



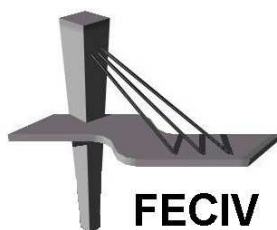
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Dissertação DE MESTRADO

**EVOLUÇÃO DO DIÂMETRO FRACTAL DE
AGREGADOS FORMADOS A PARTIR DE ÁGUA
COM BAIXA TURBIDEZ**

LUAN SERAFIM MENDES GONÇALVES

UBERLÂNDIA, setembro/2017



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



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Luan Serafim Mendes Gonçalves

EVOLUÇÃO DO DIÂMETRO FRACTAL DE AGREGADOS FORMADOS A PARTIR DE ÁGUA COM BAIXA TURBIDEZ

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

Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

Uberlândia, setembro/2017



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

- ATA Nº: 195/2017

CANDIDATO: Luan Serafim Mendes Gonçalves

Nº. Matrícula: 11512ECV003

ORIENTADOR: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

TÍTULO: "Evolução do diâmetro fractal de agregados formados a partir de água com baixa turbidez".

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

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

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

DATA DA DEFESA: 11 de setembro de 2017

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

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 13:30 - 15:30

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGE, assim composta: Professores Doutores: **José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU; Rodrigo Braga Moruzzi – IGCE/UNESP e André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU** orientador do candidato. Ressalta-se que o **Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi** participou da defesa por meio de vídeo conferência desde a cidade de Rio Claro/SP e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. André Luiz de Oliveira** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato APROVADO. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.


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


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


Membro interno: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU**

Uberlândia, 11 de SETEMBRO de 2017.

*Para minha companheira, amiga e esposa, Lauren;
meus pais Osana e Inácio;
meu orientador André.*

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Lauren, meu ponto de equilíbrio, sempre presente e motivadora. Obrigado por ser sempre companheira e por me fazer perseverar pela sua serenidade e amor.

A minha mãe Osana, pelo carinho e dedicação em todos os momentos da minha educação. Ao meu pai Inácio, pelo esforço hercúleo na minha formação.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Luiz de Oliveira pela paciência, compreensão, ensinamentos compartilhados e o precioso tempo gasto em minha orientação.

Aos meus colegas de pesquisa Ricardo e Yuri pelas conversas, palavras de incentivo e horas de pesquisa divididas em laboratório.

A Técnica Aline Martins Pinheiro pelo apoio nos trabalhos de laboratório.

Aos demais professores da FECIV/UFU que se dedicam diariamente aos alunos.

Gonçalves, L. S. M. Evolução do diâmetro fractal de agregados formados a partir de água com baixa turbidez. 96 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

RESUMO

A melhor forma de descrever a complicada estrutura dos flocos é através da teoria fractal. Algumas propriedades como a velocidade de sedimentação e a densidade aparente estão relacionadas com a natureza fractal dos agregados. O diâmetro fractal (D_f) pode ser calculado a partir de uma relação entre a área projetada e um comprimento característico da partícula, fornecendo importante informação sobre a forma dos flocos. Neste trabalho serão utilizadas imagens de alta resolução a fim de acompanhar e comparar a evolução do diâmetro fractal dos flocos durante o processo de floculação em águas de baixa turbidez (6,5 NTU) utilizando três coagulantes: PAC, sulfato de alumínio e cloreto férrico, em escala de laboratório com o uso do *jar test*, submetidos à seis gradientes médio de velocidade (20, 40, 60, 80, 100, 120 s^{-1}). Com esta técnica, é possível obter imagens diretas dos flocos enquanto o processo está em andamento. Com o uso combinado de softwares de controle da câmera fotográfica e de análise de imagens, foi possível obter dados para o acompanhamento da evolução do diâmetro fractal. Os flocos formados nessas condições apresentaram valores de D_f entre 1,73 e 1,86. O uso do Cloreto Férrico e do PAC na floculação garantem a produção de flocos com diâmetro fractal semelhante para um mesmo gradiente de velocidade e tempo, enquanto os gerados pelo uso do Sulfato de Alumínio mostram D_f ligeiramente inferior aos demais coagulantes. Os resultados sugerem que o desenvolvimento do diâmetro fractal não é sensível à alteração do gradiente de velocidade em sistemas de baixas turbidez, indicando que as características dos flocos formados pelo mecanismo de varredura estão intimamente ligadas ao coagulante utilizado.

Palavras-chave: análise de imagens; diâmetro fractal; floculação; tratamento de água.

ABSTRACT

Coagulation and flocculation are important processes in the treatment of drinking water, with direct impact on operational reliability, cost and quality of water treatment plants. In this work, high resolution images were used in order to monitor and compare the evolution of flocs' fractal dimension in the flocculation process for low-turbidity waters (6,5 NTU) using three coagulants in a laboratory-scale (jar test): polyaluminum chloride, aluminum sulfate and ferric chloride, under six shear rates (20, 40, 60, 80, 100, 120 s⁻¹). With this technique is possible to obtain direct images of flocs while the process is underway. As a result of a combination of camera control and image analysis softwares, it was possible to obtain data for determination of the fractal dimension. The results demonstrate that the fractal dimension development is not sensitive to the change of the shear rates for low turbidity waters. The flocs formed under these conditions showed D_f values between 1.73 and 1.86. The use of Ferric Chloride and PAC in flocculation ensures the formation of flocs with similar fractal diameter at the same shear rate and time, while those generated by the use of polyaluminum chloride are slightly lower than other coagulants.

Keywords: image analysis; fractal dimension; flocculation; water treatment.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SIGLAS

AWWA - American Water Works Association

D_f - Diâmetro Fractal

ETA - Estação de tratamento de água

FECIV - Faculdade de Engenharia Civil

G - Gradiente médio de velocidade (s⁻¹)

MON - Matéria Orgânica Natural

NIH - National Institute of Health

NTU - Unidade Nefelométrica de Turbidez

PAC - Policloreto de Alumínio

pH - Potencial hidrogeniônico

rpm - Rotações por minuto

SA - Sulfato de Alumínio

SCD - Detector de corrente elétrica

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

UNESP - Universidade Estadual Paulista

Zp - Potencial Zeta

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	8
INTRODUÇÃO	8
1.1 CENÁRIO.....	8
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	9
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	9
CAPÍTULO 2	10
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 INTRODUÇÃO	10
2.2 COAGULAÇÃO.....	13
2.2.1 Coagulante PAC.....	17
2.2.2 Coagulante Sulfato de Alumínio.....	19
2.2.3 Coagulante Cloreto Férrico	19
2.3 FLOCULAÇÃO.....	20
2.4 CARACTERÍSTICAS DOS FLOCOS	21
2.4.1 Crescimento dos flocos.....	22
2.4.2 Regeneração dos flocos.....	24
2.4.3 Tamanho dos flocos	25
2.4.4 Força do floco	27
2.4.5 Dimensão Fractal.....	30
2.5 TÉCNICAS PARA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS DOS FLOCOS ...	34
2.5.1 Espalhamento de luz.....	34
2.5.2 Sedimentação.....	36
2.5.3 Análise de Imagens.....	37
2.5.4 Microscopia confocal de escaneamento a laser.....	39
2.5.5 Síntese dos Métodos	40
2.6 TÉCNICAS PARA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO FRACTAL A PARTIR DE IMAGENS DIGITAIS	41
2.6.1 Box Counting.....	41
2.6.2 Sand Box.....	43
2.6.3 Área-Comprimento característico.....	45

2.6.4 Processamento de imagens: Breve histórico.....	45
CAPÍTULO 3	48
MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 INTRODUÇÃO	48
3.2 EQUIPAMENTOS	48
3.3 COAGULANTES	49
3.4 SOFTWARES	49
3.4.1 Surfer 10.....	49
3.4.2 ImageTool 3.0.....	50
3.4.3 ImageJ	50
3.4.4 Plugin FracLac para ImageJ	51
3.4.5 Camera Control 2.....	51
3.4.6 Origin 2007	52
3.5 PROCEDIMENTOS	52
3.5.1 Diagrama de Coagulação	52
3.5.1.1 Preparo da água com turbidez 6,5 NTU	52
3.5.1.2 Montagem do diagrama	53
3.5.2 Aquisição de Imagens.....	54
3.5.3 Processamento das imagens.....	55
3.5.4 Erros associados ao método.....	56
3.5.4.1 Erro de Limiar de binarização	57
3.5.4.2 Erro de Resolução	57
3.5.4.3 Erro de Amostragem.....	58
3.5.5 Ensaios para determinação da evolução da dimensão fractal.....	58
3.5.6 Cálculo da dimensão fractal	59
3.5.6.1 Cálculo da dimensão fractal pela área e comprimento característico	59
3.5.6.2 Cálculo da dimensão fractal pelo método Box Counting.....	60
3.5.6.3 Cálculo da dimensão fractal pela relação entre o diâmetro do floco e quantidade de partículas primárias	60
CAPÍTULO 4.....	61
RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1 DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO	61
8.1 DETERMINAÇÃO DOS ERROS INERENTES AO MÉTODO.....	63

4.1.1 Erro de Limiar de Binarização.....	63
4.1.2 Erro de resolução	64
4.1.3 Erro de Amostragem.....	64
8.2 ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL GLOBAL POR COAGULANTE	65
12.1 ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL POR GRADIENTE DE VELOCIDADE.....	68
12.2 ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL POR TEMPO	72
12.3 CÁLCULO DA DIMENSÃO FRACTAL PELO MÉTODO BOX COUNTING.....	78
12.4 CÁLCULO DA DIMENSÃO FRACTAL PELA RELAÇÃO ENTRE O DIÂMETRO DO FLOCO E QUANTIDADE DE PARTÍCULAS PRIMÁRIAS	79
12.5 AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS OBTIDOS	80
CAPÍTULO 5.....	84
CONCLUSÕES GERAIS E PERSPECTIVAS	84
13.1 CONCLUSÕES GERAIS DOS PRINCIPAIS RESULTADOS	84
13.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
REFERÊNCIAS	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1– Dinâmica típica do tratamento de água.....	10
Figura 2 – Partículas encontradas na água, técnicas de determinação de tamanho de partículas e tecnologias de tratamento de água e esgoto, por faixas de tamanho.....	11
Figura 3 – Esquema do processo de floculação com os ensaios mais utilizados	12
Figura 4 – Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio para remoção de turbidez...	17
Figura 5 – Esquema da quebra dos flocos e a formação de áreas de superfície inativas	25
Figura 6 – Fractal quadrático de 32 segmentos	33
Figura 7 – Ilustração de técnica fotográfica com câmeras de alta resolução	38
Figura 8 – Microscopia confocal de escaneamento a laser	39
Figura 9 – Círculo em análise no programa FracLac	43
Figura 10 – Método Sand Box.....	44
Figura 11 – Medição do comprimento, área e dimensão fractal do floco	45
Figura 12 – Montagem dos equipamentos para aquisição de imagens.....	55
Figura 13 – Modelo de foto de calibração utilizando régua graduada em milímetros	55
Figura 14 – Exemplo de imagem binarizada	56
Figura 15 – Fluxograma do ensaio de acompanhamento da evolução do diâmetro fractal para cada um dos coagulantes avaliados	59
Figura 16 – Diagrama de coagulação para turbidez remanescente (%) com $V_s = 2,5 \text{ cm/s}$	62
Figura 17 – Exemplo da forma de determinação do diâmetro fractal $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ e $t_f = 60 \text{ min}$	66
Figura 18 – Evolução da dimensão fractal por coagulante.....	67
Figura 19 – Evolução da D_f no Gradiente de Velocidade $G=20 \text{ s}^{-1}$	68
Figura 20 – Evolução da D_f no Gradiente de Velocidade $G=40 \text{ s}^{-1}$	69
Figura 21 – Evolução da D_f no Gradiente de Velocidade $G=60 \text{ s}^{-1}$	69
Figura 22 – Evolução da D_f no Gradiente de Velocidade $G=80 \text{ s}^{-1}$	70
Figura 23 – Evolução da D_f no Gradiente de Velocidade $G=100 \text{ s}^{-1}$	71
Figura 24 – Evolução da D_f por Gradiente de Velocidade $G=120 \text{ s}^{-1}$	71
Figura 25 – Evolução da D_f nos 15 minutos iniciais utilizando Cloreto Férrico.....	72
Figura 26 – Evolução da D_f nos 15 minutos iniciais utilizando Sulfato de Alumínio	72

Figura 27 – Evolução da D_f nos 15 minutos iniciais utilizando PAC	73
Figura 28 – Evolução da D_f a partir de 20 minutos utilizando Cloreto Férrico	73
Figura 29 – Evolução da D_f a partir de 20 minutos utilizando Sulfato de Alumínio	74
Figura 30 – Evolução da D_f a partir de 20 minutos utilizando PAC	74
Figura 31 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 10 minutos	75
Figura 32 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 20 minutos	75
Figura 33 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 30 minutos	76
Figura 34 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 40 minutos	76
Figura 35 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 50 minutos	77
Figura 36 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 60 minutos	78
Figura 37 – Teste de comparação das médias de Tukey para o Cloreto Férrico	81
Figura 38 – Teste de comparação das médias de Tukey para o PAC.....	81
Figura 39 – Teste de comparação das médias de Tukey para o Sulfato de Alumínio.....	82
Figura 40 – Gráfico de interações ANOVA	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência geral de coagulação em diferentes intervalos de z_p	14
Tabela 2 – Diâmetro máximo do floco vs. taxa de dissipação da energia cinética	24
Tabela 3 – Formas mais comuns de medição do diâmetro característico do floco	26
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens das técnicas usadas para determinar a dimensão fractal de flocos.....	40
Tabela 5 – Trabalhos produzidos FECIV-UFU.....	46
Tabela 6 – Trabalhos produzidos UNESP	47
Tabela 7 – Descrição dos equipamentos utilizados	48
Tabela 8 – Dosagem de coagulante e pH da água ótimos	63
Tabela 9 – Erro de Limiar de Binarização.....	63
Tabela 10 – Erro calculado em função do tamanho do floco	64
Tabela 11 – Erro Amostral	65
Tabela 12 – Cálculo do erro do programa FracLac	79
Tabela 13 – Comparativo entre o D_f obtido por 2 equações	80
Tabela 14 – Análise ANOVA 2 fatores.....	82

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Cenário

Água potável limpa e segura é imprescindível para a sobrevivência dos organismos, ecossistemas, comunidades e economias. O tratamento de água para consumo humano tornou-se indispensável após a industrialização e aumento populacional dos centros urbanos que intensificaram a poluição dos mananciais.

O tratamento de água é um processo no qual a água bruta passa por uma série de etapas a fim de se tornar segura para consumo. A coagulação e a floculação são etapas importantes nesse processo e tem relação direta com o custo operacional das Estações de Tratamento de Água (ETA) e na qualidade final da água. Segundo Roberts *et al.* (2008) os produtos químicos utilizados no tratamento representam 16% do custo do operacional de uma ETA e o custo de energia é de 34%, sendo destes aproximadamente 10% o valor referente às etapas de floculação e coagulação.

A comunidade acadêmica tem buscado entender melhor a cinética da floculação. Inicialmente foram utilizadas técnicas microscópicas para estudo das características dos flocos, mas o manuseio perturba a medição dessas características. Atualmente tem-se utilizado técnicas de obtenção de imagens de alta resolução a partir de câmeras fotográficas a fim de estudar a dinâmica e natureza dos flocos em situações práticas.

Uma das características dos flocos que podem ser obtidas pela análise de imagens é o diâmetro fractal (D_f), que é uma importante informação da estrutura do agregado, tendo portanto relação direta na eficiência do tratamento de água.

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo desta pesquisa foi acompanhar o desenvolvimento dos flocos em termos do diâmetro fractal através da análise de imagens de alta resolução, utilizando água de baixa turbidez

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Simular a floculação em laboratório;
- Acompanhar a evolução do diâmetro fractal de partículas floculentas formadas sob diferentes coagulantes e gradientes de velocidade.

1.3 Organização da dissertação

O trabalho tem início com a introdução dos objetivos desta pesquisa.

No Capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica das principais técnicas utilizadas para análise de flocos. Neste capítulo são descritos os conceitos do processo de coagulação, floculação e as características dos flocos.

No Capítulo 3, materiais e métodos, descreve-se a metodologia experimental, incluindo os testes de bancada e a aquisição e processamento de imagens.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os ensaios realizados e os resultados obtidos.

No Capítulo 5 expõe-se a conclusão do estudo assim como as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

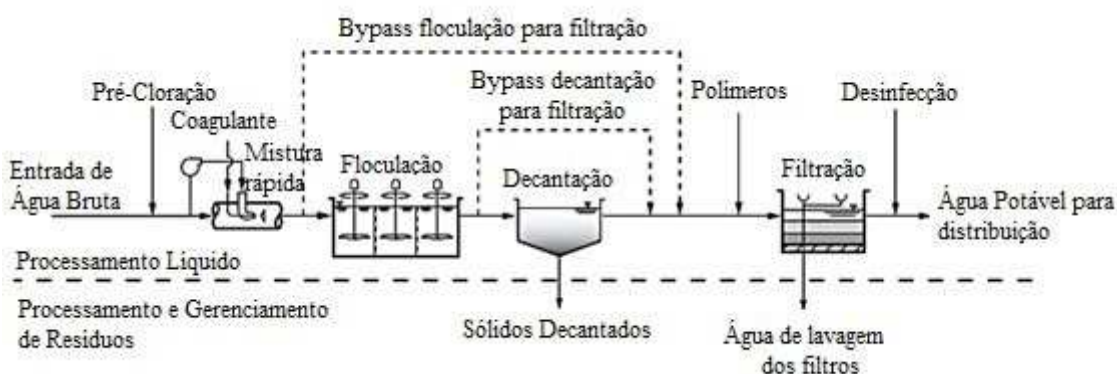
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O suprimento de água limpa e segura é essencial para o desenvolvimento econômico e social de uma comunidade. Nas últimas décadas houve grande crescimento da população mundial assim como pela demanda por água. Nesse contexto intensificou-se o empenho da comunidade acadêmica, governos e empresas em promover melhorias nos sistemas de abastecimento de água.

É prática consagrada no Brasil o uso de ETA de ciclo completo para tratamento de águas de mananciais superficiais, por serem versáteis e se adaptarem à maioria das características das águas brutas. Esse processo consiste basicamente nas seguintes etapas: mistura rápida, coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. A Figura 1 mostra a dinâmica típica do tratamento de água com tratamento convencional, filtração direta e filtração em linha.

Figura 1– Dinâmica típica do tratamento de água

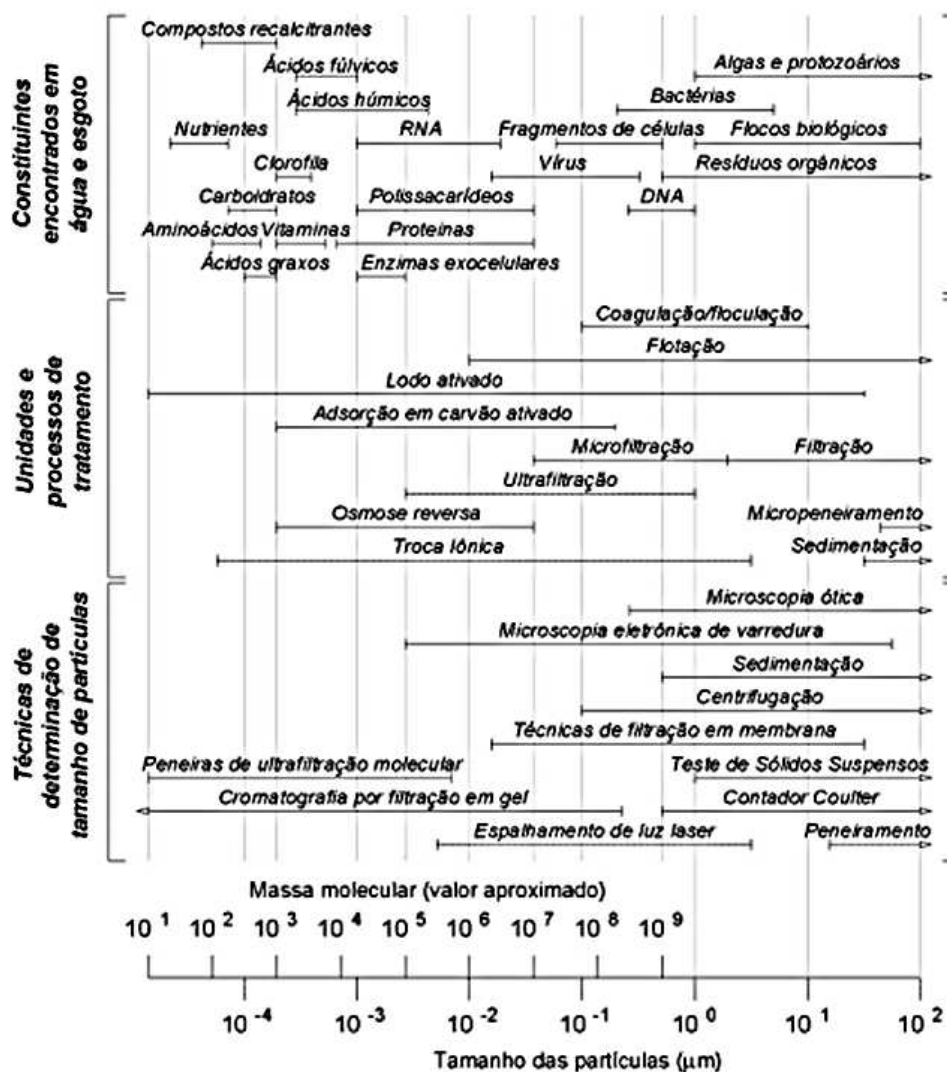


Fonte: Adaptado de Howe *et al.* (2012)

Grande parte das partículas em suspensão na água são de grandeza micrométrica e submicrométrica, sendo de difícil remoção por métodos como sedimentação ou filtração

direta. Desse modo, o processo de floculação é utilizado para auxiliar na remoção desses sólidos (SPICER *et al.*, 1996). A Figura 2 indica as partículas encontradas na água com as respectivas técnicas de determinação de tamanho e tecnologias de tratamento.

Figura 2 – Partículas encontradas na água, técnicas de determinação de tamanho de partículas e tecnologias de tratamento de água e esgoto, por faixas de tamanho



Fonte: Santos *et al.* (2004)

De acordo com Howe *et al.* (2012), a remoção de partículas é necessária porque elas podem:

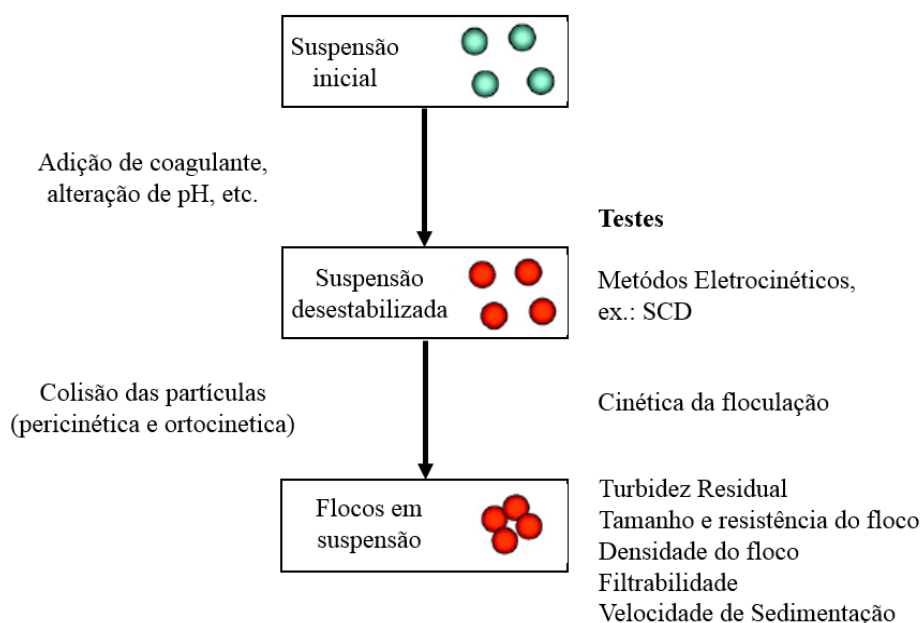
- Reduzir a clareza da água para níveis inaceitáveis de turbidez;
- Dar cor à água;
- Ser agentes infecciosos como vírus, bactérias e protozoários, ou proteger estes agentes

da ação desinfetante;

- Ter compostos tóxicos adsorvidos às suas superfícies externas.
- Reagir com o cloro gerando a formação de trihalometanos que são prejudiciais à saúde.

Uma visão esquemática da floculação é mostrada na Figura 3, que também mostra alguns tipos de ensaio possíveis em cada etapa do processo. A suspensão inicial é considerada estável, em virtude da carga das partículas na suspensão aquosa. Para promover a agregação das partículas elas precisam ser desestabilizadas, e isto pode ser conseguido simplesmente pela alteração do pH da suspensão. No entanto, na prática são necessários aditivos coagulantes que podem ser simples sais inorgânicos, coagulantes metálicos hidrolisados ou coagulantes poliméricos (GREGORY, 2009).

Figura 3 – Esquema do processo de floculação com os ensaios mais utilizados



Fonte: Adaptado de Gregory (2009)

A eficácia da coagulação depende da fonte de água e a natureza das partículas suspensas, coloidais e dissolvidas. A coagulação pela adição de produtos químicos como sais de alumínio e ferro e/ou polímeros orgânicos pode envolver: a desestabilização de partículas coloidais e suspensas; adsorção e/ou reação das partículas de matéria orgânica natural (MON) dissolvida e coloidal; ou a criação de precipitados que varrem a água atingindo partículas suspensas, coloidais e dissolvidas (HOWE *et al.*, 2012).

O propósito da floculação é produzir partículas por agregação que podem ser removidas por procedimentos simples de separação sólido-fluido, tais como sedimentação por gravidade e/ou filtração. São identificados dois tipos gerais de floculação: micro floculação (também conhecido como floculação pericinética) no qual a agregação das partículas é provocada pelo movimento térmico aleatório das moléculas do fluido (conhecido como movimento Browniano), e macro floculação (também conhecido como floculação ortocinética) no qual a agregação de partículas é provocada pela indução de gradientes de velocidade no fluido. Outra forma de macro floculação é por sedimentação diferencial, em que partículas com velocidades de sedimentação distintas chocam-se umas com as outras para formar flocos (HOWE *et al.*, 2012).

2.2 Coagulação

Coagulação é a desestabilização das partículas coloidais, provocada pela adição na água de um reagente químico coagulante. O objetivo da desestabilização das partículas é diminuir a força de repulsão das mesmas e permitir a aglomeração das partículas para que elas possam ser removidas em processos de sedimentação posterior. As partículas na água bruta, que contribuem para a cor e a turbidez, são principalmente argilas, siltes, vírus, bactérias, ácidos húmicos, minerais (incluindo o amianto, silicatos, sílica e partículas radioativas) e partículas orgânicas. Para os níveis de pH acima de 4.0 tais partículas ou moléculas geralmente são de carga negativa.

O número de elétrons excedentes que podem ser encontrados na superfície de todo tipo de partículas pode ser medido através do Potencial Zeta (zp). A grandeza das cargas determina se uma partícula coloidal em suspensão irá repelir as demais e permanecer em suspensão ou se irá aglomerar e eventualmente sedimentar. Quanto mais negativo o zp, mais forte é a força de repulsão. O Potencial Zeta é aplicável desde a partículas ultramicroscópicas até as visíveis a olho nu. Para induzir as partículas a se aglomerarem o zp deve ser próximo de zero (PIZZI, 2003).

Segundo Pizzi (2003), o zp pode ser medido por instrumentos específicos. O Potencial zeta ótimo varia de acordo com a qualidade da água e características da ETA. Uma avaliação geral da eficiência de coagulação que ocorre em vários intervalos é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Eficiência geral de coagulação em diferentes intervalos de zp

Potencial Zeta médio	Grau de Coagulação
+3 a 0	Máximo
-1 a -4	Excelente
-5 a -10	Bom
-11 a -20	Ruim
-21 a -30	Praticamente nulo

Fonte: Adaptado de Pizzi (2003)

A teoria indica que, quando a dosagem ótima de coagulante é adicionada ao líquido, o potencial zeta medido deve ser zero, portanto a dosagem ótima pode ser determinada através do zp. Para cada água bruta e cada coagulante utilizado, existe um único valor de potencial zeta que garante a aglomeração ótima das partículas. Esse valor deve ser determinado experimentalmente observando a turbidez mínima da água tratada (HENDRICKS, 2006). Além do potencial zeta da água bruta, existem outros fatores que influenciam na coagulação como a condutividade elétrica, o pH e a temperatura (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) a coagulação é um resultado individual ou combinado de quatro mecanismos distintos:

- Compressão da dupla camada elétrica: A introdução de um eletrólito indiferente de carga contrária à das partículas de um sistema coloidal causará aumento na densidade de cargas na camada difusa e diminuirá a “esfera” de influência das partículas, ocasionando coagulação da dupla camada difusa.
- Adsorção e neutralização de cargas: Após a adição do coagulante, a hidrólise dos íons metálicos com posterior adsorção das espécies hidrolisadas na superfície dos colóides levam a sua desestabilização.
- Varredura: No mecanismo de varredura, as concentrações de coagulante são elevadas, de modo que o produto de solubilidade dos hidróxidos produzidos é elevado. A precipitação floculenta destes hidróxidos captura os colóides presentes no meio, e os próprios colóides servem como sementes para a continuação do precipitado.
- Adsorção e formação de pontes: Mecanismo típico para sistemas nos quais são

adicionados compostos orgânicos de cadeia longa. As interações entre os sítios ativos destas macromoléculas e os colóides promovem a sua aglomeração.

Em geral os flocos obtidos por varredura são maiores e sedimentam ou flutam mais facilmente que os flocos obtidos por adsorção e neutralização de cargas (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Carvalho (2008) cita que os principais coagulantes utilizados para obtenção de água potável são: Sulfato de Alumínio, Policloreto de Alumínio, Cloreto Férrico, Sulfato Ferroso, Hidróxido de Cálcio, Polímeros Aniônicos e Não Aniônicos, Polímeros Catiônicos e Policátions. Segundo Yukselen e Gregory (2004) os sais metálicos são os coagulantes mais utilizados em processos de tratamento de água. Quando em contato com a água, esses sais rapidamente hidrolisam resultando em várias espécies catiônicas, que adsorvem partículas negativamente carregadas, reduzindo ou anulando sua carga. De acordo com Wang *et al.* (2009) dentre os sais metálicos mais utilizados no tratamento de água, os sais de alumínio são os mais importantes, devido a sua eficiência de tratamento e baixo custo.

Nas décadas de 1970 e 1980 países da Europa, América do Norte e Japão desenvolveram polímeros inorgânicos como coagulantes em tratamento de águas com temperatura baixa e brandas para coagulação de partículas e moléculas responsáveis por cor e turbidez. (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Recentemente, estão em uso em vários países da Ásia e Europa coagulantes de alumínio pré-hidrolisado (PAC), que podem ser divididos em três tipos: alumínio monomérico, dimérico e polímero de alumínio de fase sólida. Os coagulantes de alumínio pré-hidrolisado possuem grandes vantagens sobre os sais convencionais, como baixa formação de lodo e menor dependência da temperatura e pH (WANG *et al.*, 2009).

A confiabilidade operacional das ETAs, a qualidade final da água tratada e o controle de custos são variáveis importantes para os profissionais de tratamento de água. O cálculo da dosagem ótima de coagulante é relevante, uma vez que uma superdosagem de coagulante gera elevados custos de operação e riscos à saúde pública. Por outro lado, uma subdosagem do coagulante causa baixa eficiência de remoção de partículas sólidas e consequentemente

um tratamento insatisfatório, o que pode levar a uma falha para atender aos padrões de qualidade de água (BOUYER *et al.*, 2001).

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005) não há dosagem ótima de coagulante e tampouco pH ótimo de coagulação. O que existe é um par de valores “dosagem de coagulante x pH de coagulação” considerado adequado devido a diversos aspectos como o custo com produtos químicos, turbidez remanescente e uso de alcalinizante ou acidificante.

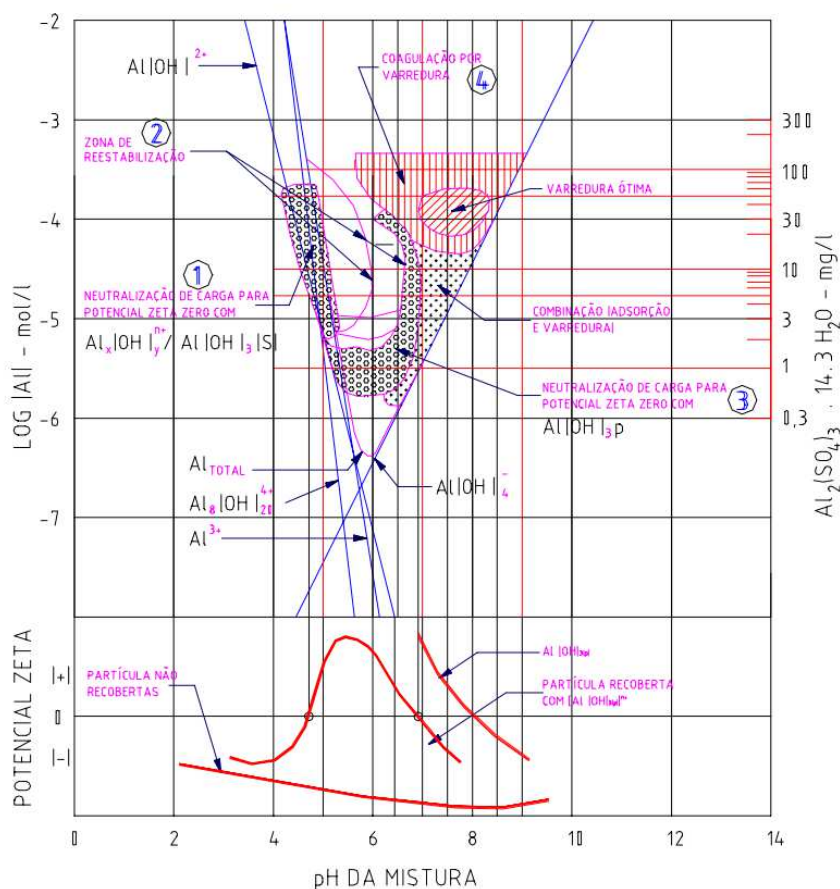
Segundo Gregory (2004), a coagulação é um processo importante no tratamento da água, sendo necessário utilizar métodos convenientes para monitoramento e controle. O teste de jarros (*jar test*), é utilizado há muitos anos para estabelecer a dosagem ótima de coagulante e pH, assim como para investigar variáveis como as condições de mistura, os efeitos de aditivos e temperatura na floculação.

Os diagramas de coagulação são instrumentos para previsão das condições em que a coagulação pode ocorrer. Por meio dos diagramas define-se a dosagem do coagulante, o melhor valor de pH de coagulação e a seleção do dispositivo de mistura rápida (AMIRTHARAJAH; O'MELIA, 1990).

Para cada coagulante e água bruta analisados existe um diagrama de coagulação específico. Através do teste de jarros, variando a dosagem do coagulante utilizado e o valor do pH de coagulação obtém-se um diagrama.

Através dos estudos de Amirtharajah e Mills (1982) foi desenvolvido o diagrama de coagulação do sulfato de alumínio, mostrado na Figura 4. É possível observar que os diferentes mecanismos de coagulação formam regiões distintas no diagrama.

Figura 4 – Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio para remoção de turbidez



Fonte: Pavanelli (2001) adaptado de Amirtharajah e Mills (1982)

Spicer *et al.* (1996) mostrou que com baixas concentrações de reagentes coagulantes, as conexões entre as partículas do floco são fracas, tornando-o mais suscetível a fragmentação e ficando restritos a tamanhos pequenos. Com o aumento da concentração de coagulantes há também o aumento da resistência do floco, garantindo uma boa distribuição de tamanhos no estado de equilíbrio.

2.2.1 Coagulante PAC

O PAC é um coagulante químico usado no tratamento de água para remoção de turbidez e cor. O alumínio desestabiliza as suspensões coloidais, bem como promove a formação de grandes flocos, capazes de serem removidos da água por sedimentação, flotação e filtração ou por esses métodos combinados. Em geral, O PAC é a opção adotada pela indústria de tratamento de água quando é necessário a formação de flocos maiores e com maior velocidade de sedimentação do que aqueles gerados pelo sulfato de alumínio e cloreto

férrico. O PAC é estável por 4 a 5 meses, quando armazenado a menos 50°C sendo ideal para armazenagem a granel e instalações tratamento de água (WATER NEW ZEALAND, 2013).

O PAC tem a fórmula geral $(Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)})_x$ e estrutura polimérica totalmente solúvel em água. O comprimento da cadeia polimerizada, peso molecular e número de cargas iônicas é determinado pelo grau de polimerização. Por hidrólise, várias espécies monoméricas e poliméricas são formadas com $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$, sendo um cátion particularmente importante. Uma espécie menos predominante é $Al_8(OH)_4^{20+}$. Estes coagulantes altamente polimerizados incluem os seguintes (GEBBIE, 2001):

- Cloreto de poli alumínio (PACl, $n = 2$ e $m = 3$);
- Alumínio cloro hidratado (ACH, $n = 2$ e $m = 5$);
- Poli alumínio cloro hidratado (PACH): semelhante ao ACH.

Na prática, há pouca diferença entre o desempenho de ACH e PACl em aplicações de tratamento de água, apesar de ACH ser mais hidratada.

Além de consumirem consideravelmente menos alcalinizantes do que outros coagulantes, o PAC é eficaz em uma ampla faixa de pH, funcionando satisfatoriamente em uma faixa de pH de 5,0 a 8,0. Outra vantagem importante é a baixa concentração de sulfato adicionado à água tratada. Níveis elevados de sulfato nas águas residuais domésticas, pode resultar na produção de sulfureto de hidrogênio no sistema de esgoto, levando a problemas de odor e corrosão (GEBBIE, 2001).

Segundo Gebbie (2001) outras vantagens do PAC são as seguintes:

- Baixos níveis de alumínio residual na água tratada podem ser alcançados, normalmente variando entre 0,01-0,05 mg/L;
- Funcionam extremamente bem em baixas temperaturas de água bruta. Os Flocos sedimentam-se igualmente em temperaturas normais e baixas, diferentemente dos demais coagulantes tradicionais;
- É produzido menos lodo em comparação com o sulfato de alumínio em uma dose equivalente;
- Dosagens mais baixas em relação ao sulfato de alumínio dão resultados equivalentes;

- O aumento de cloreto na água tratada é muito menor do que o aumento de sulfato derivado do sulfato de alumínio, resultando em aumentos inferiores de sólidos totais dissolvidos da água tratada.

O PAC pode ser produzido de várias maneiras, uma delas é através da digestão de hidróxido de alumínio em uma mistura de ácido sulfúrico e ácido clorídrico a uma temperatura de cerca de 100 a 120°C (KUDERMANN *et al.*, 1992).

2.2.2 Coagulante Sulfato de Alumínio

O Sulfato de alumínio é usado no tratamento de água para a coagulação de partículas orgânicas e minerais. Este reagente desestabiliza as suspensões coloidais bem como promove a formação de flocos que são capazes de serem removidos da água por sedimentação, flotação e filtração (WATER NEW ZEALAND, 2016).

Este coagulante é produzido a partir do alumínio metálico ou hidróxido de alumínio, que passa por tratamento com ácido sulfúrico a elevadas temperaturas. A solução sobrenadante é decantada para produzir o reagente em forma líquida ou concentrado e cristalizada em um sólido (WATER NEW ZEALAND, 2016).

Este reagente tem por fórmula química $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, em que “n” representa aproximadamente 14 a 18 moléculas de água de cristalização. O Sulfato de Alumínio Líquido é fabricado a partir de hidrato de alumínio, mantendo-se um teor de água suficiente para impedir sua cristalização. Quanto à composição química, é comercializado com 7 a 8% de alumina (Al_2O_3); com teores acima de 8,26%, o produto pode cristalizar (PAVANELLI, 2001).

2.2.3 Coagulante Cloreto Férrico

O Cloreto Férrico é produzido a partir da reação exotérmica de ácido clorídrico, concentrado com o minério de ferro (hematita- Fe_2O_3), seguido de resfriamento e filtração. A concentração final do produto é o resultado da combinação entre variáveis do processo produtivo e a temperatura ambiente mínima das regiões de aplicação (PAVANELLI, 2001).

Cloreto férrico é uma solução que varia de incolor para acobreado e tem um fraco odor de ácido clorídrico. É altamente corrosivo à maioria dos metais e tecidos, não inflamável e usado principalmente para purificação de água de abastecimento e efluentes (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 2012).

2.3 Floculação

Floculação é a aglomeração de partículas desestabilizadas em micro flocos e depois em flocos. Enquanto no processo de coagulação há desestabilização das partículas através de reações químicas entre o coagulante e os coloides suspensos, na floculação ocorre a etapa de transporte que promove as colisões necessárias entre as partículas desestabilizadas para formar os flocos (BINNIE *et al.*, 2002).

Uma vez que as partículas são desestabilizadas, a mistura permite que elas colidam. Há um equilíbrio entre a agregação induzida por colisões e a quebra dos flocos que dependem do *stress* hidrodinâmico aplicado no mesmo. Assim, dois tipos de fenômenos têm forte influência na eficiência da floculação: condições físico-químicas e hidrodinâmicas. As condições físico-químicas estão relacionadas com o tipo e dosagem de coagulante, temperatura e pH. As condições hidrodinâmicas dependem da geometria do tanque no qual o processo é realizado e do tipo e velocidade do agitador (BOUYER *et al.*, 2005).

A agregação ocorre a uma taxa que varia de acordo com a frequência e a eficiência de colisão. Quando os flocos são formados, várias de suas propriedades podem ser medidas, incluindo tamanho, densidade, dimensão fractal, resistência, taxa de sedimentação e filtrabilidade. Após a sedimentação, através do ensaio de Jar Test é possível medir a turbidez residual, que é um parâmetro importante uma vez que o objetivo do processo de floculação é obter um alto grau de separação sólido-líquido. (GREGORY, 2009).

A energia de agitação geralmente é expressa em termos do gradiente médio de velocidade, G , que é a variação da velocidade no meio fluido em relação a direção mais rápida desta variação (dv/dy). Na mistura lenta se G for pequeno, as colisões entre as partículas serão inadequadas e não ocorrerá uma boa floculação. Se G for muito grande, as forças de

cisalhamento excessivas impedirão a formação de flocos, devido as altas taxas cisalhantes causarem a quebra dos flocos previamente formados (REYNOLDS; RICHARDS, 1996).

De acordo com Bouyer, Liné e Do-Quang (2004), o crescimento dos flocos está relacionado com a taxa de colisão. Como os colóides tem densidade próxima da água eles não sedimentam, portanto, as partículas seguem o movimento do fluido. Assim, na floculação, o gradiente de velocidade tem a função de garantir a colisão das partículas.

A floculação é o processo mais utilizado para a remoção de turbidez e cor nas estações de tratamento de água (ETA). Enquanto os mecanismos principais de remoção destas características da água bruta durante o tratamento foram bem estudados, pouca atenção tem-se dado aos parâmetros operacionais fundamentais de floculação, incluindo as propriedades físicas como tamanho, compactação e resistência dos flocos (JARVIS *et al.*, 2005a).

2.4 Características dos flocos

A estrutura do floco é fator chave para análise de suas características. Para obtenção da estrutura desejada, é possível controlar e otimizar os fatores envolvidos. A previsão do comportamento dinâmico do floco pode não só melhorar o projeto de câmaras de floculação, mas também promover a otimização das câmaras existentes (WANG *et al.*, 2011).

A caracterização da estrutura dos flocos está fortemente relacionada com o estudo do mecanismo e cinética da floculação. A estrutura destes pode ser uma impressão digital do mecanismo de agregação. É sabido que a agregação em condições quiescentes leva a estruturas mais abertas se a suspensão for totalmente desestabilizada do que se há algum residual de repulsão entre as partículas. O conhecimento das propriedades estruturais de agregados coloidais é importante para estimar a distribuição em massa dos flocos a partir da medida de algumas propriedades (problema inverso) (LATTUADA; WU; MORBIDELLI, 2003).

2.4.1 Crescimento dos flocos

Segundo Spicer *et al.* (1996), várias etapas ocorrem no processo de formação dos flocos. Inicialmente o crescimento do floco é dominante, aumentando seu tamanho rapidamente. Com o passar do tempo, os flocos ficam grandes, porosos e com a estrutura frágil, se tornando suscetíveis a fragmentação pelo esforço de cisalhamento aplicado pelo fluido. O tamanho final do floco é um balanço entre o crescimento e a fragmentação, atingindo um estado de equilíbrio.

De acordo com Jarvis *et al.* (2005b), no início da formação do floco, a agregação de micro flocos domina sobre a quebra dos mesmos. A importância da ruptura aumenta à medida que os flocos crescem, até atingir distribuição de tamanho do estado de equilíbrio. A taxa de colisão e a natureza das interações das partículas são fundamentais para a taxa de crescimento de floco (R_{floc}) e podem ser descritas como na Equação 1, sendo a diferença entre a taxa de agregação e a taxa de quebra do floco (R_{br}). A taxa de agregação é função da taxa de colisão (R_{col}) e a taxa de eficiência da colisão (α). O fator α é a fração das colisões que resultam em anexação. Assim, a taxa global de crescimento de floco pode ser escrita como:

$$R_{floc} = \alpha \cdot R_{col} - R_{br} \quad (1)$$

Pela Equação (4) é possível verificar que quando os dois termos no lado direito são iguais, a taxa de crescimento dos flocos é zero e o tamanho deles atinge um valor limite. A eficiência de colisão não é constante, depende do tamanho das partículas e da efetividade da agitação. Em uma certa condição de agitação, $\alpha \cdot R_{col}$ diminui com o aumento do floco, assim como é reduzido o número de partículas no sistema. Esta é outra razão dos flocos atingirem um tamanho limite. Outra consideração importante é que a quebra do floco pode ser irreversível, uma vez que os fragmentos quebrados podem não aglomerar novamente. Nos casos de ruptura irreversível é reduzida a eficiência de colisão, e nos casos de ruptura completamente irreversível $\alpha = 0$ (JARVIS *et al.*, 2005b).

De acordo com Biggs e Lant (2000), a estrutura do floco altera-se continuamente porque as ligações internas quebram sob as forças de cisalhamento e unem em pontos mais favoráveis, onde a força atrativa é maior, ou a força repulsiva é menor. Quando é alcançado o equilíbrio entre a taxa de agregação e a taxa de ruptura para uma determinada condição de agitação, o processo de formação de flocos termina e o tamanho dos flocos atinge um nível constante.

A quebra e formação de flocos são regidas pelas condições prevalecentes na agitação, chegando a um estado de equilíbrio. Quando há aumento da agitação acima do nível crítico, os flocos se quebram até que um novo estado de equilíbrio seja atingido. Em alguns casos, devido à natureza irreversível de quebra do floco, eles são incapazes de voltar a crescer se quebrado em uma elevada taxa de agitação. Medir a energia de agitação necessária para quebrar os flocos individuais ou aqueles em suspensão é, portanto, de alta importância operacional (JARVIS *et al.*, 2005a).

Tambo e Watanabe (1984) dividiram em duas categorias o processo de floculação em fluxo contínuo. Um é o processo no qual os flocos colidem uns com os outros e formam flocos maiores, o outro é o processo no qual micro flocos são adsorvidos por flocos sedimentáveis.

Parker *et al.* (1972) apud Di Bernardo e Dantas (2005) propôs a Equação 2 para definir o tamanho estável do floco. Onde d_{fes} representa o tamanho do floco estável, K_{fes} o coeficiente relacionado a resistência do floco, e k_{fes} o coeficiente relacionado ao modo de ruptura, sendo igual a 2 para flocos maiores que a microescala de Kolmogorof (η) e 1 para os menores quando a ruptura do floco dá-se por erosão. Nos casos em que é predominante a fragmentação, k_{fes} é igual a 0,5 para ambas as condições. Estudos indicam que quando $k_{fes}=1$ o tamanho máximo de floco é inversamente proporcional ao gradiente de velocidade médio (G_{med}).

$$d_{fes} = K_{fes} \times G_{med}^{k_{fes}} \quad (2)$$

De acordo com Bouyer, Liné e Do-Quang (2004), o gradiente de velocidade não é suficiente para determinar a distribuição do tamanho dos flocos. Além dos parâmetros hidrodinâmicos, a taxa de dissipação da energia cinética (ϵ) deve ser considerada. A relação entre o diâmetro máximo do floco e a taxa de dissipação da energia cinética já foi amplamente estudada. A

Tabela 2 mostra a relação do diâmetro máximo do floco de acordo com a taxa de dissipação da energia cinética realizada por diversos autores.

Tabela 2 – Diâmetro máximo do floco vs. taxa de dissipação da energia cinética

Autores	Modelagem do floco	$d = f(\varepsilon)$	
		$\Lambda > \eta > d$	$\Lambda > d > \eta$
Parker <i>et al.</i> (1972)	Meio heterogêneo	$d \propto \varepsilon^{-1/4}$	$d \propto \varepsilon^{-1/4}$
	Meio contínuo	$d \propto \varepsilon^{-1/2}$	$d \propto \varepsilon^{-1}$
Kobayashi <i>et al.</i> (1999)	Meio heterogêneo	$d \propto \varepsilon^{-1/4}$	$d \propto \varepsilon^{-1/4}$
Tambo e Ozumi (1978)	Meio heterogêneo	$d \propto \varepsilon^{-0,35}$	$d \propto \varepsilon^{-0,45}$
Tomi e Bagster (1978)	Meio contínuo	$d \propto \varepsilon^{-1/2}$	d independe de ε
Matsuo e Unno (1981)	Partículas	$d \propto \varepsilon^{-1/2}$	$d \propto \varepsilon^{-1}$
Thomas (1964)	Meio contínuo	$d \propto \varepsilon^{-1/2}$	$d \propto \varepsilon^{-5/2}$

Fonte: Bouyer, Liné e Do-Quang (2004)

A microescala de Taylor (Λ) é uma escala integral para a energia contida em redemoinhos ou turbilhões de grande escala. Corresponde à turbilhões que absorvem a energia cinética do fluxo principal. Na região perto do rotor, grandes turbilhões estão relacionados ao tamanho do rotor. Longe do impulsor, estes remoinhos estão relacionados com o tamanho do tanque (BOUYER; LINÉ; DO-QUANG, 2004).

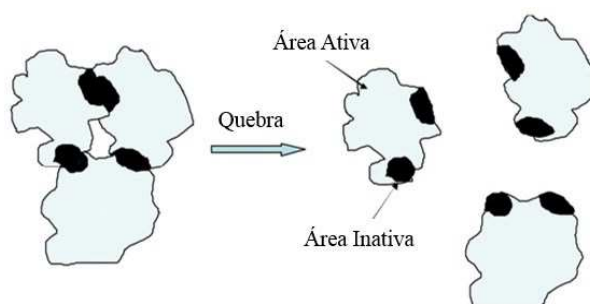
No estudo de Bouyer, Liné e Do-Quang (2004), foi possível determinar que para um mesmo gradiente de velocidade global, o valor da taxa de dissipação da energia cinética é diferente de acordo com o tipo de agitador.

2.4.2 Regeneração dos flocos

Uma propriedade que pode ter impacto significativo no tratamento de água, é o potencial de flocos se regenerarem após serem quebrados. Apesar das ETAs serem projetadas para minimizar a quebra dos flocos, na prática existem regiões próximas aos misturadores e nas bordas dos tanques que submetem os flocos a esforços de cisalhamento. O estudo da capacidade dos flocos regenerarem pode melhorar a eficiência do processo de remoção de partículas (JARVIS *et al.*, 2005a).

De acordo com Yu, Gregory e Campos (2011) é provável que após a quebra de flocos formados a partir de hidróxido de alumínio, determinadas áreas da superfície ficam inativas e dificilmente criam laços com outros flocos. As áreas inativas provavelmente são aquelas que formaram contatos entre flocos antes da ruptura. Somente as áreas que não formaram ligações anteriormente permanecem ativas e capazes de formar ligações durante o recrescimento dos flocos. Este conceito é mostrado esquematicamente na Figura 5. Desta forma, a eficiência da colisão dos flocos quebrados é reduzida, uma vez que menos colisões resultam em ligações. Com mais ciclos de recrescimento dos flocos, a proporção de superfícies ativas se torna progressivamente menor e a eficiência de colisão é ainda mais reduzida. Cada ciclo forma flocos menores do que o anterior, como tem sido observado experimentalmente.

Figura 5 – Esquema da quebra dos flocos e a formação de áreas de superfície inativas



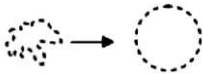
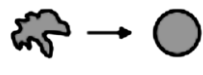
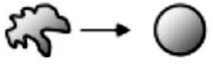
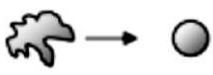
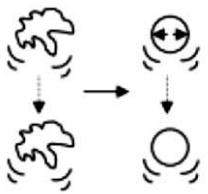
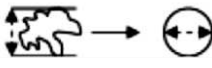
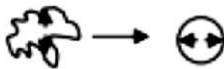
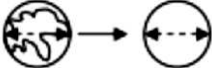
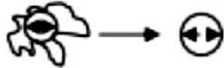
Fonte: Adaptado de Yu, Gregory e Campos (2011)

2.4.3 Tamanho dos flocos

Segundo Chakraborti, Atkinson e van Benschoten (2000), há muito tempo é reconhecida a necessidade da medição *in situ* da distribuição de tamanho e geometria das partículas.

Dharmarajah e Cleasby (1986), listaram 15 tipos de diâmetros característicos de partículas não esféricas, apesar de muitos não se aplicarem aos flocos em função da difícil medição em sua estrutura frágil, como a medição por passagem em peneiras. Jarvis *et al.* (2005c) resumiu na tabela 3 as formas mais comuns de medidas dos flocos. Os diâmetros baseados em imagens bidimensionais como o diâmetro de Feret e de Martin só são aceitáveis se diversas medições forem realizadas.

Tabela 3 – Formas mais comuns de medição do diâmetro característico do floco

Diâmetro floco	Descrição	Diagrama	Equação
Diâmetro com base no perímetro (d_c)	O diâmetro do círculo com o mesmo perímetro (P) da partícula medida		$d_c = \frac{P}{\pi}$
Diâmetro da área projetada 1 (d_a)	O diâmetro de um círculo com a mesma área projetada (A) de um floco medido em uma orientação constante		$d = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$
Diâmetro da área projetada 2 (d_a)	O diâmetro de um círculo com a mesma área projetada (A) de um floco medido em uma orientação aleatória		
Diâmetro pela superfície (d_s)	Diâmetro de uma esfera que possui a mesma área superficial (S) do floco		$d_s = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$
Diâmetro volumétrico (d_v)	O diâmetro de um círculo com um mesmo volume (V) como o floco medido		$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$
Diâmetro volume-superfície (d_{sv})	O diâmetro de uma esfera com a mesma relação de área superficial/volume de um floco		$d_{sv} = \frac{d_v^3}{d_s^2}$
Diâmetro de sedimentação (d_f)	O diâmetro da esfera com a mesma densidade e velocidade de sedimentação que um floco em mesmo fluido com a mesma densidade e viscosidade		$d_{st} = \frac{18\mu v}{\rho_f - \rho}$
Diâmetro de Stoke (d_{st})	O diâmetro de uma partícula sedimentando em um intervalo de Reynolds de fluxo laminar ($Re < 0,2$)		
Diâmetro de Feret (d_F)	O valor médio entre duas tangentes paralelas projetadas do exterior da partícula		-
Diâmetro de Martin (d_M)	O comprimento da reta paralela a uma direção fixa que divide a área projetada do floco em duas partes iguais		-
Diâmetro circunscrito	O diâmetro do menor círculo que circunscribe a área do floco projetado		-
Diâmetro inscrito	O diâmetro do maior círculo que se encaixa dentro da área do floco projetado		-

Fonte: Jarvis et al (2005c)

2.4.4 Força do floco

A força do floco é uma característica importante e desempenha papel crucial na eficiência do tratamento de água. As ETAs normalmente possuem áreas submetidas a elevadas forças de cisalhamento que induzem a dissolução do floco. Os flocos devem resistir a esses esforços de forma a não se quebrarem em pedaços menores, já que estudos mostram que flocos menores têm em geral eficiências de remoção mais baixas (WANG *et al.*, 2011).

A taxa de formação dos flocos é um balanço entre união e separação das partículas alcançando um estado de equilíbrio sob um gradiente hidráulico. O tamanho do floco nesse estado de equilíbrio é um bom indicativo da resistência do mesmo. Esse fato levou ao desenvolvimento de técnicas de medição do tamanho do floco como forma indireta de medição da força do mesmo, como as técnicas de análises de imagens (JARVIS *et al.*, 2005a).

A maior parte dos trabalhos que estudam os fatores que afetam a força do floco e seu modo de ruptura sob esforços são de natureza empírica. Inicialmente, Mühle (1993) sugeriu que os mecanismos de fragmentação dos flocos em fluxos turbulentos dependem do seu tamanho em relação a microescala de Kolmogorov. Para os flocos menores do que a microescala Kolmogorov, forças viscosas predominam e provocam a erosão da superfície do floco. Por outro lado, para flocos maiores do que a microescala Kolmogorov, a deformação ou fratura ocorre como resultado da flutuação dinâmica da pressão. Essa teoria implica que a força do floco é proporcional ao tamanho do mesmo. Mais tarde, foi observado por Yeung e Pelton (1996) que a força do floco está relacionada com sua compactidade e não ao seu tamanho. Os autores observaram que flocos mais compactos estavam sujeitos a sofrer erosão enquanto que os menos compactos estavam sujeitos a fratura. A fratura ocorre através do esforço de tração (*tensile stress*) agindo em todo o floco, enquanto a erosão é devido a tensão de cisalhamento agindo tangencialmente à superfície do floco.

Estudos atuais mostram que a força do floco está relacionada a quantidade e a força de ligações interpartículas. Segundo Jarvis *et al.* (2005a), flocos mais compactos são considerados mais fortes, devido ao aumento do número de ligações mantendo o agregado

unido. O tamanho e a forma das micropartículas que o formam são também importantes para a força do mesmo.

Segundo Yukselen e Gregory (2004), a força do floco depende da natureza da interação e do número médio de ligações por partícula. A floculação por polímeros de cadeia longa resulta em flocos mais fortes do que aqueles formados pela desestabilização das partículas em suspensão na água por sais inorgânicos.

A força do floco mostra uma hierarquia de acordo com o mecanismo de coagulação que deu sua origem, como segue: adsorção e formação de pontes < adsorção e neutralização de carga < varredura. A estrutura dos flocos formados sob a varredura é a mais compacta (WANG *et al.*, 2009).

Segundo Wang *et al.* (2011), a compacidade dos flocos é positivamente relacionada com força do floco, entretanto, não há nenhum método mecânico satisfatório para avaliar esta relação. Como a força está diretamente relacionada à estrutura do floco, ela é dependente de seu processo de formação.

Duas abordagens diferentes são consideradas para estimar a quebra do floco: (1) a primeira abordagem considera o floco heterogêneo (granulado), composto por um número finito de partículas primárias anexadas. As partículas primárias são aquelas inicialmente presentes na água, antes de qualquer processo de coagulação/floculação. Seguindo esta abordagem, a separação ocorre quando as forças hidrodinâmicas excedem a força de coesão entre cada partícula primária. (2) a segunda abordagem considera o floco como um meio contínuo. Neste caso, ele será quebrado se o stress hidrodinâmico tornar-se maior do que o esforço de coesão. Esta abordagem leva a diferentes variações no diâmetro floco comparado com a taxa de dissipação da energia cinética (BOUYER; LINÉ; DO-QUANG, 2004).

Segundo Jarvis *et al.* (2005b), o desenvolvimento de uma técnica satisfatória para quantificar a força do floco ainda é complexo. Isto ocorre parcialmente devido à fragilidade, variação no tamanho, forma, composição e ao modo de ruptura do floco. A força pode ser considerada em termos da energia necessária para quebrar os flocos sob tração, compressão ou

cisalhamento. No entanto, encontrar formas de quantificar a energia de ruptura não é uma tarefa simples. Existe, portanto, a necessidade de estudos mais profundos sobre como a força do floco pode ser medida.

Ainda de acordo com Jarvis *et al.* (2005a), as principais técnicas utilizadas na determinação da força do floco são:

- Impulsor: Exposição do floco a um único nível de agitação dentro de um recipiente e realização do comparativo entre a relação do tamanho do floco antes e depois da ruptura ou exposição do floco a um aumento controlado da agitação e realização da medição da energia utilizada até a ruptura.
- Ultrassônicas: Aplicação de um campo ultrassônico controlado a uma suspensão de flocos e observação a erosão dos mesmos.
- Misturador oscilatório: Exposição dos flocos a estresse hidrodinâmico de um misturador oscilatório controlável. Os flocos são colocados em uma coluna de vibração e submetidos a diferentes quantidades de oscilação. A vibração é convertida em energia para o sistema.
- Micromecânica: Relacionar a força de ruptura necessária para separar um único floco submetido a tração.
- Micromanipulação: Consiste em apertar um único agregado em suspensão entre uma lâmina de vidro e uma sonda de fibra óptica até ruptura do floco usando um transdutor de força.
- Análise de imagens: os flocos são expostos a agitação de um rotor no recipiente e realiza-se fotografias com posterior análise da distribuição do tamanho das partículas.
- Dispersão da luz: Os instrumentos de espalhamento de luz medem o tamanho das partículas, passando um feixe de laser através da suspensão. Esta técnica depende de um fluxo constante da suspensão através do instrumento durante o ciclo de medição.

A revisão na literatura mostra que não há um método padrão para determinação da força do floco. Na prática, a força é abordada de forma empírica, observando o tamanho do floco sob dadas condições de agitação.

2.4.5 Dimensão Fractal

O controle da massa, área de superfície e concentração das partículas afeta diretamente a remoção dos flocos por sedimentação. Além do tamanho, a forma das partículas afeta o comportamento do floco, particularmente no que diz respeito à eficiência de colisão e taxas de sedimentação. Nos últimos anos, formas de flocos irregulares têm sido descritas em conceitos de geometria fractal. A caracterização completa de uma suspensão de partículas deve incluir uma descrição da dimensão fractal dos flocos (CHAKRABORTI; ATKINSON; VAN BENSCHOTEN, 2000).

Segundo Jarvis *et al.* (2005a), a melhor forma de descrever a complicada estrutura dos flocos é através da teoria fractal. Os flocos são exemplos de massas fractais, onde ambas as superfícies interna e externa exibem propriedades fractais. A estrutura do floco possui dois aspectos importantes. Um é o tamanho e a distribuição granulométrica. A outra é a dimensão fractal, refletindo a densidade da estrutura do floco devido às suas características porosas e autossimilaridade. Uma maior dimensão fractal indica flocos mais densos com baixa porosidade (YANG *et al.*, 2013).

Segundo Li *et al.* (2006), os agregados formados durante a floculação exibem uma característica fractal, sugerindo que eles são auto similares e possuem invariância de escala. A teoria de fractais aplicada a agregados de partículas fornece um novo método quantitativo para descrever a estrutura dos flocos. A característica essencial da geometria fractal é o reconhecimento da invariância de escala como uma medida para caracterizar estruturas. Para um agregado, a relação entre a massa (M) e tamanho (R) é dado pela equação (3):

$$M \propto R^{Df} \quad (3)$$

Na equação 3, Df é a dimensão fractal de massa e tem valor entre 1 e 3 no espaço tridimensional. Agregados densos tem dimensão fractal alta, enquanto estruturas grandes, altamente ramificadas e com ligações fracas possuem dimensão fractal inferior. Atualmente, três técnicas principais para medição de dimensão fractal têm sido desenvolvidas: espalhamento de luz, sedimentação e análise de imagem (LI *et al.*, 2006).

De acordo com Chakraborti, Atkinson e van Benschoten (2000), conceitos de geometria fractal são úteis em descrever a superfície rugosa de agregados grandes, irregulares e porosos que não estão bem definidos pela geometria euclidiana. Em geometria fractal, área e volume não são necessariamente calculados elevando-se o comprimento padrão característico do objeto por uma potência de número inteiro. A heterogeneidade dos objetos com limites irregulares pode ser definida por relações não lineares, onde as propriedades de escala do objeto são determinadas por uma dimensão característica elevada a uma potência chamada de dimensão fractal. A dimensão fractal bidimensional é definida por uma relação entre a área projetada (A_s) no plano vertical e o comprimento característico dos agregados (l). Ela pode ser calculada pela Equação (4) onde D_2 é a dimensão fractal bidimensional.

$$A_s \sim l^{D_2} \quad (4)$$

Ainda segundo Chakraborti, Atkinson e van Benschoten (2000), a suposição do floco como esfera corresponde à $D_2 = 2$ na geometria euclidiana, que sempre expressa a área como uma medida linear elevada à potência 2 independentemente de forma específica. Agregados densos tem uma dimensão fractal $D_2 \cong 2$, enquanto dimensões fractais menores são resultado de estruturas grandes, altamente ramificadas e com ligações fracas. Semelhante à Equação 2, a dimensão fractal tridimensional (D_3) pode ser calculada a partir de uma relação entre o volume dos agregados (v) e a área (A) elevada à potência D_3 , conforme mostra a equação 5. Na geometria euclidiana, $D_3 = 3$.

$$V \sim A^{D_3} \quad (5)$$

Gregory (1998) mostrou que a escolha da medida para o tamanho l não é de grande relevância, já que as mesmas tendências são percebidas desde que a escolha seja constante. Para objetos euclidianos, o valor unidimensional do D_f será 1 para uma linha, 2 para uma forma plana de duas dimensões e 3 para forma tridimensional compacta. Objetos fractais assumem valores fracionados de D_f , mostrando, portanto, dimensionalidade não-euclidiana. Valores aproximando-se 3 para um floco tridimensional indica, portanto, um alto grau de compactação enquanto valores se aproximando de 1 indica uma estrutura muito solta e

aberta. A dimensão fractal, portanto, pode dar informações estruturais importantes sobre a compactação e natureza do agregado.

Dimensões fractais podem ser relacionadas com as medidas de propriedades do floco, como a velocidade de sedimentação ou tamanho de partícula. A dimensão fractal pode ser derivada de um único agregado ou de uma população de agregados. No caso dos últimos, a escala de comprimento básica pode ser tomada como a mais curta, mais longa, média geométrica, ou raio equivalente. Até o presente momento não há consenso entre os pesquisadores sobre qual abordagem produz as estimativas mais precisas da dimensão fractal (CHAKRABORTI; ATKINSON; VAN BENSCHOTEN, 2000).

A relevância da dimensão fractal para a engenharia inclui os efeitos sobre as propriedades dos agregados formados e a taxa de floculação. É desejável obter taxas de floculação rápida e produção de flocos com propriedades que resultam em eficiente separação sólido/líquido. A dimensão fractal pode variar favorecendo apenas um destes resultados. Estudos relatam que taxas de floculação são inversamente proporcionais à D_3 , enquanto a velocidade de sedimentação (W_s) é proporcional ao comprimento característico do agregado (l), elevado a uma potência que varia de acordo com várias dimensões fractais, conforme Eq. (6).

$$W_s \sim l^{(D_3-D_2+l)} \quad (6)$$

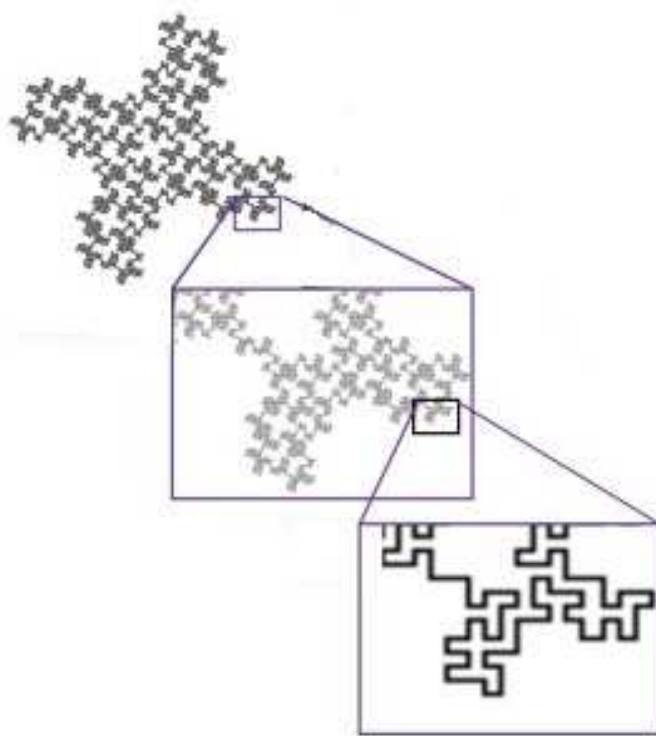
Assim, para filtração direta, partículas com D_3 pequeno podem ser desejáveis enquanto para sedimentação um D_3 grande é melhor. Recentemente, os conceitos de fractais têm sido utilizados para explicar as velocidades mais altas de sedimentação observadas por agregados grandes, em relação a sedimentação de Stokes. Como indicado na Eq. 6, o tamanho do floco e suas dimensões fractais são importantes no entendimento da velocidade de sedimentação (CHAKRABORTI; ATKINSON; VAN BENSCHOTEN, 2000).

Análise fractal é um método contemporâneo de aplicação matemática não tradicional para padrões que desafiam a compreensão com os conceitos tradicionais de flocos euclidianos. Fractais não são necessariamente formas físicas - eles podem ser padrões espaciais ou temporais. Em geral, fractais podem ser qualquer tipo de padrão infinitamente escalonado e

repetido. A este respeito, é importante estar ciente de que os fractais teóricos são abstrações, mas que dão a essência da análise fractal. As imagens digitais limitadas pela resolução da tela, geralmente não são verdadeiros fractais no sentido estrito. Da mesma forma, os chamados fractais tipicamente encontrados na natureza não são infinitamente escalonados como os padrões finitos gerado por computador, são geralmente apenas aproximações de fractais no sentido estrito (KARPERIEN, 2012).

Segundo Karperien (2012), o padrão gerado por computador mostrado na Figura 6, foi construído para emular um fractal quadrático de 32 segmentos. Seu padrão é escalonado e autosimilar. Mas conforme ilustrado, a escala não é infinita, termina quando o padrão se torna 1 pixel de largura, um limite imposto por pixels na tela do computador.

Figura 6 – Fractal quadrático de 32 segmentos



Fonte: Karperien (2012)

Apesar das formas naturais somente se aproximarem de fractais teóricos, este tipo de análise é muito útil. Pesquisadores usam diferentes tipos de análise fractal para estudar uma série de fenômenos, incluindo as geometrias complexas de muitos tipos de células biológicas e outros

padrões complexos, tais como o crescimento de árvores, caminhos de rios, crescimento de tumores, e a formação de flocos (KARPERIEN, 2012).

2.5 Técnicas para determinação das características dimensionais dos flocos

Medições diretas do desempenho da floculação fornecem dados extremamente valiosos, como a obtenção da distribuição de tamanho de partículas e morfologia dos flocos. Estas características são determinantes para a correta utilização das tecnologias de separação sólido-líquido que controlam a eficiência global de remoção das partículas em sistemas de tratamento de água. A característica dos flocos em unidades de tratamento e a obtenção do estado de equilíbrio, para uma dada configuração pré-estabelecida, podem ser monitorados, seguindo estas características (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

2.5.1 Espalhamento de luz

Segundo Jarvis *et al.* (2005a) o padrão no qual um agregado espalha radiação dá informações sobre sua estrutura. A maneira em que o objeto dispersa a luz pode permitir calcular valores de dimensão fractal se as propriedades de espalhamento das partículas que formam o agregado são suficientemente conhecidas. Esta técnica pressupõe:

- (1) as partículas primárias que compõem o agregado são uniformes em tamanho e forma.
- (2) o índice de refração do material agregado é baixo
- (3) a luz é dispersa apenas uma vez ao atravessar a suspensão dos agregados antes de atingir o detector. Dispersões múltiplas devem ser minimizadas, garantindo que a concentração de partículas seja baixa.

Com o desenvolvimento de técnicas experimentais para investigação dos flocos, o espalhamento de luz é, atualmente, mais acessível. Esta é uma técnica comum e universal, desenvolvida nas últimas décadas, tendo sido comprovadamente mais rápida, simples, econômica, menos invasiva e precisa que outras técnicas similares. Além disso, pode fornecer informações estruturais dos flocos em tempo real, o que é importante para o estudo da cinética de floculação (YANG *et al.*, 2013).

Wu *et al.* (2002) mostra que a técnica de espalhamento de luz envolve a medição da intensidade da luz (I) como uma função do vetor de onda (Q). Este vetor é definido como sendo a diferença entre os vetores de onda incidente e espalhadas pelo feixe de luz na solução. A magnitude do vetor de onda pode ser calculada pela equação 7.

$$|\vec{Q}| = Q = \frac{4\pi n \sin(\theta/2)}{\lambda} \quad (7)$$

Onde n, θ, λ são os índices de refração do meio, o ângulo de espalhamento e o comprimento de onda no vácuo, respectivamente. Aplicando a equação de Rayleigh-Gans-Debye na teoria de espalhamento, obtemos a equação 8.

$$I(Q) \propto Q^{-D_f} \quad (8)$$

onde $I(Q)$ é a intensidade da radiação espalhada e Q é o vetor de onda calculado pela equação 7. A dimensão fractal D_f é obtida pela inclinação da reta do gráfico log-log entre $I(Q)$ e Q (WU *et al.*, 2002).

A maioria das aplicações das técnicas de espalhamento tem sido em sistemas monodispersos onde as informações sobre tamanho das partículas primárias e o comportamento de dispersão dessas partículas são conhecidas. A aplicação para flocos mais complexos normalmente encontrados em processos de tratamento de água potável e de águas residuais tem sido mais difícil. Nestes casos, informações sobre a composição da partícula primária podem ser limitadas com pouco ou nenhum conhecimento do índice de refração da partícula. Além disso, as partículas primárias podem não ser uniforme e o floco pode ser formado de partículas com diferentes índices de refração (JARVIS *et al.*, 2005c).

Segundo Jarvis *et al.* (2005c), para medir o tamanho do floco, nenhum método pode ser considerado ideal, pois os flocos são muito irregulares e porosos, tendo, portanto, padrões de dispersão muito diferente das esferas sólidas. As propriedades de espalhamento de luz de agregados ainda têm que ser totalmente quantificadas.

2.5.2 Sedimentação

A sedimentação como forma de determinar o valor da dimensão fractal já é uma técnica bem estabelecida. O uso da técnica assume relevância extra porque o comportamento de sedimentação dos agregados é um parâmetro importante para otimizar o processo de sedimentação. O comportamento de sedimentação do floco é dependente de seu tamanho, densidade e porosidade. A estrutura fractal dos flocos pode ter duas consequências possíveis no seu comportamento, já que tendem a assumir formas cada vez mais não-esférica, conforme crescem: pode agir para aumentar o arrasto sobre a partícula quando comparado a uma esfera sólida do mesmo tamanho, ou a porosidade de flocos pode agir para reduzir o arrasto, permitindo que a advecção da suspensão (BUSHELL *et al.*, 2002).

Miyahara et al (2002), mostra que a equação para a velocidade terminal de uma partícula esférica em sedimentação livre é dada pela equação 9:

$$V = \frac{g}{18\eta} (\rho_f - \rho_w) d^2 \quad (9)$$

Onde V é a velocidade terminal da esfera, g é a aceleração da gravidade, η é a viscosidade do fluido, ρ_f é a densidade do floco, ρ_w é a densidade do fluido e d é o diâmetro do floco. Considerando que o floco é composto de partículas monodispersas com propriedades de autosimilaridade, chega-se à equação 10.

$$i = \left(\frac{d}{d_0} \right)^{D_f} \quad (10)$$

Onde i é o número de partículas primárias que compõem o floco, d_0 é o diâmetro da partícula primária e D_f é a dimensão fractal do floco. A partir do balanço de massa e volume do floco, obtêm-se as seguintes relações (11.a) e (11.b):

$$v_f = v_s + v_w \quad (11.a)$$

$$\rho_f v_f = \rho_s v_s + \rho_w v_w \quad (11.b)$$

Onde v_f é o volume total do floco, v_s é o volume de sólidos e v_w é o volume de vazios de um floco. A mesma analogia para ρ_f e ρ_w .

Incorporando as equações 10, 11.a e 11.b na equação 9, a velocidade de sedimentação de um único floco pode ser expressa como na equação 12:

$$V = \frac{g}{18\eta} (\rho_s - \rho_w) d_0^{3-D_f} * d^{D_f-1} \quad (12)$$

Com a velocidade de sedimentação em função do diâmetro do floco pode-se calcular a dimensão fractal D_f . A inclinação da reta de um gráfico log-log entre velocidade contra a diâmetro do floco permitem o cálculo da dimensão fractal. Esta equação só se aplica quando os flocos sedimentam-se isoladamente. Wu *et al.* (2002) observa que a maioria dos sistemas experimentais atendem aos critérios para encontrar a dimensão fractal do floco por este método.

Problemas podem ser encontrados se a porosidade dos flocos for alta, quando o mesmo pode sofrer advecção, aumentando a velocidade de sedimentação. Em casos práticos, os efeitos de porosidade na solução do problema são negligenciados e atualmente ainda o conhecimento sobre este efeito é limitado. Portanto, deve se ter cuidado ao interpretar dados quando a dimensão fractal calculada no sistema por sedimentação é significativamente inferior a 2. Além disso, a medição dos dados requer meticulosa preparação e um número grande de amostras, a fim de obter resultados precisos. (JARVIS *et al.*, 2005c)

2.5.3 Análise de Imagens

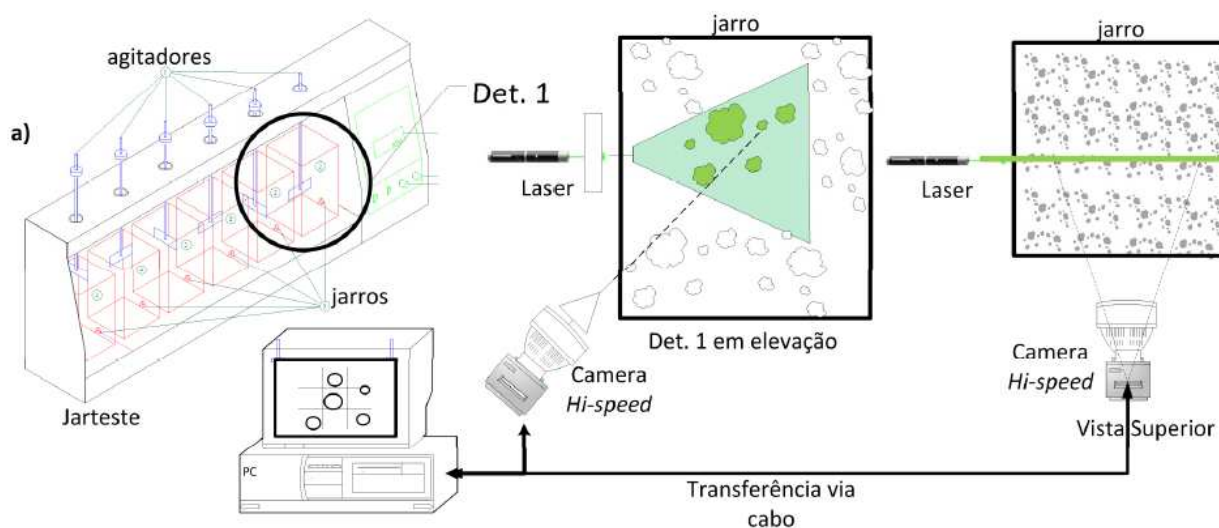
Segundo Bushell *et al.* (2002), as técnicas de análise de imagens são provavelmente as mais antigas e versáteis. Com esta técnica é possível realizar análises complexas. É uma técnica muito robusta que fornece inúmeros parâmetros sobre a morfologia dos flocos. A maioria das técnicas de análise de imagens trabalham com a projeção do agregado em um plano.

Segundo Jarvis *et al.* (2005c) técnicas fotográficas são adequadas porque os flocos são expostos apenas ao cisalhamento do rotor e não tem que passar por um sistema de bombas como no Analisador de Dispersão Fotométrica. As limitações da fotografia são o tempo e os

cuidados que devem ser tomados na preparação da iluminação para permitir o contraste adequado entre floco e fundo. Além disso, podem ser perdidos muito flocos pequenos que estão além dos limites de detecção da câmera usada. Efeitos de mascaramento também podem ocorrer em suspensões de flocos muito concentradas. Dadas essas restrições, deve-se ter cuidado ao comparar dados de tamanho do floco obtidos por diferentes metodologias.

A figura 7 ilustra um sistema de obtenção de imagens com câmeras de alta resolução. A técnica consiste em regular a câmera para focar em um plano iluminado por um laser entre 0,3 e 1,0 cm da parede do jarro em estudo. O advento de câmeras digitais de alta resolução e o desenvolvimento de softwares de análise de imagens permitiram medições de um número quase inesgotável de flocos muito mais rápidas (WANG; JIN; GREGORY, 2002).

Figura 7 – Ilustração de técnica fotográfica com câmeras de alta resolução



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2015)

Após a obtenção das imagens, as mesmas devem ser processadas de forma a obter os dados necessários para cálculo da dimensão fractal por algum método, entre eles: Box Counting, Sand Box, Área-dimensão.

2.5.5 Síntese dos Métodos

Jarvis *et al.* (2005c), mostrou que cada método tem suas vantagens e desvantagens, conforme resumido na tabela 4.

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens das técnicas usadas para determinar a dimensão fractal de flocos

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Dispersão de luz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Método não intrusivo e rápido; ▪ Bem adaptada à análise dinâmica em tempo real; ▪ Boa para análises de partículas pequenas com uma estrutura aberta e índice de refração baixo; ▪ Realiza grande número de leituras a partir de muitas partículas em poucos segundos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inadequada para partículas dispersas compostas por muitas partículas primárias; ▪ Dificuldade na escolha de um modelo apropriado para comportamento da dispersão; ▪ Resultados afetados por contaminação, como pó, etc; ▪ Quebra da relação de energia para flocos grandes.
Sedimentação	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adequado para medidas fractais de flocos compactos; ▪ Método barato e simples; ▪ Não está susceptível à problemas de contaminação; ▪ Adequado para flocos com número de partículas primárias diferentes. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Longo tempo requerido; ▪ Dificuldade em encontrar um coeficiente de arrasto adequado; ▪ Pode ter orientação não-aleatória dos agregados em sedimentação; ▪ Requer cuidado na regulação da coluna de decantação.
Análise de imagem	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adequado para agregados grandes; ▪ Não está susceptível à problemas de contaminação; ▪ Análise de flocos únicos permite detalhar informações sobre variação na estrutura do floco a partir de uma amostra. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Longo tempo requerido; ▪ Demanda boa definição e imagens com um contraste elevado para precisão da análise.

Fonte: Adaptado de Jarvis et al, 2005c

Segundo Bushel *et al.* (2002), o método de espalhamento de luz funciona melhor em flocos pequenos e porosos que possuem baixo índice de refração de luz. Esses tipos de flocos são os que apresentem maior dificuldade de estudo pelos métodos de sedimentação e de análise de imagens, uma vez que não é bem equacionado velocidade de sedimentação desses flocos, e devido a seu baixo índice de refração de luz, a obtenção de imagens fica comprometida. No entanto a técnica de espalhamento de luz encontra dificuldades em sistemas com muitos flocos devido aos efeitos de sombra e de múltiplas refrações e em sistemas que os flocos são formados por partículas primárias heterógenas.

A sedimentação é uma técnica confiável, mas que demanda tempo e cuidados extras do pesquisador. A técnica pode ser aplicada em quase todos os sistemas, com grande precisão para sistemas de flocos compactos devido a pequena interferência da adveccção. Já o método de análise de imagens tem como premissa para boa precisão dos dados a obtenção de alto contraste entre o floco e o fluido (JARVIS *et al.*, 2005c).

Não existe uma técnica que seja considerada melhor que as outras, o pesquisador deve avaliar qual método melhor se aplica ao seu sistema. É importante que o pesquisador cite qual técnica está sendo usada uma vez que os valores obtidos em cada uma serão diferentes e impossíveis de serem comparados.

2.6 Técnicas para determinação do diâmetro fractal a partir de imagens digitais

2.6.1 Box Counting

Uma maneira de determinar a dimensão fractal dos flocos é através do método *box counting* (contagem de caixas). A essência da técnica é cobrir o objeto que está sendo analisado com caixas de tamanho definido usando o número mínimo de caixas para cobrir completamente. Então o processo é repetido com caixas menores sucessivas vezes. Este método é um dos mais utilizados pela sua relativa facilidade de cálculos matemáticos e computacionais envolvidos (BUSHELL *et al.*, 2002).

Ainda de acordo com Bushell *et al.* (2002), desenhando o gráfico com o número de caixas necessárias para cobrir os objetos contra o tamanho das caixas, em escala log-log, é possível

traçar uma linha de tendência com uma inclinação da reta equivalente à dimensão fractal ou é possível calcular através da equação 11.

$$D_f = \lim_{L \rightarrow 0} - \frac{\log(N)}{\log(L)} \quad (13)$$

Onde N é o número de caixas necessárias para cobrir o objeto e L é o tamanho da caixa.

Assim, em imagens de baixa resolução (L de valor alto) a inclinação da reta será zero, já que N será 1, portanto o objeto se comportará como um ponto. Com resoluções melhores há uma transição onde é possível constatar efeitos de forma do floco e em altíssima resolução a dimensão fractal é calculada com exatidão.

Quando se lida com imagens realizadas em laboratório acompanhando a floculação, há um certo esforço de pré-processamento da imagem que deve ser considerado para obter os requisitos apropriados para o método, que são similares aos necessários para análise em relação a área e dimensão característica.

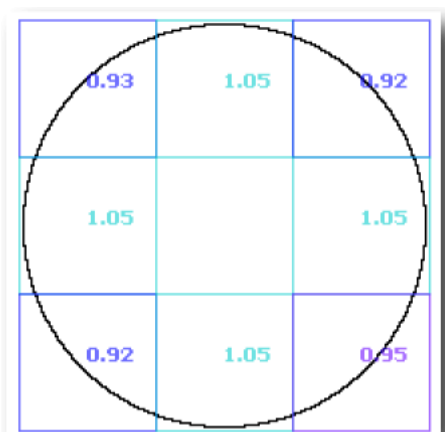
Existem diversos programas comerciais e de licença livre que foram desenvolvidos com o propósito de calcular a dimensão fractal, como o plugin Frac Lac desenvolvido pela Charles Sturt University, Australia para o programa Image J.

Segundo Karperien (2012), testes de referência usando uma varredura padrão no FracLac apresentam geralmente variação de 1 a 5% do esperado teórico para imagens binárias padrão que variam de 100 a 900 pixels de diâmetro. Imagens maiores tendem a ser mais próximas dos valores de teóricos, e as menores e mais detalhadas geralmente desviam-se mais dos valores teóricos.

Contornos simples tem uma dimensão fractal teórica de valor numérico um e objetos planos preenchidos de valor numérico dois. No entanto, uma tela de computador representa imagens usando uma grade de pixels. Assim, círculos e linhas angulares (horizontais ou verticais) são aproximadas em imagens digitais, e como resultado, os valores calculados do diâmetro fractal pelo método nem sempre correspondem ao teórico para algumas imagens. A Figura

9 ilustra o que acontece quando um círculo é analisado. Em seu tamanho original o círculo em si parece redondo, mas como visto na figura, a curva é aproximada por segmentos retos. Em geral, quando toda a imagem é digitalizada usando o método de contagem de caixas, o valor da dimensão fractal será de 1,02, mas devido as limitações das imagens digitais cada parte da imagem não é verdadeiramente arredondada e se considerados separadamente, pode variar do teórico (KARPERIEN, 2012).

Figura 9 – Círculo em análise no programa FracLac



Fonte: Karperien (2012)

2.6.2 Sand Box

Segundo Bushell *et al.* (2002), outra maneira de determinar a dimensão fractal de objetos em imagens é a técnica chamada caixa de areia. A técnica envolve selecionar um ponto perto do centro da imagem e contando a quantidade de massa do floco que cai dentro da caixa de determinado tamanho centrada sobre o ponto selecionado. A dimensão fractal pode ser obtida conforme equação 12:

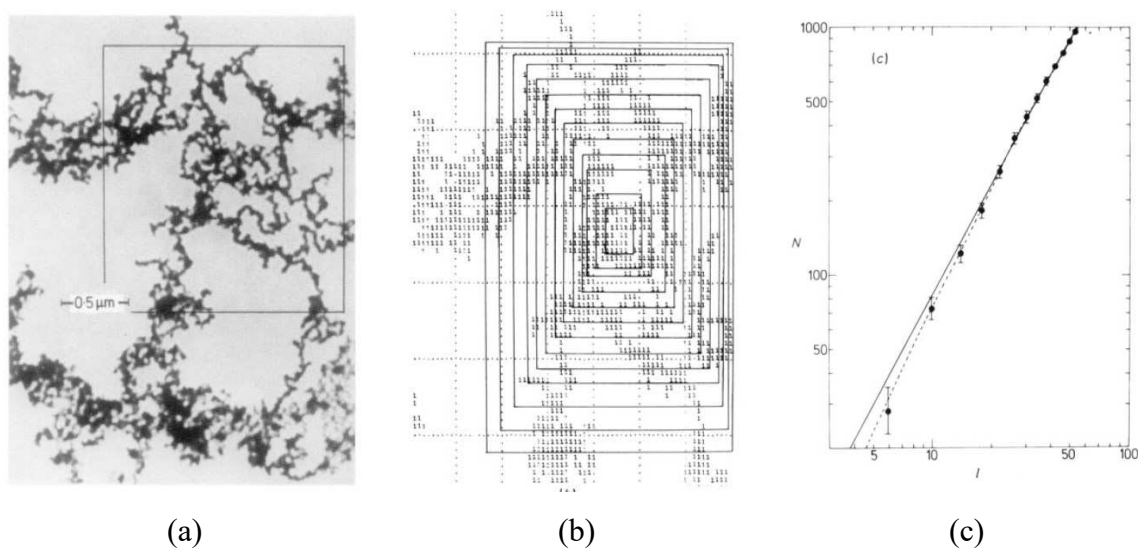
$$D_f = \frac{\log(N)}{\log(L)} \quad (14)$$

onde N é a quantidade de massa de partícula contida dentro da caixa e L é o tamanho da caixa.

Efeitos de forma do agregado também são considerados com esta técnica, então a dimensão fractal é obtida apenas onde L é muito menor do que o tamanho total do agregado e muito maior do que as partículas primárias ou da resolução da imagem.

A Figura 10 mostra em (a) uma micrografia eletrônica de transmissão de um agregado de ferro, em (b) a série de caixas usadas para gerar os dados e em (c) o gráfico de determinação do D_f . As caixas não aparecem como quadrados por causa do formato de impressora do computador. Cada ponto de dados corresponde a uma caixa na Fig. b, onde N é o número de algarismos 1,0 contados em uma caixa de lado l . O coeficiente angular $D = 1,51 \pm 0,05$, foi calculado para o menor r^2 de acordo com o número de algarismos uns contados em uma determinada caixa. Vários conjuntos semelhantes de contagens são feitas ao acaso, começando em pontos aleatórios da imagem para determinar o D_f (FORREST e WITTEN, 1979).

Figura 10 – Método Sand Box



Fonte: Forrest e Witten (1979)

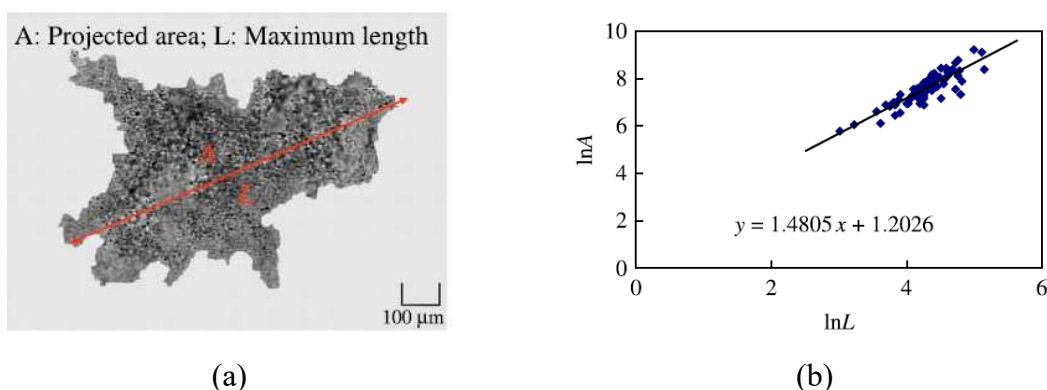
O método da caixa de areia parece ter sido preterido perante as técnicas de box counting e área-dimensão. Não existe bibliografia nem pesquisas em abundância e recentes que validem o uso do método.

2.6.3 Área-Comprimento característico

Através da imagem dos flocos capturados pela câmera digital, a dimensão fractal pode ser obtida com auxílio de programas de computador. Softwares como o ImageTool e ImageJ permitem o tratamento das imagens e a realização de medições como área, perímetro, maior dimensão, diâmetro de Feret, etc. dos flocos. Para o cálculo da dimensão fractal, em cada imagem é necessário medir uma dimensão característica e área de cada floco capturado pela câmera, conforme ilustrado na Figura 11a.

Aplicando a teoria de fractais exposto na Equação 4, existe uma relação entre a área e um comprimento característico do floco, que pode ser por exemplo sua maior dimensão. Através do desenho de um gráfico log-log da área contra a maior dimensão, é possível traçar uma reta de tendência. O coeficiente angular da reta será a dimensão fractal, conforme mostrado na Figura 11b.

Figura 11 – Medição do comprimento, área e dimensão fractal do floco



Fonte: Jin; Wang; Chai (2007)

2.6.4 Processamento de imagens: Breve histórico

O processamento de imagens é uma área de grande interesse científico devido a seu grande número de aplicações distintas. Existem duas grandes categorias da técnica, sendo a primeira relativa ao aprimoramento das informações pictóricas para interpretação e a segunda é relacionada a análise automática por um computador dos dados de uma imagem. (GONZÁLEZ e WOOD, 1992).

No início do século 20 buscou-se aprimorar a qualidade de imagens para fins de transmissão de imagens digitalizadas para jornais entre Londres e Nova York, mas foi com o advento dos computadores e o início do programa espacial americano que a técnica ganhou impulso, pela necessidade de transmissão de imagens da lua. De 1964 até a atualidade, as técnicas de aprimoramento de imagens apresentaram crescimento expressivo, com aplicações em quase todos os ramos da atividade humana (GONZÁLEZ e WOOD, 1992).

O processamento e interpretação automática de imagens tem grande aplicação na medicina, biologia, meteorologia, geografia, astronomia, etc.. A aplicação de técnicas de análise de imagem para caracterização da estrutura e propriedades dos flocos são provavelmente uma das mais antigas e versáteis (BUSHELL et al., 2002).

Esta dissertação de mestrado faz parte dos trabalhos iniciais na Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da UFU utilizando-se a técnica para estudo das partículas presentes na água. Orientados pelo Prof. André Luiz de Oliveira, foram produzidos até o momento duas dissertações, conforme descrito na Tabela 5:

Tabela 5 – Trabalhos produzidos FECIV-UFU

Ano	Autor	Trabalho
2015-2017	Ricardo Henrique de Andrade Dutra	Obtenção dos parâmetros cinéticos da floculação com utilização de técnica de análise de imagem
2015-2017	Yuri Mendes	Evolução da Distribuição do tamanho de partículas na floculação de água de baixa turbidez.

Fonte: Autor (2017)

Essa linha de pesquisa na UFU é parte integrante e originária do trabalho de pós-doutorado do Prof. André Luiz de Oliveira realizado na UNESP, supervisionado pelo Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi, que iniciou seus estudos na área em sua pesquisa de doutorado, onde estudou partículas e microbolhas usando análise de imagens em estação de tratamento em escala

piloto entre os anos de 2001 e 2004. Naquela instituição já foram produzidos uma série de trabalhos, sendo os principais descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Trabalhos produzidos na UNESP

Ano	Autores	Trabalho
2012 - 2015	Prof. Dr. Marcelo de Júlio, Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi, Prof. Dr. John Gregory, Prof. Luiza Cintra Campos	Pesquisa em parceria Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), University College of London (UCL) e UNESP cujo objetivo era a implementação de um sistema de monitoramento contínuo de partículas flocculentas em Estações de Tratamento.
2013 - 2014	Ma. Pamela Moreno	Trabalhos em nível de mestrado que estudou a aplicação da lama vermelha no tratamento de água e empregando a técnica de análise de imagem no desempenho da floculação.
2014 - 2015	Dr. André Luiz de Oliveira	Estudos de pós Doutorado no estudo de partículas flocculentas e monitoramento contínuo da floculação.
2013 - 2017	Me. Pedro Augusto Grava da Silva	Trabalho de iniciação científica referente ao aprimoramento das técnicas de obtenção e tratamento de imagem digital, seguido de pesquisa de mestrado sobre a resistência, refloculação e geometria não euclidiana de partículas.
2016 - 2017	Thaís de Almeida	Trabalho de iniciação científica que investigou a eficiência de separação sólido líquido em tratamento de águas monitorado por análise de imagem e dispersão de luz.

Fonte: Autor (2017)

A contribuição do presente trabalho reside no uso da técnica e metodologia já consolidada pelo grupo, para estudo da evolução da dimensão fractal das partículas em águas com baixa turbidez.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os equipamentos, materiais, softwares e metodologia utilizados na pesquisa.

3.2 Equipamentos

A Tabela 7 resume os equipamentos utilizados nesta pesquisa e breve descrição dos mesmos.

Tabela 7 – Descrição dos equipamentos utilizados

Equipamento	Marca/Modelo	Descrição
Jar Test	Nova Ética/218/6LBD	6 jarros de 2,5L, rotação das pás de 15 a 600 RPM (10 a 1200 s ⁻¹), dosagem simultânea de coagulante e solução para correção de pH, coletor de amostras a 8,5cm do fundo do jarro.
Turbidímetro	Policontrol/AP 2000 IR	Faixa de medição de 0 a 1000 NTU, com resolução de 0,1 NTU
pHmetro de bancada	Even/PHS-3E	Faixa de medição de 0 a 14 pH, com resolução de 0,01pH, com eletrodo combinado universal de plástico
Câmera Fotográfica	Nikon/D5 500	Resolução de até 24,2 Megapixels, velocidade de até 5 imagens por segundo.
Ponteiro Laser	Zhong Heng	Potência do feixe de laser de 35000mW, comprimento de onda entre 532 e 650 nm.

Fonte: Autor (2017)

3.3 Coagulantes

Os coagulantes utilizados nesta pesquisa foram o PAC, Cloreto Férrico e Sulfato de Alumínio.

O PAC foi adquirido da empresa Sun Química Ltda., de nome comercial Sun Floc CLA. O fabricante informa que o produto possui entre 20 e 30% de Hidrato de Alumínio, 30% de Ácido Clorídrico e 20% de Alcalinizante, sendo o pH puro do produto entre 1,00 e 2,00 e densidade específica entre 1,150 e 1,250 g/cm³.

Os coagulantes Cloreto Férrico e Sulfato de Alumínio foram preparados no laboratório de saneamento da FECIV/UFU de forma a garantir 1 mg/L de Ferro e Alumínio na solução, respectivamente.

Para controle do pH de coagulação foram utilizados ácido clorídrico HCl a 0,1 M, e base Hidróxido de Sódio NaOH a 0,1 e 0,5M.

3.4 Softwares

3.4.1 Surfer 10

O *software* Surfer 10 é produzido pela empresa Golden Software, com sede em Golden, Colorado (EUA). O Surfer é um programa que permite a construção e visualização de mapas de contorno de alta qualidade, além de realizar sofisticados processos de interpolação de dados.

Nesta pesquisa o programa foi parametrizado para realizar a interpolação de dados a partir do Método de Kriging ou Processo Gaussiano de Regressão. Kriging é um dos métodos mais flexíveis e precisos de interpolação. O método pode compensar dados agrupados, dando menos peso para o grupo na predição global. Uma das desvantagens de Kriging é que pode ser mais lento do que outros métodos. Ele também pode extrapolar valores além do alcance dos dados (XIE; WANG; JIANG, 2001).

Cada ponto da rede baseia-se nos pontos de dados conhecidos, vizinhos do nó, sendo cada ponto de dados ponderado por sua distância do nó conhecido. Desta forma, pontos que estão

mais longe do nó terão menos peso na estimativa. Por exemplo, para calcular o valor de Z no nó de grade A, utiliza-se a seguinte equação:

$$Z_A = \sum_{i=1}^n W_i Z_i \quad (15)$$

onde Z_A é o valor estimado do nó A, n é o número de dados vizinhos usados na estimativa, Z_i é o valor em cada ponto e W_i é o peso. A somatória dos pesos deve ser igual a 1 para certificar-se de que não há nenhum viés para pontos de dados em grupo (GOLDEN SOFTWARE INC., 2015).

3.4.2 ImageTool 3.0

ImageTool (versão 3.0) é um programa de processamento e análise de imagem gratuito, desenvolvido no Departamento de Diagnóstico Dental da Universidade do Texas nos Estados Unidos da América. O programa permite adquirir, exibir, editar, processar, analisar, salvar e imprimir imagens em cor e em escala de cinza. Determina-se distância, ângulo, perímetro e área pela análise de imagem, a partir de funções de cálculo dimensionais presentes neste programa. O ImageTool suporta funções de processamento de imagem padrão como manipulação de contraste, nitidez, suavização, detecção de bordas, filtragem, e possui recursos de scripts internos que permitem ao usuário gravar tarefas repetitivas e sua posterior reprodução dos scripts para automatizar a análise de imagem (DOVE, 2016).

3.4.3 ImageJ

ImageJ é um programa de processamento de imagem de domínio público programado em Java, desenvolvido pelo National Institute of Health (NIH) do Departamento de Saúde e Serviço Social dos EUA. O programa pode exibir, editar, analisar, processar, salvar e imprimir imagens de 8 bits, 16 bits e 32 bits. Pode também ler diversos formatos de imagem, incluindo TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM. Suporta "pilhas", uma série de imagens que compartilham uma única janela. Ele é *multithread*, com isso é possível executar a leitura de imagens em paralelo com outras atividades (RASBAND; FERREIRA, 2012).

O ImageJ pode calcular estatísticas de valor de área e pixel de seleções definidas pelo usuário. Pode medir distâncias e ângulos, além de criar histogramas. Suporta funções de processamento de imagem padrão como manipulação de contraste, nitidez, suavização, detecção de bordas e filtragem mediana. A calibração espacial está disponível para fornecer medidas reais em unidades do Sistema Internacional de Medidas (RASBAND; FERREIRA, 2012).

ImageJ foi projetado com uma arquitetura aberta, que permite extensões através de *plugins* do Java. O mesmo pode ser editado pelos usuários, o que torna possível resolver quase qualquer problema de processamento ou de análise de imagem. Existem atualmente cerca de 500 plugins para o ImageJ, sendo um deles o FracLac (RASBAND; FERREIRA, 2012).

3.4.4 Plugin FracLac para ImageJ

FracLac é um plugin para ImageJ que realiza análise de imagens digitais para medidas de partículas de difícil descrição das características morfológicas. É um *software* disponível gratuitamente, desenvolvido e mantido pelo Laboratório da Faculdade de Ciências da Charles Sturt University na Austrália. Como software de código aberto, com a ajuda contínua de uma série de usuários e colaboradores, o FracLac evoluiu para um conjunto de funções de análise e morfologia de fractal (KARPERIEN, 2012).

3.4.5 Camera Control 2

O software Camera Control Pro 2 desenvolvido pela Nikon permite o controle das funções e configurações da câmera fotográfica incluindo modo de exposição, velocidade e abertura do obturador, através do computador conectado a câmera por cabo usb.

Com o programa é possível melhorar o fluxo de trabalho dos procedimentos de captura e salvamento das imagens. Além disso, o controle remoto da câmera isenta o operador de possíveis alterações no posicionamento da mesma devido a manipulação do aparelho.

3.4.6 Origin 2007

O Origin 2007 realiza análise estatísticas de dados e plota gráficos a partir de dados no Excel. O software foi utilizado para comparação das médias pelo Teste de Tukey, o que não é possível ser realizado no Excel.

O Teste de Tukey realiza a comparação das médias dos grupos em pares, determinando quais grupos possuem dados estatisticamente diferentes. É um teste rigoroso e de fácil aplicação, muito utilizado em pesquisas científicas.

3.5 Procedimentos

Inicialmente foram produzidos os diagramas de coagulação para os coagulantes em estudo. Esta etapa teve a finalidade de encontrar os valores ótimos de pH e dosagem de coagulante para obtermos as melhores condições de formação de flocos a serem utilizadas nos ensaios de obtenção de imagens.

Para construção do diagrama de coagulação, seguiram-se os seguintes passos: preparo da água na turbidez desejada; execução dos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação com o “*Jar Test*”; coleta de amostras e medição dos parâmetros; montagem do diagrama de coagulação.

Em um segundo momento foram realizados ensaios controlados com aquisição e análise de imagens. Para aquisição de imagens e tratamento das mesmas, foi adotado o método amplamente explorado por Moruzzi (2005).

No tratamento das imagens, para fins de comparação dos resultados, foram utilizados dois softwares distintos, porém de características semelhantes.

3.5.1 Diagrama de Coagulação

3.5.1.1 *Preparo da água com turbidez 6,5 NTU*

A água era deionizada e armazenada temporariamente em recipientes plásticos de 10 litros. O líquido era então transferido para um recipiente de plástico de 500 litros onde era feita adição cuidadosa de solução de caulinita até que se atingisse turbidez de $6,5 \text{ NTU} \pm 10\%$.

A cada batelada de ensaios, a água era vigorosamente misturada com auxílio de uma haste de madeira a fim de manter a homogeneidade da solução, confirmada em novas medições de turbidez antes da transferência da água para os jarros do “*Jar Test*”.

A caulinita utilizada para preparo da solução mãe foi adquirida da empresa Sigma-Aldrich em estado natural. Para preparação dessa solução, era adicionada caulinita em 2 litros de água deionizada a qual era agitada em equipamento de agitação magnética durante 8 horas. Após esse período, a solução ficava em repouso por 12 horas onde coletava-se o sobrenadante para constituir a solução mãe, utilizada no preparo da água de estudo.

3.5.1.2 Montagem do diagrama

Os diagramas de coagulação foram montados para os três coagulantes em estudo: Cloreto Férrico, Sulfato de Alumínio e PAC.

Na montagem do diagrama do Cloreto Férrico, iniciou-se com concentração de 0,5 mg/L de Fe^{3+} até 10,0 mg/L, variando a cada 0,5 mg/L. Para o Sulfato de Alumínio iniciou-se com concentração de 0,25 mg/L de Al^{3+} até 5 mg/L, variando a cada 0,25 mg/L.

Para montagem do diagrama de coagulação do PAC partiu-se de um passo adotado de 12 mg/L de coagulante, iniciando-se em 12 mg/L e fechando em 120 mg/L. Para este coagulante em especial não foi possível precisar a concentração de alumínio uma vez que o fabricante não forneceu a faixa exata de concentração do produto.

O pH de coagulação avaliado foi de 4,0 a 9,0. Esse intervalo foi escolhido a fim de se obter dados de turbidez remanescente em uma larga faixa de valores de pH. No laboratório tomou-se o máximo cuidado possível para atingir todas as faixas de pH em estudo, buscando variar o mesmo em cerca de 0,5 decimais, a fim de permitir ao programa *Surfer* uma precisão maior sobre os dados interpolados.

Com os dados de laboratório de pH de coagulação, dosagem de coagulante e turbidez remanescente das partículas com $V_s \leq 5 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ e $V_s \leq 2,5 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, foram montados, no

Surfer, os diagramas de coagulação. Como a turbidez inicial variava ligeiramente a cada experimento, optou-se por utilizar valores percentuais de remoção de turbidez, para facilitar a visualização.

Os diagramas de coagulação obtidos para os três coagulantes em estudo estão apresentados no capítulo de resultados, assim como os pares de valores ótimos de dosagem de coagulante e pH da água

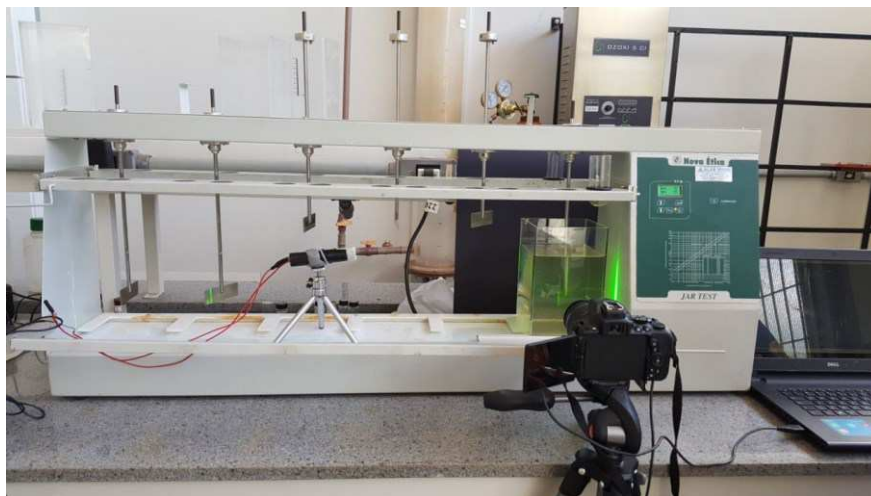
3.5.2 Aquisição de Imagens

A aquisição de imagens dos flocos foi feita a partir de câmera de alta resolução conectada a um computador com foco ajustado em plano de luz estabelecido por laser adaptado. O procedimento para aquisição de imagens seguiu a descrição a seguir:

- 1) A câmera fotográfica era fixada com auxílio de um tripé em frente ao jarro em estudo.
- 2) As configurações da câmera eram ajustadas de forma a garantir as melhores fotos possíveis para a condição de iluminação e foco.
- 3) A câmera era conectada ao computador para permitir que o software *Camera Control 2* controlasse a velocidade e quantidade de disparos do equipamento.
- 4) Um objeto com escala gráfica era inserido no jarro a fim de permitir a calibração posterior do programa de tratamento das imagens.
- 5) O feixe de luz do laser era acionado segundos antes da captura das imagens e, posteriormente desligado. Este procedimento visou manter constante a intensidade de luz.
- 6) As imagens dos flocos foram obtidas a cada minuto nos primeiros 10 minutos e nos tempos de 15, 20, 30, 40 e 60 minutos de ensaio. Eram coletadas 40 imagens em cada tempo.

A Figura 12 ilustra a montagem experimental para aquisição das imagens.

Figura 12 – Montagem dos equipamentos para aquisição de imagens

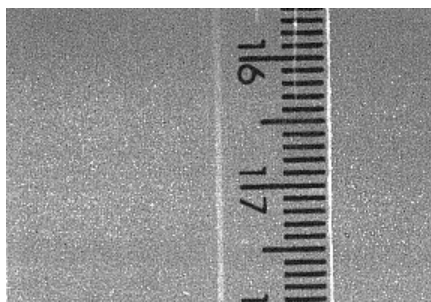


Fonte: Autor (2017)

3.5.3 Processamento das imagens

O processamento das imagens foi realizado com os softwares *ImageTool 3.0* e *ImageJ* cujas interfaces são muito semelhantes. O primeiro passo era a calibração a partir de uma dimensão conhecida em uma foto obtida para este fim. Neste estudo, foi utilizada uma régua graduada em milímetros posicionada no mesmo plano dos ensaios para efeito de calibração, conforme ilustrada na Figura 13. As imagens obtidas nos ensaios possuem a mesma resolução da foto de calibração e foram obtidas nas mesmas condições de foco e distância do jarro.

Figura 13 – Modelo de foto de calibração utilizando régua graduada em milímetros

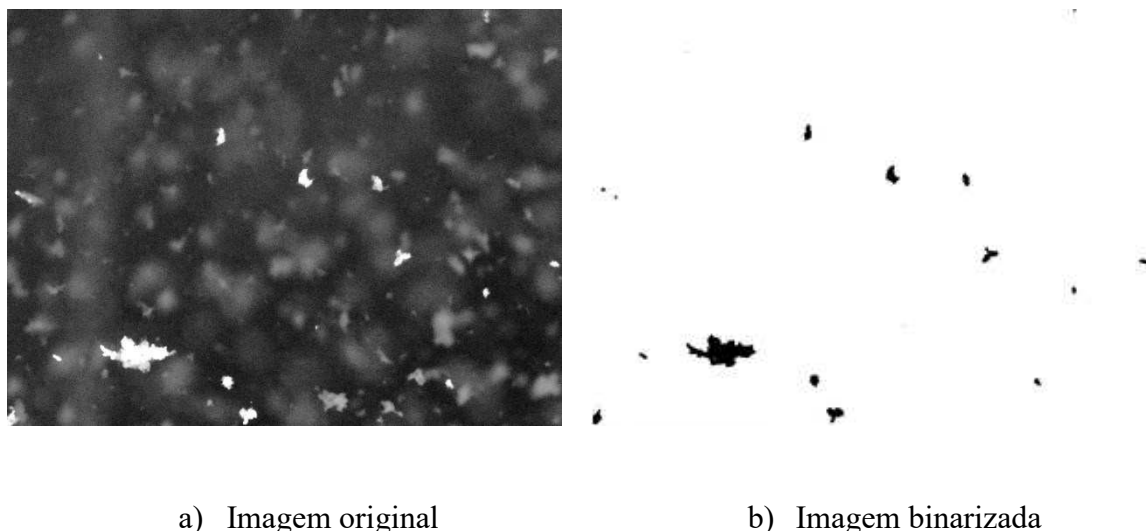


Fonte: Autor (2017)

O próximo passo era a conversão da imagem colorida em preto e branco. No processo de aquisição, as fotos são obtidas de forma que os flocos que passam pelo foco ficam mais iluminados pelo plano laser, garantindo um nível de brilho mais acentuado que os flocos em

outros planos. Assim, na imagem preto e branco é possível definir manualmente o limiar de binarização. Definido determinado limiar, os flocos no foco foram convertidos em preto, e os flocos desfocados e o fundo convertidos em branco, conforme ilustra a Figura 14.

Figura 14 – Exemplo de imagem binarizada



a) Imagem original

b) Imagem binarizada

Fonte: Autor (2017)

Conforme já comentado, o método de tratamento de imagens utilizado neste trabalho está eficientemente descrito por Moruzzi (2005). Após o tratamento da imagem, o programa é capaz de reconhecer os flocos (objetos pretos) e permite ao operador obter importantes dados sobre os mesmos como a distribuição de tamanho; diâmetro médio, máximo e mínimo; área; perímetro, número de partículas entre outros.

A principal diferença entre o uso do *ImageTool* 3.0 e *ImageJ* é que este possui função de tratamento de grupo de imagens em conjunto, assim o operador pode selecionar todo o grupo de imagens e trata-las em conjunto, aumentando a eficiência. Além disso, o *ImageJ* permite ao operador informar qual o tamanho em milímetros do pixel da imagem, aumentando a confiabilidade dos dados dimensionais.

3.5.4 Erros associados ao método

De modo análogo ao descrito por Moruzzi (2005), existem duas fontes principais de erro do método, sendo estes os erros relativos a amostragem e os erros inerentes ao método. No caso

deste trabalho, foram calculados os erros relativos o limiar de binarização, resolução e amostragem.

3.5.4.1 Erro de Limiar de binarização

Com relação aos erros do método, o primeiro deles deve-se ao processo manual de binarização da imagem, sendo que cada operador pode julgar valores diferentes de limiar, aumentando ou diminuindo assim as dimensões e quantidade de flocos no plano. A melhor forma de reduzir ao máximo este erro é na aquisição da imagem, eliminando qualquer fonte de iluminação externa, mantendo apenas o feixe de laser a fim de melhor evidenciar os flocos no plano de luz, o que não foi possível nesta pesquisa. Outra forma de reduzir o erro é o cuidado do operador na definição do limiar de um grupo de imagens.

Para o cálculo do erro de binarização foi utilizado três grupos de imagens, sendo cada grupo referente a um coagulante em estudo e possuindo cinco imagens cada, escolhidas de forma aleatória, porém em um mesmo gradiente de velocidade. Os grupos foram tratados no software ImageTool por três operadores diferentes, que resultou em 3 leituras distintas. O erro foi calculado comparando-se o número de partículas e diâmetro médio dos flocos obtidos pelos três operadores, conforme descrito na Equação 16.

$$e = \frac{L_{m\acute{a}x} - L_{m\acute{i}n}}{L_{m\acute{a}x}} * 100 \quad (16)$$

onde e é o erro calculado em %, $L_{m\acute{a}x}$ é o parâmetro máximo em análise obtido e $L_{m\acute{i}n}$ é o parâmetro mínimo em análise obtido.

3.5.4.2 Erro de Resolução

Este erro, relativo ao método, diz respeito ao número de pixels que representam a imagem. Todo floco tem sua área apresentada em função do menor elemento da imagem, o pixel. O tamanho do pixel é função da resolução adotada e do aumento (zoom) da imagem. Quanto menor o tamanho do pixel, melhor será a resolução o que garantirá melhor definição das bordas do objeto.

Nesta pesquisa, considerando o tamanho dos objetos analisados e os instrumentos e capacidade de processamento do sistema, foi utilizado um pixel de tamanho medido em 12,023 μm e área de 0,00014455mm².

Para cálculo do erro de resolução, que pode tanto ser sub ou superestimada, utilizou-se a Equação 17.

$$e = \frac{A_{\text{real}} - A_{\text{sub ou superestimada}}}{A_{\text{real}}} * 100 \quad (17)$$

onde e é o erro calculado em %, A_{real} é a área real do objeto em mm e $A_{\text{sub ou superestimada}}$ é a área sub ou superestimada do objeto em mm.

3.5.4.3 Erro de Amostragem

O erro de amostragem refere-se ao erro de representatividade da amostra em estudo. Este erro foi calculado pelo tratamento das 40 imagens obtidas no tempo de floculação de 40 minutos, para cada um dos gradientes de velocidade em estudo e para cada coagulante. Foi realizada a análise relativa às 5 primeiras imagens do grupo, e em seguida para as 10, 15, 20, 35 e 40 imagens seguintes. O erro foi calculado utilizando a Equação 18.

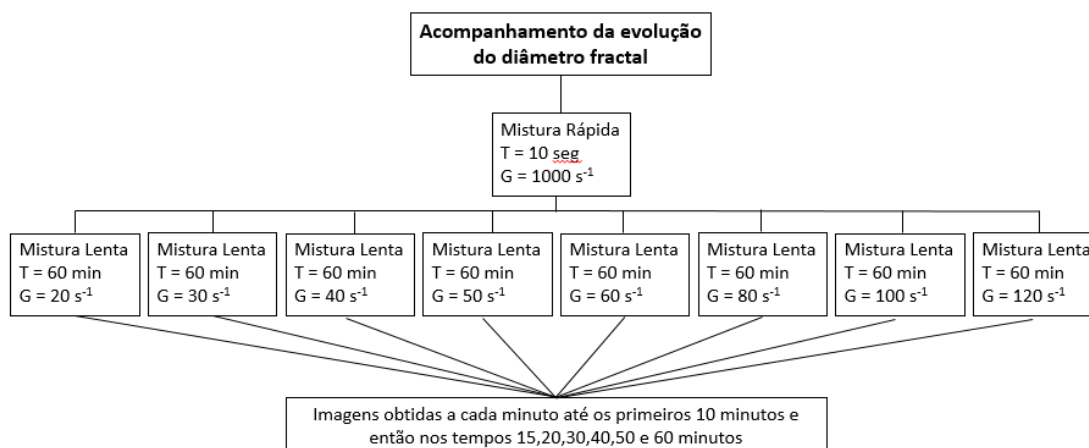
$$e = \frac{L_{\text{máx}} - L_{\text{mín}}}{L_{\text{máx}}} * 100 \quad (18)$$

onde e é o erro calculado em %, $L_{\text{máx}}$ é o parâmetro máximo em análise obtido e $L_{\text{mín}}$ é o parâmetro mínimo em análise obtido.

3.5.5 Ensaios para determinação da evolução da dimensão fractal

Considerando o início da floculação como o tempo 0, imagens foram obtidas após cada minuto até os primeiros 10 minutos, e então com 15, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos de ensaio com gradientes de velocidade de 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 s⁻¹, para os coagulantes cloreto férrico, PAC e sulfato de alumínio, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma do ensaio de acompanhamento da evolução do diâmetro fractal para cada um dos coagulantes avaliados



Fonte: Autor (2017)

3.5.6 Cálculo da dimensão fractal

A dimensão fractal foi calculada por dois métodos distintos, primeiro pela relação entre a área e o comprimento característico e em um segundo momento pelo método *Box Counting*, com auxílio do *software FracLac*.

Também foram calculadas as dimensões fractais de algumas amostras pela equação 10, apresentada no item 2.5.2 – Sedimentação, que relaciona o número de partículas primárias no floco, o diâmetro do floco e o diâmetro das partículas primárias.

3.5.6.1 Cálculo da dimensão fractal pela área e comprimento característico

Conforme já descrito no item 2.6.3, e ilustrado na Figura 11, a dimensão fractal foi calculada através do coeficiente angular da linha de tendência de uma nuvem de pontos formada pelo gráfico log-log da área pelo comprimento característico.

Os gráficos foram traçados a partir dos dados exportados do *ImageTool* e *ImageJ* com auxílio do *software Microsoft Excel*. Os dados de área e maior dimensão do floco eram exportados para o *Excel*, então calculados os logaritmos de cada um deles, e plotados os

gráficos com os dados de log da maior dimensão no eixo das abscissas e o log da área no eixo das ordenadas. O *software* possui uma função chamada “inclinação”, que retorna a inclinação da reta de regressão linear para os pontos de dados determinados, o que facilita o trabalho do operador, substituindo a plotagem de toda sequência de gráficos.

Nesta pesquisa, foram excluídos os dados de flocos com diâmetro de Feret menor que 9 pixels para diminuir o erro de determinação, uma vez que esses dados interferem significativamente a nuvem de pontos e, conseqüentemente, na dimensão fractal que se aproximava de uma esfera.

3.5.6.2 Cálculo da dimensão fractal pelo método *Box Counting*

As imagens obtidas foram tratadas no plugin FracLac dentro do programa ImageJ. O plugin realiza o cálculo pelo método de *Box Counting* conforme descrito em 2.6.1. O cálculo da dimensão fractal nesta técnica tem um alto custo computacional, levando até 8h para varredura de uma série de 40 imagens, em computadores de desempenho.

3.5.6.3 Cálculo da dimensão fractal pela relação entre o diâmetro do floco e quantidade de partículas primárias

A partir da equação 10, viu-se que era possível calcular a dimensão fractal aproximada dos flocos, com base em algumas suposições. Foi considerado que a partícula primária teria a dimensão de 1 pixel, conforme adotado por Moruzzi *et al.* (2017, no prelo), e que o número de partículas primárias por agregado seria o número de pixels que representam o agregado.

Foi traçado o gráfico log-log entre o número de partículas primárias no floco e a relação entre o diâmetro do floco e o diâmetro da partícula primário (1 pixel) para determinação do D_f do conjunto de partículas. Assim como no método que relaciona a área-comprimento característico, foram excluídas as partículas com diâmetro de Feret abaixo de 9 pixels.

Por este método foram calculados os D_f para os minutos 10,20 e 30 de cada coagulante no gradiente de velocidade $G=20\text{ s}^{-1}$ e os dados foram comparados aos obtidos com a relação área-comprimento característico.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais desenvolvidos conforme descrito pela metodologia apresentada no Capítulo 3. Para melhor entendimento e comparação da evolução da dimensão fractal em águas de baixa turbidez, ela foi analisada sob três óticas diferentes: global por coagulante; por gradiente de velocidade; por tempo de mistura lenta. Além disso é apresentada uma análise estatística dos dados com intuito de se verificar as correlações entre os diversos resultados e a verificação de semelhança.

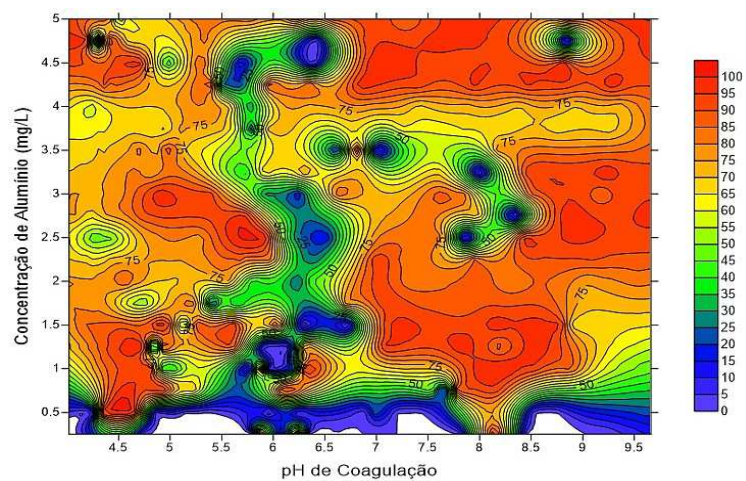
Para elaboração dos gráficos foram utilizados os dados processados pelo software *ImageJ*. Ressalta-se que, preliminarmente, também foram processadas imagens com utilização do software *Image Tools*. Como os dados produzidos pelos dois softwares foram muito semelhantes, e, considerando-se que o no *ImageJ* é possível realizar-se a análise de diversas imagens a partir de um único comando, gravado em macro, este foi escolhido para ser utilizado neste trabalho.

Os erros inerentes ao método foram determinados, e foi realizado análise comparativa entre as Equações 4 e 10 para determinação da dimensão fractal.

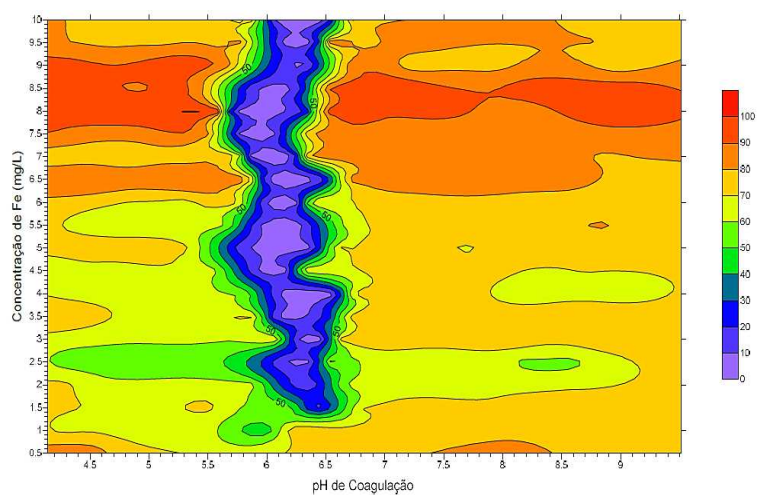
4.1 Diagrama de coagulação

Os diagramas de coagulação obtidos para os três coagulantes estão apresentados na Figura 16.

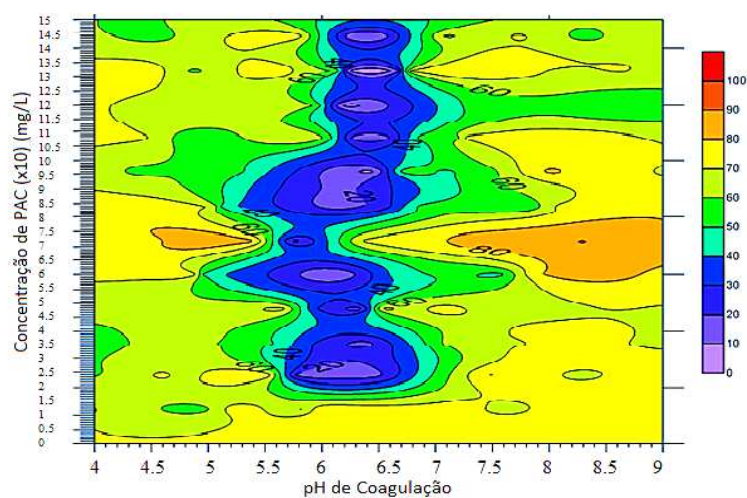
Figura 16 – Diagrama de coagulação para turbidez remanescente (%) com $V_s = 2,5$ cm/s



a) Sulfato de Alumínio



b) Cloreto Férrico



c) PAC

Fonte: Autor (2017)

Os pares de valores ótimos de dosagem de coagulante versus pH de coagulação utilizados neste estudo estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dosagem de coagulante e pH da água ótimos

	Dosagem de coagulante (mg/L)	pH da água
Sulfato de Alumínio	2,5 de Al	6,50
Cloreto Férrico	5,2 de Fe	6,15
PAC	70,0 de PAC	6,20

Fonte: Autor (2017)

8.1 Determinação dos erros inerentes ao método.

4.1.1 Erro de Limiar de Binarização

Utilizando a Equação 16, o erro referente ao limiar de binarização foi calculado e é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Erro de Limiar de Binarização

	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Erro (%)
Limiar adotado Cloreto Férrico	172	158	150	12,79
Limiar adotado PAC	186	176	201	12,44
Limiar adotado Sulfato de Alumínio	185	170	168	9,19
Diâmetro Médio Cloreto Férrico (µm)	222,64	215,58	213,28	4,20
Diâmetro Médio PAC (µm)	74,62	55,57	93,99	40,88
Diâmetro Médio Sulfato de Alumínio (µm)	110,86	109,54	84,95	23,37
Quantidade de Flocos Cloreto Férrico	357	357	309	13,45
Quantidade de Flocos PAC	213	171	345	50,43
Quantidade de Flocos Sulfato de Alumínio	1052	987	978	7,03

Fonte: Autor (2017)

É possível observar o caso crítico para o coagulante PAC. Na seleção do limiar ocorre um erro de 12,44%, próximo aos demais coagulantes, porém este desvio gera um erro de 40,88%

no diâmetro médio e 50,43% no número de partículas, o que mostra a influência do operador e das condições da obtenção das imagens no resultado final da pesquisa.

4.1.2 Erro de resolução

A Tabela 10 apresenta o erro de resolução para diversos tamanhos de flocos, calculados a partir da Equação 17. Em análise óbvia, quanto maior o tamanho do floco, menor o erro relacionado a resolução.

Tabela 10 – Erro calculado em função do tamanho do floco

D	D_r (mm)	A_{real} (mm ²)	A_{super} (mm ²)	A_{sub} (mm ²)	D_{super} (mm)	D_{sub} (mm)	E_{super} (%)	E_{sub} (%)
1pixel	0,012023	0,000113524	0,0001445	0	0,013564038	0	12,82	100,00
2pixel	0,024045	0,000454096	0,000578	0	0,027128075	0	12,82	100,00
4pixel	0,04809	0,001816386	0,002312	0,000578	0,05425615	0,027128075	12,82	43,59
8pixel	0,096181	0,007265542	0,00867	0,004624	0,105066583	0,076729783	9,24	20,22
16pixel	0,192362	0,029062168	0,03179	0,023698	0,201187189	0,173704435	4,59	9,70
32pixel	0,384724	0,116248674	0,123692	0,105774	0,396849525	0,366981797	3,15	4,61

Fonte: Autor (2017)

Observa-se na Tabela 10 que a partir de 8 pixels o erro do método é de 9,24% para área superestimada e 20,22% para área subestimada. Como nesta pesquisa as partículas menores do que 9 pixels foram desconsiderados para determinação da dimensão fractal, o erro será reduzido, mostrando a viabilidade do método.

4.1.3 Erro de Amostragem

O erro de amostragem por coagulante está exibido na Tabela 11 e foi calculado a partir da Equação 18.

Tabela 11 – Erro Amostral

Nº Imagens	e (%) - Cloreto Férrico					
	G=20s ⁻¹	G=40s ⁻¹	G=60s ⁻¹	G=80 s ⁻¹	G=100 s ⁻¹	G=120 s ⁻¹
5	7,69	3,94	5,21	0,32	2,30	5,08
10	0,70	1,60	3,77	0,25	5,55	1,70
15	0,51	1,33	6,46	0,62	1,12	2,11
20	2,14	2,00	5,04	1,64	0,37	0,61
25	1,39	0,60	4,01	3,40	2,63	0,66
30	2,06	0,43	2,95	2,60	1,66	0,47
35	0,14	0,07	1,28	2,09	0,85	0,34
40	0	0	0	0	0	0

Nº Imagens	e (%) - PAC					
	G=20s ⁻¹	G=40s ⁻¹	G=60s ⁻¹	G=80 s ⁻¹	G=100 s ⁻¹	G=120 s ⁻¹
5	42,71	8,48	40,69	3,63	14,52	5,60
10	43,18	1,90	13,80	2,84	12,84	0,61
15	53,84	2,46	2,82	5,38	13,46	2,61
20	22,20	1,11	1,09	5,74	15,30	1,49
25	3,94	1,22	1,59	2,94	8,35	1,01
30	7,53	0,74	2,31	1,76	2,86	0,73
35	2,09	0,43	2,16	0,59	1,10	0,37
40	0	0	0	0	0	0

Nº Imagens	e (%) – Sulfato de Alumínio					
	G=20s ⁻¹	G=40s ⁻¹	G=60s ⁻¹	G=80 s ⁻¹	G=100 s ⁻¹	G=120 s ⁻¹
5	13,60	13,25	5,18	5,00	1,77	0,65
10	9,75	9,17	5,06	2,16	0,45	3,74
15	5,69	9,45	1,70	1,47	2,53	1,09
20	1,17	10,45	2,72	0,32	1,28	1,48
25	1,70	6,68	2,00	0,98	1,64	0,70
30	1,64	4,23	1,93	0,98	1,83	0,70
35	0,62	1,91	0,59	0,51	0,97	0,43
40	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor (2017)

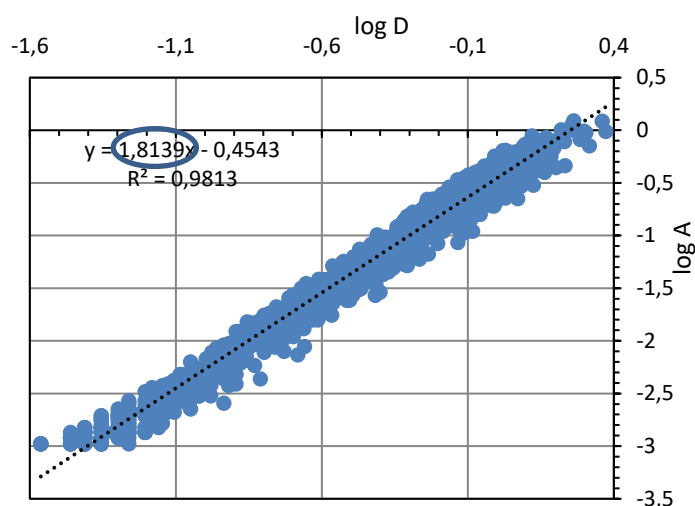
Observa-se na Tabela 11 que o PAC é o coagulante mais sensível ao erro amostral, no entanto os reagentes apresentam erro amostral relativamente baixo a partir de 25 imagens.

8.2 Acompanhamento da evolução da dimensão fractal global por coagulante

Neste item são ilustrados os valores de evolução do diâmetro fractal obtidos considerando-se de forma isolada cada um dos diferentes coagulantes.

A Figura 16 ilustra em detalhe o gráfico de determinação do diâmetro fractal. Cada ponto dos gráficos foi obtido de maneira semelhante. Neste exemplo o D_f foi determinado para o tempo de floculação de 60 minutos e gradiente médio de velocidade (G) de 60 s^{-1} utilizando-se o PAC como coagulante.

Figura 17 – Exemplo da forma de determinação do diâmetro fractal $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ e $t_f = 60 \text{ min}$



Fonte: Autor (2017)

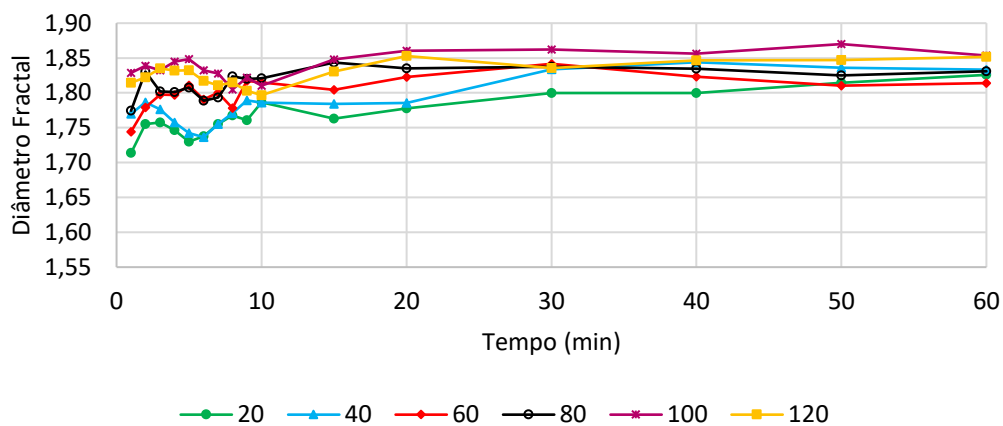
Após a realização dos ensaios e tratamento das imagens conforme descrito no item 3 (Materiais e Métodos), obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 17.

A partir dos resultados apresentados na Fig. 17, observa-se que não houve alteração expressiva nos valores da dimensão fractal ao longo do tempo para os três coagulantes. Observa-se que com o uso do Cloreto Férrico e o PAC a dimensão fractal se estacionou em valores entre 1,76 e 1,81 mostrando ligeira tendência dos flocos produzidos por estes coagulantes se mostrarem mais próximos ao círculo. Ao aplicar o Sulfato de Alumínio (SA) os resultados apresentaram dispersão maior na dimensão fractal final do ensaio, variando desde 1,73 até 1,83.

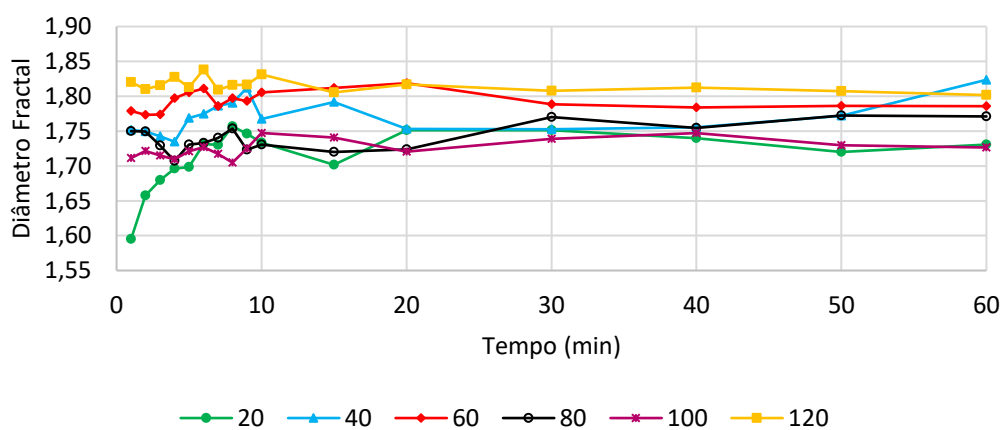
No entanto, é curioso observar que não houve padrão de aumento ou redução da dimensão fractal com o aumento do gradiente médio de velocidade. Exemplo disso é que com o uso do Sulfato de Alumínio a ordem do maior para o menor D_f foram obtidos na seguinte ordem

de gradientes médios de velocidade: $G_f=40 \text{ s}^{-1}$, $G_f=120 \text{ s}^{-1}$, $G_f=100 \text{ s}^{-1}$, $G_f=80 \text{ s}^{-1}$, $G_f=60 \text{ s}^{-1}$, $G_f=20 \text{ s}^{-1}$.

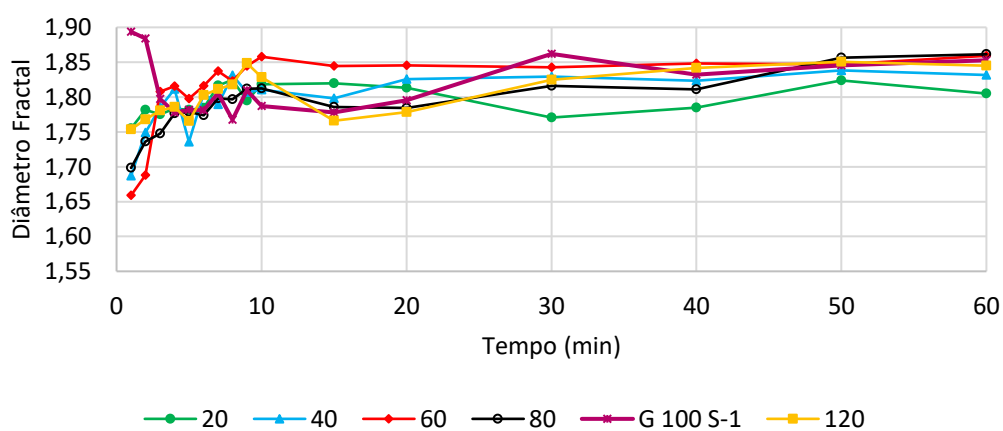
Figura 18 – Evolução da dimensão fractal por coagulante



a) Cloreto férrico



b) Sulfato de alumínio



c) PAC

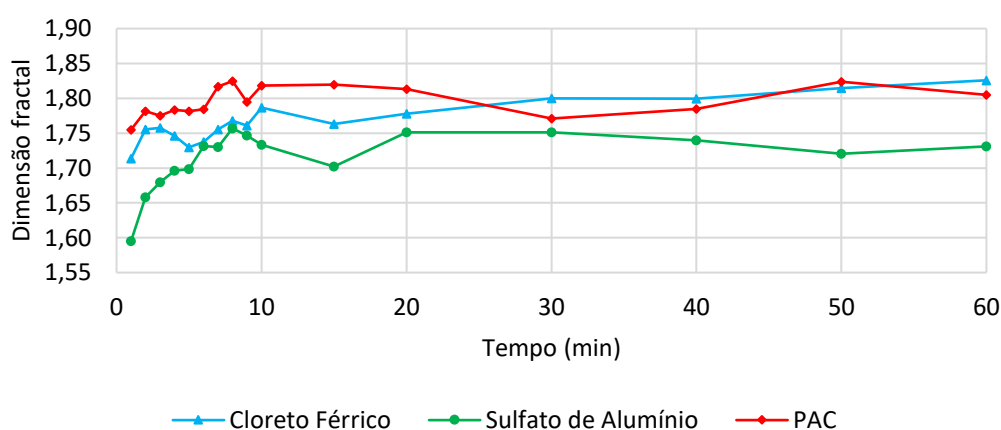
Fonte: Autor (2017)

12.1 Acompanhamento da evolução da dimensão fractal por gradiente de velocidade

Os resultados obtidos para a evolução da dimensão fractal por gradiente de velocidade estão expostos nas Figuras 18, 19, 20, 21, 22 e 23.

Analisando-se os resultados para $G=20 \text{ s}^{-1}$, apresentados na Fig. 18, observa-se comportamento semelhante entre os dados obtidos com o uso do Cloreto Férrico e do PAC, com tendência em estabilizar em valores de D_f acima de 1,80. Utilizando-se o SA, a dimensão fractal apresentou desde o início do ensaio valores inferiores aos demais coagulantes, finalizando o ensaio com $D_f = 1,73$. Os primeiros 10 minutos de ensaio mostram que o flocos está em processo de formação, com sucessivas alterações positivas e negativas do diâmetro fractal. Aos 15 minutos observou-se uma alteração acentuada no D_f com o uso do Cloreto Férrico e o Sulfato de Alumínio. Com a utilização do PAC só foi possível observar essa alteração acentuada aos 30 minutos de ensaio.

Figura 19 – Evolução da D_f no Gradiente de Velocidade $G=20 \text{ s}^{-1}$

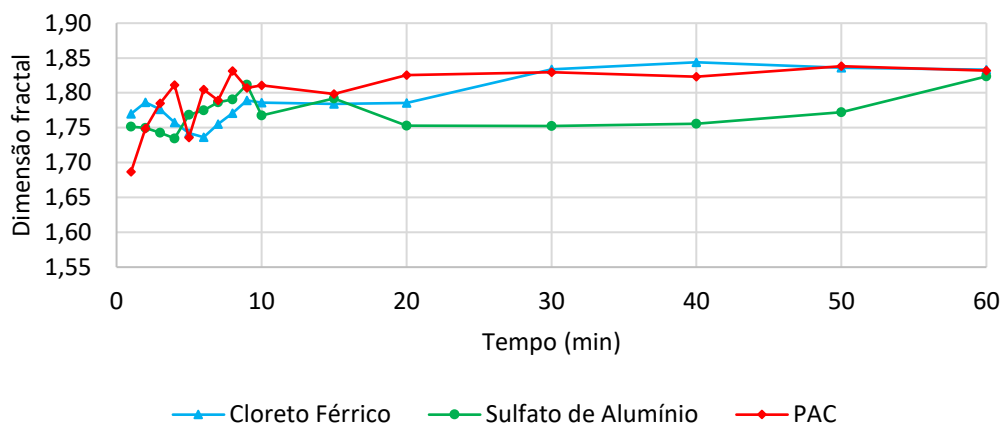


Fonte: Autor (2017)

Na Fig. 19, nota-se que para $G=40 \text{ s}^{-1}$ os valores de D_f de flocos dos três coagulantes terminaram o ensaio no mesmo patamar, acima de 1,82. Neste gradiente, é possível verificar que os flocos formados com SA só apresentaram incremento do D_f nos últimos minutos do ensaio. Nos 10 minutos iniciais o diâmetro fractal dos flocos formados por PAC sofreram grandes alterações com diversos picos positivos e negativos. Após os 30 minutos de ensaio

o comportamento dos flocos utilizando o PAC e o Cloreto Férrico foram semelhantes.

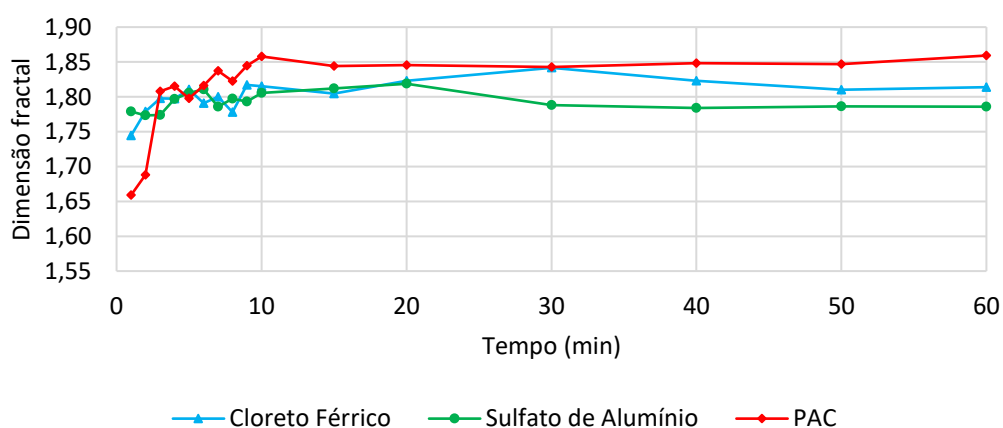
Figura 20 – Evolução da D_f no Gradiente de Velocidade $G=40 \text{ s}^{-1}$



Fonte: Autor (2017)

Analisando a Fig. 20 para o $G=60 \text{ s}^{-1}$, observa-se similaridade de comportamento da evolução da dimensão fractal entre os coagulantes. Neste gradiente de velocidade, a curva de evolução do D_f com o uso do PAC descolou da curva do Cloreto Férrico após os 30 minutos de ensaio, estacionando em valor superior aos demais coagulantes ($D_f=1,86$). A curva com o uso do Sulfato de Alumínio, apesar de acompanhar os demais coagulantes no início do ensaio, mostrou queda a partir de 20 minutos, finalizando o ensaio com $D_f=1,76$.

Figura 21 – Evolução da D_f no Gradiente de Velocidade $G=60 \text{ s}^{-1}$

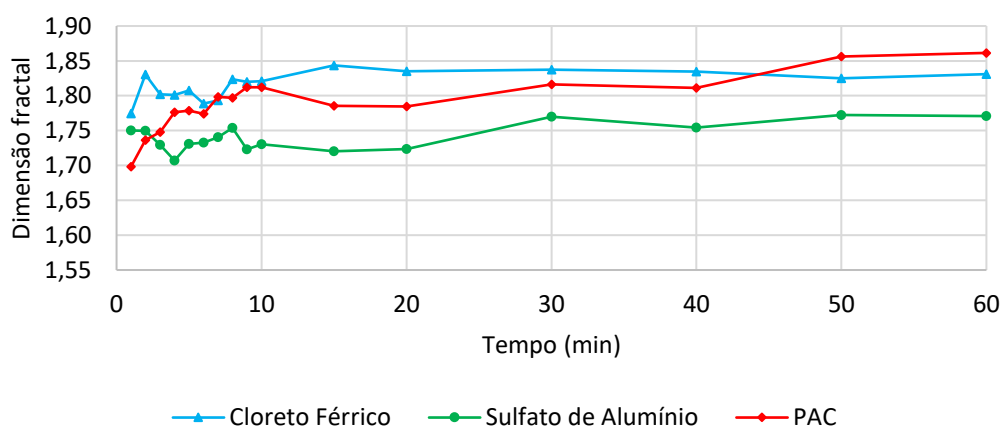


Fonte: Autor (2017)

Ao avançar para $G=80 \text{ s}^{-1}$ observa-se pelos resultados mostrados na Fig. 21 que com a

utilização do PAC, a curva de evolução do D_f começa a aumentar os valores obtidos para D_f em relação aos obtidos nos gradientes anteriores, chegando ao ponto final com $D_f=1,86$, o maior valor obtido nesta pesquisa. Assim como nos demais gradientes médios de velocidade, os flocos formados com o Cloreto Férrico apresentaram dimensão fractal intermediária entre o PAC e o SA.

Figura 22 – Evolução da D_f no Gradiente de Velocidade $G=80\text{ s}^{-1}$

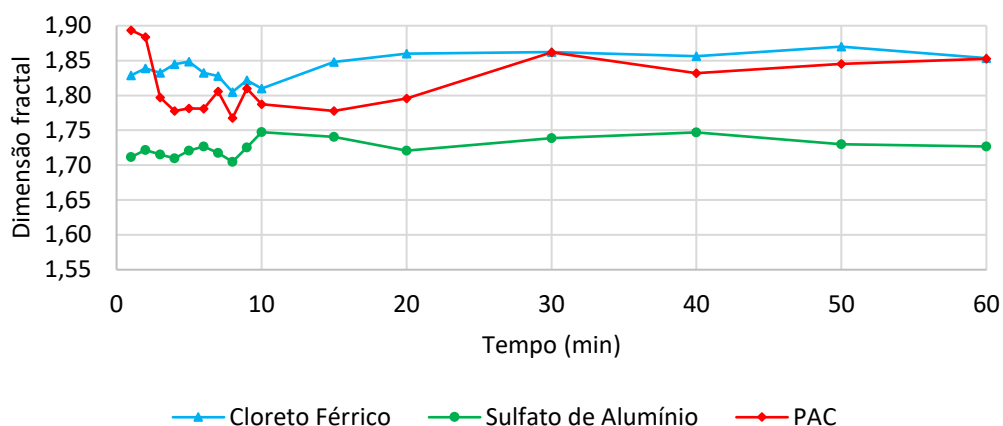


Fonte: Autor (2017)

Com o $G=100\text{ s}^{-1}$, o comportamento dos flocos formados com PAC no final do ensaio apresentou-se próximo ao valor obtido com $G=80\text{ s}^{-1}$ ($D_f=1,85$), porém neste gradiente de velocidade o uso do Cloreto Férrico garantiu o mesmo valor final de dimensão fractal, conforme ilustra a Figura 22. Neste gradiente de velocidade, a curva com o uso do Sulfato de Alumínio apresentou valores inferiores aos demais coagulantes desde o início do ensaio, finalizando o mesmo com $D_f=1,77$.

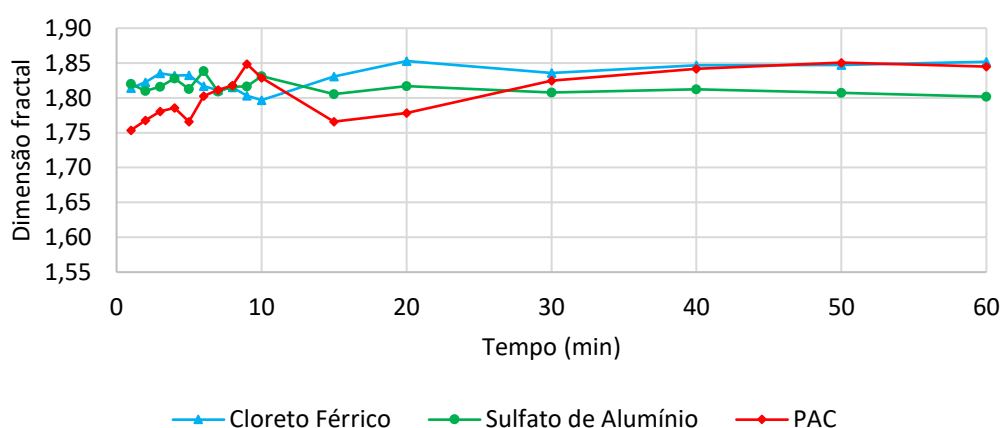
Ao atingir $G=120\text{ s}^{-1}$, observa-se pelos resultados apresentados na Fig. 23, que manteve-se o comportamento observado com os gradientes de velocidade mais baixos. Os flocos formados com Cloreto Férrico mantiveram-se em valores de D_f próximos aos do PAC ($D_f=1,85$). O Sulfato de Alumínio apresentou curva semelhante ao Cloreto Férrico até o minuto 15, quando o D_f começou a declinar até encerrar o ensaio com $D_f=1,80$.

Figura 23 – Evolução da D_f no Gradiente de Velocidade $G=100\text{ s}^{-1}$



Fonte: Autor (2017)

Figura 24 – Evolução da D_f por Gradiente de Velocidade $G=120\text{ s}^{-1}$



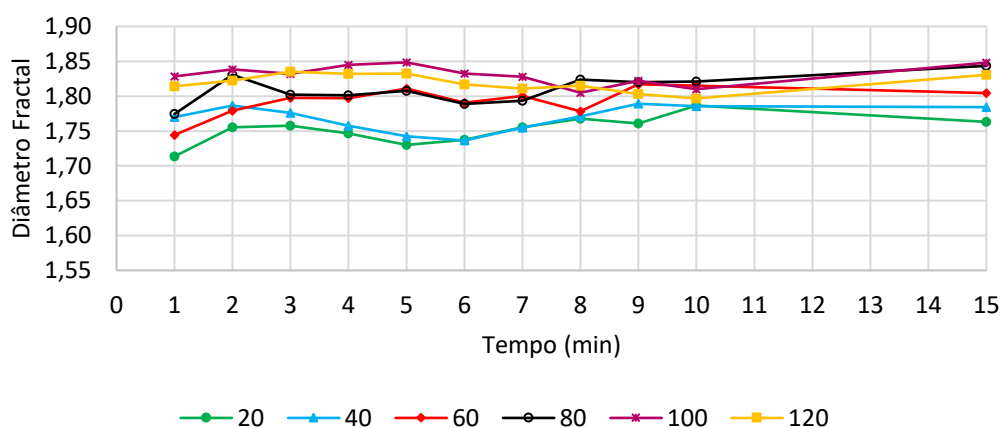
Fonte: Autor (2017)

De forma geral, o Cloreto Férrico e o PAC garantem a formação de flocos com valores de D_f superior aos Sulfato de Alumínio, não importando o gradiente de velocidade em análise. O PAC mostra os maiores valores de dimensão fractal para os gradientes de velocidade acima de $G=60\text{ s}^{-1}$. O Cloreto Férrico apresenta maiores valores de D_f nos menores gradientes, $G=20\text{ s}^{-1}$ e $G=40\text{ s}^{-1}$. No $G=40\text{ s}^{-1}$ todos os coagulantes apresentaram valores de D_f semelhantes, porém só foi o maior resultado obtido para Sulfato Alumínio, sendo que com o uso do PAC o maior D_f foi conseguido com $G=80\text{ s}^{-1}$ e utilizando-se o Cloreto Férrico com $G=100\text{ s}^{-1}$.

12.2 Acompanhamento da evolução da dimensão fractal por tempo

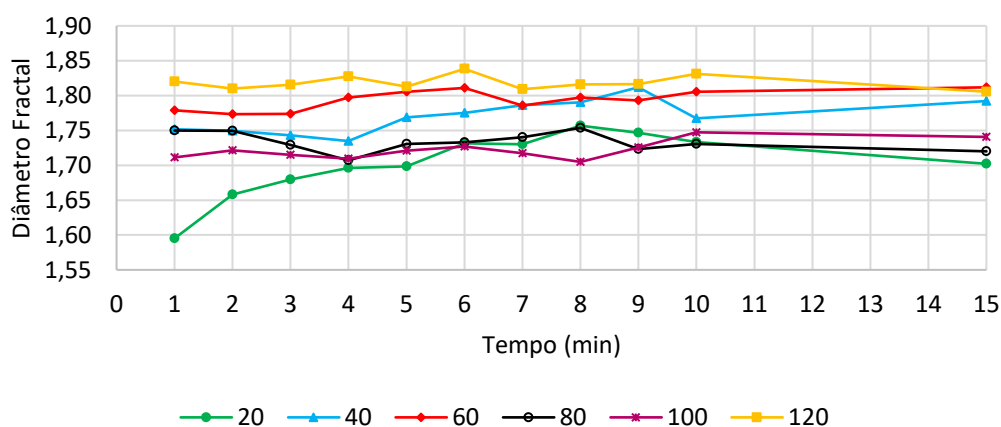
Para acompanhamento da evolução da dimensão fractal por tempo, foi realizada uma análise do minuto 1 ao 15, do minuto 20 ao 60 e para os minutos 10, 20, 30, 40, 50 e 60. As Figuras 24, 25 e 26 evidenciam os 15 primeiros minutos de mistura lenta para os três coagulantes em estudo.

Figura 25 – Evolução da D_f nos 15 minutos iniciais utilizando Cloreto Férrico



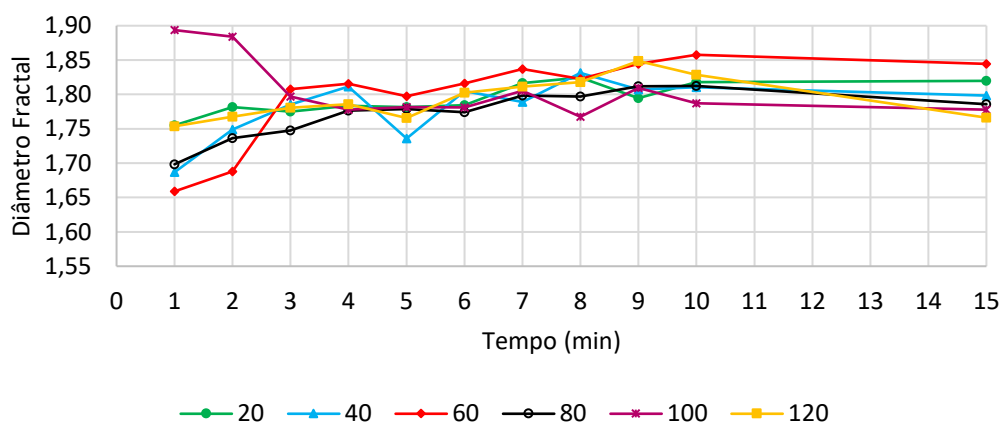
Fonte: Autor (2017)

Figura 26 – Evolução da D_f nos 15 minutos iniciais utilizando Sulfato de Alumínio



Fonte: Autor (2017)

Figura 27 – Evolução da D_f nos 15 minutos iniciais utilizando PAC

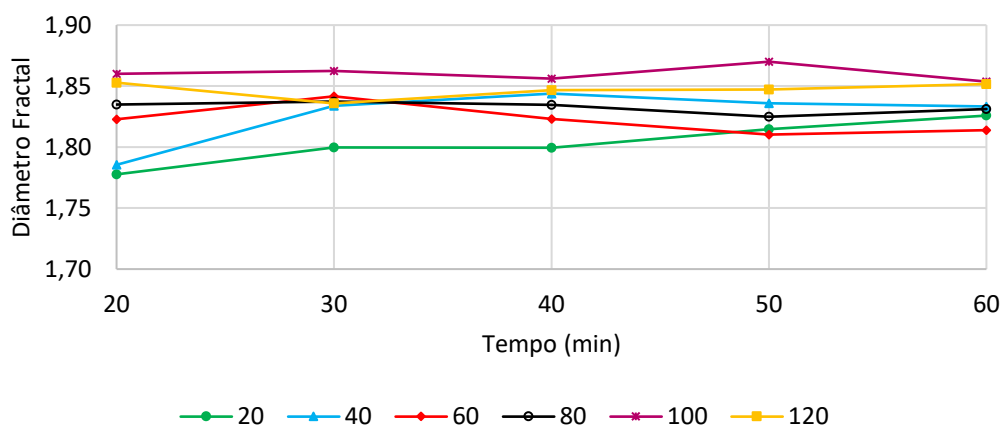


Fonte: Autor (2017)

Observou-se em todos os coagulantes utilizados a tendência dos primeiros 15 minutos serem os que apresentam maiores variações da D_f , indicando que os flocos ainda não atingiram o ponto de equilíbrio em relação a sua forma. A partir dos resultados para o Cloreto Férrico mostrados na Figura 24, observa-se menor variação da D_f do que nos demais coagulantes, enquanto que a Figura 26 permite observar maior variação ao utilizar o coagulante PAC.

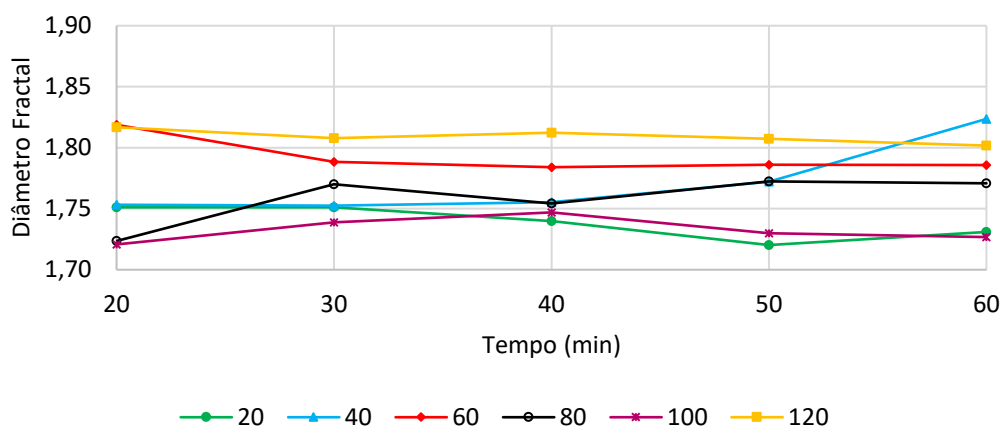
As Figuras 27, 28 e 29 mostram o comportamento do minuto 20 ao 60 para os três coagulantes.

Figura 28 – Evolução da D_f a partir de 20 minutos utilizando Cloreto Férrico



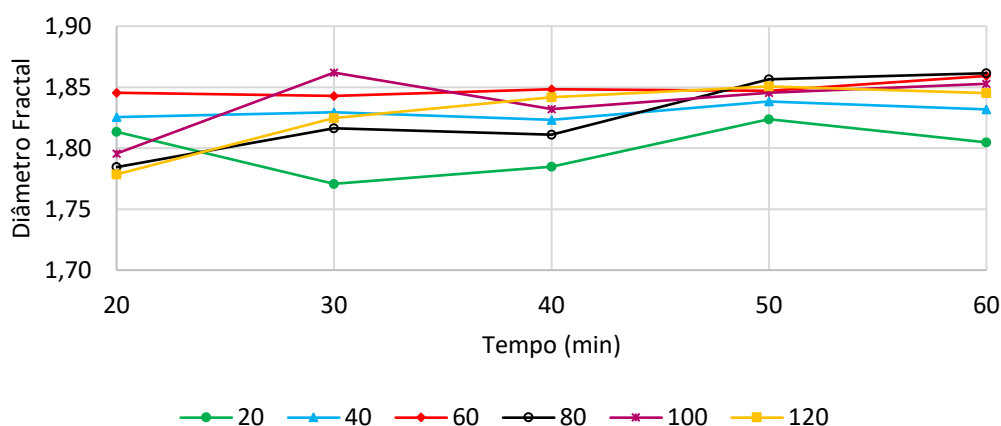
Fonte: Autor (2017)

Figura 29 – Evolução da D_f a partir de 20 minutos utilizando Sulfato de Alumínio



Fonte: Autor (2017)

Figura 30 – Evolução da D_f a partir de 20 minutos utilizando PAC



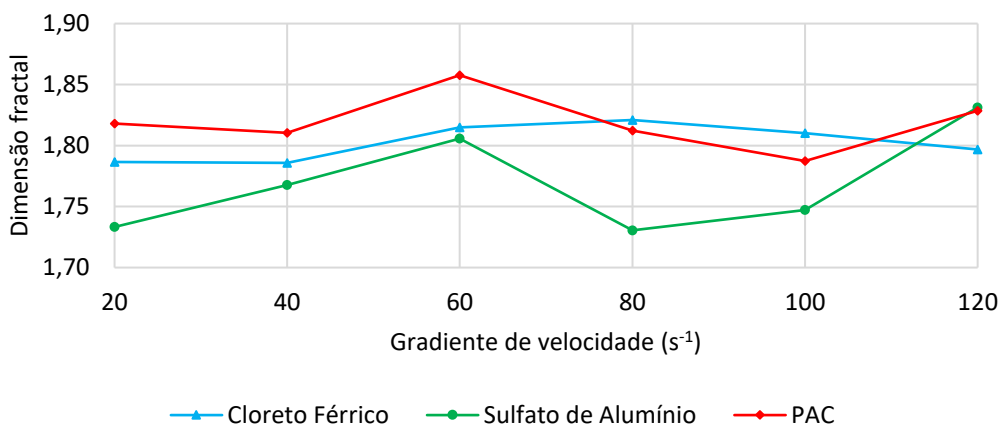
Fonte: Autor (2017)

Analisando a evolução da dimensão fractal a partir do minuto 20 até o minuto 60, observa-se grande variação de comportamento dos coagulantes. Quando utilizado Cloreto Férrico (Figura 27), podem ser observadas curvas com ascensão e declínio suaves, não apresentando variações bruscas no intervalo de 10 minutos. Com utilização do PAC (Figura 29) e o Sulfato de Alumínio (Figura 28) os valores de D_f mostraram vértices acentuados positivos e negativos, indicando, possivelmente, que o coagulante ainda está ativo, rearranjando a estrutura dos flocos mesmo após decorridos 20 minutos de floculação.

As Figuras de 30 a 35 mostram a evolução da dimensão fractal dos flocos obtidos nos tempos de floculação de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos para cada um dos três coagulantes. Observa-

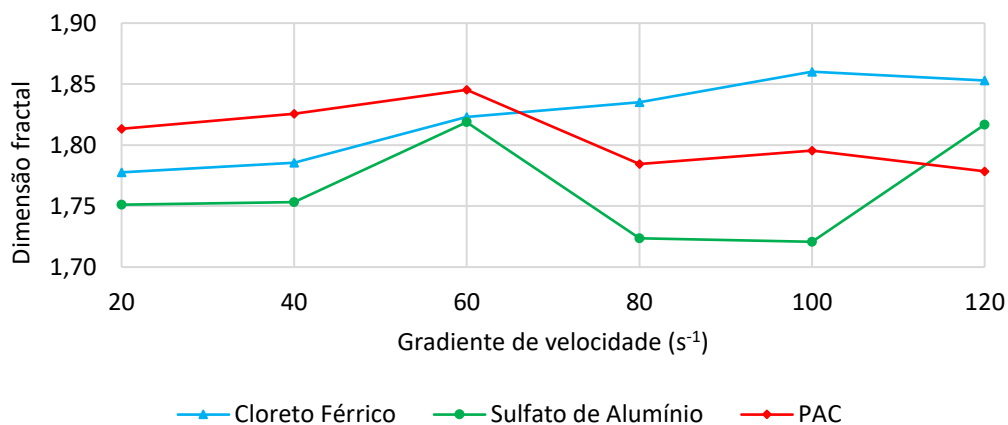
se para 10 e 20 minutos de floculação (Figuras 30 e 31), respectivamente, que não há uma tendência bem definida de desenvolvimento da D_f de acordo com o gradiente de velocidade para nenhum dos coagulantes.

Figura 31 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 10 minutos



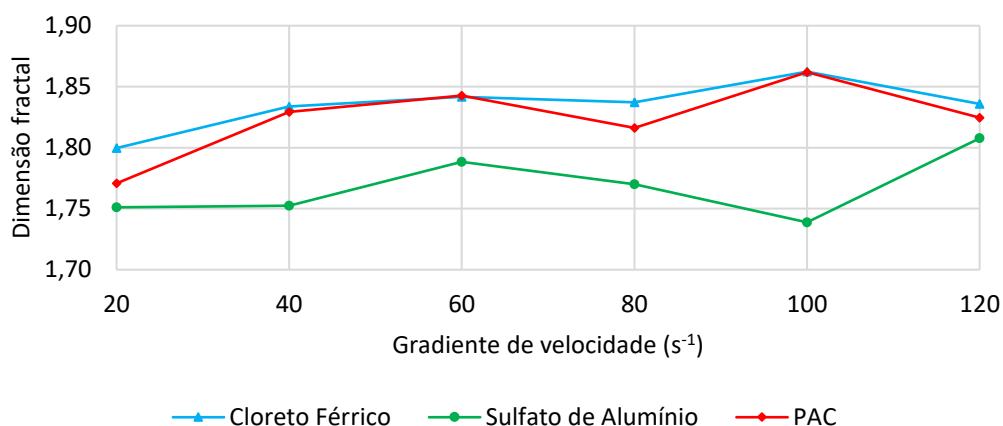
Fonte: Autor (2017)

Figura 32 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 20 minutos



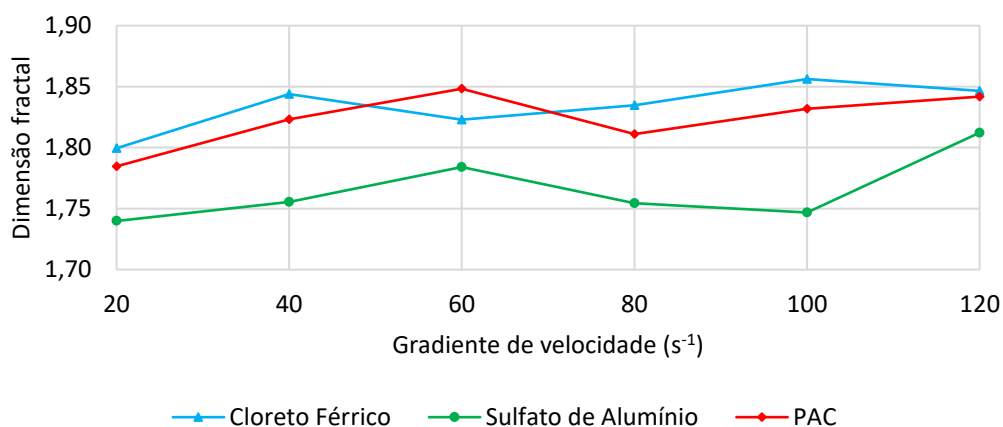
Fonte: Autor (2017)

A partir da Figura 32, observa-se que com 30 minutos de floculação, os valores de D_f obtidos utilizando-se o PAC e Cloreto Férrico são muito semelhantes, mantendo os valores de D_f acima de 1,80 em gradientes de velocidade superiores ao $G=20s^{-1}$. A curva com a utilização do Sulfato de Alumínio manteve-se abaixo dos demais coagulantes em todo o ensaio, e em patamares inferiores ao $D_f=1,80$ até o $G=120s^{-1}$.

Figura 33 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 30 minutos

Fonte: Autor (2017)

Aos 40 minutos de mistura lenta, o uso do PAC mostra crescimento nos valores de dimensão fractal até o $G=60 s^{-1}$, para gradientes maiores que este a tendência é de redução do valor da D_f neste tempo, conforme Figura 33. A utilização do Sulfato de Alumínio apresenta 2 picos de valores com D_f próximo a 1,80, para o $G=60 s^{-1}$ e $G=120 s^{-1}$, para os demais gradientes o D_f se aproxima de 1,75. Com a aplicação do Cloreto Férrico o D_f manteve-se acima de 1,80 para todos os gradientes.

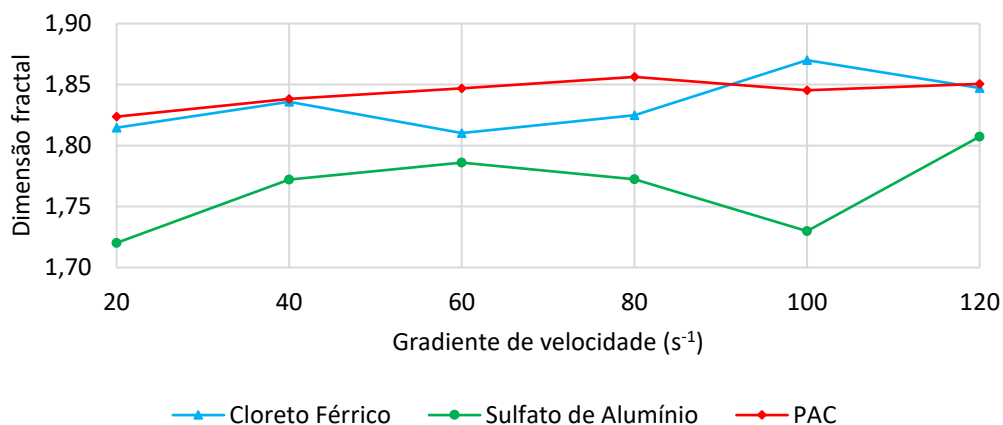
Figura 34 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 40 minutos

Fonte: Autor (2017)

Decorridos 50 minutos de mistura lenta, ilustrado na Figura 34, o uso do PAC mostra crescimentos nos valores de D_f até o $G=80 s^{-1}$, enquanto que para gradientes maiores que este, os valores da dimensão fractal tendem a reduzir. A utilização do Sulfato de alumínio

apresentou novamente valores inferiores a $D_f=1,80$, dois picos abaixo de 1,75 para o $G=20 \text{ s}^{-1}$ e $G=100 \text{ s}^{-1}$. Os valores das dimensões fractais obtidos com o Cloreto Férrico no minuto 40 são muito similares aos do minuto 50.

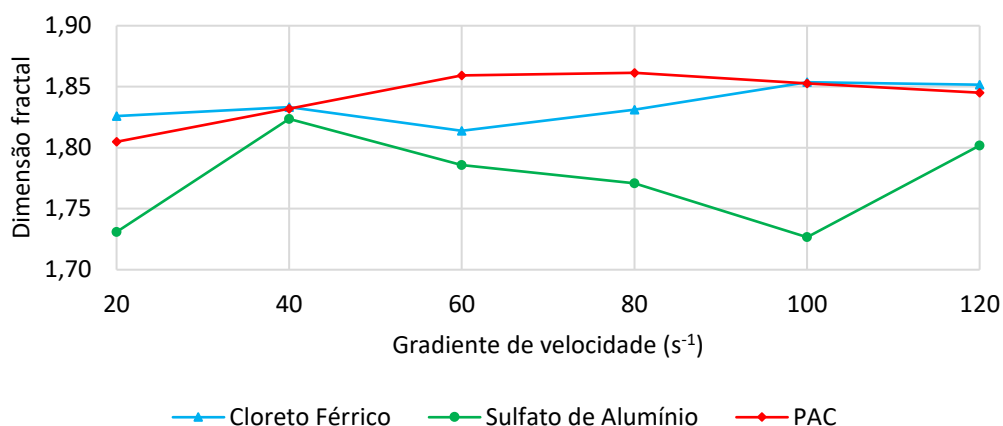
Figura 35 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 50 minutos



Fonte: Autor (2017)

Avaliando o minuto 60, mostrado na Figura 35, para o uso do PAC observa-se que com este coagulante é possível obter as maiores dimensões fractais nos gradientes de velocidade $G=60 \text{ s}^{-1}$ e $G=80 \text{ s}^{-1}$. Para os gradientes de velocidade $G=40 \text{ s}^{-1}$, $G=100 \text{ s}^{-1}$ e $G=120 \text{ s}^{-1}$ o PAC e o Cloreto Férrico garantem dimensões fractais semelhantes aos flocos. O Cloreto Férrico forma flocos com dimensão fractal significativamente superior apenas para o $G=20 \text{ s}^{-1}$.

Observa-se, ainda na Figura 35, que o comportamento utilizando o Sulfato de Alumínio não acompanhou os demais coagulantes, sendo totalmente divergente. Neste reagente, para o minuto 60 obtém-se a maior dimensão fractal ($D_f=1,83$) para o $G=40 \text{ s}^{-1}$, apresentando redução do D_f a partir deste gradiente até o $G=120 \text{ s}^{-1}$, quando há novo aumento do D_f . O Cloreto Férrico mostrou-se o menos sensível a variações de gradiente de velocidade, com a tendência de gerar flocos com dimensão fractal próximo a 1,83.

Figura 36 – Evolução da D_f para tempo de floculação de 60 minutos

Fonte: Autor (2017)

12.3 Cálculo da dimensão fractal pelo método Box Counting

Após uma série de cálculos da dimensão fractal dos flocos nesta técnica, utilizando o *software* FracLac, observaram-se diversos resultados menores que um, indicando, portanto, dimensões entre o ponto (zero) e a reta (um), sugerido que havia um erro no método de cálculo. Dessa forma, foram desenhadas várias imagens de calibração com círculos de diâmetro em pixel conhecidos a fim de determinar a precisão do método com o uso deste *software*. Os dados obtidos estão mostrados na Tabela 12.

Observou-se, portanto, que o programa apresenta confiabilidade dos dados apenas para flocos de diâmetro acima de 200 pixels, o que nesta pesquisa representa flocos de diâmetro maior do que 1,72mm.

Desta forma, observando a população de flocos da pesquisa, verificou-se que a grande maioria possuía diâmetro inferior a 200 pixels, o que inviabilizou o uso da técnica. É necessário o uso de câmeras fotográficas ainda mais potentes a fim de aplicar o método.

Tabela 12 – Cálculo do erro do programa FracLac

Diâmetro (Pixels)	Diâmetro (mm)	Calculado	Box Counting	Variação (%)
		D_f	D_b	
3	0,04	2,07	0,00	-
10	0,12	2,11	0,65	227,25
15	0,18	2,14	1,21	77,24
20	0,24	2,17	1,56	39,18
30	0,36	2,24	1,58	41,31
50	0,60	2,47	1,69	46,78
75	0,90	4,33	1,66	161,59
100	1,20	0,69	1,75	-60,67
125	1,50	1,41	1,70	-17,09
150	1,80	1,59	1,78	-10,50
200	2,40	1,72	1,79	-3,43
450	5,41	1,86	1,88	-0,96
1000	12,02	1,90	1,85	2,86
4500	54,10	1,94	1,86	4,27

Fonte: Autor (2017)

12.4 Cálculo da dimensão fractal pela relação entre o diâmetro do floco e quantidade de partículas primárias

A partir da equação 10 e das considerações relatadas no item 3.5.6.3, a dimensão fractal foi calculada e então comparada com a obtida pela relação área-comprimento característico (Equação 4). Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 13. Observa-se, portanto, que a Equação 10 é uma equação confiável para obtenção da dimensão fractal.

Tabela 13 – Comparativo entre o D_f obtido por 2 equações

Coagulantes	Tempo (min)	D _f calculado		
		Eq. (10)	Eq. (4)	Variação (%)
PAC	10	1,94	1,82	6,59
	20	1,98	1,81	8,97
	30	1,83	1,77	3,39
Sulfato de alumínio	10	1,79	1,73	3,47
	20	1,82	1,75	3,68
	30	1,82	1,75	3,68
Cloreto férrico	10	1,76	1,79	-1,67
	20	1,74	1,78	-1,98
	30	1,82	1,80	1,08

Fonte: Autor (2017)

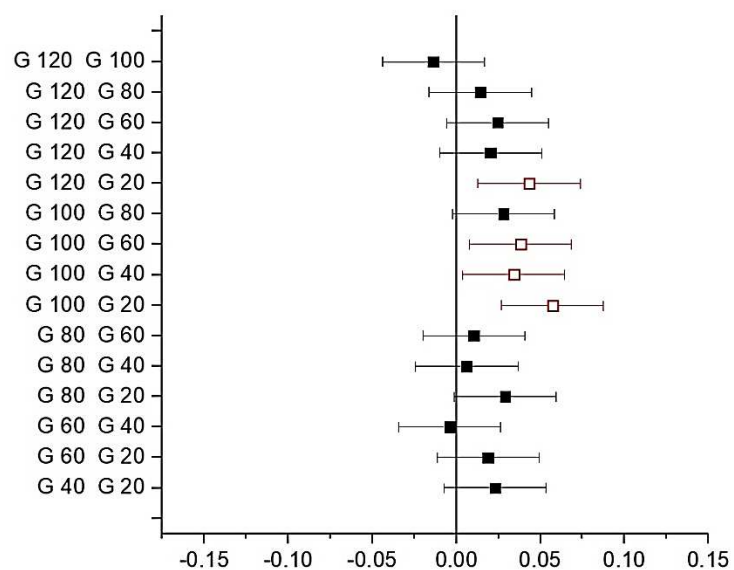
12.5 Avaliação da correlação entre os dados obtidos

A partir dos dados obtidos de dimensão fractal com os três coagulantes, para os diversos gradientes de velocidade, foi realizado o Teste de Tukey, com o auxílio do programa Origin. As Figura 36, 37 e 38 ilustram a comparação das médias obtidas com o D_f para diferentes gradientes de velocidade, comparadas dois a dois, com o uso do Cloreto Férrico, PAC e Sulfato de Alumínio, respectivamente. Nestas figuras os marcadores totalmente preenchidos apresentam resultados estatisticamente semelhantes, enquanto os demais podem ser considerados diferentes com 95% de significância

Pela Figura 36, observa-se que utilizando o Cloreto Férrico, os resultados indicam que não há diferenças significativas entre os gradientes de velocidade, exceto para o $G=100s^{-1}$, porém ainda assim bem próximos dos demais.

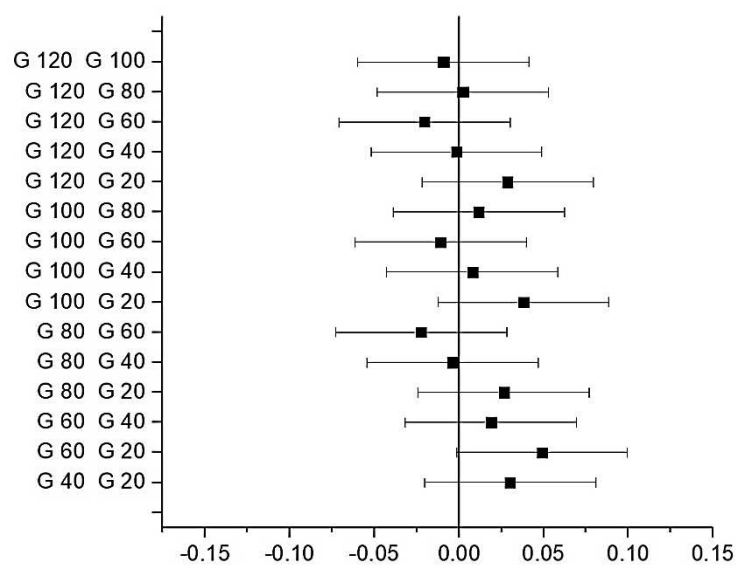
Na Figura 37, verifica-se que quando o PAC é utilizado como coagulante, todos os gradientes de velocidade são estatisticamente semelhantes. Através da Figura 38, observa-se que com o uso do Sulfato de Alumínio apenas com os gradientes de velocidade de $G=100s^{-1}$ e $G=80s^{-1}$ ocorrem resultados estatisticamente diferentes.

Figura 37 – Teste de comparação das médias de Tukey para o Cloreto Férrico



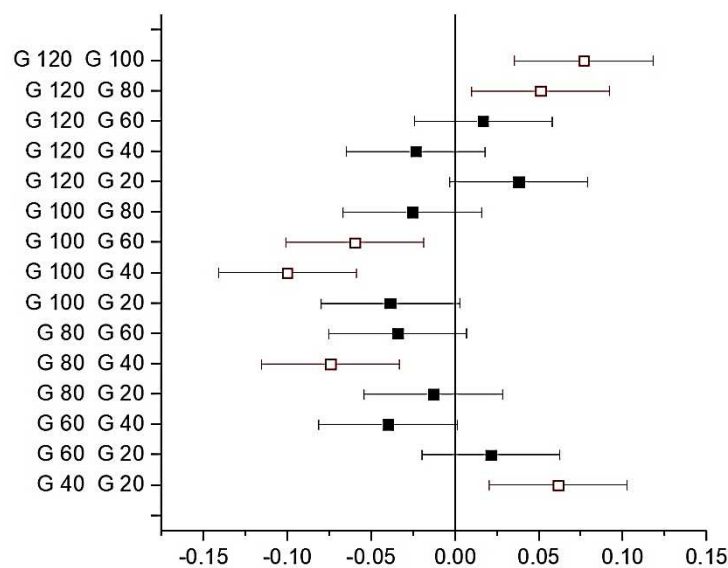
Fonte: Autor (2017)

Figura 38 – Teste de comparação das médias de Tukey para o PAC



Fonte: Autor (2017)

Figura 39 – Teste de comparação das médias de Tukey para o Sulfato de Alumínio



Fonte: Autor (2017)

Em seguida, foi executada a análise estatística ANOVA com dois fatores (gradiente médio de velocidade e coagulante), a fim de verificar o real impacto de cada um deles no resultado final do diâmetro fractal. Os dados obtidos nos experimentos foram analisados pelo programa Origin. Os dados gerais obtidos na análise ANOVA são apresentados na Tabela 14. A Figura 39 mostra o gráfico de interações ANOVA.

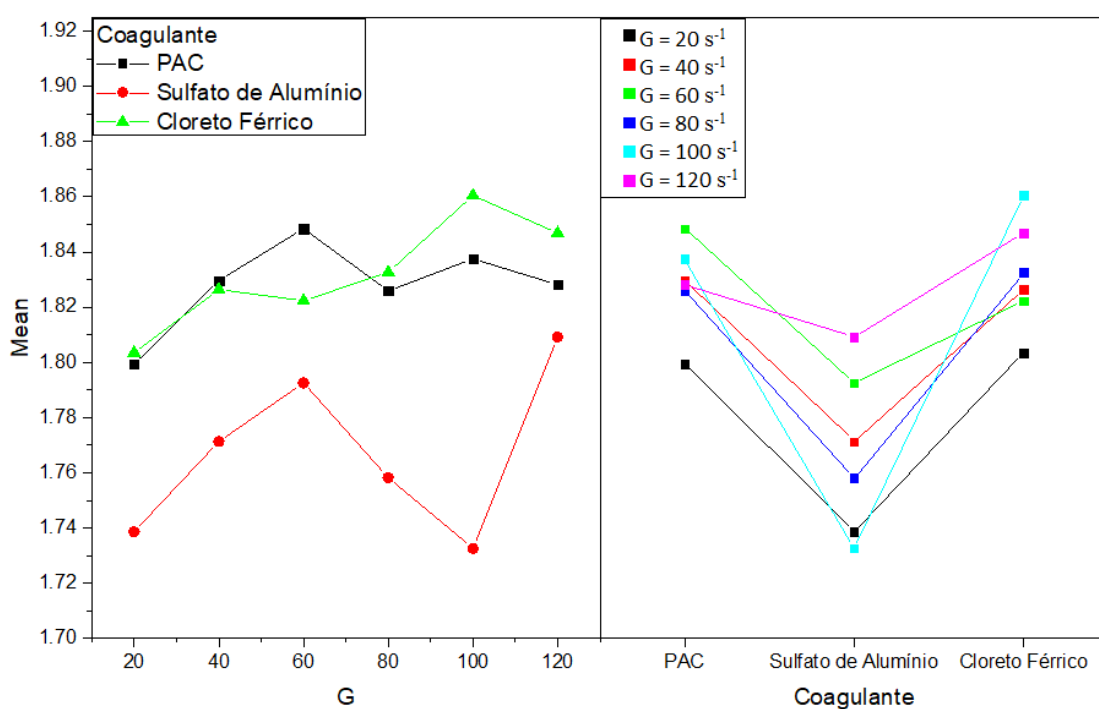
Tabela 14 – Análise ANOVA 2 fatores

	G.L.	Soma Quadrática	Média Quadrática	F-Valor	P-Valor
Coagulante	2,00	0,08	0,04	116,79	-
G	5,00	0,02	0,00	11,73	2,60E-08
Interação	10,00	0,02	0,00	5,60	3,92E-06
Modelo	17,00	0,12	0,01	20,48	-
Erro	72,00	0,02	0,00	-	-
Total					
Corrigido	89,00	0,14	-	-	-

Fonte: Autor (2017)

A análise Tabela 12 e da Figura 39, mostra que as interações entre os Coagulantes e os Gradientes Médios de Velocidade são significativamente diferentes com 95% de significância. Esta observação, juntamente com o fato de que a análise de Tukey mostrou que para um mesmo coagulante a alteração do gradiente médio de velocidade não fornece diferenças significativas da dimensão fractal, demonstra que em água de baixa turbidez com grande concentração de agente coagulante, este é o principal agente estrutural do floco e reflete na variação de seus parâmetros característicos como dimensão fractal.

Figura 40 – Gráfico de interações ANOVA



Fonte: Autor (2017)

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS E PERSPECTIVAS

Este capítulo apresenta as principais constatações deste trabalho e algumas propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

13.1 Conclusões gerais dos principais resultados

As técnicas de estudo da floculação com base em fotografias são de ampla utilização pelos pesquisadores e são importantes ferramentas para o estudo da floculação. Os resultados encontrados neste trabalho mostraram que o método *Box Counting* para determinação da dimensão fractal necessita de câmeras fotográficas com resolução maior do que as comumente encontradas no mercado.

O uso da relação entre número de partículas primárias no agregado e diâmetro da partícula primária apresentado na Equação 10 é confiável para cálculo do D_f , podendo ser utilizada essa equação como alternativa a relação entre área e comprimento característico.

De uma maneira geral, os resultados obtidos para dimensão fractal em sistemas de baixa turbidez utilizando Cloreto Férrico tenderam a se estabilizar em valores entre 1,81 e 1,85. A dimensão fractal nestes sistemas utilizando Sulfato de Alumínio apresentou maior variação, com valores entre 1,73 e 1,82. Utilizando-se o PAC os resultados da dimensão fractal foram próximos aos do obtidos com o Cloreto Férrico, que mostrando variações entre 1,80 e 1,86.

A dimensão fractal nos primeiros 15 minutos de floculação apresentou grande variação para os três coagulantes em estudo independente do gradiente de velocidade utilizado, indicando que a forma do floco ainda não está definida. A dimensão fractal não pareceu ser afetada pelo aumento ou redução/aumento do gradiente de velocidade.

Os resultados obtidos sugerem que as características dos flocos formados pelo mecanismo de varredura estão intimamente ligadas ao coagulante. No caso deste estudo, principalmente

em função da baixa turbidez e elevada dosagem de coagulante, 5,2 mg/L de Fe^{3+} quando utilizado o Cloreto Férrico, 2,5 mg/L de Al^{3+} quando utilizado o Sulfato de Alumínio e 70 mg/L de PAC, não houve alteração significativa dos valores de D_f considerando-se os tempos de floculação para cada tipo de coagulante. De fato, como explicam os resultados obtidos na análise de *Tukey* e ANOVA, os dados são estatisticamente semelhantes para as situações investigadas para um coagulante e estatisticamente diferentes para a interação entre os coagulantes, o que reforça a hipótese de que há pouca ou nenhuma influência relativa do gradiente de velocidade nas características dos flocos formados. Assim sendo, pode-se inferir que os flocos formados preponderantemente a partir das concentrações dos metais alumínio e ferro, apresentam dimensões próximas da euclidiana e que as tensões cisalhantes médias existentes no jarro atuam mais no sentido de erosão da superfície dos flocos que em sua quebra.

13.2 Sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho de mestrado possibilitou o surgimento de perspectivas no qual pode-se citar as seguintes:

- Aprimorar a técnica de aquisição de imagens, com equipamentos de maior resolução e plano de luz mais bem estabelecido
- Ampliar a análise de dimensão fractal utilizando métodos diferentes aos aplicados neste estudo a fim de confirmar a influência do gradiente de velocidade na evolução da dimensão fractal;
- Avaliar o acompanhamento da dimensão fractal utilizando-se diversas concentrações de coagulante e outros mecanismos de coagulação;
- Estender este estudo a amostras de água obtidas de fontes naturais.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. AWWA Standard for liquid ferric chloride. Denver: AWWA. 2012. p.26

AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C. R. *Coagulation processes: Destabilization, mixing and flocculation*. Water quality and treatment. 1ª Edition. Toronto. Ed. McGraw-Hill., p. 220, 1990.

AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K. M. *Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation*. J. AWWA, v. 74, n. 4, p.210-216, 1982.

BIGGS, C.A.; LANT, P.A. Activated sludge flocculation: on-line determination of floc size and the effect of shear. **Water Research**, [S.l.], v. 34, p.2542-2550, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00431-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00431-5)

BINNIE, C., KIMBER, M. and SMETHURST. G., 2002. Basic water treatment. Thomas Telford Ltd., London.

BOUYER, D.; LINE, A.; DO-QUANG, Zdravka. Experimental Analysis of Floc Size Distribution under Different Hydrodynamics in a Mixing Tank. **Wiley Interscience**. Sl, p. 2064-2081. 2004. <https://doi.org/10.1002/aic.10242>

BOUYER, D. *et al.* Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions. **Journal of Colloid and Interface Science**, [S.l.], v. 292, p.413-428, 2005.

BOUYER, D. *et al.* Experimental analysis of floc size distribution and hydrodynamics in a jar-test. **Trans Icheme**, [S.l.], v. 79, p.1017-1024, nov. 2001.

BUSHELL, G. *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, 2002.

CARVALHO, M. J. H., Uso de Coagulantes Naturais no Processo de Obtenção de Água Potável, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2008.

CHAKRABORTI, R. K.; ATKINSON, J. P.; VAN BENSCHOTEN, J. E.. Characterization of Alum Floc by Image Analysis. **Environmental Science & Technology**. S.l, p. 3969-3976. jan. 2000.

COUFORT, C. *et al.* Analysis of floc size distributions in a mixing tank. **Chemical Engineering and Processing**, Karlsruhe, v.47, p.287-294, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.01.009>

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 2.ed. São Paulo: Editora Rima, 2005. v. 2.

DHARMARAJAH, A. H. w CLEASBY, J. L. Predicting the Expansion Behaviour of Filter Media. **Journal of the American Water Works Association**. P.66-76, 1986.

DOVE, B. UTHSCSA **ImageTool**: What is ImageTool?. Disponível em: <<http://compdent.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>>. Acesso em: 10 set. 2016.

FORREST, S R; WITTEN, T A. Long-range correlations in smoke-particle aggregates. **Journal Of Physics A: Mathematical and General**, [s.l.], v. 12, n. 5, p.109-117, maio 1979. IOP Publishing.

GEBBIE, P. Using polyaluminium coagulants in water treatment. In: **Proc. 64th AWIEO Conference**. 2001.

GOLDEN SOFTWARE INC., Full User's Guide (Surfer 12). [Software]. Golden, Colorado, 2015.

GREGORY, J. The role of floc density in solid-liquid separation. **Filtration & Separation**, [s.l.], v. 35, n. 4, p.367-371, 1998.

GREGORY, J. Monitoring floc formation and breakage. **Water Science and Technology**, [S.l.], v. 50, n.12, p.163-170, 2004.

GREGORY, J. Monitoring particle aggregation processes. **Advances in Colloid and Interface Science**, [S.l.], n.148, p.109-123, 2009.

GONZÁLEZ, R.C.; WOODS, R.E. (1992). **Processamento de Imagens Digitais**, AddisonWesley Publishing Company, Reading.

GUNNARSSON, Stig; SODERLUND, Marten. **Process for the production of polyaluminium salts**. U.S. Patent Application n. 12/663,695, 5 jun. 2008.

HENDRICKS, W. D.. **Water Treatment Unit Processes: physical and chemical**. Boca Raton: Crc Press, 2006.1040 p.

HOWE, K. J. *et al.* **Principles of Water Treatment**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2012. 674 p.

JARVIS, P. *et al.* A Review of Floc Strength and Breakage. **Water Research**, [S.l.], v. 39, n. 14, p.3121-3137, 2005a.

JARVIS, P. *et al.*. Breakage, Regrowth, and Fractal Nature of Natural Organic Matter Flocs. **Environmental Science & Technology**, [S.l.], v.39, n.7, p.2307-2314, 2005b.

JARVIS, P. *et al.* Measuring Floc Structural Characteristics. **Reviews in Environmental Science And Biotechnology**, [s.l.], v. 4, n. 1-2, p.1-18, 2005c.

JIN, P. K.; WANG, X. C.; CHAI H. Evaluation of floc strength by morphological analysis and PDA online monitoring. **Water Science & Technology**, [s.l.], v. 56, n. 10, p.117-124, 2007.

KARPERIEN, A. L.. **User's Guide for FracLac**. 2.5 Australia, 2012. Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/plugins/fractalac/FLHelp/Introduction.htm>>. Acesso em: 17 jun. 2017.

KUDERMANN, G.; BLAUFUSS, K.; SIMBACH, B.; THOME, R.; BINGS, H. **Process for the preparation of basic aluminium chloride solutions**. European Patent n. 19920121891, 23 dez. 1992.

LANDAHL, M. T.; MOLLO-CHRISTENSEN, E. **Turbulence and Random Processes in Fluid Mechanics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 184 p.

LATTUADA, M.; WU, H.; MORBIDELLI, Massimo. A simple model for the structure of fractal aggregates. **Journal Of Colloid And Interface Science**. S.l, p. 106-120. jul. 2003.

LI, T. *et al.* Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms. **Powder Technology**. Sl, p. 104-110. jan. 2006.

MIYAHARA, K. *et al.* Settling velocity of a sodium montmorillonite floc under high ionic strength. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s.l.], v. 196, n. 1, p.87-91, 2002.

MÜHLE, E. K. "Floc Stability in Laminar and Turbulent Flow". Dobias B. (org.), *Coagulation and Flocculation*. New York: Marcel Dekker, 1993. p.355-390

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 emprego de sonda ultra-sônica e de técnica de análise por imagem**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. <https://doi.org/10.11606/T.18.2005.tde-04072007-170028>

MORUZZI, R. B. *et al.* An Experimental and numerical approach to the assessment of floc settling velocity using fractal geometry. **Water Science and Technology**, [s.l.], 2017. No prelo.

NIKON. **NIKON D5500**: Manual do Referência Nikon D5500. S.l.: S.l., 2016. 428 p.

OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G.; De JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 36, p. 16721-16732, 2015. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1081833>

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. Dissertação de Metrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001. <https://doi.org/10.11606/D.18.2001.tde-21012003-084719>

PIZZI, N. G. **Water Treatment**: Principles and practices of water supply operations series. 4. ed. Denver: Tips Technical Publishing Inc., 2003. 511 p.

REYNOLDS, T. D.; RICHARDS, P.A., 1996. Unit operations and processes in environmental engineering. 2nd Edition, PWS Publishing Company.

ROBERTS, D. *et al.* **Costs and Benefits of Complete Water Treatment Plant Automation**. Washington: Awwa Research Foundation, 2008. 236 p.

SANTOS, H. R. *et al.* Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. *Eng. Sanit. Ambient.* [online]. 2004, vol.9, n.4, p. 291-300. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522004000400005>

SODERLUND, M.; GUNNARSSON, S. **Process for the production of polyaluminium salts**. European Patent n. 20080767055, 5 jun. 2008.

SPICER, P. T.; PRATSINIS, S. E. Shear-induced flocculation: the evolution of floc structure and the shape of the size distribution at steady state. **Water Resources**, [S.l.], v.30, n.5, p.1049-1056, 1996.

TAMBO, N.; WATANAB, Y. Physical aspect of flocculation process ill: flocculation process in a continuous flow flocculator with a back-mix flow. **Water Resources**, [S.l.], v. 18, n. 6, p.695-707, 1984.

TEIXEIRA, J. C. *et al.* Estudo do impacto das deficiências de saneamento básico sobre a saúde pública no Brasil no período de 2001 a 2009. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Juiz de Fora, v. 1, n. 19, p.87-96, mar. 2014. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014000100010>

XIE, H.; WANG, Y.; JIANG, Y. **Computer applications in the minerals industries**. Lisse, Holanda: A.a.balkema, 2001. 863 p.

WANG, D *et al.* Characterization of floc structure and strength: Role of changing shear rates under various coagulation mechanisms. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [S.l.], n.379, p.36-42, 2011.

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, p.354-359, 2009.

WANG, X. C.; JIN, P. K.; GREGORY, J. Structure of Al-humic flocs and their removal at slightly acidic and neutral pH. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 2, n. 2, p. 99-106, 2002.

WATER NEW ZEALAND. Standard for the supply of polyaluminium chloride for use in water treatment. Wellington: Water New Zealand, 2013. 17 p.

WATER NEW ZEALAND. Water New Zealand Good Practice Guide: Supply of Aluminium Sulphate for Use in Drinking Water Treatment. Wellington: Water New Zealand, 2016. 18 p.

WU, R. M. *et al.* Multilevel Structure of Sludge Flocs. **Journal Of Colloid And Interface Science**, [s.l.], v. 252, n. 2, p.383-392, 2002.

YANG, Z.; YANG, H.; JIANG, Z.; HUANG, X.; LI, H.; LI, A.; CHENG, R. A new method for calculation of flocculation kinetics combining Smoluchowski model with fractal theory. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. S.l, p. 11-19. fev. 2013.

YEUNG A. K. C.; PELTON R. Micromechanics: a new approach to studying the strength and break-up of flocs. **Journal of Colloid and Interface Science**, [S.l.], v.184, p.579-585, 1996.

YU, W.; GREGORY, J.; CAMPOS, L. C. Breakage and re-growth of flocs: Effect of additional doses of coagulant species. **Water Research**, [S.l.], v. 45, p.6718-6724, 2011.

YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. The reversibility of floc breakage. **International Journal of Mineral Processing**, [S.l.], v. 73, p.251-259, 2004.