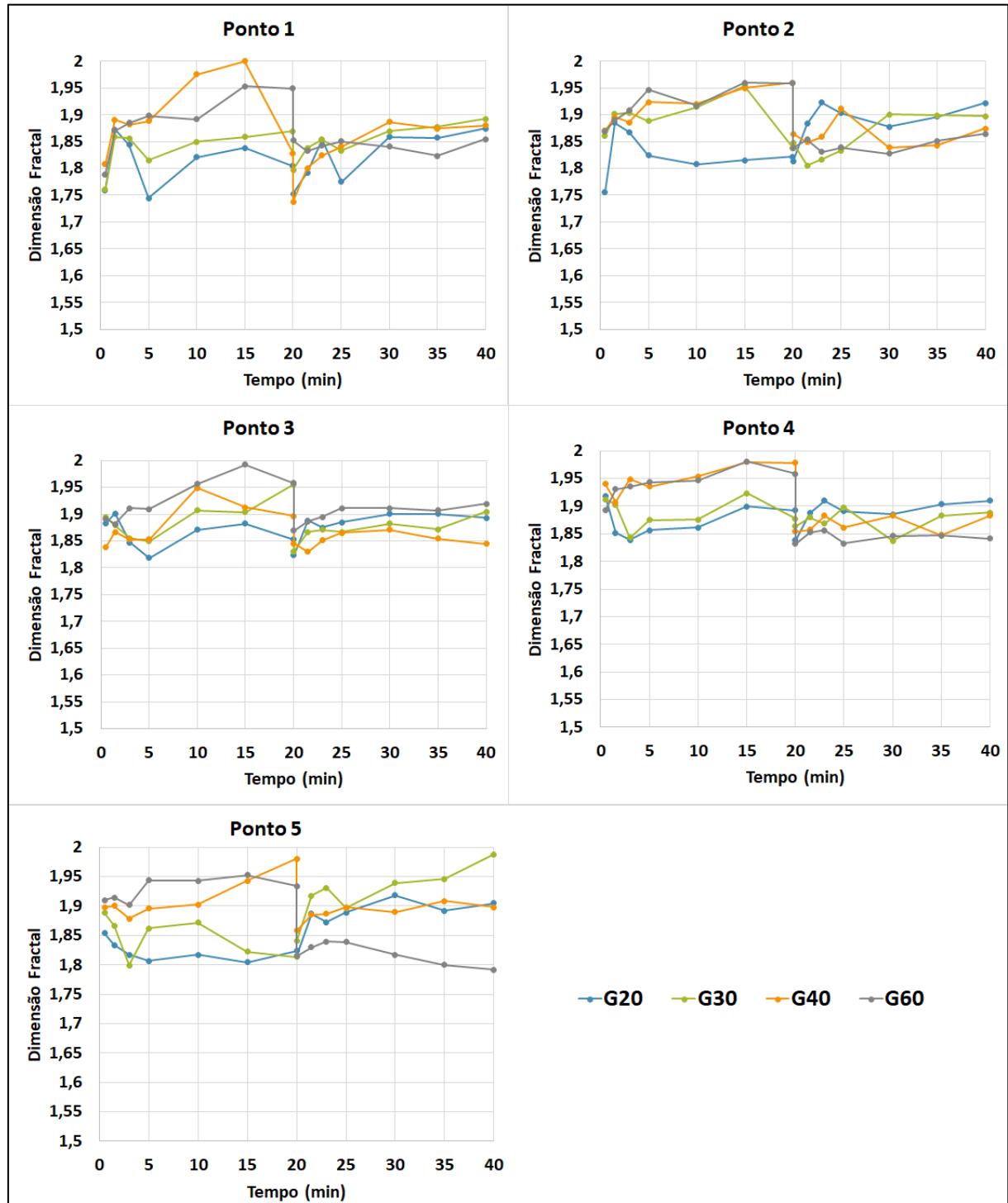
Como descrito anteriormente, a dimensão fractal tem um valor adimensional que, em análises bidimensionais varia entre 1 e 2 e representa a forma geral dos flocos e quanto maior esse valor, mais próximo de um círculo perfeito eles são. As Figuras 36 e 37 contêm os gráficos referentes às dimensões fractais observadas ao longo do tempo para cada ponto e em cada  $G_{mv}$  de floculação utilizado para os ensaios com  $G_{mv}$  de quebra a  $120\text{ s}^{-1}$  e  $500\text{ s}^{-1}$  respectivamente.

Figura 36 – Evolução da Dimensão Fractal para os ensaios com ruptura a  $120\text{ s}^{-1}$



Fonte: Do Autor, 2021.

Figura 37 – Evolução da Dimensão Fractal para os ensaios com ruptura a  $500 \text{ s}^{-1}$



Fonte: Do Autor, 2021.

A partir dos gráficos, foi possível verificar que, como tendência geral, o G20 foi o que obteve as menores dimensões fractais para os primeiros 20 minutos do ensaio. Isso ocorre devido à maior capacidade de crescimento dos flocos, já que as forças de atrito a que eles foram

submetidos foram menores do que nos outros casos. Esse resultado é consistente com a ideia de que os flocos são formados principalmente pelo mecanismo de formação de pontes, onde os flocos conseguem se desenvolver em cadeias maiores, mais desorganizadas e de maneira pouco compacta.

Já para os dois maiores  $G_{mv}$  (G40 e G60), foram verificadas as maiores dimensões fractais. Esse resultado, juntamente com a alteração verificada no diâmetro médio, sugere que com o aumento da força de atrito a que os flocos são submetidos, a erosão superficial (e não a ruptura em grande escala) é o principal fenômeno de quebra observado durante o período de floculação, uma vez que em situações em que há significativa ruptura em grande escala, espera-se que haja redução no diâmetro médio observado, e nesses  $G_{mv}$ , as cadeias de flocos formados não são tão extensas, e os flocos têm tendência a ser menores.

Da mesma forma que os parâmetros anteriores, foi verificado também que o período de quebra a  $120\text{ s}^{-1}$  causou apenas uma perturbação do processo de floculação, e não causou alteração do comportamento dos flocos no período de reflocação. Já para a quebra a  $500\text{ s}^{-1}$ , foi verificada uma grande queda na dimensão fractal, principalmente para os maiores  $G_{mv}$  de floculação, sugerindo também, pela concomitante diminuição observada do diâmetro médio dos flocos, que para essa agitação o mecanismo de ruptura mais comum foi o de fragmentação em grande escala e, na maioria dos casos, a sua forma não retornou aos valores originais.

Os resultados foram consistentes com a análise da DTP, onde, após a quebra, os flocos tiveram regeneração limitada após ruptura a  $500\text{ s}^{-1}$  e passaram o período de reflocação sem grandes alterações de tamanho e forma, com a mesma exceção que também foi verificada para os ensaios com G20 e G30: nesses casos, os flocos não tiveram oportunidades de choque suficientes para se desenvolver adequadamente na etapa de floculação e dessa forma tiveram maior resistência aos esforços cortantes a que foram submetidos, não tendo sua estrutura prejudicada por esse período e seguindo o seu desenvolvimento normal nos últimos 20 minutos dos ensaios.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados, foi possível verificar que o Tanino é um coagulante com boa eficiência de remoção de cor elevada, que foi capaz de atender às exigências legislativas quanto à cor remanescente da água estudada. Ainda, sua efetividade não foi significativamente reduzida com a introdução de maiores gradientes médios de agitação, como possivelmente ocorre em passagens e orifícios para uma situação real de tratamento de água.

Além disso, os parâmetros estudados revelaram informações importantes quanto ao processo de floculação, quebra e regeneração dos flocos, como a influência de diferentes gradientes médios de velocidade de agitação durante o período de floculação e o mecanismo que o coagulante utiliza para a agregação de flocos. O estudo da mudança nas características dos flocos após o processo de quebra também demonstrou a capacidade regenerativa dos flocos, encontrando um comportamento de redução gradativa de diâmetro médio similar a outros já encontrados na literatura para diferentes coagulantes.

Pesquisas futuras podem aprofundar os estudos realizados, incluindo variações no tempo utilizado tanto para o período de mistura rápida (que se mostrou possivelmente insuficiente para os dois menores gradientes médios de velocidade de floculação estudados, devido ao desenvolvimento incompleto dos flocos formados), quanto para o período de quebra, que pode levar a novos entendimentos relativos às suas consequências sobre o mecanismo de reflocação, ou também no tempo de floculação, de forma a verificar os efeitos encontrados mencionados por Gregory e Rossi (2001) ao longo de maiores períodos.

A aplicabilidade do estudo para situações reais, tanto com o estudo replicado a água natural de rio quanto para efluentes domésticos ou industriais pode também trazer nova luz sobre a afinidade do Tanino com diferentes agentes poluidores presentes na água, aprofundando ainda mais o conhecimento sobre esse coagulante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro. 1992.

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. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/156148>. Acesso em: 1 mar. 2020

ANÍCIO, S. O. **Determinação de relação entre parâmetros representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP), Dimensão fractal (Df) e o Índice de Floculação (IF) obtido por meio 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. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27313>. Acesso em: 1 abr. 2020.

BACHE, D. H. *et al.* Sweep coagulation: structures, mechanisms and practice: structures, mechanisms and practice. **Journal Of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, [s.l.], v. 48, n. 5, p. 201-210, set. 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.2166/aqua.1999.0022>. Disponível em: <https://iwaponline.com/aqua/article/48/5/201/30465/Sweep-coagulation-structures-mechanisms-and>. Acesso em: 20 mar. 2020.

BELTRÁN-HEREDIA, J. *et al.* Removal of Alizarin Violet 3R (anthraquinonic dye) from aqueous solutions by natural coagulants. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 170, n. 1, p. 43-50, out. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.131>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389409007341>. Acesso em: 15 mar. 2020.

BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; DÁVILA-ACEDO, M. A. Optimization of the synthesis of a new coagulant from a tannin extract. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 186, n. 2-3, p. 1704-1712, fev. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.075>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410016559>. Acesso em: 12 fev. 2020.

BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; GÓMEZ-MUÑOZ, M. C. New coagulant agents from tannin extracts: Preliminary optimisation studies. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 162, n. 3, p.1019-1025, 1 set. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.07.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138589471000611X>. Acesso em: 17 set. 2019.

BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J. Municipal wastewater treatment by modified tannin flocculant agent. **Desalination**, [s.l.], v. 249, n. 1, p. 353-358, nov. 2009.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.039>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916409009138>. Acesso em: 10 fev. 2020.

**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. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21640>. Acesso em: 1 abr.2020.

**BOULAADJOUL, S. et al.** 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, set. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.123>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653518307720>. Acesso em: 25 mar. 2020.

**BRASIL.** Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021.** Brasília, 1999. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 10 mai. 2021.

**BÜLL, J. C. Determinação da força e crescimento do flocos 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. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/156121>. Acesso em: 1 mar. 2020.

**BÜLL, J. C.; SILVA, P. A. G.; MORUZZI, R.** Determinação da força do flocos e da reflocação 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. Disponível em: [https://prope.unesp.br/cic\\_isbn/fase\\_1.php?mn=3](https://prope.unesp.br/cic_isbn/fase_1.php?mn=3). Acesso em: 2 abr. 2020.

**BUSHELL, G. C. et al.** 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, jan. 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0001-8686\(00\)00078-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0001-8686(00)00078-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868600000786>. Acesso em: 18 mar. 2020.

**CAMACHO, F. P. et al.** The use of Moringa oleifera as a natural coagulant in surface water treatment. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 313, p. 226-237, abr. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894716317831>. Acesso em: 06 set. 2021.

**CAPELETE, B. C. Emprego da quitosana como coagulante no tratamento de água contendo *Microcystis aeruginosa* - avaliação de eficiência e formação de trialometanos.** 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/8637>. Acesso em: 06 set. 2021.

CHAKRABORTI, R. K.; ATKINSON, J. F.; VAN BENSCHOTEN, J. E. Characterization of Alum Floc by Image Analysis. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 34, n. 18, p. 3969-3976, set. 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es990818o>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es990818o>. Acesso em: 12 mar. 2020.

CHAKRABORTI, R. K *et al.* Changes in fractal dimension during aggregation. **Water Research**, [S.L.], v. 37, n. 4, p. 873-883, fev. 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1354\(02\)00379-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1354(02)00379-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135402003792>. Acesso em: 11 maio 2021.

CRITTENDEN J. C. *et al.* **Water treatment: principles and design**. 3. ed. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. di B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005. 792 p. (Volume 1).

EPA. **25 years of the Safe Drinking Water Act: History and trends**. [s.l.]: Office of Water, 1999. 57 p. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=200027R1.TXT>. Acesso em: 20 ago. 2020.

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. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19959>. Acesso em: 1 abr. 2020.

FANG, G. **Evaluation and Performance of a Tannin-based Polymer as a Coagulant in Water Treatment**. 2007. 286 f. Tese (Doutorado) - Department Of Civil And Environmental Engineering, Imperial College London, London, 2007.

FITZPATRICK, C. S. B.; FRADIN, E.; GREGORY, J. Temperature effects on flocculation, using different coagulants. **Water Science And Technology**, [s.l.], v. 50, n. 12, p. 171-175, 1 dez. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2004.0710>. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/50/12/171/11478/Temperature-effects-on-flocculation-using>. Acesso em: 23 mar. 2020.

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). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043135487900236?via%3Dihub>. Acesso em: 2 mar. 2020.

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. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20168>. Acesso em: 4 fev. 2020.

GREGORY, J. The role of floc density in solid-liquid separation. **Filtration & Separation**, [s.l.], v. 35, n. 4, p. 367-366, maio 1998. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0015-1882\(97\)87417-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0015-1882(97)87417-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0015188297874174>. Acesso em: 23 mar. 2020.

GREGORY, J; ROSSI, L. Dynamic testing of water treatment coagulants. **Water Supply**, [S.L], v. 1, n. 4, p. 65-72, jun. 2001. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2001.0068> Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/1/4/65/25516/Dynamic-testing-of-water-treatment-coagulants>. Acesso em: 11 mai. 2021.

GREHS, B. W. N. *et al.* Removal of microorganisms and antibiotic resistance genes from treated urban wastewater: a comparison between aluminium sulphate and tannin coagulants. : A comparison between aluminium sulphate and tannin coagulants. **Water Research**, [s.l.], v. 166, p. 115056-115068, dez. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2019.115056>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135419308309>. Acesso em: 12 fev. 2020.

HAMEED, Y. T. *et al.* A tannin-based agent for coagulation and flocculation of municipal wastewater: Chemical composition, performance assessment compared to Polyaluminum chloride, and application in a pilot plant. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 184, p.494-503, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.033>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479716308179>. Acesso em: 18 set. 2019.

HAN, M.; KIM, T.; KIM, J. Application of image analysis to evaluate the flocculation process. **Journal Of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, [s.l.], v. 55, n. 7-8, p. 453-459, nov. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.2166/aqua.2006.053>. Disponível em: <https://iwaponline.com/aqua/article/55/7-8/453/31115/Application-of-image-analysis-to-evaluate-the>. Acesso em: 16 mar. 2020.

HE, J. *et al.* A novel quantitative method for evaluating floc strength under turbulent flow conditions. **Desalination And Water Treatment**, [s.l.], v. 56, n. 7, p. 1975-1984, 9 set. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2014.958107>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19443994.2014.958107>. Acesso em: 17 mar. 2020.

HERMAWAN, M. *et al.* Floc Strength Characterization Technique. An Insight into Silica Aggregation. **Langmuir**, [s.l.], v. 20, n. 15, p. 6450-6457, jul. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/la049651p>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la049651p>. Acesso em: 17 mar. 2020.

JACKSON, G. A. *et al.* Combining particle size spectra from a mesocosm experiment measured using photographic and aperture impedance (Coulter and Elzone) techniques. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, [s.l.], v. 42, n. 1, p. 139-157, jan. 1995. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0967-0645\(95\)00009-f](http://dx.doi.org/10.1016/0967-0645(95)00009-f). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/096706459500009F>. Acesso em: 25 mar. 2020.

JARVIS, P. *et al.* A review of floc strength and breakage. **Water Research**, [s.l.], v. 39, n. 14, p. 3121-3137, set. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135405002794>. Acesso em: 06 mar. 2020.

JUSTINA, M. D. *et al.* Using vegetable tannin and polyaluminium chloride as coagulants for dairy wastewater treatment: a comparative study: A comparative study. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 25, p. 173-181, out. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.08.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714418304549>. Acesso em: 13 fev. 2020.

KLUMB, A. K.; FARIA, O. L. V. Produção de coagulante vegetal catiônico a partir de cascas de Eucalipto (*Eucalyptus Tereticornis*). **Vetor**, Rio Grande, v. 22, n. 1, p.71-80, maio 2012. Disponível em: <http://repositorio.furg.br/handle/1/4244>. Acesso em: 20 set. 2019.

LAMB, L. H.; DECUSATI, O. G. **Manufacturing process for quaternary ammonium tannate, a vegetable coagulating;flocculating agent**. US n. US 6,478,986 B1, 12 nov. 2002

LAWLER, D. F. Particle size distributions in treatment processes: Theory and practice. **Water Science And Technology**, [s.l.], v. 36, n. 4, p. 15-23, abr. 1997. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0273-1223\(97\)00414-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0273-1223(97)00414-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273122397004149>. Acesso em: 22 mar. 2020.

LECLERC, H.; SCHWARTZBROD, L.; DEI-CAS, E. Microbial Agents Associated with Waterborne Diseases. **Critical Reviews In Microbiology**, [S.L.], v. 28, n. 4, p. 371-409, jan. 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/1040-840291046768>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1040-840291046768>. Acesso em: 25 ago. 2020.

LETTERMAN, R. D.; AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C. R. Coagulation and flocculation. In: American Water Works Association. **Water Quality and Treatment**. 5. ed. [s.l.]: McGraw-Hill, 1999. Cap. 6. p. 6.1-6.66

LI, T. *et al.* Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms. **Powder Technology**, [s.l.], v. 168, n. 2, p. 104-110, out. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2006.07.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591006002610>. Acesso em: 15 mar. 2020.

LI, T. *et al.* The strength and fractal dimension characteristics of alum-kaolin flocs. **International Journal Of Mineral Processing**, [S.L.], v. 82, n. 1, p. 23-29, fev. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.012>. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751606002201?casa\\_token=nNjZxcLegcAAAAAA:\\_yJ5X76kBZ-AM6y8s\\_mAzLMrxRH8Cuk2xZVG\\_RAGCIgyvR8Q7Ksmc4hYzdsvxXpRo\\_kKiXYZH98](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751606002201?casa_token=nNjZxcLegcAAAAAA:_yJ5X76kBZ-AM6y8s_mAzLMrxRH8Cuk2xZVG_RAGCIgyvR8Q7Ksmc4hYzdsvxXpRo_kKiXYZH98). Acesso em: 07 jul. 2021.

LI, X.; ZHANG, J. Numerical simulation and experimental verification of particle coagulation dynamics for a pulsed input. **Journal Of Colloid And Interface Science**, [s.l.], v. 262, n. 1, p. 149-161, jun. 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9797\(03\)00194-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9797(03)00194-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979703001942?via%3Dihub>. Acesso em: 25 mar. 2020.

MCLACHLAN, D. R. C.. Aluminium and the risk of Alzheimer's Disease. **Environmetrics**, [s.l.], v. 6, n. 3, p.233-275, maio 1995. DOI: <https://doi.org/10.1002/env.3170060303>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/env.3170060303>. Acesso em: 05 jun. 2019.

MENDES, Y. C. M. **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. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19955>. Acesso em: 10 mar. 2020.

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. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/126386/000834118.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 9 mar. 2020.

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

MORENO, P. *et al.* Investigação do efeito do número de camp (NC) na distribuição de tamanho de partículas (DTP). In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28., 2015, Rio de Janeiro. **Anais** [...].ABES. v.1, 2015.

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. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-04072007-170028/pt-br.php>. Acesso em: 2 abr. 2020.

MORUZZI, R. B. *et al.* Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 21, n. 4, p.817-824, 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016144959 Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522016000400817&script=sci\\_abstract&tlang=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522016000400817&script=sci_abstract&tlang=pt). Acesso em: 26 fev. 2020.

MORUZZI, R. B. *et al.* Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 609, p. 807-814, dez. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.194>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135402003792>. Acesso em: 11 maio 2021.

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. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/61/1/253/13759/Characterization-of-micro-bubble-size-distribution?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 2 abr. 2020.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 12, n. 3, p.273-283, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000300007>. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v12n3/a05v12n3.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2020.

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. 60, n. 6, p. 617-626, dez. 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/723032000087925>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/723032000087925>. Acesso em: 06 set. 2021.

NNAJI, N. J. N. *et al.* Modelling the coag-flocculation kinetics of cashew nut testa tannins in an industrial effluent. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [s.l.], v. 20, n. 4, p. 1930-1935, jul. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2013.09.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1226086X13004334>. Acesso em: 10 mar. 2020.

OLIVEIRA, A. L. *et al.* 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. *et al.* 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. *et al.* 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. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=156&SUMARIO=5133>. Acesso em: 1 abr. 2020.

OLIVEIRA, A. L. *et al.* Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter. **Desalination and Water Treatment**, [s.l.], p.1-12, 2015c. DOI: 10.1080/19443994.2015.1081833. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19443994.2015.1081833>. Acesso em: 1 mar. 2020.

OLIVEIRA, A. S. **Avaliação da morfologia e da distribuição do tamanho de partículas para pontos distintos do diagrama de coagulação/flocação.** Orientador: André Luiz de Oliveira. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21559>. Acesso em: 22 abr. 2020.

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. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24884>. Acesso em: 22 abr. 2020.

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

ÖZACAR, M.; SENGİL, 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, nov. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2003.07.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092777570300462X>. Acesso em: 20 set. 2019.

PÁDUA, V. L. de; FERREIRA, A. C. da S. Qualidade da água para consumo humano. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. de (Org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010. Cap. 4. p. 151-217.

PÁDUA, V. L. de. Introdução ao tratamento de água. In: HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de (Org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010. Cap. 12. p. 531-583.

PARK, N. *et al.* Application of various membranes to remove NOM typically occurring in Korea with respect to DBP, AOC and transport parameters. **Desalination**, [s.l.], v. 178, n. 1-3, p. 161-169, jul. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2004.11.035>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916405002432>. Acesso em: 16 mar. 2020.

PEREIRA, T. I. O.; MEIRA, L. D. A. S.; SOUSA, M. E. A.. Uso da mucilagem do quiabo como agente floculante no tratamento da água do rio Amazonas. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, XXVIII, 2019, Belo Horizonte. **Anais [...]**. [S.L]: [S.N], 2019. p. 1-8. Disponível em: <http://www.entmme2019.entmme.org/download-trabalhos/>. Acesso em: 06 set. 2021.

PRÜSS-ÜSTÜN, A. *et al.* **Safer water, better health: costs, benefits and sustainability of interventions to protect and promote health.** World Health Organization (WHO), Geneva, 2008. Disponível em: [http://www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/publications/saferwater/en/](http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/saferwater/en/). Acesso em: 20 ago. 2020.

RICHARDSON, S. *et al.* Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research.: A review and roadmap for research. **Mutation Research/reviews In Mutation Research**, [s.l.], v. 636, n. 1-3, p. 178-242, nov. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138357420700035X>. Acesso em: 16 mar. 2020.

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

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; BELTRÁN-HEREDIA, J.; SOLERA-HERNÁNDEZ, C. Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 91, n. 10, p. 2051-2058, out. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.05.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479710001428>. Acesso em: 01 abr. 2020.

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, dez. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.10.030>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894710009502>. Acesso em: 20 set. 2019.

SANTOS, H. R. *et al.* Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 9, n. 4, p.291-300, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522004000400005>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522004000400005&lng=en&nrm=iso&tlang=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522004000400005&lng=en&nrm=iso&tlang=pt). Acesso em: 10 mar. 2020.

SANTOS, J. D. dos *et al.* Use of different coagulants for cassava processing wastewater treatment. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 2, p. 1821-1827, abr. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2018.02.039>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343718301118>. Acesso em: 16 mar. 2020.

SHARP, E. L. *et al.* The Impact of Zeta Potential on the Physical Properties of Ferric–NOM Flocs. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 40, n. 12, p. 3934-3940, jun. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es051919r>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es051919r>. Acesso em: 18 mar. 2020.

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. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27750>. Acesso em: 2 abr. 2020.

SILVA, P. A. G. **Estudo da resistência do floco e da reflocação 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. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/152254>. Acesso em: 1 abr. 2020.

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. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/140204>. Acesso em: 2 abr. 2020.

SMITH, L. S. Public health role, Aluminium and Alzheimer's disease. **Environmetrics**, [s.l.], v. 6, n. 3, p.277-286, maio 1995. DOI: <https://doi.org/10.1002/env.3170060304>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/env.3170060304>. Acesso em: 05 jun. 2019.

SPINELLI, V. A. **Quitosana, polieletrólito natural para o tratamento de água potável.** 2001. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/82191>. Acesso em: 06 set. 2021.

TRAMONTINI, M.; ANGIOLINI, L. **Mannich bases: chemistry and uses.** [s.l.]: Crc Press, 1994. 289 p.

VAZ, C. *et al.* Use of the extract of the flower of Musa sp., in the treatment from coagulation – Flocculation, of iron ore fines. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 1155-1160, fev. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.047>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343718300472>. Acesso em: 12 fev. 2020.

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. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-10072007-202831/en.php>. Acesso em: 27 fev. 2020.

WANG, Y. *et al.* Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment. **Journal Of Colloid And Interface Science**, [s.l.], v. 332, n. 2, p. 354-359, abr. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2009.01.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979709000095>. Acesso em: 10 mar. 2020.

WIESNER, M. R. Kinetics of aggregate formation in rapid mix. **Water Research**, [s.l.], v. 26, n. 3, p. 379-387, mar. 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(92\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0043-1354(92)90035-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0043135492900353>. Acesso em: 18 mar. 2020.

YEUNG, A. K. C.; PELTON, R. Micromechanics: a new approach to studying the strength and breakup of flocs: A New Approach to Studying the Strength and Breakup of Flocs. **Journal Of Colloid And Interface Science**, [s.l.], v. 184, n. 2, p. 579-585, dez. 1996. DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jcis.1996.0654>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979796906542>. Acesso em: 24 mar. 2020.

YU, W. *et al.* Breakage and re-growth of flocs formed by alum and  $\text{PACl}$ . **Powder Technology**, [S.L.], v. 189, n. 3, p. 439-443, fev. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2008.07.008>. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591008003690?casa\\_token=dGj2ctK2bEAAAAAA:FLzJp2mLBGCKgRdBhWXKEd6j\\_ZKRoi9bHi2c4YHh\\_SUDHZ8WyaoORspi\\_qAxEM9atIIHiktZbVk](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591008003690?casa_token=dGj2ctK2bEAAAAAA:FLzJp2mLBGCKgRdBhWXKEd6j_ZKRoi9bHi2c4YHh_SUDHZ8WyaoORspi_qAxEM9atIIHiktZbVk). Acesso em: 07 jul. 2021.

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, fev. 2004. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0301-7516\(03\)00077-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0301-7516(03)00077-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751603000772>. Acesso em: 10 maio 2021.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DO DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO

Tabela A.1 – Resultados dos ensaios para dosagem de 25 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)			0,50	Dosagem (mL/L)			25,00		
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)			107	Temperatura (°C)			23		
pH da água bruta			6,40	Data		26/8/19	E	27/8/19	
Jarro Nº	pH de coagulação	Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,23	-	-	1,00	0,75	116	118	118	127
2	3,54	-	-	1,00	0,50	116	118	118	124
3	3,88	-	-	1,00	0,25	118	118	118	127
4	3,97	-	-	0,50	0,30	127	122	122	122
5	4,05	-	-	0,50	0,25	116	116	114	116
6	4,10	-	-	0,50	0,40	122	122	124	124
7	4,52	-	-	0,50	0,20	118	118	120	122
8	5,08	-	-	0,50	0,10	129	131	129	131
9	5,70	-	-	-	-	127	131	133	133
10	6,18	0,10	0,30	-	-	127	127	124	124
11	6,54	0,50	0,10	-	-	116	116	116	118
12	6,95	0,50	0,25	-	-	116	118	118	118
13	6,96	0,50	0,20	-	-	116	114	116	116
14	7,2	0,10	1,25	-	-	124	127	124	127
15	7,80	0,50	0,30	-	-	120	122	122	127
16	8,37	0,50	0,35	-	-	127	127	127	129
17	9,00	0,50	0,40	-	-	133	131	133	135
18	9,10	0,50	0,50	-	-	129	129	131	131
19	9,55	0,50	0,75	-	-	137	137	139	139
20	9,80	0,50	1,00	-	-	142	139	139	142

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.2 – Resultados dos ensaios para dosagem de 37,5 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)			0,75		Dosagem (mL/L)			37,50		
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)			107		Temperatura (°C)			26,30		
pH da água bruta			6,17		Data		26/8/19			
Jarro	pH de coagulação	Conc (mol/L)	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº			Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,98	-	-	0,50	0,30	122	122	124	124	124
2	4,21	-	-	0,50	0,15	122	124	124	124	124
3	4,63	-	-	-	-	124	124	124	124	127
4	4,74	0,50	0,07	-	-	127	129	129	129	131
5	5,53	0,50	0,14	-	-	133	133	135	135	135
6	6,13	0,50	0,20	-	-	137	137	135	135	139
7	6,42	0,50	0,25	-	-	34	28	32	32	32
8	6,79	0,50	0,30	-	-	139	139	139	139	139
9	7,27	0,50	0,40	-	-	137	137	137	137	139
10	7,65	0,5+0,1	0,4+0,1	-	-	142	142	142	142	146
11	7,90	0,5+0,1	0,4+0,05	-	-	139	139	142	142	144
12	8,14	0,5+0,1	0,4+0,15	-	-	144	144	144	144	146
13	8,20	0,5+0,1	0,4+0,25	-	-	144	144	144	144	146
14	8,70	0,50	0,50	-	-	150	150	150	150	150
15	8,99	0,50	0,60	-	-	150	150	152	152	152

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.3 – Resultados dos ensaios para dosagem de 50 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		1,0		Dosagem (mL/L)		50			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		25,5			
pH da água bruta		6,46		Data		4/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	4,10	-	-	0,50	0,20	127	127	127	127
2	4,18	-	-	0,50	0,10	122	122	122	124
3	4,67	-	-	-	-	127	129	124	127
4	5,36	0,10	0,70	-	-	129	131	133	135
5	5,57	0,10	0,85	-	-	133	133	133	135
6	5,90	0,10	1,00	-	-	137	135	139	139
7	6,32	0,10	1,30	-	-	135	133	135	135
8	6,45	0,10	1,60			30	32	17	19
9	6,56	0,50	0,30	-	-	32	21	21	19
10	6,65	0,10	1,80			39	36	30	32
11	7,02	0,10	2,00			144	139	142	142
12	7,50	0,10	2,20			146	144	144	144
13	7,94	0,10	2,45	-	-	146	146	148	150
14	8,35	0,10	2,70	-	-	148	150	150	152
15	9,05	0,50	0,60	-	-	157	155	152	155
16	9,60	0,50	0,90	-	-	163	163	161	161

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.4 – Resultados dos ensaios para dosagem de 62,5 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		1,25		Dosagem (mL/L)		62,50			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		26,10			
pH da água bruta		6,37		Data		17/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,90	-	-	0,50	0,30	129	131	133	135
2	4,00	-	-	0,50	0,20	131	133	133	135
3	4,26	-	-	-	-	133	133	135	137
4	5,04	0,50	0,20	-	-	133	137	139	142
5	5,53	0,50	0,25	-	-	133	133	135	137
6	5,85	0,50	0,30	-	-	139	137	137	142
7	6,30	0,50	0,40	-	-	146	142	142	144
8	6,68	0,5+0,1	0,4+0,2	-	-	41	39	36	39
9	6,70	0,5+0,1	0,4+0,35	-	-	28	24	26	26
10	6,77	0,5+0,1	0,4+0,3	-	-	32	26	28	28
11	6,90	0,5+0,1	0,4+0,45	-	-	24	15	15	19
12	7,18	0,50	0,50	-	-	161	157	152	157
13	7,60	0,5+0,1	0,5+0,2	-	-	150	152	155	157
14	7,92	0,5+0,1	0,5+0,35	-	-	157	157	159	161
15	8,49	0,50	0,60	-	-	163	161	161	161
16	9,03	0,50	0,75	-	-	172	176	176	176

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.5 – Resultados dos ensaios para dosagem de 75 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		1,50		Dosagem (mL/L)		75,0			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		25,20			
pH da água bruta		6,33		Data	5/9/19				
Jarr o Nº	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min		
1	3,97	-	-	0,50	0,25	131	133		
2	4,10	-	-	0,50	0,15	133	135		
3	4,40	-	-	-	-	131	133		
4	4,60	0,10	0,50	-	-	137	139		
5	4,70	0,10	0,70	-	-	139	137		
6	5,30	0,10	1,10	-	-	142	144		
7	5,60	0,50	0,20	-	-	137	139		
8	5,80	0,50	0,30	-	-	148	150		
9	6,15	0,50	0,35	-	-	150	148		
10	6,46	0,50	0,40	-	-	150	150		
11	6,47	0,50	0,50	-	-	161	163		
12	6,70	0,50	0,52	-	-	13	13		
13	6,91	0,50	0,54	-	-	19	19		
14	7,24	0,50	0,55	-	-	19	17		
15	7,40	0,50	0,60	-	-	161	163		
16	8,08	0,50	0,63	-	-	165	165		
17	8,15	0,50	0,65	-	-	165	167		
18	8,50	0,50	0,72	-	-	172	172		
19	8,80	0,50	0,80	-	-	176	178		
20	9,17	0,50	0,95	-	-	187	187		
						V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min		

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.6 – Resultados dos ensaios para dosagem de 82,5 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		1,75		Dosagem (mL/L)		82,50			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		25,40			
pH da água bruta		6,15		Data		17/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,84	-	-	0,50	0,30	133	133	133	137
2	3,98	-	-	0,50	0,20	133	135	135	135
3	4,15	-	-	-	-	137	137	135	142
4	4,36	0,50	0,10	-	-	137	139	139	139
5	5,06	0,50	0,30	-	-	146	144	144	144
6	5,31	0,50	0,40	-	-	146	150	152	150
7	5,91	0,50	0,50	-	-	150	157	157	157
8	6,34	0,50	0,60	-	-	161	163	167	167
9	6,82	0,50	0,65	-	-	19	15	19	17
10	7,10	0,50	0,70	-	-	43	45	45	45
11	7,50	0,50	0,70			176	178	180	182
12	7,77	0,50	0,80	-	-	178	176	176	178
13	7,95	0,50	0,75	-	-	185	185	185	185
14	8,10	0,5+0,1	0,7+0,2	-	-	176	176	178	178
15	8,76	0,50	0,90	-	-	191	191	195	191
16	8,95	0,5+0,1	0,7+1,6	-	-	191	195	193	195
17	9,10	0,50	1,00	-	-	193	191	189	195

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.7 – Resultados dos ensaios para dosagem de 100 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		2,0		Dosagem (mL/L)		100			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		24,30			
pH da água bruta		6,54		Data		29/8/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Remanescente			
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,80	-	-	0,50	0,40	135	137	137	137
2	4,17	-	-	-	-	144	144	144	146
3	4,50	0,50	0,10	-	-	148	146	146	150
4	5,00	0,50	0,30	-	-	150	152	152	155
5	5,05	0,50	0,40	-	-	152	155	157	157
6	5,78	0,50	0,45	-	-	157	157	159	161
7	5,91	0,50	0,50	-	-	165	165	167	170
8	6,33	0,50	0,60	-	-	172	170	172	182
9	6,65	0,50	0,70	-	-	127	124	127	133
10	6,80	0,10	3,50	-	-	45	45	43	45
11	7,34	0,10	3,70	-	-	24	21	19	19
12	7,60	0,10	4,00	-	-	30	21	21	24
13	7,72	0,10	3,90	-	-	43	41	41	43
14	8,24	0,10	4,10	-	-	182	185	187	189
15	8,54	0,10	3,60	-	-	165	165	170	170
16	8,56	0,50	0,90	-	-	172	191	193	195
17	8,60	0,10	4,30	-	-	187	189	191	193
18	9,16	0,50	1,10	-	-	206	208	208	212
19	9,47	0,50	1,30	-	-	215	219	219	217
20	9,96	0,50	2,00	-	-	234	236	238	236

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.8 – Resultados dos ensaios para dosagem de 112,50 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		2,25		Dosagem (mL/L)		112,50			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		26,6			
pH da água bruta		6,45		Data		20/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,82	-	-	0,50	0,20	135	135	137	137
2	3,97	-	-	-	-	139	139	142	142
3	4,35	0,50	0,30	-	-	144	146	148	146
4	4,50	0,50	0,50	-	-	152	155	157	157
5	5,16	0,50	0,60	-	-	159	159	159	163
6	5,65	0,50	0,70	-	-	167	167	167	172
7	6,08	0,50	0,77	-	-	176	180	182	187
8	6,38	0,50	0,80	-	-	185	187	187	195
9	6,54	0,5+0,1	0,9+0,35	-	-	204	202	202	204
10	6,69	0,50	1,00	-	-	77	75	77	79
11	7,21	0,50	0,90			21	21	21	21
12	7,48	0,5+0,1	0,9+0,2	-	-	94	86	88	84
13	7,89	0,50	0,92			204	206	206	206
14	8,32	0,50	0,95			202	202	202	202
15	8,56	0,5+0,1	0,9+0,5	-	-	202	204	206	206
16	8,58	0,50	1,05	-	-	202	204	202	206
17	8,91	0,50	1,10	-	-	206	208	208	210
18	9,05	0,50	1,20	-	-	206	208	208	215
19	9,26	0,50	1,30	-	-	215	219	219	221

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.9 – Resultados dos ensaios para dosagem de 125 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)			2,5	Dosagem (mL/L)			125			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)			107	Temperatura (°C)			25,5			
pH da água bruta			6,44	Data		6/9/19				
Jarro	pH de coagulação	Conc (mol/L)	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº			Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	4,00	-	-	-	-	-	139	142	142	146
2	4,40	0,50	0,30	-	-	-	146	148	150	150
3	4,67	0,50	0,40	-	-	-	155	157	159	161
4	5,00	0,50	0,50	-	-	-	163	163	163	167
5	5,62	0,50	0,60	-	-	-	163	165	170	170
6	5,95	0,50	0,70	-	-	-	180	178	182	185
7	6,59	0,50	0,80	-	-	-	193	193	195	200
8	6,82	0,5+0,1	0,9+0,1	-	-	-	13	13	13	13
9	6,92	0,50	0,90	-	-	-	13	15	17	15
10	7,19	0,5+0,1	0,9+0,2	-	-	-	13	13	13	11
11	7,31	0,50	1,00	-	-	-	15	11	11	13
12	7,50	0,5+0,1	0,9+0,3	-	-	-	13	11	9	9
13	7,78	0,50	0,97	-	-	-	13	13	11	13
14	8,23	0,5+0,1	0,9+0,4	-	-	-	17	15	15	15
15	8,26	0,5+0,1	1+0,1	-	-	-	208	208	210	215
16	8,34	0,5+0,1	1+0,2	-	-	-	210	215	212	217
17	8,50	0,5+0,1	1+0,3	-	-	-	217	219	221	221
18	8,56	0,5+0,1	1+0,4	-	-	-	208	212	215	219
19	8,78	0,50	1,10	-	-	-	215	215	217	215
20	9,00	0,50	1,20	-	-	-	204	206	204	204
21	9,26	0,50	1,30	-	-	-	215	215	215	215

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.10 – Resultados dos ensaios para dosagem de 137,5 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		2,75		Dosagem (mL/L)		137,5			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		27,3			
pH da água bruta		5,91		Data		23/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,85	-	-	-	-	148	150	150	150
2	4,25	0,50	0,40	-	-	157	152	157	159
3	4,65	0,50	0,60	-	-	163	165	163	167
4	4,99	0,50	0,70	-	-	165	170	170	170
5	5,59	0,50	0,80	-	-	180	182	185	185
6	6,02	0,50	0,90	-	-	189	193	193	195
7	6,57	0,50	1,00	-	-	187	195	193	187
8	6,78	0,5+0,1	1+0,15	-	-	11	9	11	11
9	7,04	0,50	1,05	-	-	13	13	11	11
10	7,37	0,5+0,1	1+0,4	-	-	13	15	13	15
11	7,55	0,50	1,10	-	-	32	32	32	32
12	8,12	0,50	1,15	-	-	139	133	131	133
13	8,17	0,5+0,1	1,1+0,15	-	-	221	223	221	221
14	8,58	0,50	1,20	-	-	219	221	223	225
15	8,94	0,50	1,30	-	-	225	225	227	232
16	9,19	0,50	1,40	-	-	232	236	234	238

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.11 – Resultados dos ensaios para dosagem de 150 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		3		Dosagem (mL/L)		150			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		24,8			
pH da água bruta		6,42		Data	30/8/19	e	2/9/19		
Jarro	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,35	-	-	0,50	0,60	146	144	146	142
2	3,36	-	-	0,50	0,80	144	144	148	144
3	3,46	-	-	0,50	1,30	148	148	148	144
4	3,49	-	-	0,50	1,20	146	146	146	144
5	3,93	-	-	-	-	150	150	152	152
6	4,54	0,50	0,50	-	-	157	159	159	163
7	4,78	0,50	0,60	-	-	167	167	167	170
8	5,39	0,50	0,70	-	-	176	176	176	178
9	5,95	0,50	0,80	-	-	191	191	195	195
10	6,28	0,50	0,90	-	-	202	202	204	204
11	6,60	0,50	1,00	-	-	210	212	212	217
12	6,80	0,50	1,00	-	-	221	223	225	227
13	7,29	0,50	1,10	-	-	13	13	11	13
14	7,60	0,10	5,50	-	-	17	15	15	15
15	7,80	0,10	5,60	-	-	21	15	17	15
16	8,14	0,10	5,70	-	-	26	19	24	21
17	8,22	0,10	5,80	-	-	21	21	19	21
18	8,60	0,50	1,20	-	-	234	236	238	236
19	8,90	0,50	1,30	-	-	240	240	243	243
20	9,15	0,50	1,50	-	-	247	247	249	253

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.12 – Resultados dos ensaios para dosagem de 162,5 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		3,25		Dosagem (mL/L)		162,5			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		24,9			
pH da água bruta		5,93		Data		25/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Remanescente			
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,79	-	-	-	-	150	150	150	152
2	4,24	0,50	0,50	-	-	159	159	161	161
3	4,66	0,50	0,70	-	-	165	167	170	174
4	4,97	0,50	0,80	-	-	167	170	172	174
5	5,45	0,50	0,90	-	-	180	178	182	187
6	5,86	0,50	1,00	-	-	193	195	197	202
7	6,27	0,50	1,10	-	-	204	206	212	212
8	6,49	0,50	1,15	-	-	217	219	221	223
9	6,90	0,50	1,20	-	-	15	15	15	15
10	7,10	0,5+0,1	1,2+0,1	-	-	13	13	13	15
11	7,69	0,5+0,1	1,2+0,2	-	-	15	15	15	15
12	7,80	0,50	1,25	-	-	19	19	19	19
13	8,29	0,50	1,30	-	-	135	139	144	146
14	8,65	0,50	1,40	-	-	247	249	251	251
15	9,16	0,50	1,55	-	-	255	260	264	258

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.13 – Resultados dos ensaios para dosagem de 175 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		3,5		Dosagem (mL/L)		175			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		25,2			
pH da água bruta		6,5		Data		10/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,82	-	-	-	-	146	150	152	152
2	3,84	0,50	0,10	-	-	152	152	152	152
3	4,21	0,50	0,50	-	-	159	159	161	163
4	4,68	0,50	0,70	-	-	163	165	167	167
5	5,11	0,50	0,80			172	172	174	174
6	5,44	0,50	0,90	-	-	178	178	178	180
7	5,78	0,50	1,00			189	187	187	187
8	6,26	0,50	1,10	-	-	202	204	204	210
9	6,75	0,50	1,20	-	-	217	219	221	225
10	7,10	0,5+0,1	1,2+0,2	-	-	191	191	193	197
11	7,23	0,50	1,30	-	-	15	13	15	15
12	7,32	0,5+0,1	1,2+0,3	-	-	15	15	11	11
13	7,60	0,5+0,1	1,3+0,2	-	-	11	9	9	9
14	7,88	0,5+0,1	1,3+0,25	-	-	19	17	15	17
15	8,22	0,5+0,1	1,3+0,3	-	-	19	19	21	21
16	8,37	0,50	1,40	-	-	73	71	71	71
17	8,81	0,50	1,50	-	-	253	253	253	255
18	9,28	0,50	1,70	-	-	268	273	273	273

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.14 – Resultados dos ensaios para dosagem de 187,5 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		3,75		Dosagem (mL/L)		187,5			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		22,8			
pH da água bruta		6		Data		27/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Remanescente			
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,70	-	-	-	-	161	161	161	161
2	4,10	0,50	0,50	-	-	167	170	170	170
3	4,53	0,50	0,75	-	-	172	172	174	174
4	5,20	0,50	1,00	-	-	191	191	193	195
5	5,70	0,50	1,10	-	-	200	202	204	206
6	5,98	0,50	1,20	-	-	217	217	217	217
7	6,36	0,50	1,30	-	-	227	232	236	238
8	6,67	0,50	1,35	-	-	15	15	13	13
9	6,90	0,50	1,40	-	-	24	24	24	24
10	7,55	0,50	1,45	-	-	19	19	19	19
11	7,92	0,50	1,50	-	-	17	15	13	13
12	8,46	0,5+0,1	1,5+0,1	-	-	273	270	273	275
13	8,65	0,5+0,1	1,5+0,3	-	-	270	273	273	275
14	8,72	0,50	1,60	-	-	275	275	281	283
15	9,20	0,50	1,75	-	-	288	285	288	292

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.15 – Resultados dos ensaios para dosagem de 200 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)			4	Dosagem (mL/L)			200			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)			107	Temperatura (°C)			25,6			
pH da água bruta			6,5	Data		2/9/19				
Jarro	pH de coagulação	Conc (mol/L)	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº			Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,80	-	-	-	-	-	161	163	163	165
2	4,20	0,50	0,50	-	-	-	170	170	172	178
3	4,50	0,10	3,50	-	-	-	176	176	178	178
4	4,87	0,10	4,25	-	-	-	182	185	187	189
5	5,30	0,50	0,90	-	-	-	191	193	191	193
6	5,60	0,50	1,00	-	-	-	202	206	204	208
7	6,00	0,50	1,15	-	-	-	215	217	219	223
8	6,55	0,50	1,30	-	-	-	240	243	247	255
9	7,01	0,50	1,40	-	-	-	36	34	39	34
10	7,05	0,50	1,40	-	-	-	34	36	36	36
11	7,54	0,10	7,25	-	-	-	15	17	15	17
12	7,90	0,50	1,50	-	-	-	19	34	15	15
13	7,98	0,50	1,50	-	-	-	9	9	9	9
14	8,10	0,50	1,45	-	-	-	15	15	17	15
15	8,36	0,50	1,60	-	-	-	41	41	41	39
16	8,79	0,50	1,70	-	-	-	281	283	285	288
17	9,10	0,50	1,80	-	-	-	294	296	298	298
18	9,30	0,50	2,00	-	-	-	307	309	309	309

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.16 – Resultados dos ensaios para dosagem de 212,5 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		4,25		Dosagem (mL/L)		212,5			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		24,5			
pH da água bruta		5,9		Data		30/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,76	-	-	-	-	163	165	163	163
2	4,04	0,50	0,50	-	-	167	170	167	167
3	4,41	0,50	0,80	-	-	178	178	178	180
4	5,04	0,50	1,10	-	-	195	197	195	197
5	5,36	0,50	1,20	-	-	193	200	200	200
6	5,80	0,50	1,30	-	-	212	217	215	217
7	6,10	0,50	1,40	-	-	230	232	232	234
8	6,57	0,50	1,50	-	-	243	247	245	245
9	6,90	0,5+0,1	1,5+0,1	-	-	15	21	19	19
10	7,20	0,50	1,55	-	-	11	9	11	11
11	7,61	0,50	1,60	-	-	11	11	11	11
12	8,06	0,50	1,65	-	-	17	11	13	13
13	8,30	0,50	1,70	-	-	19	21	21	21
14	8,62	0,50	1,75			300	303	298	298
15	8,89	0,50	1,80	-	-	292	290	290	290
16	9,21	0,50	2,00	-	-	305	298	303	303

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.17 – Resultados dos ensaios para dosagem de 225 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)			4,5	Dosagem (mL/L)			225			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)			107	Temperatura (°C)			25,7			
pH da água bruta			6,1	Data		11/9/19				
Jarro	pH de coagulação	Conc (mol/L)	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº			Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,76	-	-	-	-	-	163	165	165	165
2	4,07	0,50	0,50	-	-	-	165	172	172	174
3	4,18	0,50	0,70	-	-	-	180	180	178	180
4	4,50	0,50	0,90	-	-	-	185	185	185	187
5	4,82	0,50	1,10	-	-	-	185	185	187	187
6	5,15	0,5+0,1	1,1+0,1	-	-	-	189	189	191	195
7	5,73	0,50	1,30	-	-	-	204	210	212	215
8	5,75	0,50	1,20	-	-	-	197	202	200	204
9	6,11	0,50	1,40	-	-	-	221	225	225	227
10	6,57	0,50	1,50	-	-	-	245	249	251	253
11	7,06	0,5+0,1	1,5+0,4	-	-	-	260	264	264	270
12	7,13	0,50	1,60	-	-	-	19	15	15	17
13	7,15	0,5+0,1	1,6+0,2	-	-	-	9	9	6	9
14	7,30	0,5+0,1	1,6+0,3	-	-	-	11	9	6	9
15	7,58	0,5+0,1	1,6+0,5	-	-	-	15	13	13	13
16	8,36	0,50	1,70	-	-	-	21	19	19	21
17	8,63	0,50	1,80	-	-	-	36	36	36	39
18	9,01	0,50	2,00	-	-	-	307	305	309	309
19	9,42	0,50	2,20	-	-	-	328	326	330	330

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.18 – Resultados dos ensaios para dosagem de 237,5 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)			4,75	Dosagem (mL/L)			237,5			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)			107	Temperatura (°C)			25,5			
pH da água bruta			6	Data		30/9/19				
Jarro	pH de coagulação	Nº	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
			Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,75		-	-	-	-	163	167	167	165
2	4,03		0,50	0,50	-	-	167	170	170	170
3	4,39		0,50	0,90	-	-	180	185	182	182
4	4,96		0,50	1,20	-	-	197	200	202	200
5	5,52		0,50	1,40	-	-	212	217	219	219
6	5,99		0,50	1,50	-	-	238	238	240	243
7	6,35		0,50	1,60	-	-	251	253	255	258
8	6,81		0,50	1,70	-	-	105	105	107	107
9	7,14		0,5+0,1	1,7+0,1	-	-	9	6	6	6
10	7,37		0,50	1,75	-	-	9	6	6	6
11	7,90		0,50	1,80	-	-	13	9	9	6
12	8,31		0,50	1,85	-	-	17	15	19	13
13	8,38		0,50	1,90	-	-	36	32	30	30
14	8,64		0,50	1,92	-	-	49	49	52	52
15	8,80		0,50	1,95	-	-	324	330	328	330
16	8,94		0,50	2,00	-	-	311	307	311	315
17	9,17		0,50	2,10	-	-	320	320	322	324
18	9,36		0,50	2,30	-	-	333	335	337	341

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.19 – Resultados dos ensaios para dosagem de 250 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		5		Dosagem (mL/L)		250			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		26,6			
pH da água bruta		6,02		Data		12/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Remanescente			
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,70	-	-	-	-	167	165	165	165
2	3,95	0,50	0,50	-	-	172	170	170	172
3	4,11	0,50	0,70	-	-	174	176	174	176
4	4,28	0,50	0,90	-	-	178	178	178	178
5	4,67	0,50	1,20	-	-	197	197	193	191
6	5,15	0,50	1,30	-	-	204	206	208	212
7	5,37	0,50	1,35	-	-	210	212	210	217
8	5,80	0,50	1,50	-	-	219	230	227	230
9	6,54	0,5+0,1	1,7+0,2	-	-	262	266	264	270
10	6,59	0,50	1,65	-	-	262	264	266	273
11	6,77	0,50	1,80	-	-	103	99	101	101
12	7,40	0,50	1,81	-	-	6	6	6	6
13	7,67	0,50	1,85	-	-	13	13	13	13
14	7,83	0,5+0,1	1,8+0,2	-	-	15	13	13	13
15	8,05	0,5+0,1	1,8+0,4	-	-	15	15	15	15
16	8,16	0,50	1,90	-	-	15	15	15	13
17	8,35	0,50	1,95	-	-	19	19	19	17
18	8,56	0,50	2,05	-	-	77	79	79	82
19	8,98	0,50	2,10	-	-	326	326	326	339
20	9,23	0,50	2,30	-	-	343	348	352	348

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.20 – Resultados dos ensaios para dosagem de 262,5 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		5,25		Dosagem (mL/L)		262,5			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		25,5			
pH da água bruta		5,97		Data		1/10/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,65	-	-	-	-	174	174	174	174
2	4,02	0,50	0,70	-	-	180	182	185	185
3	4,28	0,50	1,00	-	-	189	189	191	189
4	4,85	0,50	1,30	-	-	200	200	202	204
5	5,51	0,50	1,50	-	-	221	227	230	232
6	5,79	0,50	1,60	-	-	236	240	240	245
7	6,26	0,50	1,70	-	-	258	260	262	264
8	6,64	0,50	1,80	-	-	253	253	255	255
9	6,95	0,50	1,85	-	-	45	45	41	43
10	7,10	0,50	1,90	-	-	17	17	15	15
11	7,52	0,50	1,95	-	-	13	13	9	9
12	7,70	0,50	2,00	-	-	11	11	9	9
13	8,20	0,50	2,00			15	13	13	13
14	8,60	0,50	2,10	-	-	49	45	47	49
15	8,94	0,50	2,20	-	-	324	328	333	333
16	9,16	0,50	2,30	-	-	339	341	343	343
17	9,25	0,50	2,40	-	-	352	354	354	354

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.21 – Resultados dos ensaios para dosagem de 275 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)			5,5	Dosagem (mL/L)			275					
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)			107	Temperatura (°C)			26,1					
pH da água bruta			6,1	Data		18/9/19						
Jarro	pH de coagulação	Conc (mol/L)	NaOH	HCl	Cor Remanescente				V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
Nº			Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min		
1	3,68	-	-	-	-	-	172	174	176	176		
2	4,05	0,50	0,70	-	-	-	185	185	187	189		
3	4,32	0,50	1,00	-	-	-	193	195	197	197		
4	4,93	0,50	1,30	-	-	-	204	206	208	210		
5	5,30	0,50	1,50	-	-	-	225	227	219	221		
6	5,81	0,50	1,60	-	-	-	227	223	227	232		
7	6,18	0,50	1,70	-	-	-	253	258	249	253		
8	6,41	0,50	1,80	-	-	-	264	264	264	266		
9	6,56	0,50	1,90	-	-	-	283	288	281	281		
10	6,92	0,50	2,00	-	-	-	62	62	62	62		
11	7,55	0,50	2,10	-	-	-	11	9	9	9		
12	7,80	0,50	2,05	-	-	-	11	11	11	15		
13	8,01	0,50	2,15	-	-	-	13	17	19	15		
14	8,26	0,5+0,1	2,10+0,2	-	-	-	21	17	21	21		
15	8,46	0,50	2,20	-	-	-	36	34	34	36		
16	8,90	0,50	2,35	-	-	-	350	354	348	356		
17	9,26	0,50	2,45	-	-	-	356	358	358	358		

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.22 – Resultados dos ensaios para dosagem de 287,5 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		5,75		Dosagem (mL/L)		287,5			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		25,4			
pH da água bruta		5,8		Data		2/10/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH	HCl	Cor Remanescente					
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,66	-	-	-	-	178	174	174	176
2	4,18	0,50	0,90	-	-	189	191	191	193
3	4,41	0,50	1,15	-	-	200	200	197	195
4	4,77	0,50	1,40	-	-	208	210	208	208
5	5,24	0,50	1,60	-	-	208	212	215	217
6	5,94	0,50	1,80	-	-	249	255	253	255
7	6,60	0,50	2,00	-	-	262	266	268	273
8	6,90	0,50	2,10	-	-	9	11	11	11
9	7,23	0,50	2,17	-	-	26	24	24	24
10	7,69	0,50	2,15	-	-	11	9	9	9
11	7,85	0,50	2,12	-	-	13	11	11	11
12	8,42	0,50	2,20	-	-	13	15	13	13
13	8,71	0,50	2,25	-	-	39	39	39	41
14	8,71	0,50	2,30	-	-	54	52	54	54
15	8,92	0,50	2,40	-	-	354	350	350	346
16	9,25	0,50	2,60	-	-	371	373	373	373

Fonte: do Autor, 2019.

Tabela A.23 – Resultados dos ensaios para dosagem de 300 mL/L

Quantidade de Tanino (mL)		6		Dosagem (mL/L)		300			
Cor Aparente da Amostra Bruta (uH)		107		Temperatura (°C)		25,5			
pH da água bruta		6,46		Data		4/9/19			
Jarro	pH de coagulação	NaOH		HCl		Cor Remanescente			
Nº		Conc (mol/L)	Vol (mL)	Conc (mol/L)	Vol (mL)	V1= 5 cm/min	V2= 2,5 cm/min	V3= 1 cm/min	V4= 0,5 cm/min
1	3,62	-	-	-	-	178	180	178	178
2	4,23	0,50	1,00	-	-	193	191	193	197
3	4,62	0,50	1,25	-	-	210	210	210	212
4	5,20	0,50	1,50	-	-	225	223	227	227
5	5,74	0,50	1,65	-	-	253	255	255	262
6	6,56	0,50	1,85	-	-	285	290	292	294
7	6,85	0,50	2,00	-	-	225	223	227	232
8	6,99	0,5+0,1	2+0,75	-	-	221	223	227	227
9	7,07	0,5+0,1	2+0,3	-	-	330	335	337	343
10	7,42	0,50	2,15	-	-	17	17	17	17
11	8,06	0,5+0,1	2+1,2	-	-	21	17	21	21
12	8,35	0,50	2,30	-	-	17	19	15	19
13	8,72	0,5+0,1	2+2	-	-	99	97	101	103
14	9,00	0,50	2,50	-	-	384	386	393	397
15	9,32	0,50	2,70	-	-	384	391	399	406
16	9,55	0,50	2,90	-	-	401	401	408	410

Fonte: do Autor, 2019.

## APÊNDICE B – RESULTADOS DE FORÇA E REFLOCULAÇÃO

Tabela B.1 – Resultados de quebra e reflocação para o Ponto 1

	Quebra a 120 s <sup>-1</sup>					Quebra a 500 s <sup>-1</sup>				
	d1	d2	d3	FF	FR	d1	d2	d3	FF	FR
<b>G20</b>	0,460	0,700	0,932	152,04	50,34	0,608	0,420	0,699	69,10	45,89
<b>G30</b>	0,808	0,670	0,812	82,87	17,52	0,701	0,420	0,651	59,95	32,96
<b>G40</b>	0,839	0,723	0,711	86,18	-1,50	0,564	0,386	0,624	68,37	42,21
<b>G60</b>	0,741	0,630	0,639	85,04	1,25	0,718	0,428	0,516	59,57	12,26

Fonte: Do Autor, 2021.

Tabela B.2 – Resultados de quebra e reflocação para o Ponto 2

	Quebra a 120 s <sup>-1</sup>					Quebra a 500 s <sup>-1</sup>				
	d1	d2	d3	FF	FR	d1	d2	d3	FF	FR
<b>G20</b>	0,526	0,599	0,624	113,91	4,76	0,384	0,450	0,920	117,00	122,39
<b>G30</b>	0,847	0,804	0,839	94,87	4,20	0,801	0,435	0,648	54,26	26,70
<b>G40</b>	0,792	0,727	0,731	91,79	0,59	0,819	0,457	0,514	55,76	7,04
<b>G60</b>	0,709	0,657	0,621	92,66	-5,08	0,699	0,444	0,459	63,46	2,23

Fonte: Do Autor, 2021.

Tabela B.3 – Resultados de quebra e reflocação para o Ponto 3

	Quebra a 120 s <sup>-1</sup>					Quebra a 500 s <sup>-1</sup>				
	d1	d2	d3	FF	FR	d1	d2	d3	FF	FR
<b>G20</b>	0,670	0,696	0,929	103,87	34,73	0,660	0,445	0,728	67,44	42,83
<b>G30</b>	0,915	0,767	0,868	83,76	11,01	0,915	0,443	0,649	48,41	22,49
<b>G40</b>	1,034	0,959	0,911	92,76	-4,63	0,983	0,561	0,608	57,06	4,80
<b>G60</b>	0,739	0,737	0,669	99,76	-9,32	0,821	0,507	0,599	61,73	11,19

Fonte: Do Autor, 2021.

Tabela B.4 – Resultados de quebra e reflocação para o Ponto 4

	Quebra a 120 s <sup>-1</sup>					Quebra a 500 s <sup>-1</sup>				
	d1	d2	d3	FF	FR	d1	d2	d3	FF	FR
<b>G20</b>	0,577	0,716	0,815	124,00	17,14	0,677	0,458	0,774	67,58	46,69
<b>G30</b>	0,980	0,767	0,881	78,30	11,60	0,707	0,487	0,684	68,85	27,96
<b>G40</b>	0,839	0,774	0,752	92,20	-2,59	0,899	0,474	0,523	52,76	5,36
<b>G60</b>	0,711	0,712	0,637	100,10	-10,61	0,735	0,453	0,473	61,60	2,74

Fonte: Do Autor, 2021.

Tabela B.5 – Resultados de quebra e reflocação para o Ponto 5

	Quebra a 120 s <sup>-1</sup>					Quebra a 500 s <sup>-1</sup>				
	d1	d2	d3	FF	FR	d1	d2	d3	FF	FR
<b>G20</b>	0,641	0,704	0,960	109,75	39,99	0,501	0,515	0,999	102,75	96,58
<b>G30</b>	0,830	0,833	0,853	100,39	2,36	0,378	0,489	0,836	129,36	91,68
<b>G40</b>	0,912	0,826	0,816	90,57	-1,11	0,856	0,486	0,620	56,82	15,61
<b>G60</b>	0,725	0,720	0,655	99,27	-8,99	0,737	0,459	0,461	62,22	0,24

Fonte: Do Autor, 2021.