



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

unesp 

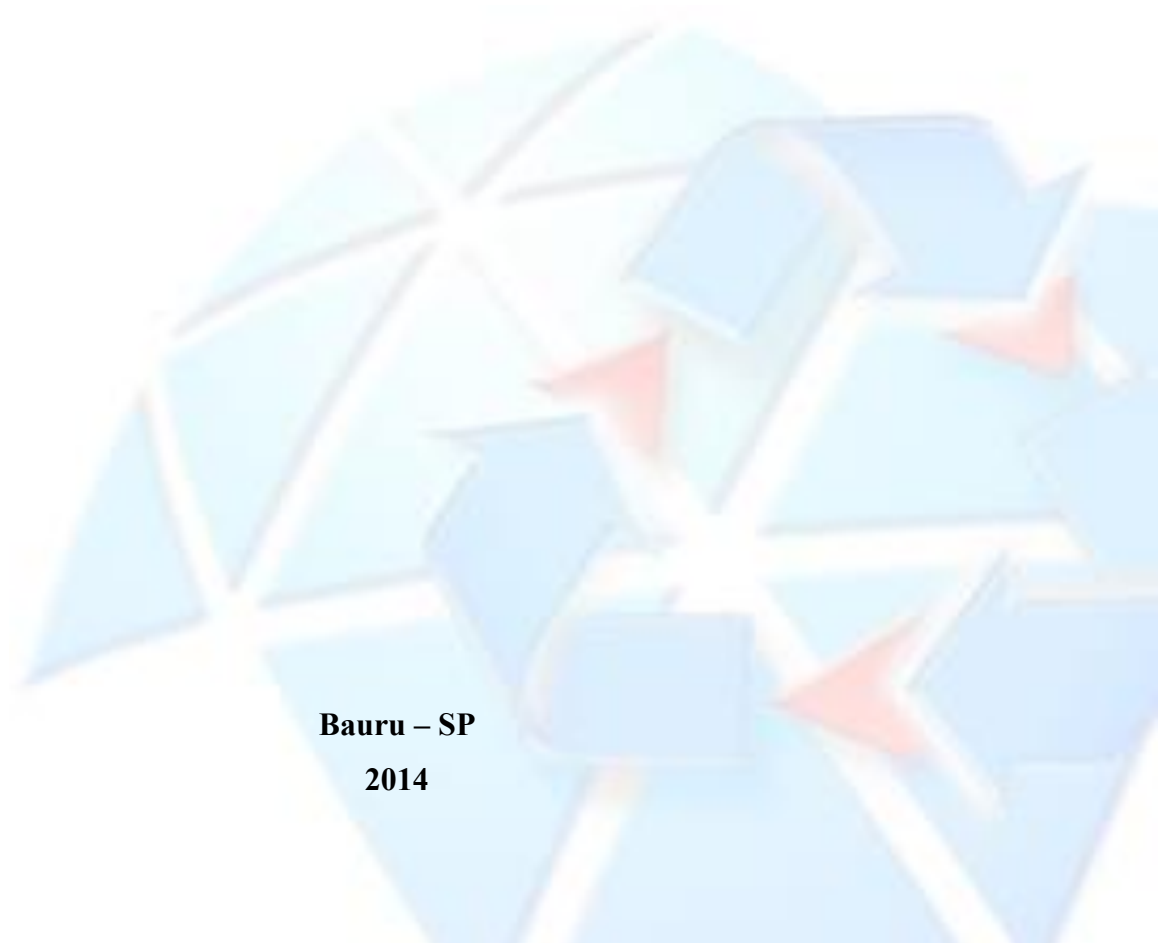
Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

PAMELA MORENO

**EMPREGO DE TÉCNICA DEDICADA DE ANÁLISE DE
IMAGEM NA AVALIAÇÃO DO PRODUTO GT NO
DESEMPENHO DA FLOCULAÇÃO**

Bauru – SP
2014



PAMELA MORENO

**EMPREGO DE TÉCNICA DEDICADA DE ANÁLISE DE
IMAGEM NA AVALIAÇÃO DO PRODUTO GT NO
DESEMPENHO DA FLOCULAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Bauru – SP

2014



Moreno, Pamela.

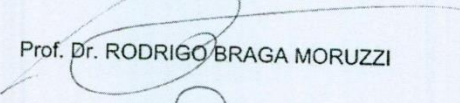
Emprego de técnica dedicada de análise de imagem na
avaliação do produto GT no desempenho da floculação /
Pamela Moreno, 2015
107 f.

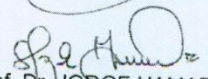
Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi

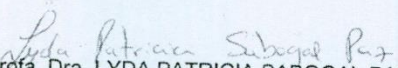
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE PAMELA MORENO,
DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL,
DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 09 dias do mês de fevereiro do ano de 2015, às 09:30 horas, no(a) Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) - Câmpus de Rio Claro, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI do(a) Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento / Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Prof. Dr. JORGE HAMADA do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Faculdade de Engenharia de Bauru, Profa. Dra. LYDA PATRICIA SABOGAL PAZ do(a) Departamento de Hidráulica e Saneamento/USP/EESC, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de PAMELA MORENO, intitulada "EMPREGO DE TÉCNICA DEDICADA DE ANÁLISE DE IMAGEM E AVALIAÇÃO DO PRODUTO GT NO DESEMPENHO DA FLOCULAÇÃO". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI


Prof. Dr. JORGE HAMADA


Profa. Dra. LYDA PATRICIA SABOGAL PAZ

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

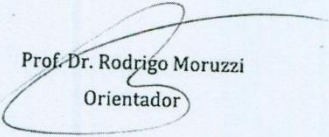
A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA:
PAMELA MORENO

DE: "EMPREGO DE TÉCNICA DEDICADA DE ANÁLISE DE IMAGEM E AVALIAÇÃO DO PRODUTO GT
NO DESEMPENHO DA FLOCULAÇÃO"

PARA:

substituir "E" por "NA"

Bauru, 09 de fevereiro de 2015.


Prof. Dr. Rodrigo Moruzzi
Orientador

DEDICATÓRIA

*Para minha mãe Lucilara Gonzalez de Godoy,
meu irmão James Andrade Moreno Júnior
e avó Dalva Aparecida Gonzalez de Godoy.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Lucilara Gonzalez de Godoy, irmão James Andrade Moreno Júnior e família por todo o apoio e carinho, durante esses dois anos de mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi pela orientação, paciência, atenção, parceria e todo o ensinamento compartilhado.

Aos meus companheiros de projeto André Oliveira e Pedro Grava.

A todos que trabalham no Deplan, que fizeram parte do meu dia a dia.

As irmãs que ganhei ao morar na República Patins.

A Eduarda Ibler Annibal e Maria Carolina Bonjovanni, grandes amigas que estiveram sempre ao meu lado.

A todos os professores do mestrado que contribuíram de alguma maneira para a minha formação.

A todos os amigos que estiveram presentes durante essa etapa de minha vida.

Aos membros da banca de qualificação pela disposição e conselhos para o aperfeiçoamento do presente trabalho.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de mestrado, Processo: 2013/01634-3 pertencente ao Processo: 2010/50694-0.

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.”

Charles Chaplin

RESUMO

A floculação é etapa fundamental no tratamento de água para abastecimento público sendo essencial para remoção do seu material particulado. O conhecimento da distribuição do tamanho das partículas floculentas torna-se de grande valia para a compreensão dos processos que envolvem a remoção desses flocos bem como a tecnologia de tratamento a ser adotada. Neste trabalho, foi avaliado o produto do gradiente médio de velocidade de floculação (Gf) pelo tempo de floculação (Tf), GT também definido como número de Camp (NC), sob a ótica da distribuição de tamanho de partícula (DTP). Para tal, foi empregada técnica dedicada de captura e de tratamento de imagens visando obtenção da DTP e de seus parâmetros representativos. Foram investigados diferentes valores de NC (18000, 24000, 36000, 54000 e 72000) para a avaliação da eficiência da sedimentação em diferentes velocidades associadas (0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min). Os resultados demonstraram que o desempenho da sedimentação nas distintas velocidades investigadas é sensível ao valor de NC. Para um mesmo NC o gradiente médio de velocidade foi determinante, sendo os melhores resultados obtidos para Gf de $20s^{-1}$. Mantida a mesma velocidade de sedimentação de 2,5 cm/min verificou-se eficiência de remoção de turbidez praticamente constante, por volta de 70%, para valores de número de Camp de 24000, 36000 e 54000 ao passo que para os extremos, 18 e 72 mil houve queda na eficiência. Em relação à DTP verificou-se, por meio da análise de seu parâmetro característico β , que este é sensível a variação do produto GT , sendo mais sensível aos valores de G para determinados valores de T . Em linhas gerais, o trabalho mostrou que o aumento da energia fornecida durante a floculação implica em menor alteração da dinâmica da distribuição de tamanho de partículas, estabelecendo uma relação inversa de proporção entre energia e a variação do parâmetro característico de distribuição de tamanho de partícula β . Isto ocorre devido à ação de ruptura dos flocos que contribui para o alcance do estado de equilíbrio das partículas floculentas em menor tempo de floculação. Desta maneira, para maiores valores de Gf e NC, maior será o valor em módulo de β com maior translação do eixo para a faixa de tamanho de partículas menores.

Palavras-Chave: floculação, análise de imagem, distribuição de tamanho de partícula, número de Camp.

ABSTRACT

Flocculation is a paramount step in water treatment for public supply, in addition, is essential to remove the particulate material. The knowledge about the distribution of the flocculent particles size becomes important to understand the process of flocs removal and the treatment technology that must be adopted. In this study was evaluated the product of the average velocity gradient flocculation (Gf) by time of flocculation (Tf), GT is also defined as Camp number (NC), according to the particle size distribution (PSD). In this case, the technique of image treatment was used to obtain the PSD and the others representatives parameters. Were investigated different values of NC (18000, 24000, 36000, 54000 e 72000) for evaluation of the sedimentation efficiency in different associated velocities (0.5;1,5;2.5;3.5 e 5.0 cm/min). The results show that NC is fundamental for the sedimentation performance in all velocities. For the same NC the average of the velocity gradient was determinant, being one of the best results for $Gf = 20s^{-1}$. If the velocity of sedimentation is constant (2,5 cm/min) is possible to conclude that the turbidity removal efficiency maintain 70% for Cam numbers around 24000, 36000 and 54000. In other hand, for extreme values 18 and 72 thousand exist a reduction of efficiency. In relation with PSD, is possible to analyze your characteristic parameter β that is sensible according with the provided energy. In conclusion, the case of study show that the increase of provided energy during flocculation results in reduction of dynamic alteration about particle size distribution, establishing inverse proportion between energy and variation of the characteristic parameter β . This happens due to flocs action of rupture that contributes to reach the equilibrium state of the flocculent particles in less time of flocculation. Moreover, high values of Gf and NC imply high values of β with higher values of translation of the axis for the range of smaller particle size.

Key-word: flocculation, image analysis, particle size distribution, Camp number.

LISTA DE SIGLAS

DBO: Demanda bioquímica de oxigênio.

DEPLAN: Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento.

DLVO: *Derjaguin- Landau- Verwey – Overbeek*

DQO: Demanda química de oxigênio.

DTP: Distribuição de Tamanho de Partícula.

EMA: Erro máximo admitido.

ETA: Estação de Tratamento de Água.

GT: Produto do gradiente médio de velocidade (G) pelo tempo de residência médio (T).

IF: Índice de Flocculação.

ITA: Instituto Tecnológico de Aeronáutica;

LAGEA: Laboratório de Geoquímica Ambiental.

NC: Número de Camp.

PZC: Ponto de Carga Zero.

TRC: Tubo de Raios Catódicos.

UCL: *University College London.*

UNESP: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

LISTA DE SÍMBOLOS

A: coeficiente de densidade da equação de potência.

A₂: Área efetiva da seção transversal do feixe de luz.

ac: parte flutuante.

Al(OH)⁻: Íon aluminato.

Al(OH)_{3(s)}: Hidróxido de alumínio sólido.

Al₂(SO₄)³: Sulfato de Alumínio.

β: Coeficiente de inclinação da equação de potência (parâmetro característico de distribuição de tamanho de partícula).

β_(i,j): Taxa de colisão entre as partículas i e j (L⁻³T).

β_(i,k): Taxa de colisão entre as partículas i e k (L⁻³T).

σ: Desvio Padrão.

cm: centímetro.

d_c: componente estável.

d_p: Diâmetro da partícula.

d_(dp): Variação incremental dos diâmetros das partículas.

dN : Concentração do número de partículas em termos da variação incremental dos diâmetros das partículas ($d(d_p)$).

dn_k/dt : Variação do número de partículas k por tempo.

dv/dt : Gradiente de velocidade no fluido (s^{-1}).

$F(d_p)$: Função que define a frequência de distribuição de partículas ($d_1, d_2, d_3...$).

G : Gradiente de velocidade (s^{-1}).

Gf : gradiente médio de floculação (s^{-1}).

Gmr : gradiente médio de mistura rápida (s^{-1}).

H_{ij} : Taxa de colisão entre as partículas i e j ($L^{-3}T$).

i : Partículas discretas de tamanho i .

j : Partículas discretas de tamanho j .

k : Partículas de tamanho k .

K_A : Constante cinética de agregação.

K_B : Constante cinética de ruptura (s).

L : Comprimento do caminho ótico.

L : Litro.

$min.$: Minuto.

ml : Mililitro.

mm : Milímetro.

n_i : Número de partículas de tamanho i (L^{-3}).

n_j : Número de partículas de tamanho j (L^{-3}).

n_k : Número de partículas de tamanho k (L^{-3}).

N_0 : Número inicial de partículas primárias antes da floculação após tempo longo de sedimentação (medido em termos de turbidez inicial da água - uT).

N_m : Número de partículas primárias na saída do reator m após tempo T de floculação e após longo período de sedimentação (medido como turbidez da água - uT).

R_{ij} : Raio de interação entre duas partículas i e j (distância entre o centro e duas partículas (m)).

Tf : Tempo de floculação (min).

T/m : Tempo de mistura no reator m (s).

Tmr : Tempo de mistura rápida (s).

uT : unidade de turbidez.

\bar{X} : Média Aritmética.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema das reações durante a coagulação cujo papel é a desestabilização das cargas das partículas, através da adição de produtos químicos.....	18
Figura 2 - Apresenta o diagrama de coagulação e Potencial Zeta do alumínio evidenciando algumas regiões distintas, caracterizadas pelos pares de valores dosagem de coagulante versus pH da mistura.	21
Figura 3 - Desempenho da floculação (N_0/N_1) para uma faixa de valores de G_f e T_f tendo como coagulante Sulfato de Alumínio. Dosagem = 15mg/L; pH: 7,6; $N_0 = 3,13$ uT, $G_{mr} = 500$ s ⁻¹ ; $T_{mr} = 10$ s.....	30
Figura 4 - Elementos de um sistema de processamento de imagens.	36
Figura 5 - Imagem esquemática das etapas adotadas por Bouyer (2005) para aquisição e processamento de imagens capturadas dos flocos em um tanque de mistura.	37
Figura 6 - a) Arranjo experimental hipotético. b) exemplo de imagem dos flocos adquirida digitalmente após binarização utilizando <i>software</i> específico.	39
Figura 7 - Desenho esquemático do arranjo experimental utilizado para aquisição das imagens e determinação da distribuição de tamanho de partícula, em escoamento contínuo.	40
Figura 8 - Distintos diâmetros equivalentes para uma mesma partícula.	41
Figura 9 - Fluxograma ilustrativo dos objetivos e atividades realizadas.....	46
Figura 10 - Instalação experimental em escala de bancada, constituída de equipamento Jarteste para realização de ensaios de coagulação/floculação, câmera <i>High-Speed, Laser</i> e computador com <i>Softwares</i> específicos para aquisição e tratamento das imagens.	48
Figura 11 - Câmera <i>High-Speed Phantom Miro EX 4</i>	48
Figura 12 - Diagrama hipotético dos patamares correspondentes ao estudo de mistura rápida (G_{mr}) e floculação (G_f), os diferentes tempos investigados na mistura rápida (T_{mr})	

e na floculação (T_f). Faixa investigada: $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$; $T_{mr} = 10 \text{ s}$; $20 \text{ s}^{-1} \leq G_f \leq 60 \text{ s}^{-1}$; $5 \text{ min} \leq T_{mr} \leq 60 \text{ min}$.	49
Figura 13 - a) Imagem de origem, não binarizada. b) Imagem binarizada.	53
Figura 14 – Relação entre pixel(s) e o tamanho dos objetos empregados para a determinação da DTP e de erro para objetos regulares e irregulares.	57
Figura 15 - Fluxograma esquemático dos números de Camp e gradientes médios de velocidade de floculação adotados com seus respectivos tempos de floculação.	61
Figura 16 - Tela de abertura do arquivo imagem para calibração.	66
Figura 17 - Procedimento inicial de calibração da imagem da régua, adotada como referência de medida.	67
Figura 18 - Nome de calibração e unidade de medida adotada.	67
Figura 19 - Escolha do comprimento de referência com base em um tamanho conhecido.	68
Figura 20 - Ativação da calibração do sistema.	69
Figura 21 - Binarização da imagem por meio da ferramenta <i>threshold</i> modo manual.	70
Figura 22 - Escolha do limiar de binarização por meio do histograma de intensidade.	71
Figura 23 - a) Seleção da ferramenta de contagem de objetos. b) Seleção do comando de escolha dos parâmetros a serem medidos. c) Seleção dos atributos que se deseja determinar.	72
Figura 24 - a) Contagem do número de objetos presentes na imagem. b) Separação dos objetos por meio da utilização da ferramenta <i>watershed split</i> . c) Nova contagem de objetos posteriormente ao uso da ferramenta <i>watershed split</i> com a detecção, ou segmentação, do número de flocos da imagem. d) Medição dos objetos.	73

Figura 25 – Aba de visualização das medidas obtidas para os parâmetros analisados para cada objeto identificado.....	74
Figura 26 - Número de flocos obtidos por número de imagens tratadas.....	76
Figura 27 – Percentual do erro para diferentes grupos de imagens tendo os valores obtidos para 100 imagens como referência.	77
Figura 28 - Imagens de flocos capturados para cinco aberturas distintas de diafragma (entrada de luz) crescente de a para e, e seus respectivos histogramas (número de ocorrência de cada nível de cinza na imagem $0 \leq X \leq 255$) com informações de desvio padrão (σ) e média aritmética (\bar{X}). As imagens foram adquiridas em 8 bits.....	78
Figura 29 - Coeficiente de variação, tendo como referência o menor valor obtido para cada parâmetro, para: a) Desvio padrão. b) Média aritmética.....	80
Figura 30 - Desvio padrão (σ) por média aritmética (\bar{X}).....	81
Figura 31 - Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio em termos de porcentagem de turbidez remanescente para velocidade de sedimentação de 2.5 cm/min.	86
Figura 32 - Eficiência de remoção de turbidez, em porcentagem, para gradientes médio de velocidade de floculação de 60, 50, 40, 30 e 20 s^{-1} , avaliados para velocidades de sedimentação de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min para os seguintes números de Camp: a) NC=18000, b) NC=24000, c) NC=36000, d) NC=54000, e) NC=72000.	86
Figura 33 - Imagem dos flocos obtidos tendo fixo número de Camp de 54000. a) $Gf=20s^{-1}$ e $Tf=45min$. b) $Gf=60s^{-1}$ e $Tf=15min$	89
Figura 34 - Distribuição de tamanho de partícula (DTP) para $Gf=20s^{-1}$ e $Gf=60s^{-1}$	90
Figura 35: a) Exemplo de curva de DTP obtida experimentalmente. b) Exemplo da função contínua linearizada e ajustada aos dados experimentais.....	92

Figura 36: Figura comparativa da interferência do número de Camp em β com o aumento do gradiente médio de velocidade de floculação. a) $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$, b) $Gf = 30 \text{ s}^{-1}$, c) $Gf = 40 \text{ s}^{-1}$, $Gf = 50 \text{ s}^{-1}$, e) $Gf = 60 \text{ s}^{-1}$ 92

Figura 37 - Figura comparativa da interferência do Gf em β com o aumento da energia motriz do sistema. a-) $NC=18000$ (-), b-) $NC=24000$ (-), c-) $NC=36000$, d-) $NC=54000$, e-) $NC=72000$ 94

Figura 38 - Coeficientes de sensibilidade de β . a) Avaliação com base nos valores de Gf ; b) Avaliação com base nos valores de NC 95

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Erro amostral relativo à média e erro máximo admitido para intervalos de confiança de 90, 95 e 99%.....	76
Tabela 2 - Erros absoluto e relativo, para cada faixa de tamanho de partícula investigada, média do erro relativo e erro de β , em porcentagem, para: a) limiar específico b) limiar extrapolado, adotados como referência.	82
Tabela 3 - Erros médios, mediana, moda e desvio padrão, para os dois grupos de imagens binarizados com limiar específico e limiar extrapolado, sendo limiar específico adotado como referência.....	83
Tabela 4 - Erro referente à área subestimada e superestimada, em porcentagem, por faixa de tamanho de partículas.	85
Tabela 5 - Dados estatísticos referentes à DTP (assimetria, média, mediana, curtose, moda e desvio padrão) para $Gf=20s^{-1}$ e $Gf=60s^{-1}$	90
Tabela 6 - Diâmetro mais provável de flocos, em μm , para pH=3,5 e pH=5,0 para valores de gradientes médio de velocidade de 30, 45 e 60 rpm.	91

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Expressões que descrevem distintos diâmetros para determinação de tamanho de partícula.	41
Quadro 2 - Trabalhos encontrados na literatura com emprego de análise digital de imagem de partícula floculenta.....	43

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
LISTA DE SIGLAS	3
LISTA DE SÍMBOLOS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABELAS	9
1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Geral	15
2.2 Específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Tratamento de água para abastecimento público	16
3.2 Coagulação	17
3.3 Mecanismos de coagulação	18
3.4 Diagrama de coagulação	20
3.5 Flocculação	21
3.6 Agregação/ruptura dos flocos e o Número de Camp (NC)	23
3.7 Distribuição de tamanho de partícula (<i>DTP</i>)	31
3.8 Processamento de imagens: breve histórico	33
3.9 Imagem	34
3.10 Aquisição, processamento e metodologia de análise de imagem	35
3.11 Determinação do tamanho dos flocos: princípio da esfera equivalente e diâmetro fractal	40
3.12 Precisão e erros associados ao método	42
3.13 Trabalhos encontrados na literatura com emprego de análise digital de imagem de partícula flocculenta.	43
4 MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1 Elaboração da sequência de procedimentos desencadeados para a aquisição e o tratamento de imagens digitais com seus respectivos erros associados	47
4.1.1 Aquisição das imagens	47
4.1.1.1 <i>Montagem das instalações experimentais em escala de bancada</i>	47
4.1.1.2 <i>Procedimentos para aquisição das imagens</i>	50
4.1.2 Tratamento das imagens	51

	11
4.1.2.1 <i>Calibração do sistema</i>	52
4.1.2.2 <i>Binarização das imagens</i>	52
4.1.2.3 <i>Contagem dos objetos e medição de parâmetros para caracterização das partículas</i>	53
4.1.3 Determinação dos erros do método	54
4.1.3.1 <i>Amostral</i>	54
4.1.3.2 <i>Erro inerente ao método de aquisição e tratamento</i>	54
4.2 Avaliação da cinética da floculação tendo como referência aspectos colisionais, com ênfase na distribuição de tamanho de partícula (DTP)	57
4.2.1 Elaboração do Diagrama de Coagulação	57
4.2.1.1 <i>Água de estudo</i>	57
4.2.1.2 <i>Coagulante e Soluções Estoque</i>	58
4.2.1.3 <i>Ensaio em batelada para construção do diagrama</i>	58
4.2.1.4 <i>Determinação da eficiência de remoção de turbidez</i>	59
4.2.2 Estudo da cinética da floculação adotando distintos números de Camp como referência colisional	60
4.2.2.1 <i>Definição dos números de Camp, gradientes médios de velocidade e tempos, de floculação, mantendo a relação $NC = Gf \times Tf$.</i>	60
4.2.2.2 <i>Ensaio em batelada</i>	61
4.2.2.3 <i>Determinação da distribuição de tamanho de partícula e definição de β como parâmetro característico da DTP</i>	62
4.2.2.4 <i>Análise do comportamento da cinética da floculação</i>	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1 Procedimentos desenvolvidos para a aquisição e tratamento de imagens digitais	64
5.1.1 Aquisição das imagens	64
5.1.2 Tratamento das imagens	65
5.1.3 Erros associados ao método de aquisição e tratamento da imagem	75
5.1.3.1 <i>Amostral</i>	75
5.1.3.2 <i>Erro inerente ao método de aquisição e tratamento das imagens</i>	77
5.2 Estudo da cinética da floculação tendo como referência aspectos colisionais, com ênfase na distribuição de tamanho de partícula (DTP)	85
5.2.1 Avaliação do diagrama de coagulação, para o sulfato de alumínio, e da eficiência de remoção de turbidez dos ensaios realizados para o estudo da cinética da floculação.	85
5.2.2 Estudo da cinética da floculação adotando distintos números de Camp como referência colisional	91

		12
6	RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS	97
7	CONCLUSÕES	99
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
	APÊNDICE A	107

1 INTRODUÇÃO

O tema água tem cada vez mais chamado a atenção da sociedade. Recurso natural essencial para a vida do homem vem se tornando escasso em decorrência, dentre outras razões, da atividade antrópica, da desigualdade social e da falta de manejo e uso sustentável dos recursos naturais.

O acesso à água tratada e aos serviços adequados de saneamento básico estão longe de cobrir as necessidades básicas da população mundial, sendo, na maioria das vezes, privilégio de países e regiões mais desenvolvidas. Este quadro evidencia as inúmeras ocorrências de morte em virtude de doenças intestinais transmitidas por meio deste recurso.

No Brasil, o tema água tem estampado os noticiários com a crise do sistema Cantareira. Reservatório de grande importância para a região de São Paulo, seus baixos níveis no ano de 2014 e 2015 são preocupantes para suprir o abastecimento público.

Dessa maneira, diante da problemática água, se faz necessário o aperfeiçoamento contínuo das técnicas de tratamento de água e esgoto com o objetivo de proporcionar qualidade e segurança ao meio ambiente e à saúde da população.

Sob o ponto de vista dos processos e operações de uma estação de tratamento de água, a floculação constitui etapa fundamental no tratamento da água para abastecimento público. A característica dos flocos formados durante a floculação tem relação direta com as características da água bruta, dos produtos químicos e da tecnologia empregada, sendo determinantes na eficiência dos processos e na qualidade da água tratada para abastecimento (MORUZZI, 2010).

A coagulação e a floculação promovem mudanças na distribuição de tamanho de partícula (DTP), que traduz os efeitos dos choques, agregação e ruptura dos flocos (ZHANG, 2011). A DTP depende do gradiente médio de floculação e do tempo de exposição das partículas floculentas a este gradiente. Ela pode ser determinada em função de uma série de parâmetros, entre os quais: diâmetro, volume e área. Assim, a compreensão do comportamento da DTP e das características físicas de seus flocos, para distintas condições cinéticas, surge como ferramenta para o aperfeiçoamento de projetos de unidades de separação sólido/líquido no tratamento de água.

Assim, para a obtenção da DTP, distintas metodologias de medição de tamanho de partícula vêm sendo utilizadas, como por exemplo: espalhamento de luz por meio de laser, ultrassom, análise óptica de imagem e análise digital de imagens. A análise digital

de imagem permite uma melhor informação visual para a análise e interpretação humana ou para a percepção automática por meio do uso de máquinas (JUNKER, 2006).

A cinética dos encontros entre partículas durante a floculação leva em consideração dois efeitos: agregação e ruptura. A agregação é decorrente dos encontros das partículas desestabilizadas, sendo que a agitação promove uma maior taxa nesses encontros e forma aglomerados ou flocos. Já na ruptura, devido a forças de cisalhamento, tem-se a erosão dos flocos que é mais acentuada quando se tem agitação intensa ou tempo de floculação longo (THOMAS, 1999).

Segundo Argaman (1971) a eficiência da floculação é dependente do produto adimensional GT (número de Camp, sendo G o gradiente médio de velocidade e T o tempo de residência médio), distribuição do tempo de residência, volume dos flocos (partículas) e distribuição do tamanho dos flocos.

Portanto, a avaliação da distribuição de tamanho de partículas floculentas em diferentes condições cinéticas, por meio de análise digital de imagens é de suma importância para uma maior compreensão dos processos de tratamento de água para abastecimento público a fim de otimizá-los e alcançar a qualidade desejada do tratamento.

2 OBJETIVOS

2.1 geral

Empregar técnica dedicada de análise de imagem na avaliação do produto GT no desempenho da floculação.

2.2 Específicos

1. Elaborar uma sequência de procedimentos desencadeados para a aquisição e o tratamento de imagens digitais de partículas floculentas, com seus respectivos erros associados.
2. Avaliar a cinética da floculação tendo como referência aspectos colisionais, com ênfase na distribuição de tamanho de partícula.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tratamento de água para abastecimento público utilizando tecnologia convencional

Água de qualquer qualidade pode ser do ponto de vista tecnológico, transformada em água potável. Entretanto, alguns fatores como custo e confiabilidade tanto na operação quanto na manutenção acabam por inviabilizar o uso de determinados cursos d'água como fonte para abastecimento. Meio ambiente e tecnologia de tratamento de água estão diretamente relacionados. De acordo com a qualidade de determinada água a ser tratada e suas relações com o meio ambiente há determinadas tecnologias para que o tratamento seja realizado de forma eficiente (DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

Segundo Hammer (1979) tem-se água poluída quando as influências de esgotos sanitários, industriais e agrícolas a torna inaceitável para seu melhor uso. Poluição e eutrofização são as principais preocupações em um manancial.

A poluição pode causar tanto alterações de caráter físico (turbidez, cor, condutividade, temperatura) como químico (pH, *DQO*, *DBO*, toxicidade) e biológico (espécies do fitoplâncton e zooplâncton). Em consequência de contaminações biológicas dos recursos hídricos estão associadas doenças como: amebíase, giardíase, esquistossomose, viroses, cólera, disenteria entre outras (DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

Com objetivo de fornecer à população um produto potável ao consumo, tem-se então os tratamentos de água que devem obedecer aos padrões de qualidade definidos pelo órgão competente. Águas com finalidade de uso doméstico devem ser esteticamente aceitáveis com ausência de turbidez, odor, cor ou gosto (HAMMER, 1979).

De acordo Di Bernardo (2005), por meio de um mecanismo denominado varredura a água bruta é coagulada, na maioria das vezes com um sal de ferro ou alumínio, havendo formação predominantemente de precipitados do metal do coagulante com aprisionamento das impurezas. Este processo ocorre na unidade de mistura rápida que pode ser mecanizada ou hidráulica dependendo de uma série de fatores, entre os quais, vazão a ser tratada, variação da qualidade da água bruta, condições disponíveis de manutenção e operação.

Uma vez coagulada, a água é submetida a uma agitação lenta por determinado período de tempo para que os flocos atinjam o tamanho e massa específica necessária para uma eficiente remoção por sedimentação em decantadores ou por meio de flotação nos flotadores. Assim como o processo de mistura rápida a floculação também pode ser de caráter mecânico ou hidráulico. A partir dos decantadores ou flotadores tem-se água clarificada que é em seguida filtrada em unidades com escoamento descendente que contém materiais granulares (areia ou antracito e areia) com granulometria adequada (DI BERNARDO, 2005).

3.2 Coagulação

Grande parte das partículas presentes nas águas, como argilas e bactérias, possuem carga negativa e acabam por repelirem umas as outras. Com o objetivo de se realizar a clarificação dessas águas deve-se realizar seu tratamento, iniciando com a coagulação (AMIRTHARAJAH, 1982).

De acordo com Voltan (2007) a coagulação afeta o comportamento das partículas em um sistema natural por meio da dosagem e tipo de coagulante, pH, intensidade de mistura e concentração das partículas a fim de promover a hidrólise do coagulante e por fim desestabilizar as impurezas (processo químico) presentes na água a ser tratada. A intensidade de mistura é um dos principais fatores, uma vez que promove interações entre agregados e partículas, afetando as características de sedimentação.

Coagular significa reduzir o seu Potencial Zeta (*P.Z*), que é a medida do potencial elétrico entre a superfície externa da camada compacta que se desenvolve ao redor da partícula e o meio líquido na qual está inserida, em valores que permitam uma posterior aglomeração ou unificação das impurezas. Possibilita, assim, a produção de flocos sendo que uma maior eficiência é alcançada quando o valor se aproxima de zero (COVENTYA, 2014).

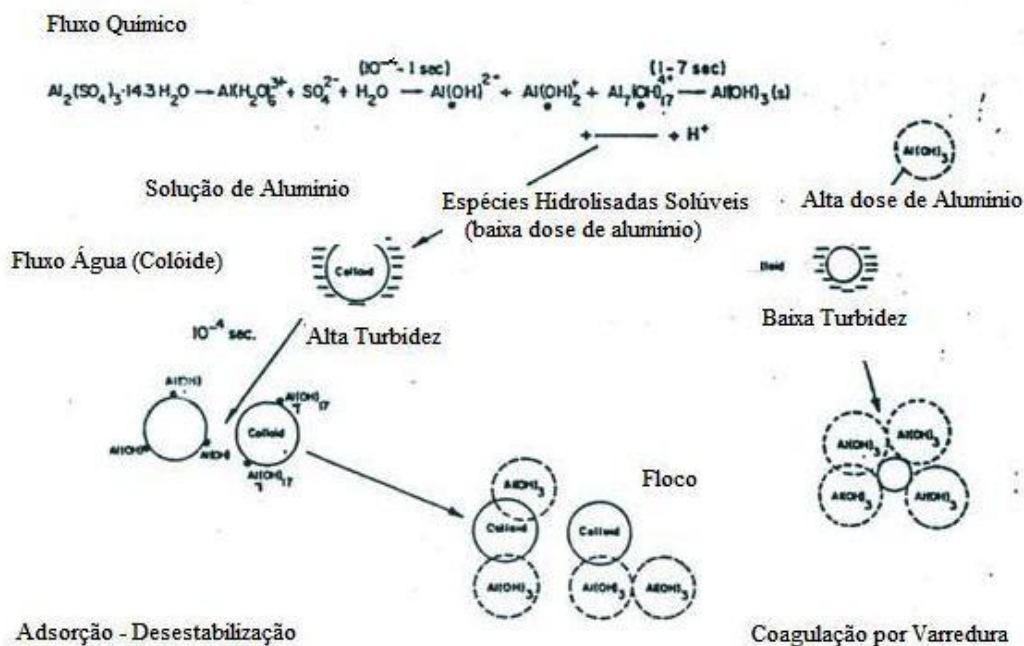
A adição de sais de alumínio ou ferro à água a ser tratada sob condições particulares de dosagem de coagulante e pH dão origem à uma série de espécies hidrolisadas. No caso do sulfato de alumínio são: Al^{3+} ; $Al(OH)^{2+}$; $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ e $Al(OH)_4^-$. Essas espécies hidrolisadas adsorvem ou formam superfícies complexas, possibilitando assim a formação do floco (AMIRTHARAJAH, 1982).

Além de sais de ferro e sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)^3$), cloreto de polialumínio e polímeros catiônicos também são utilizados como coagulante. Sua escolha e

concentração dependem além da natureza dos sólidos suspensos das características químicas da água afluyente (WESNER, 1998).

Segue Figura 1 esquemática das reações que ocorrem durante a coagulação:

Figura 1 - Esquema das reações durante a coagulação cujo papel é a desestabilização das cargas das partículas, através da adição de produtos químicos.



Fonte: Amirtharajah (1982).

3.3 Mecanismos de coagulação

Existe uma série de mecanismos de desestabilização de partículas, minimizando ou eliminando, assim, sua força de repulsão e possibilitando a sua agregação. Entre eles tem-se: compressão da dupla camada elétrica, adsorção e neutralização de carga, varredura e adsorção e formação de pontes. Essa desestabilização pode ocorrer tanto por meio de apenas um ou pela combinação desses mecanismos. O predomínio de um deles está relacionado a alguns fatores, entre os quais: valor do pH de coagulação, do coagulante usado e sua dosagem, características da qualidade da água, da carga e da concentração das partículas (O' MELIA, 1972).

Na compressão da dupla camada elétrica os colóides repelem íons de mesma carga ao passo que atraem os de carga contrária, ou seja, a desestabilização de um colóide por

um eletrólito indiferente ocorre em resultado de interações eletrostáticas. Isso foi evidenciado por Schulze e Hardly, por volta de 1900, empregando a teoria conhecida como *DLVO*, desenvolvida por Derjaguin, Landau, Verwey e Overbeek. A introdução de um colóide num sistema coloidal gera como consequência aumento na densidade de cargas na camada difusa diminuindo a “esfera” de influência das partículas dando origem a coagulação por compressão da camada difusa (DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

Já na adsorção e neutralização de carga têm-se as interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente. No emprego de espécies hidrolisadas de alumínio, ferro ou de polímeros sintéticos catiônicos o mecanismo de adsorção é dominante devido à interação entre coagulante e colóide. Esse mecanismo é de grande importância quando se tem tratamento realizado por meio de tecnologias de filtração direta, pois não há necessidade da geração de flocos para posterior sedimentação ou flotação sendo necessárias partículas desestabilizadas que serão retidas no meio granular dos filtros (DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

O mecanismo de varredura, segundo Arboleda (1992), consiste em introduzir ao processo uma quantidade de coagulante que excede o limite de solubilidade do mesmo na água. Desta forma, os hidróxidos gerados se precipitam envolvendo tanto os colóides quanto as partículas suspensas. Sabe-se que os flocos formados por esse mecanismo quando comparados com os gerados por adsorção e neutralização de cargas são maiores e acabam por possuir sedimentação de forma mais fácil.

A adsorção e formação de pontes, segundo Di Bernardo e Dantas (2005) é caracterizada por envolver a utilização de polímeros de grandes cadeias moleculares ligando a superfície à qual estão aderidos a outras partículas. Esse mecanismo possui o objetivo reduzir as dosagens de coagulante e conferir ao floco maior densidade.

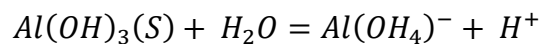
Por meio dos mecanismos citados as partículas se unem por sucessivas colisões até darem origem a flocos cuja velocidade de formação depende, do tamanho das partículas em relação ao estado de agitação do líquido, bem como da concentração das mesmas e de seu grau de desestabilização, permitindo assim que as colisões sejam eficazes para produzir aderência (ARBOLEDA, 1992).

3.4 Diagrama de coagulação

O diagrama de coagulação é uma ferramenta em que se consegue prever as condições químicas em que determinada coagulação pode ocorrer, possibilitando definir o melhor valor de pH para remoção de cor e turbidez e concentração do coagulante (ARBOLEDA, 1992; AMIRTHARAJAH e O'MELIA, 1990).

Consiste na sobreposição do diagrama de solubilidade do coagulante com as condições químicas em que o processo ocorre, aferidas por meio de jarreste, variando o valor do pH de coagulação e dosagem do coagulante utilizado. É específico para cada água bruta e coagulante adotado (ARBOLEDA, 1992; AMIRTHARAJAH e O'MELIA, 1990).

O equilíbrio do íon aluminato $Al(OH)_4^-$ com o hidróxido de alumínio sólido $Al(OH)_3(S)$ pode ser descrito da seguinte maneira (AMIRTHARAJAH, 1982):



Sua constante de equilíbrio é dada por:

$$k_4 = \frac{[H^+][Al(OH)_4^-]}{[Al(OH)_3(S)]} = 10^{-12.35}$$

Sabendo que $Al(OH)_3(S) = 1$ e fazendo seu logaritmo negativo:

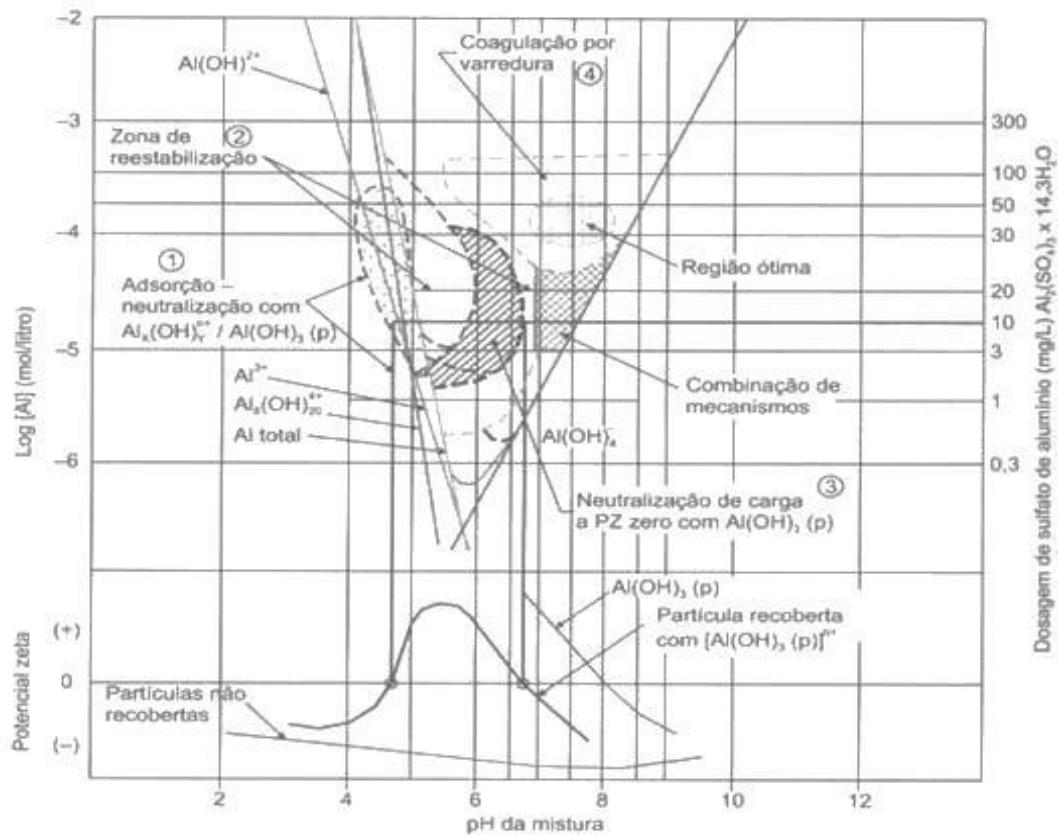
$$-\log[k_4] = -\log[H^+] - \log[Al(OH)_4^-] = 12.35$$

Portanto:

$$\log[Al(OH)_4^-] = pH - 12.35$$

A interação entre o coloide e o hidróxido de alumínio é mostrada na Figura 2 que também evidencia o Potencial Zeta em decorrência dessas interações. O ponto de carga zero (*PZC*) para o hidróxido de alumínio está na faixa de pH de 7,0 à 9,0, dependendo dos ânions na solução. Para dosagem específica de 10 mg/L do coagulante alumínio duas regiões de neutralização de cargas onde o *PZC* é próximo a zero foram produzidas: no pH = 4,8 e pH = 6,8, sendo então, consideradas boas condições de pH para ocorrência de coagulação (AMIRTHARAJAH, 1982).

Figura 2 - Diagrama de coagulação e Potencial Zeta do alumínio evidenciando algumas regiões distintas, caracterizadas pelos pares de valores dosagem de coagulante versus pH da mistura.



Fonte: Amirtharajah (1982).

Ou seja, as regiões em que a coagulação é eficaz dependem do tipo e dosagem do coagulante empregado, das características da água, do valor do pH de coagulação, evidenciando a necessidade de se construir um diagrama para cada situação específica.

3.5 Floculação

Na floculação ocorrem as interações entre as impurezas desestabilizadas, durante a etapa de coagulação, e os precipitados de metal, recebendo agitação controlada para alcançar um aumento na probabilidade de ocorrência dos choques entre as partículas. Geram assim, flocos que serão removidos, em seguida, por meio de filtração, flotação ou sedimentação. Em relação ao tamanho do floco, determinadas forças de cisalhamento

geradas pela agitação podem levar à sua ruptura. Portanto, agregação e ruptura ocorrem simultaneamente (VOLTAN, 2007).

Adesão e transporte são os mecanismos que norteiam a floculação. A adesão relaciona-se às cargas superficiais da partícula que devem sofrer alteração durante a coagulação para que os choques ocorram de maneira efetiva. Já o transporte refere-se à agitação introduzida ao meio, podendo ser dividido em: floculação pericinética (movimento Browniano), em que a energia térmica causa o movimento errático das partículas sendo restrito às partículas muito pequenas, ortocinética, quando os encontros das partículas são decorrentes do gradiente médio de velocidade e sedimentação/flotação diferencial, em que as partículas com velocidades distintas de sedimentação podem se encontrar. No tratamento de água de abastecimento, as dispersões coloidais apresentam partículas relativamente grandes dificultando a interação pericinética sendo, neste caso, insignificante se comparada às interações ortocinética e por sedimentação diferencial (SANTOS *et al.*, 2004).

Para otimização dos parâmetros de mistura rápida e floculação, após a escolha no diagrama de coagulação de pares de valores de pH de coagulação versus dosagem de coagulante, fixa-se os parâmetros da floculação e posteriormente, com variação dos parâmetros de mistura rápida e velocidade de sedimentação, chega-se aos valores de otimização de mistura rápida. Tendo os parâmetros dosagem do coagulante, pH de coagulação e gradiente médio de velocidade e tempo de mistura rápida, segue-se com a otimização da floculação que uma vez definida, o melhor cenário para o tratamento de determinada água, é então obtido (BRITO, 1998; DI BERNARDO e DANTAS, 2005; VOLTAN, 2007).

Com o objetivo de estimar o desempenho da floculação a partir de fenômenos de agregação e ruptura, a modelagem matemática relativa à cinética dos encontros passou a ser adotada. A agregação e formação dos flocos resultam dos encontros entre as partículas sendo que o aumento do gradiente médio de velocidade e do tempo de floculação geram aumento na taxa desses encontros. Por outro lado, uma agitação muito alta faz com que as forças de cisalhamento possam causar a ruptura dos flocos assim como determinados tempos de floculação causam a quebra desses flocos também (DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

3.6 Agregação/ruptura dos flocos e o Número de Camp (NC)

As partículas encontradas em águas de abastecimento podem ser tanto de origem mineral, como por exemplo, argilas, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio, sílicas entre outros ou de origem orgânica, como, bactérias, vírus, algas e cistos de protozoários. Existente, em sua maioria, como suspensões coloidais, são estáveis de tal maneira que possuem uma baixa taxa de agregação de partícula ou de floculação. Entre os motivos para tal ocorrência pode-se citar: interações eletrostáticas repulsivas, efeitos hidrofílicos devido à água ligada à superfície das partículas e efeitos histéricos devido às macromoléculas adsorvidas (EDZWALD, J.K., 1993).

Como foi visto a coagulação e a floculação são muito empregadas nos processos de separação sólido/líquido em tratamentos de água para abastecimento e águas residuárias. A floculação é utilizada com a finalidade de promover aumento no tamanho médio do floco a fim de elevar a remoção das partículas. (PRATSINIS E SPICER, 1996). O coagulante empregado, bem como, a produção de flocos com propriedades adequadas são essenciais para melhor remoção das partículas em suspensão (minerais ou orgânicas), fundamentais para o tratamento e qualidade da água (GREGORY E YUKSELEN, 2004).

Nas unidades de mistura rápida onde ocorre o processo de coagulação, a taxa de crescimento inicial dos flocos é determinada pelo cisalhamento aplicado, concentração das partículas bem como da eficiência das colisões. Os flocos então se tornam maiores, porém o seu crescimento pode ser limitado pela existência de forças destrutivas e pela diminuição da eficiência da colisão das partículas no campo de cisalhamento pelo aumento do tamanho das partículas (BRAKALOV, 1987 APUD GREGORY 2004).¹ O balanço dinâmico entre o crescimento e quebra do floco pode conduzir a um estado estático na distribuição de tamanho do floco em que o tamanho limitante depende da taxa de cisalhamento empregada (MUHLE, 1993 APUD GREGORY 2004).²

Segundo Voltan (2007) a desagregação ocorre em função da atuação dessas forças de cisalhamento sobre os flocos, de maneira que a energia dissipada durante a floculação ocasiona o aumento dessas forças, e da diferença de pressão em lados

¹ BRAKALOV, L.B. *A connection between orthokinetic coagulation capture efficiency of aggregates and their maximum size*. *Chem. Eng. Sci.* 42, 2373-2383, 1987.

² MUHLE, K. *Floc stability in laminar and turbulent flow*. In: Dobias, B. (Ed.), *Coagulation and Flocculation*. Dekker, New York, p. 355-390, 1993.

opostos de flocos relativamente grandes, causando sua fragmentação. Boyer *et al.* (2005) afirmou que o tamanho do floco é controlado pelo balanço entre o estresse hidrodinâmico e a força de agregação.

Portanto, fenômenos físico-químicos e hidrodinâmicos atuam com grande influência nas eficiências de coagulação e floculação estando relacionados com a dose e o tipo de coagulante, temperatura e pH. Por outro lado, fenômenos hidrodinâmicos dependem da geometria do tanque em que ocorre o processo e do tipo e velocidade do rotor. Esses fenômenos são levados em conta na modelagem de agregação das partículas em termos da taxa de colisão, eficiência de agregação e quebra dos flocos (BOUYER *et al.*, 2005).

De acordo com Yukselen e Gregory (2002a), as interações entre as partículas ocorrem devido a fenômenos físicos (forças eletrostáticas ou de Van der Waals). Assim, quanto se tem aumento da agitação, em poucos segundos, observa-se a ruptura dos flocos que voltam a crescer quando se retorna às condições anteriores à agitação.

Porém, o recrescimento desses flocos levados à ruptura é limitado sendo não completamente reversível uma vez que não atingem o tamanho inicial quando as condições de agitação retornam às condições anteriores à agitação. Ou seja, a reversibilidade da ruptura dos flocos depende da intensidade e do tempo de agitação (YUKSELEN e GREGORY, 2002a, 2004a, 2004b).

Jarvis *et al.* (2006) também chegaram à conclusão, em seu trabalho, de que todos os flocos estudados apresentaram capacidade limitada de recrescimento, após a ruptura dos mesmos. Observaram também que os flocos rompidos que permaneceram de tamanho mais próximo àquele anterior à ruptura possuíram maior resistência. (JARVIS *et al.* (2005b).

Voltan (2007) concluiu que a ruptura, em poucos segundos, prejudicou a remoção dos flocos por sedimentação. Quanto maior o gradiente médio de velocidade na ruptura, pior foi a eficiência de remoção por sedimentação, mesmo após a refloculação. Concluiu também que quanto menor o gradiente médio de velocidade durante a refloculação, menores foram os valores de turbidez remanescente obtidos. Apenas para velocidade de sedimentação mais baixas e gradientes médios de velocidade de refloculação $75s^{-1}$ e $15s^{-1}$, respectivamente, foi atingida eficiência de remoção do sobrenadante similar à encontrada no início, sem ruptura.

Segundo Constantino (2008) na refloculação, mesmo aos primeiros cinco minutos, a cor aparente remanescente diminuiu, quando comparada com as coletas efetuadas logo após a ruptura (sem refloculação). Além disso, observou que tempos de refloculação

longos, obtiveram menor eficiência de remoção de cor aparente quando comparado com menores tempos de refloculação. O mesmo comportamento foi notado para o tempo de floculação. Para tempos acima de 25 minutos a eficiência de remoção de cor aparente foi menor do que para tempos menores, entre 15 a 20 minutos. Em relação ao gradiente médio de velocidade, quanto maior seu valor durante a ruptura, maiores os valores de cor aparente remanescente após a refloculação, distanciando-se dos valores obtidos inicialmente, sem a ruptura. Portanto, gradiente médio de velocidade exerce significativa influência na velocidade de sedimentação dos flocos, mesmo após a refloculação. Assim, a refloculação depende de uma série de fatores, a saber: gradiente médio de velocidade durante a ruptura dos flocos e tempo de agitação e gradiente médio de velocidade de refloculação.

De acordo com Moruzzi e Oliveira (2013) a eficiência da floculação em um sistema contínuo depende do número de câmaras em série e do gradiente médio de velocidade (G) aplicado nessas câmaras, que podem ser tanto fixas ou diminuïrem de forma gradual. O emprego de elevados gradientes médios de velocidade faz com que não seja possível operar com um sistema de alta eficiência uma vez que aumenta a quebra dos flocos.

Ou seja, as altas taxas de cisalhamento aplicadas às partículas atuam na força e na habilidade de reversão do floco influenciando, como consequência, as suas características (CAMPOS *et al.*, 2010). Portanto, a estrutura do floco é de suma relevância uma vez que determina seu tamanho e densidade, tendo influência direta na eficiência de remoção de sólidos durante a sedimentação (PRATSINIS, S.E.; SPICER, P.T., 1996).

Segundo Moruzzi e Oliveira (2013) o modelo mais empregado para o estudo da cinética de floculação é o que foi proposto por Argaman e Kaufman (1970) em que a agregação e quebra dos flocos são os principais fenômenos considerados. Este modelo permitiu a análise do design e dos parâmetros de operação para um sistema contínuo de floculação usando câmaras em série. Assim, evidenciou-se que a eficiência da floculação em um sistema contínuo depende além do número de câmaras em série, do gradiente médio de velocidade aplicado a essas câmaras, que podem ser fixos ou diminuir de maneira gradual.

Para altos gradientes médios de velocidade, atingir elevada eficiência do sistema não é possível uma vez que promove o aumento da quebra dos flocos. Desta maneira, a diminuição gradual de G nas câmaras possibilita a operação do sistema com elevados

valores de G e como consequência alta eficiência de floculação é obtida (MORUZZI e OLIVEIRA, 2013).

As primeiras teorias a respeito da cinética da floculação foram estabelecidas por Smoluchowski (1917) das quais derivam as expressões básicas para representação da frequência de colisão entre partículas (THOMAS *et al.*, 1999). A equação básica desenvolvida por Smoluchowski (1917) é apresentada a seguir:

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i+j=k} \beta(i, j) n_i n_j - \sum_{i=1}^{\infty} \beta(i, k) n_i n_k \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo:

i = partículas discretas de tamanho i ;

j = partículas discretas de tamanho j ;

k = partículas de tamanho k ;

$\beta_{(i, j)}$ = taxa de colisão entre as partículas i e j ($L^{-3}T$);

$\beta_{(i, k)}$ = taxa de colisão entre as partículas i e k ($L^{-3}T$);

n_i = número de partículas de tamanho i (L^{-3});

n_j = número de partículas de tamanho j (L^{-3});

n_k = número de partículas de tamanho k (L^{-3});

dn_k/dt = variação do número de partículas k por tempo.

Assim, Smoluchowski (1917) propôs as seguintes hipóteses: 1- a eficiência das colisões é única para todas as partículas; 2- o fluxo do meio líquido é laminar; 3- as partículas são monodispersas (mesmo tamanho); 4- não há quebra dos flocos formados; 5- todas as partículas são esféricas e assim permanecem após as colisões; 6- colisões ocorrem apenas entre duas partículas.

Baseado então nestas premissas desenvolveu uma expressão analítica para descrever a frequência de colisão entre partículas para floculação ortocinética dada pela Equação (2):

$$H_{ij} = \frac{1}{6} \frac{dv}{dt} (d_i + d_j)^3 \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo:

i = partículas discretas de tamanho i ;

j = partículas discretas de tamanho j ;

H_{ij} = taxa de colisão entre as partículas i e j ($L^{-3}T$);

dv/dt = gradiente de velocidade no fluido (s^{-1}).

Porém, a utilização desta equação em projetos de sistemas de floculação é limitada já que o tratamento teórico é baseado em fluxo laminar e as condições prevalentes no processo são de fluxo turbulento.

Assim sendo, Camp e Stein (1943), afirmaram ser o regime turbulento de maior relevância para tratamento de água. Generalizaram a equação de Smoluchowski ao adicionar condições de escoamento turbulento e definir o conceito de gradiente médio de velocidade. Portanto, a frequência de colisão é expressa da seguinte maneira:

$$H_{ij} = \frac{4}{3} n_i n_j R_{ij}^3 G \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo:

H_{ij} = número de contatos por unidade de tempo entre partículas de raio R_i e R_j (s^{-1});

n_i e n_j = número de partículas de raio i e j , respectivamente, por unidade de volume ($1/m^3$);

R_{ij} = raio de interação entre duas partículas i e j (distância entre o centro e duas partículas (m)).

De acordo com Argaman (1971) a eficiência da floculação depende do produto adimensional GT (Número de Camp, onde G é o gradiente médio de velocidade e T o tempo de residência médio), distribuição do tempo de residência, volume dos flocos (partículas) e distribuição do tamanho dos flocos. No entanto, estas equações não descrevem os efeitos da erosão dos flocos devido às tensões de cisalhamento existentes. Assim sendo, Argaman (1968)³ e Argaman & Kaufman (1970)⁴ apud Argaman (1971) desenvolveram uma expressão para avaliar o desempenho da floculação em fluxo contínuo que considera tanto a agregação quanto a ruptura dos flocos. Relataram que a relação linear entre a performance da floculação e o produto GT (Número de Camp) é uma aproximação aceitável apenas para pequenas variações de G e que a estrutura fina do campo de turbulência tem um efeito significativo no desempenho. Descreveram que na unidade de floculação os dois processos opostos ocorrem simultaneamente, ou seja,

³ ARGMAN, Y. *Turbulence in Orthokinect Flocculation*. Phd. Thesis presented to University of California, Berkely. 1968.

⁴ ARGAMAN Y. AND KAUFMAN W. J. *Turbulence and flocculation*. J. Sanitary Eng. Div. ASCE v.96, p. 223-24, 1970.

por um lado as partículas primárias (partículas presentes na suspensão no tempo zero) são removidas através de sua incorporação aos flocos e por outro são desprendidas na suspensão pela quebra destes flocos. A combinação destes efeitos pode ser descrita de uma maneira mais geral conforme a Equação 4:

$$\frac{dn}{dt} = -(função\ de\ agregação) + (função\ de\ ruptura) \quad \text{Equação (4)}$$

A Equação (4) pode ser integrada e utilizada para avaliar a concentração de partículas em cada uma das câmaras de floculação. Argaman (1968) apud Argaman (1971) mostrou que a relação entre a concentração de partículas na entrada e saída de cada um dos m compartimentos de um floclador em série é dada pela Equação (5):

$$\frac{N_1^i}{N_1^{i+1}} = \frac{(1 + K_A G \frac{T}{m})^m}{(1 + K_B G^2 \frac{T}{m})} \quad \text{Equação (5)}$$

A variação geral entre todos os m compartimentos do floclador é dada pela Equação (6):

$$\frac{n_0}{n_m} = \frac{(1 + K_A G \frac{T}{m})^m}{(1 + K_B G^2 \frac{T}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (1 + K_A G \frac{T}{m})^i)} \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo:

n_0 = número inicial de partículas primárias antes da floculação após tempo longo de sedimentação (medido em termos de turbidez inicial da água - uT);

n_m = número de partículas primárias na saída do reator m após tempo T de floculação e após longo período de sedimentação (medido como turbidez da água - uT);

K_A = constante cinética de agregação;

K_B = constante cinética de ruptura;

G = Gradiente de velocidade (s^{-1});

T/m = tempo de mistura no reator m (s).

Pádua *et al.* (1998) propuseram uma metodologia para determinação dos gradientes médios de velocidade para cada câmara em uma unidade de floculação composta por câmaras em série. Esta metodologia é de suma relevância, sendo citada aqui, para conhecimento.

Argaman (1968) afirma que o produto GT (Número de Camp – NC), estabelecido por Camp & Stein (1943), por si só não é um parâmetro adequado para descrever o efeito da energia de agitação e do tempo de mistura no desempenho de floculação, ou seja, para qualquer desempenho desejado há um tempo de mistura mínimo abaixo do qual os resultados pretendidos podem não ser atingidos, independentemente do gradiente de velocidade. Esse fato decorre do rompimento dos flocos, negligenciado no tratamento matemático.

Considerando-se flocos muito fortes (pequeno K_B), ou seja, com baixos valores de G o denominador da equação se aproxima da unidade e, portanto, torna-se idêntica à teoria de Smoluchowski (1917) adaptada para fluxo turbulento por Camp & Stein (1943).

De acordo com Bratby *et al.* (1977), a equação que descreve a cinética de floculação em reator estático, assumindo o número de partículas primárias N igual a turbidez remanescente, é semelhante à equação dada a seguir:

$$\frac{N_0}{N_1} = \left[\frac{K_B}{K_A} G_f + \left(1 - \frac{K_B}{K_A} G_f \right) e^{-K_A G_f T_f} \right]^{-1} \quad \text{Equação (7)}$$

Sendo:

N_0 : turbidez inicial do sobrenadante (uT);

N_1 : turbidez final do sobrenadante após tempo de sedimentação longo (uT);

K_A : coeficiente de agregação;

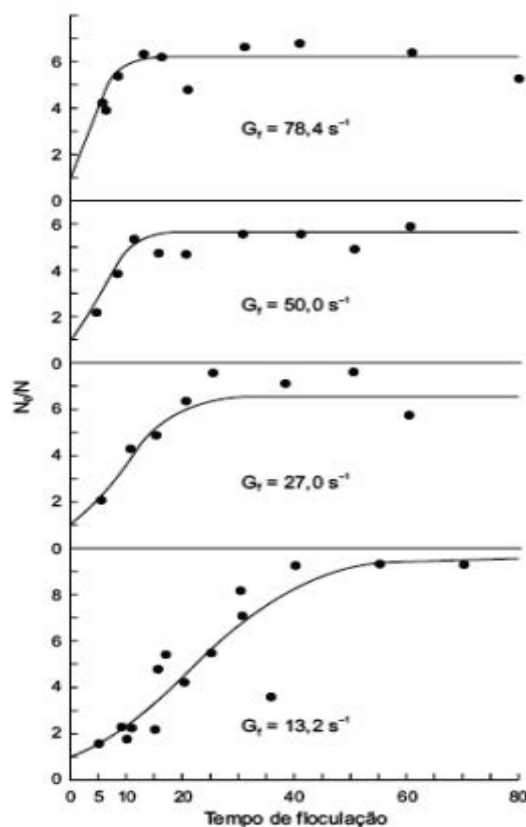
K_B : coeficiente de ruptura;

G_f : gradiente de velocidade médio durante a floculação (s⁻¹);

T_f : tempo de floculação.

Para se determinar os coeficientes de agregação e ruptura na floculação são realizados ensaios de coagulação, floculação e sedimentação por um tempo longo, geralmente maior que duas horas, variando tempos de agitação e gradiente médio de velocidade de floculação, para condições ótimas de mistura rápida. Bratby *et al.* (1981) realizaram esse estudo e construíram o gráfico que está representado na Figura 3 de N_0/N_1 em função do tempo de floculação, para cada gradiente de velocidade estudado.

Figura 3 - Desempenho da floculação (N_0/N_1) para uma faixa de valores de Gf e Tf tendo como coagulante Sulfato de Alumínio. Dosagem = 15mg/L; pH: 7,6; $N_0 = 3,13$ uT, $G_{mr} = 500 \text{ s}^{-1}$; $T_{mr} = 10\text{s}$.



Fonte: Brabty (1981).

De acordo com Argaman e Kaufman (1970) esses ensaios para a determinação dos valores dos coeficientes K_A e K_B possuem alto custo envolvido bem como o tempo relativamente longo de execução o que dificulta a utilização do modelo. Assume-se assim que para câmaras de mistura completa em série os coeficientes K_A e K_B permanecem constantes.

Brito (1998), realizou estudo para a determinação dos coeficientes de agregação e ruptura. Observou que com maior tempo de sedimentação os valores de agregação aumentaram e os valores de ruptura diminuíram. Sendo assim, concluiu que tanto para a mistura rápida quanto para a floculação, a seleção dos valores do gradiente médio de velocidade e do tempo de agitação, que otimizam essas operações, é influenciada pela velocidade de sedimentação dos flocos.

Spicer e Pratsinis (1996) estudaram o efeito de variadas taxas de cisalhamento durante a coagulação e encontraram que os agregados alcançaram equilíbrio, ou seja, “*steady-state*” relativamente rápido sobre elevadas taxas de cisalhamento. Assim, a quebra do floco era o processo principal responsável por manter o tamanho da partícula estável e limitar a continuação de seu crescimento.

Libânio (1995) afirmou que o contínuo período de agitação reduz a eficiência de remoção da floculação, ou seja, durante a floculação os flocos atingem seu tamanho máximo a partir do qual passa a prevalecer o mecanismo de ruptura, de maneira que ao se aumentar o tempo de floculação, tem-se a redução das dimensões dos flocos e da eficiência da floculação.

Flocos com tamanhos e características distintas podem ter a mesma capacidade de sedimentação, pois a sedimentação não depende apenas do tamanho e largura do floco, mas também de características como densidade e força de ligação (HAN et. al, 2006).

3.7 Distribuição de tamanho de partícula (DTP)

As unidades de coagulação e floculação são projetadas a fim de promoverem mudanças nas distribuições de tamanho das partículas (LAWLER, 1997). Portanto, torna-se interessante a melhoria de seus parâmetros operacionais com o objetivo de se obter a distribuição de partículas adequadas às técnicas de separação utilizadas à jusante (sedimentação, flotação, filtração entre outros) (SANTOS *et al.*, 2004).

As partículas presentes no esgoto sanitário e na água bruta possuem caráter heterogêneo, podendo ser representadas por gráficos ou funções de distribuição de tamanho de partículas. Assim, ao serem acompanhadas ao longo dos flocladores fornecem informações para uma melhor compreensão dos fenômenos que envolvem a floculação. (Kobler & Boller, 1997; Lawler 1997; Thomas *et al.*, 1999).

De acordo com Lawler (1997), poluentes presentes em águas de abastecimento público e águas residuárias são partículas caracterizadas por uma série de propriedades, como tamanho, forma, densidade, carga de superfície, velocidade de sedimentação e porosidade, que influenciam o seu comportamento na água e a sua remoção. Essas propriedades variam de partícula para partícula dando origem, desta maneira, a uma distribuição de tamanho de partícula.

Segundo Bouyer *et al.* (2005) a eficiência de agregação depende das características físico-químicas das partículas (carga de superfície e pH) sendo de suma relevância o

estudo do efeito hidrodinâmico no processo de agregação e quebra e como consequência sua influência no tamanho do floco.

Como ferramenta potencial para o aprimoramento na concepção e projeto de unidades de separação sólido/líquido empregadas no tratamento de água e esgoto surge o conhecimento das características físicas dos sólidos (SANTOS *et al.*, 2004). Descrita por diversos autores como a “próxima fronteira” do conhecimento, a caracterização das partículas apresenta-se como promissora ferramenta no campo do tratamento de água e esgoto sanitário (MORUZZI, 2010).

A distribuição de tamanho de partículas (*DTP*) traduz os efeitos dos choques, agregação e ruptura dos flocos (ZHANG, 2011). Na floculação, a *DTP*, depende, entre outros fatores, do gradiente médio de velocidade e do tempo de exposição das partículas a este gradiente. A *DTP* pode ser definida com base no número, massa, diâmetro, área superficial e/ou volume das partículas. No tratamento de água a *DTP* é mais frequentemente determinada utilizando-se um contador de tamanho de partículas. Após a contagem, as partículas são agrupadas por faixas de tamanho e o número total é conhecido. Segundo Crittenden *et. al* (2005) a distribuição da frequência do número de partículas $F(d)$ pode se expressa como a concentração do número de partículas, dN , no que diz respeito à fração incremental no tamanho das partículas, $d(dp)$, representada pela Equação (8):

$$F(d_p) = \frac{dN}{d(dp)} \quad \text{Equação (8)}$$

Sendo:

$F(d_p)$ = função que define a frequência de distribuição de tamanho de partículas ($d_1, d_2, d_3...$);

dN = concentração do número de partículas em termos da variação incremental dos diâmetros das partículas ($d(dp)$);

$d(dp)$ = variação incremental dos diâmetros das partículas.

A frequência de distribuição de tamanho de partículas em águas naturais aumenta com a diminuição do diâmetro da partícula enquanto que a distribuição do volume aumenta com o aumento do tamanho. A equação 9 abaixo refere-se a distribuição em forma de potência (CRITTENDEN *et. al*, 2005):

$$\frac{dN}{d(dp)} = A(dp)^{-\beta} \approx \frac{\Delta N}{\Delta(dp)} \quad \text{Equação (9)}$$

Sendo:

A = coeficiente de densidade da equação de potência;

d_p = diâmetro da partícula;

β = coeficiente de inclinação da equação de potência.

Aplica-se *Log* em ambos os lados da Equação (9) ou realiza-se sua integração a fim de determinar os coeficientes A e β , os quais representam a forma da distribuição dos tamanhos das partículas. Assim, o estudo da *DTP* pode ser utilizado como opção à utilização do parâmetro turbidez na análise de variáveis envolvidas nos processos de coagulação e floculação da água.

Ou seja, a influência da distribuição de tamanho de partícula é de grande importância em diversas áreas de estudo, sendo importante sua compreensão, uma vez que atua na eficiência dos processos de tratamento de água (LAWLER, 1997).

3.8 Processamento de imagens: breve histórico

As técnicas de processamento e análise de imagens, que começaram a ter aplicação no início do século XX com o envio, através do sistema Bartlane de transmissão de imagens por meio de cabos submarinos entre Londres e Nova Iorque para publicação em jornais, passaram a ser uma ferramenta importante e eficiente para obtenção das características de partículas. Devido à necessidade da análise e melhoramento das imagens de televisão enviadas por sondas espaciais, das missões para a Lua, para Marte e dos voos tripulados para a Lua, houve um grande salto nas técnicas de processamento de imagem com o surgimento de computadores de grande porte no período da corrida espacial (MARQUES FILHO E VIEIRA NETO, 1999).

Hoje em dia a análise de imagem é empregada em diversas áreas de aplicação do conhecimento humano para resolver uma expressiva variedade de problemas, uma vez que requerem métodos capazes de melhorar a informação visual para análise e interpretação humana ou percepção automática por máquinas. Na Medicina, por exemplo, o uso de imagens no diagnóstico médico tornou-se rotineiro e os avanços em seu processamento têm permitido além do desenvolvimento de equipamentos inovadores uma maior facilidade de interpretação das imagens geradas por

equipamentos antigos, como o de raio X. Na Biologia, a capacidade de processamento automático de imagens obtidas de microscópios facilita a execução de tarefas laboratoriais com alto grau de precisão e repetibilidade. Além dessas, os avanços nas áreas de processamento de imagens e visão por computador beneficiam também áreas como Astronomia, Segurança, Publicidade, Direito, Geografia, Sensoriamento Remoto, Meteorologia bem como a área de Saneamento Ambiental (MARQUES FILHO E VIEIRA NETO, 1999).

Para o caso da obtenção da distribuição de tamanho de partícula, uma série de métodos de medição vem sendo empregado, podendo-se citar: espalhamento de luz por meio de laser; ultrassom; análise óptica de imagem, medição mecânica direta e análise digital de imagens, sendo que cada método resulta em dados precisos de tamanho de partícula com um conjunto de parâmetros pretendidos (JUNKER, 2006).

3.9 Imagem

Imagem é uma matriz cujos índices de linhas e colunas identificam um ponto da imagem e o correspondente valor da matriz naquele ponto identifica o nível de cinza daquele pixel. Os elementos desta matriz são chamados de elementos da imagem ou *pixel* (*picture element*), ou seja, *pixel* é o menor ponto que forma uma imagem digital, sendo que o conjunto de milhares de *pixels* forma uma imagem inteira. Estas matrizes variam de tamanho, apresentando geralmente, a forma quadrada $n \times n$ que possui níveis de cinza com potências inteiras de dois (MARQUES FILHO E VIEIRA NETO, 1999).

A qualidade das imagens a serem adquiridas para processamento e análise é de suma relevância. As câmeras atuais possuem 256 níveis de cinza representados pelo modo 8 bits ($2^8 = 256$) (MORUZZI, 2007).

Anteriormente a aquisição de uma imagem deve-se realizar o processo de calibração. Este procedimento informa o tamanho correspondente a uma determinada distância entre pontos, sendo etapa essencial para a determinação da distribuição de tamanhos de partículas por emprego de análise de imagem (MORUZZI, 2007).

Uma vez adquirida uma imagem deve-se realizar sua limiarização, ou seja, separar as regiões de uma imagem quando esta apresenta duas classes (o fundo e o objeto). Devido ao fato da limiarização produzir uma imagem binária à saída, o processo também é denominado de binarização. A forma mais simples de limiarização consiste

na bipartição de seu histograma, convertendo os pixels cujo tom de cinza é maior ou igual a certo valor de limiar em brancos e os demais em pretos (MARQUES FILHO E VIEIRA NETO, 1999). Assim os objetos de interesse possuem nível de brilho superior aos demais permitindo separá-los da imagem de fundo de modo que a contagem e medições possam ser realizadas (RUSS, 1992).

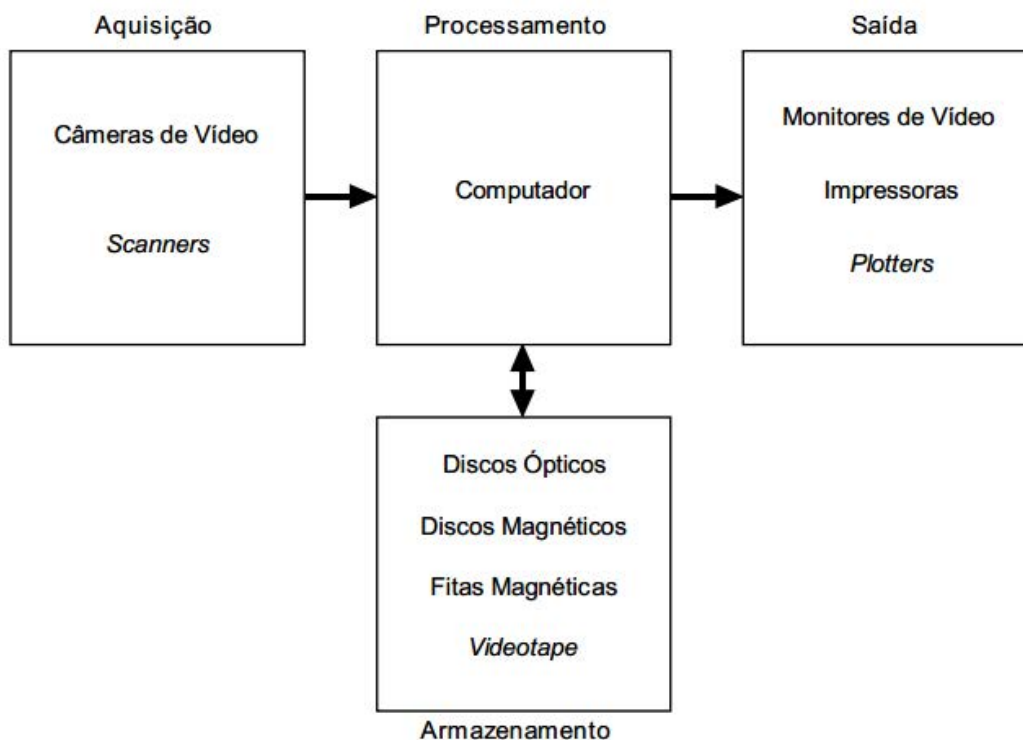
Com a segmentação da imagem realiza-se sua decomposição nas partes que as constituem até isolar os elementos ou objetos de interesse para análise, podendo ser considerada como uma etapa de classificação de pixels. Essa classificação é, em sua maioria, baseada no histograma de uma propriedade, de maneira geral, o nível de cinza. O histograma de uma imagem é uma boa aproximação à densidade de probabilidade da propriedade que ele representa uma vez que o número de pixels em uma imagem é geralmente muito elevado (PADILHA, 1998).

Para uma boa imagem deve-se evitar sua sobreposição, assim o comprimento do atraso entre dois frames é escolhido. Portanto, em tempo real, diferentes níveis de cinza detectados entre dois frames consecutivos são empregados com o objetivo de detectar objetos em movimento ou em estado estacionário (JUNKER, 2006).

3.10 Aquisição, processamento e metodologia de análise de imagem

Muitos sistemas de análises de imagem acabam por possuir um fluxograma básico a ser seguido. Este constitui em: adquirir (inicializar; definir o foco; capturar a imagem, otimizar a imagem adquirida); processar (podendo ser manual- medir/calcular); arquivar/armazenar e por fim exibir e analisar. (Figura 4). É de suma importância a definição do foco do *hardware* e do brilho além dos parâmetros de calibração e de processamento da imagem. O valor do limiar de binarização irá delinear os objetos de fundo com os pixels mais brilhantes (tons de cinza), que são de interesse para a análise e obtenção dos dados inicialmente propostos (JUNKER, 2006).

Figura 4 - Elementos de um sistema de processamento de imagens.



Fonte: Marques filho e Vieira Neto (1999).

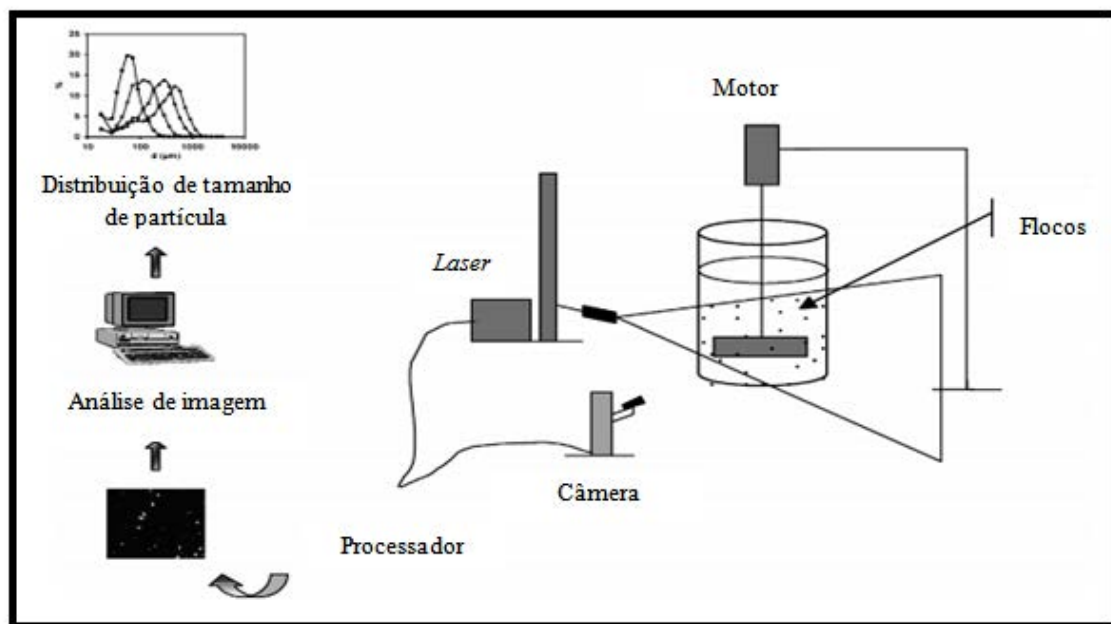
A etapa de aquisição tem como objetivo converter uma imagem em uma representação numérica adequada para o processamento digital subsequente. O armazenamento das imagens digitais é um grande desafio no projeto de um sistema de processamento de imagem uma vez da necessidade de grande quantidade de bytes para tanto. Pode ser dividido em: armazenamento de curta duração de uma imagem; armazenamento de massa para operações de recuperação de imagens relativamente rápidas e arquivamento de imagens, para recuperação futura, quando necessário. No processamento os procedimentos normalmente são expressos sob forma algorítmica, assim, a maioria das funções de processamento de imagens podem ser implementadas via *software*. Por fim, tem-se a etapa de exibição e análise sendo que atualmente os monitores em uso são capazes de exibir imagens com resolução de pelo menos 640 x 480 pixels com 256 cores distintas com uso de tecnologia *TRC* (Tubo de Raios Catódicos) (MARQUES FILHO E VIEIRA NETO, 1999).

Bouyer et. al. (2005) realizou o estudo da distribuição de tamanho de flocos e sua relação com fenômenos hidrodinâmicos em um tanque de mistura em estado estático por meio do emprego de análise de imagem. A análise consistiu, basicamente, em

aquisição e processamento de imagens capturadas dos flocos no tanque. Em comparação com algumas outras técnicas existentes, tais como microscopia, a análise de imagem possui a vantagem de ser uma técnica não invasiva e não causar deformações na amostra.

Um plano de iluminação de um tanque com luz fria (*laser*) foi projetado com a finalidade de visualizar os flocos. Prosseguiu-se com a captura das imagens das partículas por meio de câmera digital. Por fim, realizou-se o processamento das imagens capturadas por meio de *software* específico para posterior análise (Figura 5) (BOUYER, 2005).

Figura 5 - Imagem esquemática das etapas adotadas por Bouyer (2005) para aquisição e processamento de imagens capturadas dos flocos em um tanque de mistura.



Fonte: Bouyer *et al.* (2005).

De acordo com Junker (2006) o sistema de aquisição de imagens utiliza uma câmera conectada a um microscópio com um sinal de vídeo do campo de visão que são enviados assim a um computador, permitindo o processamento e análise das imagens. A câmera oferece uma alta sensibilidade de captura das imagens sendo que esta é digitalizada no espaço e produz *pixels*, cada um associado a um nível de cinza. Com o processamento da imagem tem-se o objetivo de elevar sua qualidade e como consequência analisá-las para obtenção de medições confiáveis. Câmeras de alta

velocidade de captura (*high-speed*), com velocidades atingindo 0,001s são empregadas para se evitar imagens tremidas. Por outro lado, torna-se necessário o uso de uma grande quantidade de luz, podendo ser obtida, por exemplo, por meio de luz fria (*laser*).

O presente trabalho teve como embasamento os métodos de aquisição e tratamento de imagem aplicados em Moruzzi (2005) e apresentados em Moruzzi e Reali (2007) e Moruzzi e Reali (2010). Em termos gerais os passos necessários consistem em: aquisição das imagens; tratamento digital; calibração; determinação das feições de interesse e dos tamanhos das partículas. Posteriormente foram obtidas as curvas de distribuição acumulada. Desta maneira, os procedimentos podem ser resumidos em:

✓ Aquisição

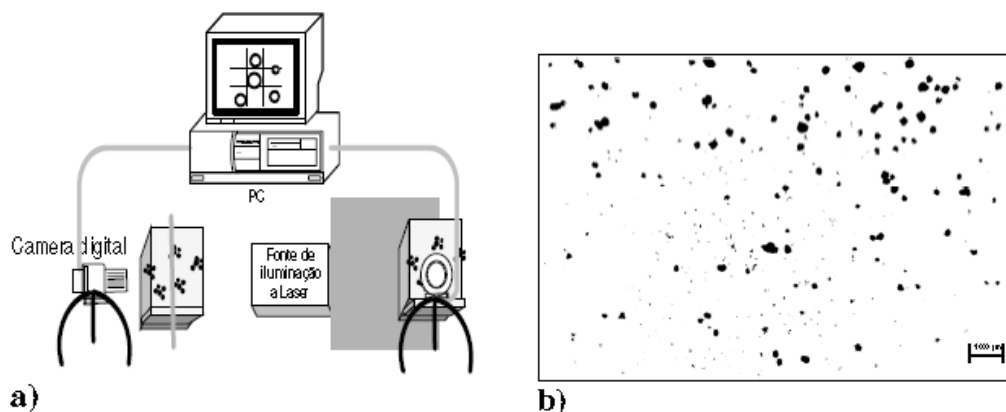
A aquisição das imagens dos flocos em suspensão deve ser realizada em diferentes condições de floculação (sem extração de amostras), quais sejam: gradiente médio de velocidade de floculação (Gmf) e tempo de floculação (Tf). As imagens são adquiridas utilizando velocidade de captura, iluminação, ampliação e resolução adequadas. Tais condições devem ser definidas em função de condições particulares disponíveis para análise somente na consecução da proposta.

O sistema foi composto pelos seguintes itens:

- I) Câmera digital (*low-light high-speed*);
- II) Suporte para fixação da fonte de iluminação a laser e da câmera;
- III) Fonte de iluminação a *laser*;
- IV) Conjunto de lentes para ampliação da imagem;
- V) *Software* para tratamento e obtenção das feições de interesse;
- VI) Computador.

Na Figura 6 está apresentada uma ilustração do arranjo experimental, visto em duas perspectivas.

Figura 6 - a) Arranjo experimental. b) exemplo de imagem dos flocos adquirida digitalmente após binarização utilizando *software* específico.

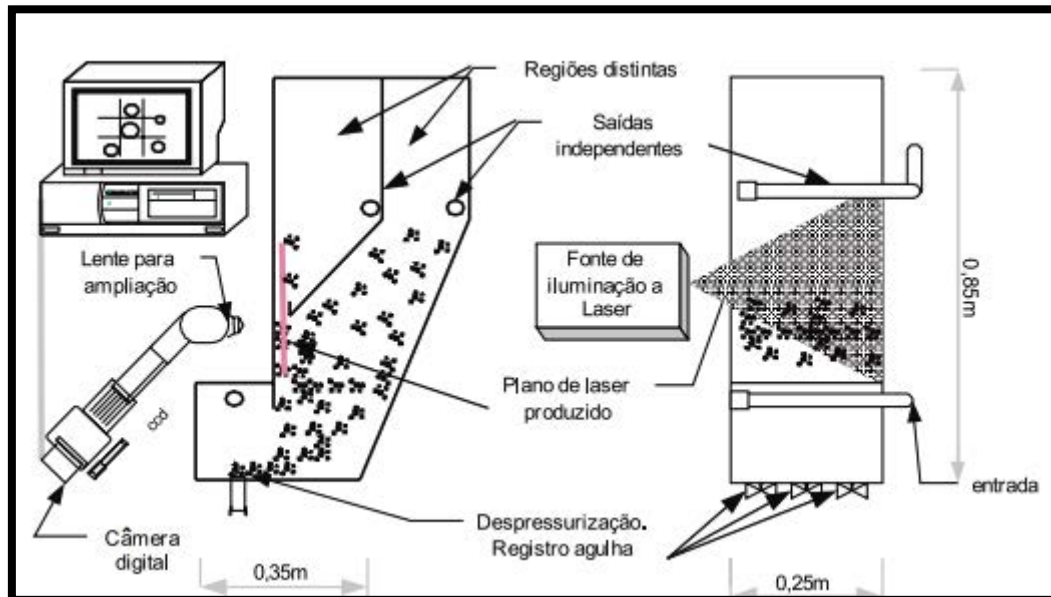


Fonte: Moruzzi (2005).

✓ Tratamento das imagens

O tratamento é determinado pela qualidade das imagens podendo ser alterado em decorrência desta fase. O tratamento, calibração, obtenção das feições de interesse e das classes de tamanho de partículas são realizados empregando o Software Image Pro-Plus versão 7.0. Os procedimentos usuais para tratamento das imagens envolvem etapas de correção da imagem, binarização (transformação em imagem de 1 bit), segmentação e detecção dos objetos e obtenção das feições de interesse. Deve-se proceder à calibração do sistema através da foto de calibração adquirida antes da obtenção de cada bateria de ensaios. Este procedimento informa qual é o tamanho correspondente a uma determinada distância entre pontos e constitui-se etapa fundamental na determinação da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) por análise de imagem (Figura 7).

Figura 7 - Desenho esquemático do arranjo experimental utilizado para aquisição das imagens e determinação da distribuição de tamanho de partícula, em escoamento contínuo.



Fonte: Moruzzi (2005).

3.11 Determinação do tamanho dos flocos: princípio da esfera equivalente e diâmetro fractal

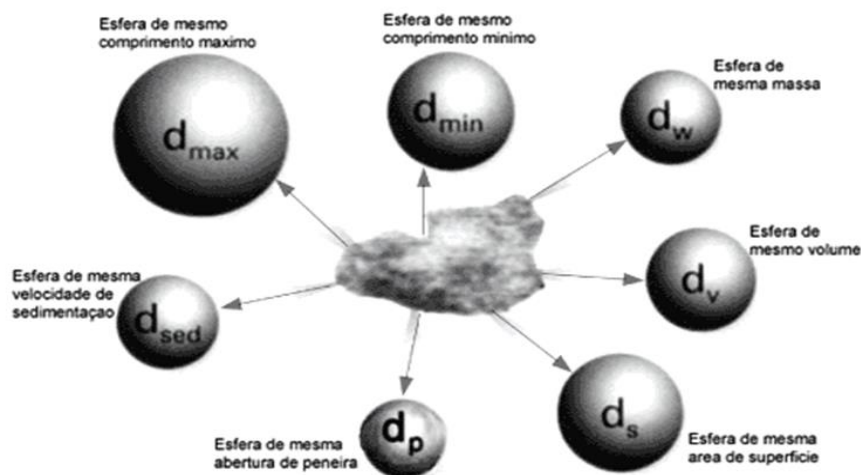
De acordo com Moruzzi *et al.* (2010) as partículas suspensas de afluentes e efluentes de sistemas de tratamento tanto de água como esgoto possuem estruturas tridimensionais, sendo geralmente de tamanhos variáveis, irregulares e com distintas propriedades físico-químicas.

Torna-se, assim, necessário o estudo de seus tamanhos, entretanto, os métodos existentes geram como resposta apenas um número que representa o tamanho da partícula. Assim sendo, a esfera é a única forma passível de ser representada por apenas um número em todas as direções do espaço tridimensional. De acordo com as distintas propriedades da esfera uma mesma partícula pode ser caracterizada por: perímetro da área projetada; volume; área superficial; maior ou menor dimensão, entre outras (SANTOS *et al.*, 2004).

Ou seja, o princípio da esfera equivalente relaciona alguma das propriedades citadas acima ao diâmetro de uma esfera. Ao relacionar essas distintas propriedades de uma

mesma partícula a um diâmetro de esfera equivalente, diferentes diâmetros equivalentes podem ser obtidos como mostra a Figura 8 (Allen, 1997).

Figura 8 - Distintos diâmetros equivalentes para uma mesma partícula.



Fonte: Rawle⁵ apud SANTOS (2004).

Junker (2006) listou uma série de expressões usadas para descrever diâmetro como pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1- Expressões que descrevem distintos diâmetros para determinação de tamanho de partícula.

Diâmetro médio aritmético da partícula	$d_a = \frac{(\sum d_i)}{n}$	n= número total de partículas; d _i = diâmetro da partícula i.
Diâmetro médio de Sauter (quantifica os efeitos de transferência de massa)	$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}$	n _i d _i ³ = volume; n _i d _i ² = área.
Diâmetro médio volumétrico	$d_{30} = \frac{(\sum 6V_b/\pi)^{1/3}}{n}$	V _b = volume total de bolhas
Diâmetro de Feret (diâmetro equivalente para um objeto circular com mesma área de um objeto irregular)	$d_F = (4A/\pi)^{1/2}$	A = número de pixels no floco.

Fonte: Extraído de Junker 2006.

⁵ RAWLE, A. *Basic principles of particle size analysis*. [http://www.malvern.co.uk/malvern/kbase.nsf/0/5E3F5A148D336B0480256BF2006E2195/\\$file/Basic-principles-of-particle-size-analysis-MRK034-low-res.pdf](http://www.malvern.co.uk/malvern/kbase.nsf/0/5E3F5A148D336B0480256BF2006E2195/$file/Basic-principles-of-particle-size-analysis-MRK034-low-res.pdf). (sem data). (Acesso: 5 Jan. 2004).

Dimensão fractal pode ser definida em termo linear, plano ou volumétrico, sendo chamado de valores uni-, bi-, ou tri- dimensional, respectivamente. O bi-dimensional é definido em termos da relação entre o aumento em raio e o correspondente aumento em massa contido dentro do círculo, ou, em termos geométricos:

$$A \propto r^{D_2}$$

Sendo A correspondente a soma das áreas de todas as partículas primárias contidas dentro de um círculo de raio r. Na geometria Euclidiana para círculos sólidos, $D_2 = 2$ (CHAKRABORTI *et al.*, 2003). Portanto, o diâmetro fractal varia de $D_2 = 1$ para reta à $D_2 = 2$ para área projetada de uma esfera (um círculo). Já o tri-dimensional, referente à dimensão fractal definida em termo de volume varia de $D_3 = 1$ para reta de partículas à $D_3 = 3$ para esfera (PRATSINIS, 1996).

De acordo com Chakraborti (2003) o conceito de fractal tem sido empregado como uma nova maneira para descrever a geometria e a variação das propriedades físicas, tais como: densidade, porosidade e velocidade de sedimentação. Tradicionalmente é usada a geometria clássica Euclidiana, baseada nas equações de Smoluchowski que considera os agregados como esferas impermeáveis.

3.12 Precisão e erros associados ao método

A aquisição de imagens não homogêneas geram ruídos. Padilha (1998) afirmou ser a segmentação etapa crítica do tratamento da informação. Utiliza a abordagem da similaridade entre pixels (binarização ou *thresholding*) e a descontinuidade entre eles (detecção de bordas) (RUSS, 1992). Portanto, ruídos presentes nesta etapa acabam por refletir em etapas posteriores interferindo de maneira negativa na reprodutibilidade e precisão dos resultados.

Um dos grandes problemas da aquisição de imagens é a captura de fotos claras em movimento, eliminando interferência nas medições. A habilidade de distinguir os objetos de interesse, neste caso flocos, do plano de fundo, evitar a sobreposição e a omissão de partículas além de rastros e imagens deformadas são fatores essenciais. Outras limitações para aquisição das imagens, que são baseadas em métodos ópticos, são turbidez bem como interferência de sólidos na suspensão (JUNKER, 2006).

Russ (1992) acrescenta também, como interferência no processo de tratamento da imagem, a determinação manual do limiar de binarização, uma vez que acaba havendo

variação entre os limiares selecionados de uma pessoa pra outra ou de uma mesma pessoa em um período de tempo. Essa variabilidade na binarização representa uma fonte de erro para a análise das imagens, já que pode haver o acréscimo ou exclusão de pixels de interesse. Assim para a definição do limiar de binarização deve-se buscar atingir reprodutibilidade (inerente à iluminação adotada e a subjetividade do operador) e precisão na definição das bordas.

Conforme definido por Gonzalez e Woods (2002) o histograma de uma imagem fornece informações estatísticas em relação à distribuição dos pixels, sobre o contraste da imagem bem como os níveis de iluminação. Torna-se assim, uma ferramenta essencial na etapa de pré-processamento já que é também muito empregado na etapa de segmentação. Ele é utilizado como sendo uma distribuição estatística dos pixels fornecendo informações sobre o desvio padrão (σ) e a média aritmética (X).

De acordo com Moruzzi *et al.* (2010) dois tipos de erros podem ocorrer durante a etapa de aquisição e tratamento das imagens, sendo eles, erro amostral e erro referente ao método de análise e tratamento, sobretudo durante a etapa de binarização. Sabe-se que o tamanho de cada pixel está diretamente relacionado com a resolução adotada e o grau de aumento utilizado na captura da imagem. Quanto maior a resolução e o grau de aumento menor o tamanho do pixel, tendo como consequência maior precisão na definição das bordas do objeto.

De acordo com Junker (2006) a automatização do processo de análise das imagens torna esta etapa independente do operador e como consequência evita tendências que possam surgir pelo tratamento humano (JUNKER, 2006).

3.13 Trabalhos com emprego de análise digital de imagem de partícula floclenta.

De acordo com Moruzzi (2005), existem distintos princípios de medição para a determinação de tamanho de partículas sendo as técnicas mais empregadas, no campo do saneamento, análise de imagem, princípio da difração a laser (LALLS) e interferência de campo (eletroresistividade *Coulter* e bloqueio de luz).

No Quadro 2 são apresentados trabalhos com seus objetivos, a técnica utilizada, descrição dos equipamentos, diâmetro equivalente e resultados obtidos nos estudos.

Quadro 2 - Trabalhos com emprego de análise digital de imagem de partícula floclenta.

Data/Autor	Objetivo	Técnica	Descrição	Diâmetro equivalente	Resultados
Zhang <i>et al.</i> (2011)	Investigar a dinâmica da floculação por meio da caracterização da distribuição de tamanho de partícula com emprego de distintos floculantes em diferentes modelos de água.	Sistema PIV de análise de imagem (particle image velocimetry).	Avançado sistema não intrusivo de captação de imagem para visualização de fluxo com técnica de rastreamento de partícula. Consiste em: Iluminação a laser, Vídeo Câmera high-speed e Software de processamento de dados	- Diâmetro equivalente (tamanho partícula): $(4A \pi)^{1/2}$ - Dimensão Fractal (estrutura morfológica): $A \propto P^{2/D_b}$	Logo após adição de floculante obtém-se elevado valor de (D_b). Por outro lado, posteriormente à quebra dos flocos (D_b) gerado possui baixo valor. Com a refloculação a estrutura fractal do floco pode apenas ser parcialmente recuperada $1.11 < D_b < 1.22$ (após 30 min. floculação lenta)
Dumas <i>et al.</i> (2007)	Analisar a relação entre distribuição de tamanho do floco e a hidrodinâmica em um tanque de mistura.	Sistema PIV de análise de imagem (particle image velocimetry).	Câmera CCD; Laser e Software VISILOG 5.	Relação com a escala Kolmogorov.	O tamanho do floco pode ser relacionado com a escala Kolmogorov e a distribuição de tamanho de floco depende do misturador adotada.
Bouyer <i>et al.</i> (2005)	Analisar a relação entre o tamanho do floco e a hidrodinâmica em um tanque de mistura em estado estático.	Sistema PIV de análise de imagem (particle image velocimetry).	Sistema não intrusivo e não destrutivo composto por: Laser (Mini Yag, 15 Hz, 30 mJ) para iluminação de um plano no tanque para visualização dos flocos; Câmera (Kodak Megaplus ES 1.0, 1008 X 1018 pixels) para captura das imagens; Software (VISILOG 5) para processamento e análise das imagens	Relação entre o diâmetro do floco e gradiente de velocidade global: $d \propto \varepsilon^{-1/4}$	Tamanho do floco decresce com o aumento do gradiente de velocidade; pH=3.5 $d_{mais\ provável} = 280 \mu m$ (30 rpm) $d_{mais\ provável} = 220 \mu m$ (45 rpm) $d_{mais\ provável} = 180 \mu m$ (60 rpm) pH=5 $d_{mais\ provável} = 80 \mu m$ (30 rpm) $d_{mais\ provável} = 70 \mu m$ (45 rpm) $d_{mais\ provável} = 40-60 \mu m$ (60 rpm)

continua

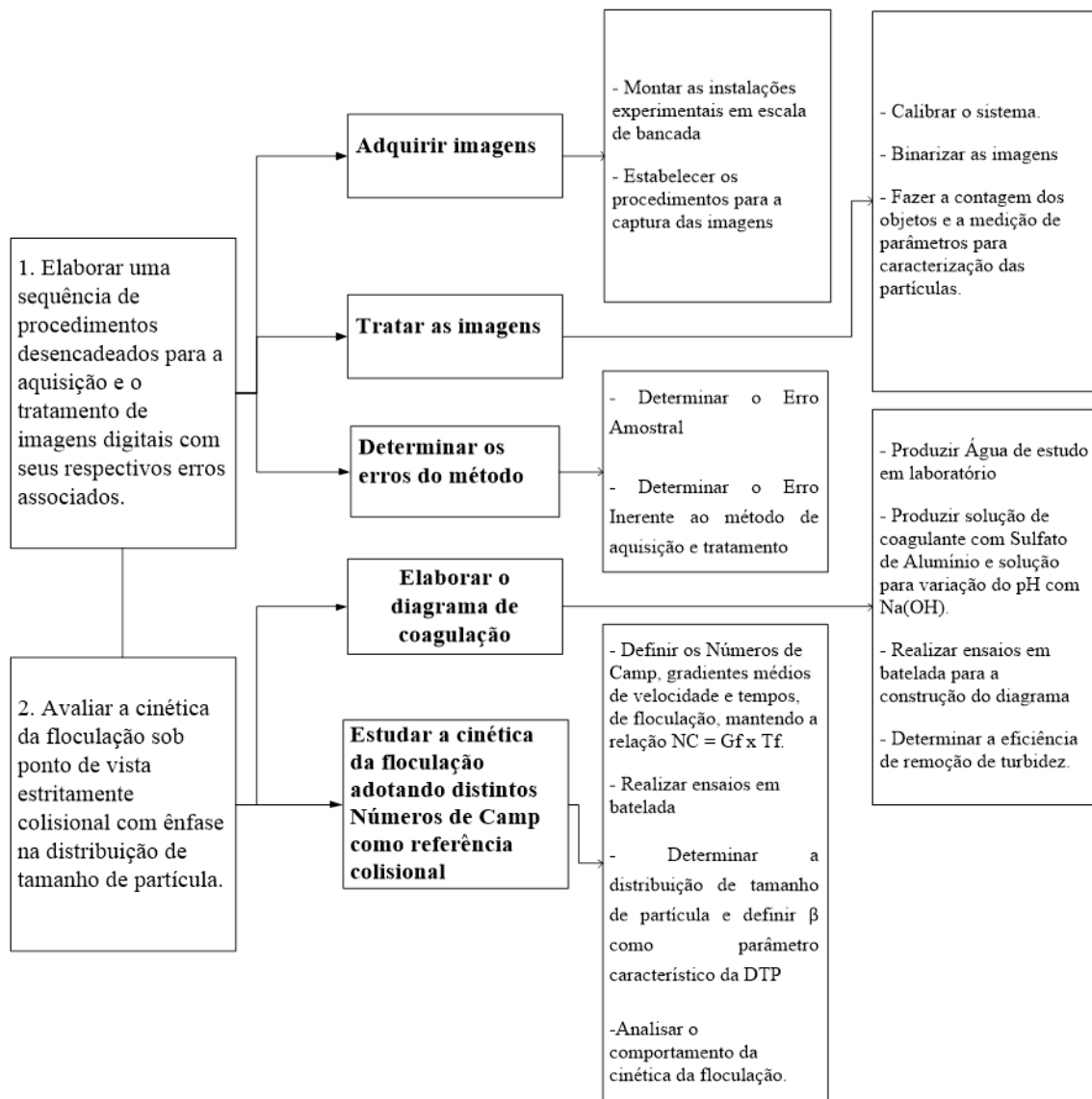
continuação do Quadro 2

Data/Autor	Objetivo	Técnica	Descrição	Diâmetro equivalente	Resultados
Chakraborti <i>et al.</i> (2003)	Calcular mudanças, de acordo com o tempo, na dimensão fractal de agregados durante a floculação de uma suspensão, inicialmente monodispersa de microesferas de látex	Sistema óptico não-intrusivo com análise digital de imagem.	Camera Kodak Megaplug model 1.4 ; Software NIH (National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA).	Dimensão Bidimensional Fractal D_2 : $A \propto r^{D_2}$	$1.48 < D_2 < 1.94$
Moon <i>et al.</i> (2001)	Avaliar a estrutura do floco empregando dimensão fractal.	Análise automática de imagem (AIA).	Video câmera; Monitor e Software.	Dimensão Fractal.	Flocos no domínio de varredura: $D_1 = 1.31$ $D_2 = 1.48$ $D_3 = 2.2$ Flocos no domínio de neutralização de cargas: $D_1 = 1.08$ $D_2 = 1.53$ $D_3 = 1.84$
Pratisinis <i>et al.</i> (1996)	Investigar o efeito de tipos distintos de misturadores e a taxa de cisalhamento na evolução do tamanho do floco e sua estrutura durante a floculação.	Análise digital de imagem.	Microscópio óptico (Nikon Labophot); Video câmera (Hitachi-Denshi); Computer (DTK 486 DX4); Software (Global Lab Image v. 2.0).	Comprimento máximo (L_n) e Dimensão Bidimensional Fractal (D_2)	O comprimento médio do floco aumentou rapidamente durante o crescimento do floco e estabilizou em um valor do estado estacionário, que aumentou com a diminuição do gradiente médio de velocidade com todos os misturadores; Para todos os misturadores o D_2 aumentou rapidamente durante o estado inicial da floculação.
Kramer <i>et al.</i> (1995)	Determinar a distribuição de tamanho de pequenas partículas suspensas em um fluxo turbulento.	Análise digital de imagem.	Câmera; Lente 20mm; Iluminação	Diâmetro circular equivalente (CD): $CD = \sqrt{\frac{4 \cdot Area}{\pi}}$	Baixo limiar de tamanho de partícula mensurável de $3\mu\text{m}$ com magnificação ótima de 40X e variação da concentração de 0.0005%-0,05% de sólidos (em base de massa).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da Figura 9 apresenta de maneira simplificada os objetivos estabelecidos no trabalho bem como as atividades desenvolvidas para a obtenção dos resultados.

Figura 9 - Fluxograma ilustrativo dos objetivos e das atividades realizadas.



Foi empregada técnica de análise digital de imagem para quantificar e determinar as características das partículas flocculentas. Os dados experimentais (diâmetro médio e número de partículas, por classe) foram linearizados para obtenção da função de distribuição de tamanho de partículas (DTP) e de seu parâmetro característico, β . Utilizou-se também estatística descritiva (assimetria, média, mediana, curtose, moda e desvio padrão) para avaliação dos resultados e estudo da cinética da floculação tendo como referência aspectos colisionais.

4.1 Elaboração da sequência de procedimentos desencadeados para a aquisição e o tratamento de imagens digitais com seus respectivos erros associados

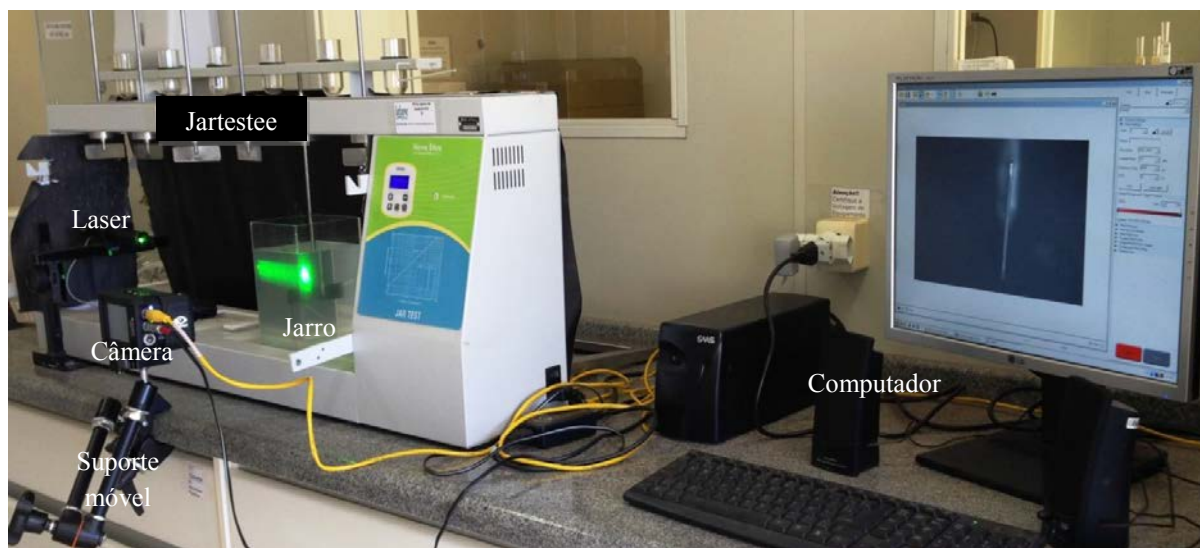
4.1.1 Aquisição das imagens

4.1.1.1 Montagem das instalações experimentais em escala de bancada

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado o Laboratório de Geoquímica Ambiental (LAGEA) do Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento – DEPLAN da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Rio Claro, SP.

A montagem e as instalações dos equipamentos, necessários para a realização dos ensaios propostos, foram realizadas conforme Figura 10.

Figura 10 - Instalação experimental em escala de bancada, constituída de equipamento Jartestee para realização de ensaios de coagulação/floculação, câmera *High-Speed*, Laser e computador com *Softwares* específicos para aquisição e tratamento das imagens.



O sistema de captação de imagens, adotado para a análise e estudo das partículas floculentas foi não intrusivo, contribuindo para a não ocorrência de deformações nas características dos flocos estudados. Para tanto, foi utilizada câmera *High-Speed Phantom Miro EX 4* (Figura 11).

Figura 11 - Câmera *High-Speed Phantom Miro EX 4*.



Fonte: Manual do fabricante. Site: <http://www.visionresearch.com/Products/High-Speed-Cameras/Miro-eX4/>.

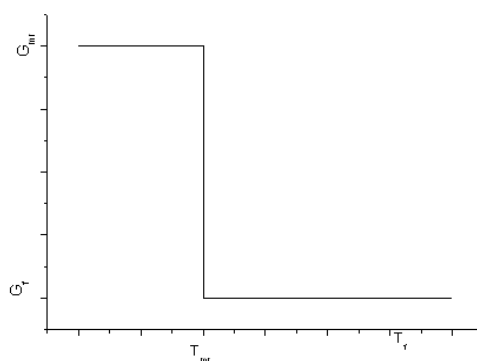
A câmera *Phantom Miro EX4* possui resolução máxima de 800 x 600 unidades elementares (*pixels*), ajuste de foco manual e objetivas intercambiáveis tendo sido acoplada a um conjunto de lentes de 50mm. Esse conjunto de lentes foi escolhido por ter possibilitado a razão de magnitude adequada para a visualização e determinação da DTP frente à resolução da câmera e campo visual, adotados. A câmera possui como acessórios: jogo de lentes, *DVD* suporte com manual da câmera *Miro*, bateria de *LED*, cartão de memória *8GB*, 5m de cabo de internet e cabos de captura *Miro*.

Para o processamento e estudo das imagens, a câmera *Phantom Miro EX4* foi conectada a um computador em que foi instalado o *Software Phantom PCC 2.2*. Por meio deste *Software* foram feitos os ajustes de resolução da imagem, velocidade de captura e frequência, necessários para a aquisição das imagens dos flocos gerados durante a etapa de floculação. Além deste, foi instalado o *Software Image Pro-Plus 7.0* utilizado para o tratamento das imagens digitais adquiridas.

Para os ensaios de coagulação/floculação foi utilizado o equipamento *Jarteste*. Este foi empregado para obtenção do par de valores dosagem ótimo de coagulante x pH de coagulação e determinação dos gradientes médios de velocidade e tempos, de mistura rápida e floculação.

Dois intervalos de tempo foram definidos, sendo o primeiro composto por gradiente médio de mistura rápida (G_{mr}) e tempo de mistura rápida (T_{mr}) e o segundo por gradiente médio de floculação (G_f) e tempo de floculação (T_f) (Figura 12).

Figura 12 - Diagrama hipotético dos patamares correspondentes ao estudo de mistura rápida (G_{mr}) e floculação (G_f), os diferentes tempos investigados na mistura rápida (T_{mr}) e na floculação (T_f). Faixa investigada: $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$; $T_{mr} = 10 \text{ s}$; $20 \text{ s}^{-1} \leq G_f \leq 60 \text{ s}^{-1}$; $5 \text{ min} \leq T_{mr} \leq 60 \text{ min}$.



Foi utilizado, como fonte de iluminação, *laser* (luz fria) com potência nominal de $2000mW$ e comprimento de onda verde de $532nm$. Foi montado um suporte para sua mobilidade vertical e horizontal. O feixe de luz colimado foi alterado por meio de lente cilíndrica buscando a projeção do plano de luz com espessura de 2 mm.

Para as medições dos valores de pH de coagulação e turbidez finais (uT) das amostras coletadas nos ensaios de coagulação/ floculação utilizou-se pHmetro *MS TECNOPON* e turbidímetro portátil *HACH* modelo 2100P.

4. 1.1.2 Procedimentos para aquisição das imagens

Para a aquisição das imagens buscou-se minimizar interferências (ruídos), caracterizadas por distorções devido à presença de pontos não associados às partículas. Para tal, a iluminação foi posicionada de maneira que os objetos que passassem pelo foco possuíssem nível de brilho mais acentuado que os demais.

Assim, os procedimentos e os pontos abordados para a captura das imagens listam-se abaixo:

1- Limpar a parede de acrílico do Jarteste para evitar interferências externas nas imagens capturadas.

2-Posicionar a câmera digital, *Phanton Miro EX 4*, à frente do jarro do Jarteste utilizado para os ensaios de coagulação/ floculação, por meio de suporte fixo à bancada do laboratório, com distância a permitir a captura das imagens no foco.

3-Definir o foco para aquisição das imagens manualmente, uma vez que a manutenção da posição focal é essencial, devendo a foto das partículas floculentas ser nítida.

4-Posicionar o plano de *laser* no foco já definido, perpendicularmente à aquisição das imagens.

5- Definir campo de visão suficiente para a representatividade do universo de partículas floculentas com a maior resolução possível, ou seja, maior detalhamento da imagem.

Portanto, foi empregada resolução máxima da câmera de 800 x 600 *pixels* e foi feita a captura de um fragmento da imagem de 14 x 11 mm do campo visual total cujo tamanho foi de 41 x 30,8 mm com magnitude de ampliação de 5:1.

6-Obter por meio do *Software Phantom PCC 2.2* um histograma com baixo desvio padrão e média aritmética, caracterizando uma imagem com definição entre preto e branco, diminuindo, portanto, as interferências por pontos não associados às partículas de interesse.

7-Adotar velocidade de captura das imagens sem rastros ou deformações e frequência de captura que gere uma amostra de imagens representativa do universo amostral. A velocidade de captura do obturador foi definida para 1/1250s (800 μ s) com taxa de aquisição das imagens de 10 Hz. As imagens foram capturas nos 10 segundos finais para cada tempo de floculação estudado, obtendo-se assim 100 imagens para cada ensaio.

4.1.2 Tratamento das imagens

Foi utilizado o *Software Image Pro-Plus 7.0* para o tratamento das imagens adquiridas, obtenção do número de partículas e dos atributos característicos dos flocos divididos em 19 classes.

Após o tratamento, foram criados arquivos em planilha eletrônica com informações sobre o número de partículas por imagem capturada e sobre os parâmetros característicos de interesse, sendo eles: área, aspecto, diâmetro médio e perímetro.

Comando Macro

Foi desenvolvido um comando macro dentro do *Software* a fim de automatizar e diminuir o tempo gasto com as sequências de procedimentos para o tratamento e obtenção do número e medidas das partículas floculentas, cuja rotina encontra-se no Apêndice A.

4.1.2.1 Calibração do sistema

A calibração é um procedimento que informa qual é o tamanho correspondente a uma determinada distância entre pontos e constitui-se etapa fundamental para a determinação da distribuição de tamanho de partículas por análise de imagem. Para tal, anteriormente à realização de cada bateria de ensaios, foi realizada a aquisição da foto de calibração.

As condições adotadas para a aquisição desta foto foram as mesmas adotadas para a aquisição das imagens das partículas floculentas (item 4.1.1.2). Assim, como referência de medida, foi utilizada uma régua, em centímetros, cuja imagem foi capturada no foco definido para a captura das imagens das partículas floculentas (Figura 18).

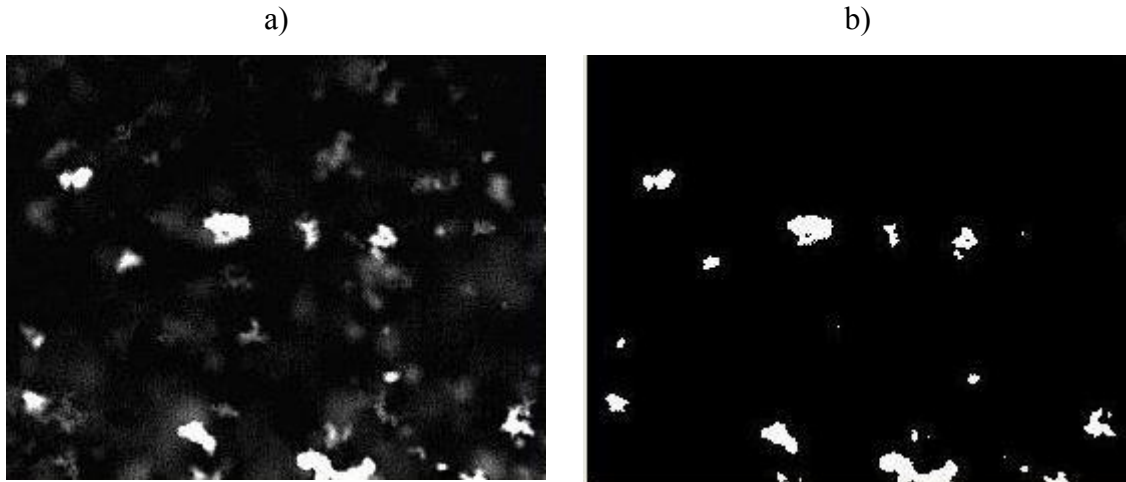
Antes de se iniciar o tratamento de cada agrupamento de imagens das partículas floculentas, foi realizada a calibração do sistema, por meio dos seguintes procedimentos: *file* → *open* → selecionar imagem de calibração → *menu* → *measure* → *calibration* → *spatial calibration wizard* → definir unidade de referência em mm → *next* → *draw reference line* → estabelecer a relação de medidas na janela *scaling* → *ok* → *finish*.

4.1.2.2 Binarização das imagens

A binarização das imagens teve como objetivo transformar a imagem em 1 bit, ou seja, preto e branco, separando objetos de interesse do plano de fundo de maneira a eliminar as interferências de pontos não associados as partículas de interesse.

Para tanto, foi determinado um limiar de binarização, visualmente, por meio de comparação com a imagem de origem. Ressalta-se que o limiar adotado foi específico para cada grupo de imagens composto por 100 fotos. Esse limiar variou de 0 à 255 tons de cinza com as extremidades, 0 correspondente ao tom branco e 255 ao tom preto uma vez que as imagens adquiridas foram de 8 bits ($2^8 = 256$) (Figura 13).

Figura 13 - a) Imagem de origem, não binarizada (8 bits). b) Imagem binarizada (1 bit).



4.1.2.3 Contagem dos objetos e medição de parâmetros para caracterização das partículas

Após a calibração do sistema e tratamento das imagens (binarização), visando sua segmentação, foi adotada uma sequência de comandos, conforme segue: *menu* → *measure* → *count/size* → *automatic Bright Objects* → *count*. Para a separação de objetos agrupados foram obedecidos os seguintes passos: *count/size* → *edit* → *watershed Split*. As medições dos objetos foram feitas, em seguida, por meio da sequência de comandos: *measure* → *select measurements*.

O *Software* possui uma grande variedade de parâmetros de medidas para caracterização das partículas. Dessa maneira, foram selecionadas área, aspecto (razão entre o maior eixo pelo menor), diâmetro médio (comprimento médio dos diâmetros obtidos a partir da medida dos comprimentos de dois em dois graus com referência ao centroide) e perímetro (comprimento da linha de contorno do objeto) para compor o banco de dados gerado em planilha eletrônica, posteriormente analisada.

4.1.3 Determinação dos erros do método

4.1.3.1 Amostral

Durante a etapa de aquisição e tratamento das imagens pode ocorrer o erro amostral, ou seja, erro referente à representatividade da amostra estudada.

Inicialmente, regressão linear do número de objetos capturados por número de um conjunto preliminar de imagens, foi empregada para a estimativa do valor médio de partículas capturadas por imagem. Posteriormente, o erro amostral relativo à média foi calculado para intervalos de confiança de 90%, 95% e 99% para uma amostra de 100 imagens considerando uma população infinita de partículas como universo amostral.

Foi calculado, também, o erro de β , parâmetro característico de distribuição de tamanho de partícula (*item 4.2.2.3*), média e mediana para grupos de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 80 imagens tendo como referência os valores obtidos para 100 imagens conforme Equação 11.

$$e\% = \left(\frac{Av - Ref}{Av} \right) 100 \quad \text{Equação (11)}$$

Sendo:

$e\%$: erro;

Av : valor avaliado (10, 20, 30, 40, 50, 50 e 80 imagens);

Ref : valor adotado como referência (100 imagens).

4.1.3.2 Erro inerente ao método de aquisição e tratamento

O erro denominado inerente refere-se aquele decorrente do método de análise e tratamento das imagens, sobretudo durante a etapa de binarização. Portanto, foram analisados três tipos de erros:

1-Erro referente à qualidade da imagem (erro de aquisição).

As imagens adquiridas nesse trabalho foram monocromáticas, ou seja, imagens produzidas por apenas um comprimento de onda. A qualidade com que foram adquiridas influencia diretamente no seu tratamento e na obtenção da distribuição de tamanho de partículas.

Conforme dito por Russ (1992), o histograma da imagem é ferramenta fundamental para a definição do limiar de binarização. Ele apresenta distintos picos das várias fases ou estruturas presentes no campo de visão sendo que quanto maior a distinção entre esses picos mais binarizada é a imagem e maior é o grau de definição entre objeto de interesse e fundo da imagem.

Portanto, imagens com histograma possuindo menor valor de dispersão estatística, ou seja, menor desvio padrão são mais bem definidas quando comparadas com imagens com maiores valores de dispersão. Além disso, quanto mais transladado para o eixo da esquerda for o histograma, menor a média aritmética. Assim, mais próximo à ausência de cor (preto) será o plano de fundo da imagem sendo mais fácil realizar sua binarização.

A referência empregada para análise das imagens capturadas foi a imagem com menor desvio padrão e menor média aritmética. Dessa maneira, cinco imagens foram capturadas mantendo-se a condição de iluminação e variando-se a abertura do diafragma (mecanismo de controle do tamanho do orifício por onde passa a luz). Seus histogramas foram analisados por meio dos valores obtidos de desvio padrão e de média aritmética sendo definido um coeficiente de variação (CV) para cada parâmetro, conforme Equação 12.

$$CV\% = \left(\frac{Av-Ref}{Av} \right) 100 \quad \text{Equação (12)}$$

Sendo:

Ref = valor adotado como referência (menor valor obtido para σ e \bar{X})

Av = valor avaliado (os demais valores obtidos).

Por fim, foi analisada também a relação do comportamento do brilho nas escalas de cinza por meio da análise do desvio padrão com a média aritmética.

2-Erro referente à escolha do limiar de binarização (erro do tratamento).

Para análise do erro referente à adoção de determinado limiar de binarização foi realizada a binarização específica para dois grupos de imagens, contendo 100 imagens cada um, para um mesmo valor de Gf e valores de número de Camp distintos, escolhidos aleatoriamente.

Posteriormente, o valor obtido para cada grupo de imagens foi extrapolado para o outro grupo e o erro na DTP foi avaliado. Portanto, os dois grupos foram tratados duas vezes, sendo a primeira vez com seu limiar específico e a segunda com o limiar extrapolado do outro grupo estudado.

Adotando como referência o limiar específico de cada grupo, foram calculados: erro absoluto e relativo, erro em relação ao parâmetro representativo de distribuição de tamanho de partícula β e os erros referente à média, mediana, moda e desvio padrão conforme Equação 11.

$$e\% = \left(\frac{Av - Ref}{Av} \right) 100 \quad \text{Equação (11)}$$

Sendo:

$e\%$: erro;

Ref = valor adotado como referência (valor obtido do limiar específico);

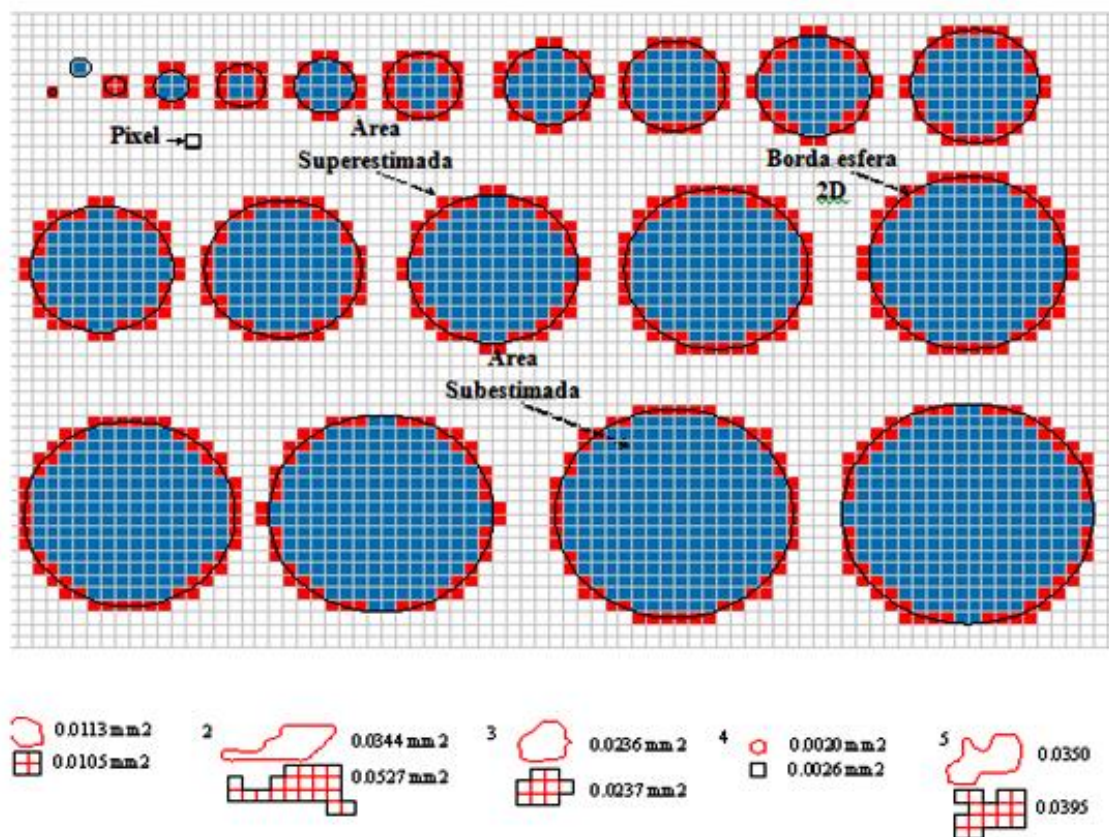
Av = valor avaliado (valor obtido da extrapolação do limiar).

3-Erro referente à resolução e à magnitude de ampliação adotada na captura da imagem (tamanho do *pixel*).

O erro referente à resolução e a magnitude de ampliação adotada na captura da imagem foi determinado em função da área dos *pixels* das imagens para cada tamanho médio dos flocos nas faixas pré-estabelecidas. Como a área pode ser sub ou superestimada para cada faixa estudada, dependendo do limiar de binarização empregado, o erro foi calculado em função da área de pixels (para mais ou para menos) em relação à área do objeto (Figura 14).

O valor obtido para o tamanho do pixel foi de 0,05133 mm com área de 0,00263 mm².

Figura 14 – Relação entre pixel(s) e o tamanho dos objetos empregados para a determinação da DTP e de erro para objetos regulares e irregulares.



4.2 Avaliação da cinética da floculação tendo como referência aspectos colisionais, com ênfase na distribuição de tamanho de partícula (DTP)

4.2.1 Elaboração do Diagrama de Coagulação

4.2.1.1 Água de estudo

A água de estudo foi preparada em laboratório a partir de solução de caulinita. Esta foi preparada tendo com base o trabalho de Pádua (1994) e adaptada do trabalho de Gregory e Yukselen (2004). Assim, 40 g de caulinita da marca Fluka foram misturadas em 2 L de água deionizada durante duas horas no equipamento Jarteste com gradiente médio de velocidade de 1200 s^{-1} . Após a agitação a solução foi deixada em repouso

durante 12 horas e o sobrenadante, aproximadamente 800 mL da solução, foi utilizado para constituir a solução mãe. A turbidez da água bruta (solução mãe) foi de 5000 ± 200 uT. A água utilizada nos ensaios (água de estudo) foi preparada com a adição de 10 ml da solução de caulinita em 2L de água deionizada para obtenção de turbidez de 25 ± 2 uT. O valor da turbidez foi estabelecido de acordo com a pesquisa desenvolvida pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), pertencente ao mesmo projeto de origem do trabalho aqui executado.

4.2.1.2 Coagulante e Soluções Estoque

O coagulante empregado foi o sulfato de alumínio comercial 40% ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) sendo preparada solução estoque com adição de $46,708 \pm 0,002$ g do coagulante à 1L de água deionizada de forma a se obter para cada ml de solução, concentração de 10^{-3} g/L de alumínio. Para a variação do pH foi produzida solução estoque de NaOH 0,1N com adição de 4g do soluto em 1L de água deionizada.

4.2.1.3 Ensaios em batelada para construção do diagrama

Com o objetivo de selecionar o par de valores dosagem coagulante x pH de coagulação ótimo para a realização dos demais ensaios do presente trabalho, foram conduzidos experimentos para obtenção do diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio, usando o procedimento tradicional de ensaio de Jarteste (descrito por DI BERNARDO *et al.*, 2002). O mecanismo de coagulação adotado foi o de varredura.

A característica da água de estudo foi fixada conforme item 4.2.1.1, variando-se o pH de coagulação e a dosagem do coagulante sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$), em termos do Alumínio - DA.

Os parâmetros de operação adotados foram: gradiente médio de velocidade de mistura rápida, $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$, tempo de mistura rápida, $T_{mr} = 10 \text{ s}$, gradiente médio de velocidade de floculação, $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ e tempo de floculação, $T_f = 20 \text{ min}$.

O Jarteste foi então programado com esses parâmetros, sendo adicionado a cada jarro, 2L da água de estudo (turbidez de 25 ± 2 uT). Para cada batelada, ou seja, 1 ensaio com seis jarros, foi mantida a concentração do coagulante em todos os jarros. As concentrações da solução de NaOH adicionadas à cada um foram distintas a fim de se

obter diferentes faixas de pH. A dosagem do coagulante variou de 0,25 a 5,25 ml da solução estoque de sulfato de alumínio varrendo uma faixa de pH de 4,5 a 9,0.

Uma vez programado o Jarreste deu-se início aos ensaios. Ao fim da mistura rápida amostras foram coletadas para medição do pH de coagulação e ao término do tempo de floculação o aparelho foi desligado para a coleta de amostras para a leitura de turbidez remanescente. Estas foram coletadas do jarro em tempo correspondente à velocidade de sedimentação de 2,5 cm/min, uma vez que corresponde a taxa de aplicação superficial aparente empregada em decantadores convencionais.

4.2.1.4 Determinação da eficiência de remoção de turbidez

Por meio da determinação do residual remanescente de remoção de turbidez foi construído o diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio. A velocidade de sedimentação adotada para a confecção do diagrama de coagulação foi de 2,5 cm/min., sendo obtido um valor de turbidez remanescente em função do par de valores dosagem de coagulante x pH de coagulação. A eficiência de remoção de turbidez foi calculada de acordo com a Equação 13:

$$E\% = \left(1 - \frac{N}{N_0}\right) 100 \quad \text{Equação (13)}$$

Sendo:

$E\%$ = valor da eficiência de remoção em porcentagem;

N = valor da turbidez final (residual remanescente);

N_0 = valor da turbidez inicial;

$\frac{N}{N_0}$ = fração residual remanescente.

Assim, curvas de mesma turbidez residual remanescente foram traçadas visando à obtenção de uma região cuja eficiência de remoção fosse a maior possível. Analisado o diagrama de coagulação gerado, foi selecionado o par de valores dosagem de coagulante x pH de coagulação ótimo para posterior estudo da cinética da floculação adotando distintos números de Camp como referência colisional.

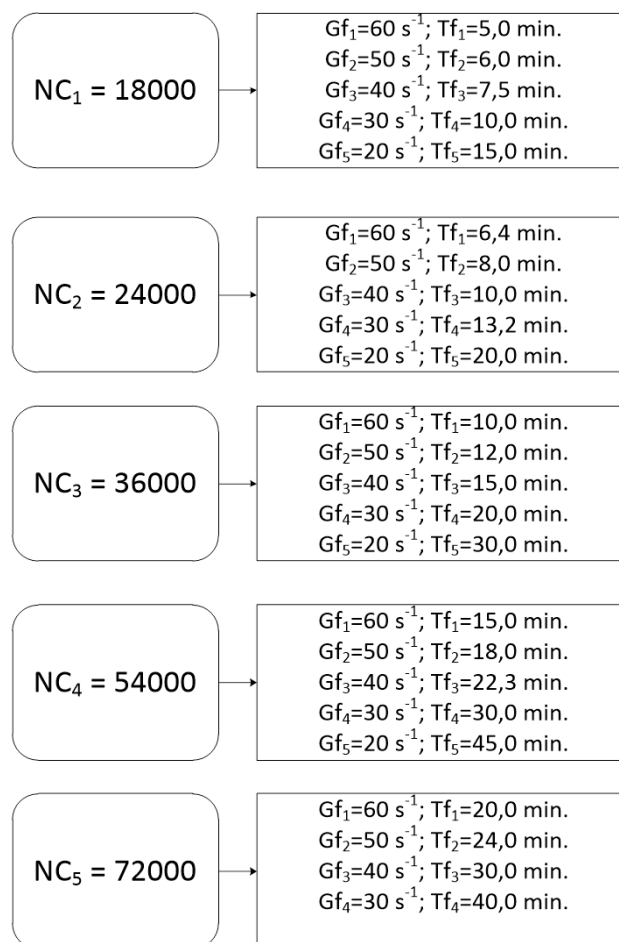
4.2.2 Estudo da cinética da floculação adotando distintos números de Camp como referência colisional

4.2.2.1 Definição dos números de Camp, gradientes médios de velocidade e tempos, de floculação, mantendo a relação $NC = Gf \times Tf$.

Dentre os parâmetros envolvidos na floculação, destaca-se a oportunidade de choque entre as partículas, representada pelo adimensional número de Camp (NC). Este adimensional apresenta como fundamento, que são igualmente importantes na oportunidade de choques entre as partículas, o gradiente médio de velocidade x o tempo de detenção ($NC = Gf \times Tf$).

O número de Camp foi utilizado como referencia colisional para a análise da cinética da floculação. Desta maneira foram fixos os seguintes valores de números de Camp: $NC_1=18000$; $NC_2=24000$; $NC_3=36000$; $NC_4=54000$; $NC_5=72000$ e para cada NC cinco gradientes médio de floculação foram estabelecidos, sendo: $Gf_1= 60 \text{ s}^{-1}$; $Gf_2= 50 \text{ s}^{-1}$; $Gf_3= 40 \text{ s}^{-1}$; $Gf_4= 30 \text{ s}^{-1}$; $Gf_5= 20 \text{ s}^{-1}$. Os tempos de floculação, em minutos, foram determinados mantendo-se a relação $NC = Gf \times Tf$, conforme Figura 15:

Figura 15 - Fluxograma esquemático dos números de Camp e gradientes médios de velocidade de floculação adotados com seus respectivos tempos de floculação.



4.2.2.2 Ensaios em batelada

Para o estudo da cinética da floculação ensaios em batelada foram realizados. Assim, adotou-se a condição ótima de coagulação (dosagem de coagulante x pH, Gmr e Tmr), definida em etapas anteriores.

As imagens das partículas floculentas foram obtidas conforme especificado no item 4.1.1.2. Ao fim dos ensaios foram coletadas amostras para medição de turbidez remanescente, utilizando a Equação 13, nas velocidades de sedimentação de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min com a finalidade de construção das curvas de sedimentação.

4.2.2.3 Determinação da distribuição de tamanho de partícula e definição de β como parâmetro característico da DTP

Foi utilizado o diâmetro médio (comprimento médio dos diâmetros obtidos a partir da medida dos comprimentos de dois em dois graus com referência ao centroide) como base para o tamanho medido visando à análise da distribuição de tamanho de partícula (DTP).

Os dados foram classificados em 19 classes de tamanho com variação de 0,05 mm com menor faixa de 0,001 a 0,05 e maior de 0,9 a 0,95 mm. Posteriormente, esses dados foram ajustados para uma função contínua de distribuição de tamanho cuja forma apresenta-se conforme Equação 9.

Assim, a DTP pode ser expressa por meio do parâmetro característico de distribuição de tamanho de partícula β e A . Esses coeficientes foram obtidos a partir da linearização dos dados obtidos do tratamento das imagens por meio da Equação 14.

$$\text{Log} \left[\frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \right] = \text{Log} A - \beta \text{Log}(d_p) \quad \text{Equação (14)}$$

O parâmetro A representa o número de dados avaliados, que quanto maior, maior o número de partículas em cada faixa de tamanho avaliada. Já a inclinação da reta, representada por β é uma medida da quantidade relativa de partículas em cada faixa de tamanhos.

Conforme Crittenden *et. al* (2005), um valor negativo de β representa o domínio de partículas maiores, igual a 1, distribuição homogênea e, positivo, domínio das partículas de menor tamanho.

Para a análise dos dados foi utilizada estatística descritiva, por meio de ferramentas de análise de distribuição descritiva (assimetria, média, mediana, curtose, moda e desvio padrão).

4.2.2.4 Análise do comportamento da cinética da floculação

Para o estudo do comportamento da cinética da floculação foi utilizado como referência o efeito do número de Camp (NC), para diferentes valores de gradiente médio de velocidade de floculação (Gf) visando verificar a distribuição de tamanho de partículas por meio de seu parâmetro característico de DTP, β , conforme Figura 15.

Dessa maneira, foi avaliada a relação do β com NC sendo $\beta = f(NC)$ e $NC = g(Gf)$ e a relação de β com Gf sendo $\beta = f(Gf)$ e $Gf = g(NC)$.

Por meio da regressão linear dos dados obtidos foram definidos dois coeficientes de sensibilidade (C.S) correspondentes ao coeficiente angular da reta. Portanto, C.S de β por Gf , obtido da relação β x NC, e C.S de β por NC, obtido da relação β x Gf . Por meio destes coeficientes determina-se o quanto β varia em relação às perturbações causadas por Gf e NC. Dessa maneira, relacionou-se para cada Gf e NC seu correspondente C.S. de β .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Procedimentos desenvolvidos para a aquisição e tratamento de imagens digitais

A seguir é apresentada a sequência de procedimentos desencadeados para a aquisição, tratamento e obtenção das classes e tamanhos das partículas flocculentas. As análises foram efetuadas em amostras indeformadas por meio de instalação em batelada com método não intrusivo de aquisição de imagem.

A adoção de procedimentos automáticos por meio do desenvolvimento de um comando macro no programa de tratamento de imagens *Image Pro-Plus 7* foi ponto de suma importância ao permitir a análise de um grande número de objetos e conseqüentemente queda do erro decorrente do número de amostras.

Os procedimentos padronizados para a aquisição das imagens das partículas, durante a etapa de floculação, são descritas conforme segue:

5.1.1 Aquisição das imagens

- 1- Montar a instalação experimental constituída de *Jarteste*, computador com *software* específico para a aquisição e tratamento das imagens, câmera High-Speed para aquisição não intrusiva dos flocos e *laser* para projeção do plano homogêneo de luz;
- 2- Posicionar a câmera à frente do jarro do *Jarteste* em que será realizado os ensaios de coagulação/floculação com distância a se obter focagem do ponto de interesse para a captura dos flocos;
- 3- Regular a câmera para acionar o modo de captura múltipla de imagens na velocidade de abertura de 1/2500 (800 μ s), frequência de 10 Hz e resolução máxima de 800x600 *pixels*;
- 4- Posicionar a régua de calibração à frente à câmera no interior do *Jarteste*;

- 5- Ligar o equipamento de *laser* e focar o plano de luz na régua de referência, perpendicularmente a aquisição das imagens;
- 6- Fixar o foco da máquina na régua de referência (ajuste de foco manual);
- 7- Ajustar histograma da imagem fornecida pelo *software Phantom 2.2* de maneira a se obter baixo desvio padrão e média aritmética com definição bem marcada entre preto e branco;
- 8- Fotografar a régua de calibração;
- 9- Retirar a régua de referência sem alterar o foco;
- 10- Realizar procedimentos para ensaio tradicional em Jarteste;
- 11- Acionar o botão da câmera para a captura das imagens nos 10 segundos finais do tempo de floculação;
- 12- Salvar os arquivos imagens no PC e repetir o procedimento para todos os ensaios de coagulação/floculação pré-definidos.

5.1.2 Tratamento das imagens

O tratamento das imagens foi realizado no programa *Image Pro-Plus 7.0* após a aquisição e estocagem das imagens. Os resultados referentes à obtenção de tamanho dos flocos foram tabelados em Excel pelo *software* sendo utilizados para análise e determinação das classes e distribuição de tamanho de partícula em planilha eletrônica.

Para a descrição dos procedimentos adotados para esta etapa foi utilizada imagem real obtida dos ensaios realizados. Etapas do tratamento dos dados e construção dos gráficos não serão citadas aqui tendo sido descritas em materiais e métodos.

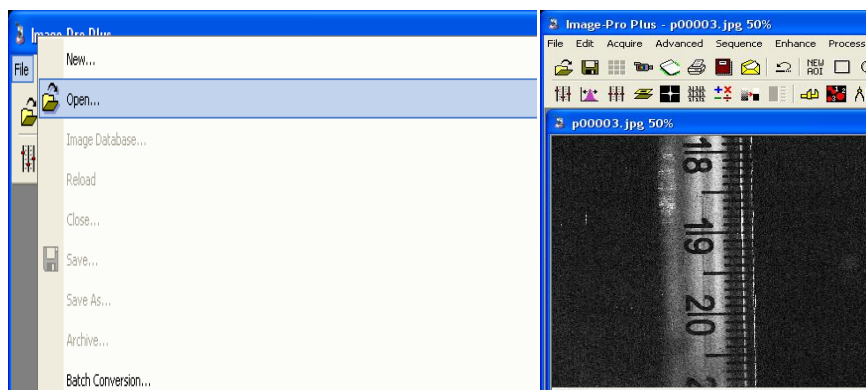
Os procedimentos padronizados para o tratamento e obtenção das classes e DTP das imagens capturadas são descritas conforme segue:

Calibração

Inicialmente deve-se realizar a calibração do sistema por meio da foto de calibração adquirida previamente a obtenção de cada bateria de ensaios. A imagem foi adquirida com nitidez suficiente para a delimitação das bordas sendo a etapa de binarização, neste momento, dispensável. Os passos adotados foram:

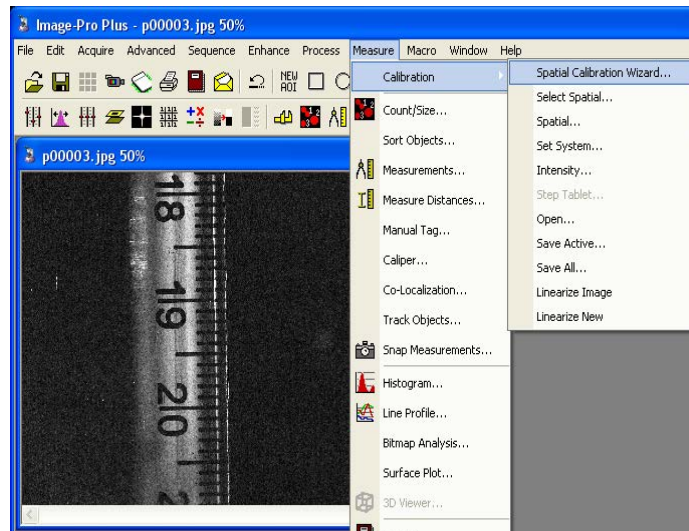
- 1- Na barra de ferramentas do programa *Image-Pro Plus 7.0* selecionar a opção *File* → *Open* e escolher o arquivo a ser calibrado (Figura 16).

Figura 16 - Tela de abertura do arquivo imagem para calibração.



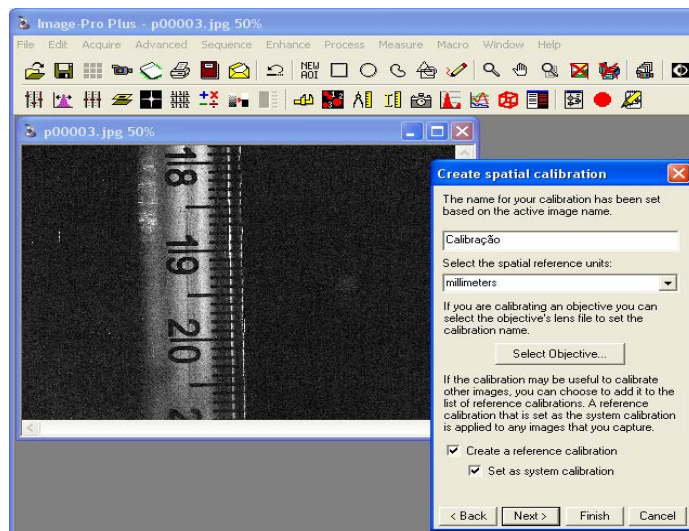
- 2- No *menu* clicar em *measure* → *calibration* → *spatial calibration wizard* (Figura 17).

Figura 17 - Procedimento inicial de calibração da imagem da régua, adotada como referência de medida.



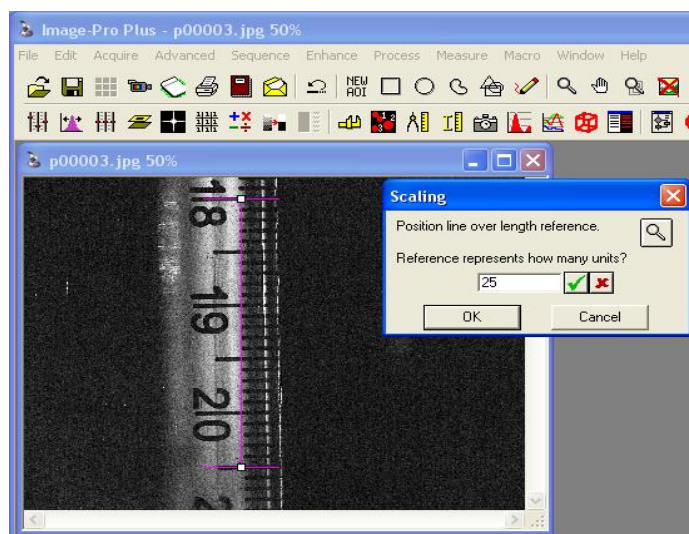
- 3- Informar o nome da calibração e a unidade de medida, milímetros, selecionar *create a reference calibration* e *set as system calibration* (Figura 18).

Figura 18 - Nome de calibração e unidade de medida adotada.



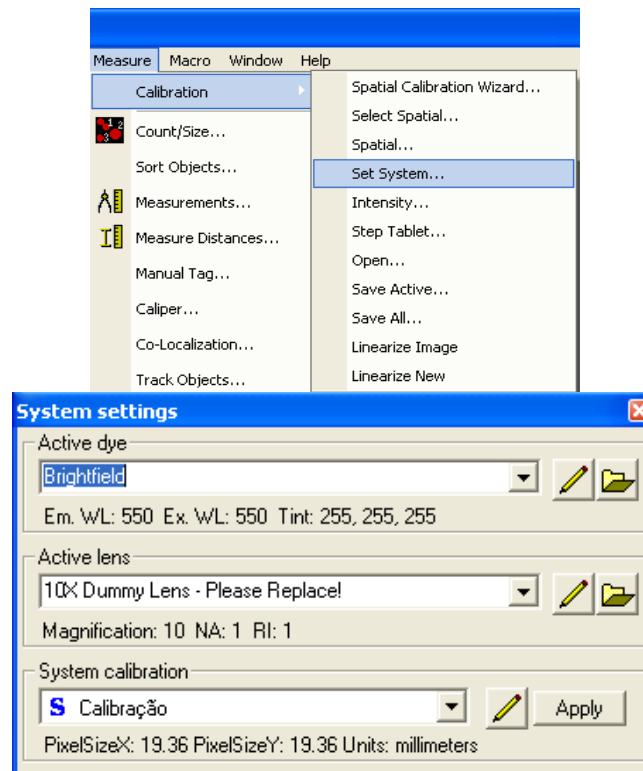
- 4- Desenhar a linha de comprimento conhecido clicando na régua de referência e informar o tamanho e a unidade de medida correspondente (Figura 19).

Figura 19 - Escolha do comprimento de referência com base em um tamanho conhecido.



- 5- Após a escolha do comprimento de referência deve-se clicar em *ok* para finalizar a calibração e anteriormente a cada tratamento de um grupo de imagens, realizar sua ativação. Para a ativação clicar em *measure* na barra de ferramentas → *calibration* → *set system*. Na janela *system settings* selecionar Calibração em *system calibration* e por fim clicar em *apply* pra ativar a calibração do sistema (Figura 20).

Figura 20 - Ativação da calibração do sistema.



RESUMO CALIBRAÇÃO

- 1- Abrir o arquivo imagem contendo a foto de calibração;
- 2- Nomear a calibração, informar a unidade de medida e calibrar o tamanho conhecido: *menu* → *measure* → *calibration* → *spatial calibration wizard* → informar o nome da calibração e a unidade de medida (mm) → selecionar *create a reference calibration* e *set as system calibration*;
- 3- Clicar em ok e finalizar a calibração;
- 4- Ativar a calibração correspondente, cada vez que for efetuar a determinação de tamanho da série de imagens coletadas para aquela determinada calibração: *menu* → *measure* → *calibration* → *set system* → selecionar Calibração em *system calibration* → *apply*.

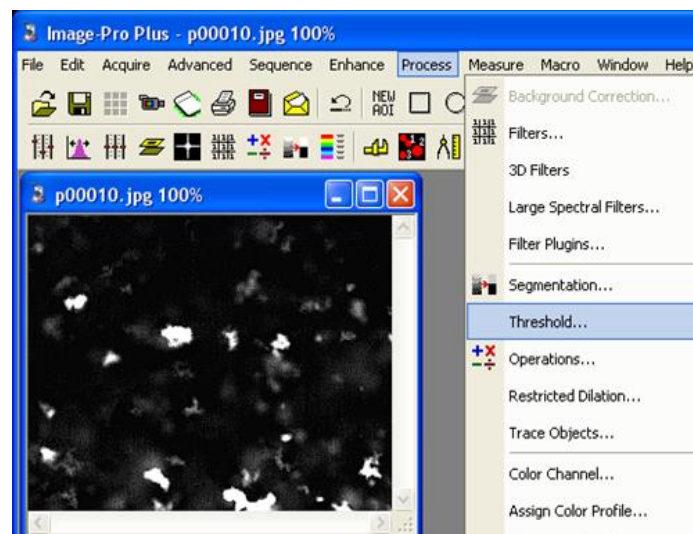
Binarização

As imagens foram adquiridas de maneira que os objetos que passaram pelo foco possuísem nível de brilho mais acentuado que os demais originando uma imagem com boa distinção entre objeto e fundo facilitando etapa de binarização da imagem conforme MORUZZI (2005; 2007). O limiar de binarização foi determinado manualmente em função do número de objetos que apareciam na imagem de acordo com este ou aquele limiar adotado.

Os procedimentos adotados para a binarização da imagem foram:

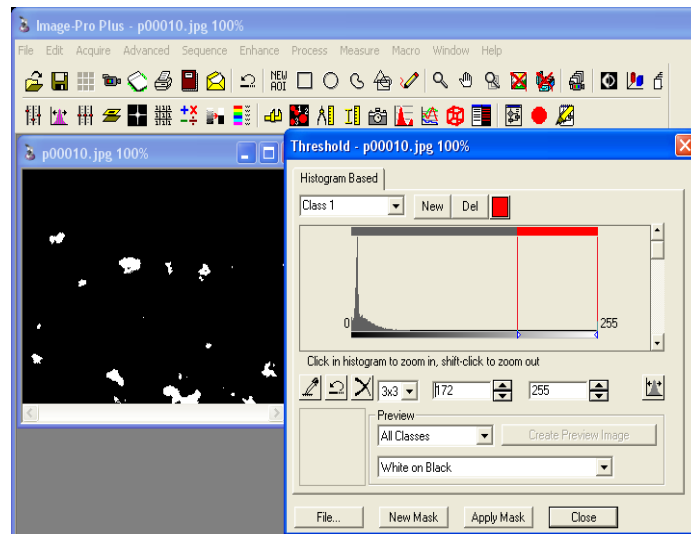
- 1- Abertura do arquivo imagem que se quer tratar: *menu* → *open* → *file*. Clicar em *process* → *threshold* para a binarização manual da imagem (transformação da imagem em 1 bit) (Figura 21).

Figura 21 - Binarização da imagem por meio da ferramenta *threshold* modo manual.



- 2- A janela *threshold* abrirá um histograma de intensidade em que deverá ser escolhido o limiar de binarização de maneira manual por comparação visual com a imagem de origem (Figura 22). Após a escolha do limiar, clicar em *apply mask* e a binarização será realizada.

Figura 22 - Escolha do limiar de binarização por meio do histograma de intensidade.



RESUMO BINARIZAÇÃO

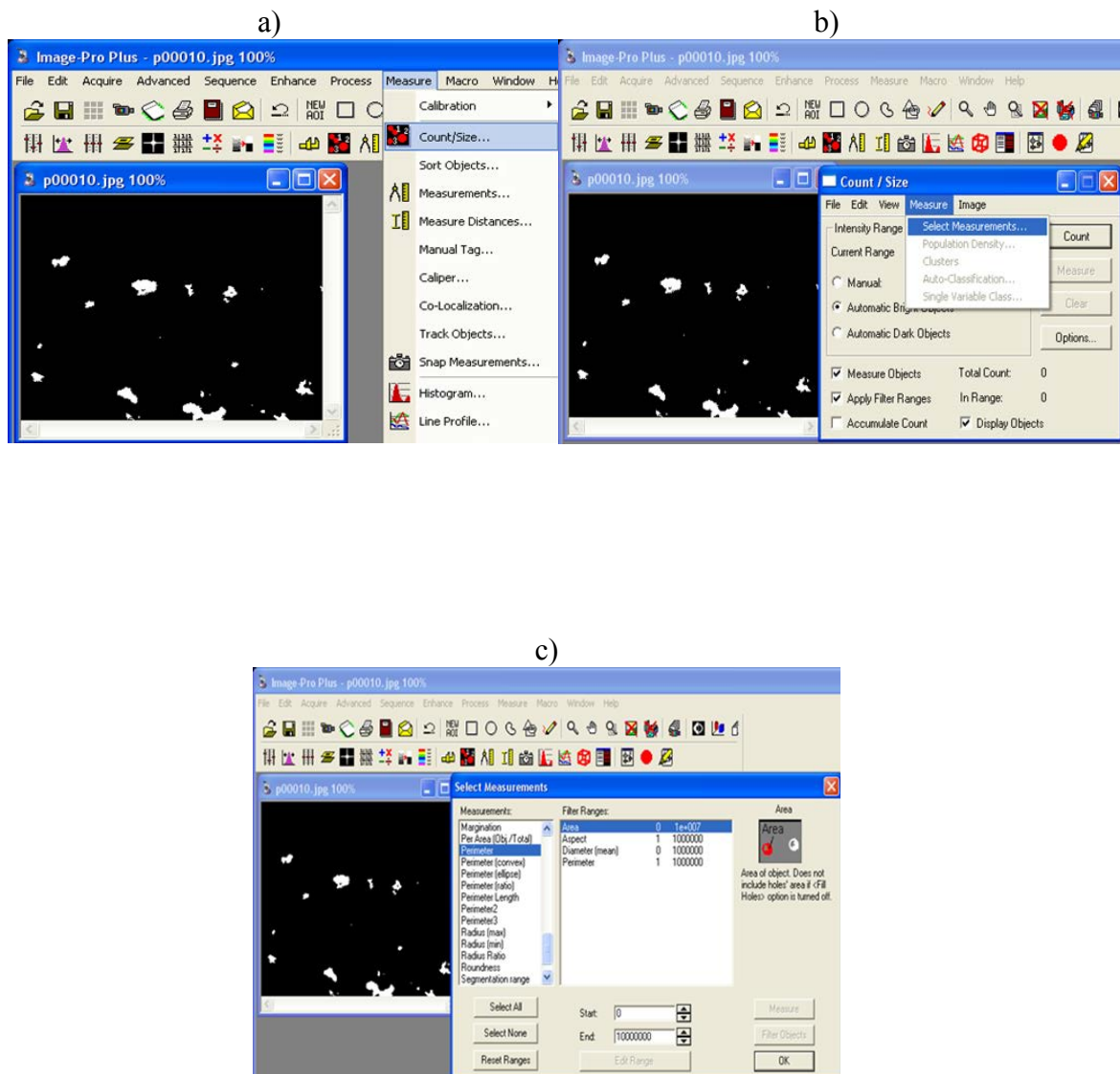
- 1- Abrir o arquivo imagem que se deseja tratar;
- 2- Clicar em process → *threshold* para a binarização manual da imagem;
- 3- Escolher o limiar de binarização por meio do histograma de intensidade e clicar em *apply mask* para finalizar a binarização.

Segmentação e detecção dos objetos e obtenção dos tamanhos

Para a segmentação e detecção dos objetos e obtenção de seus tamanhos os seguintes procedimentos foram executados:

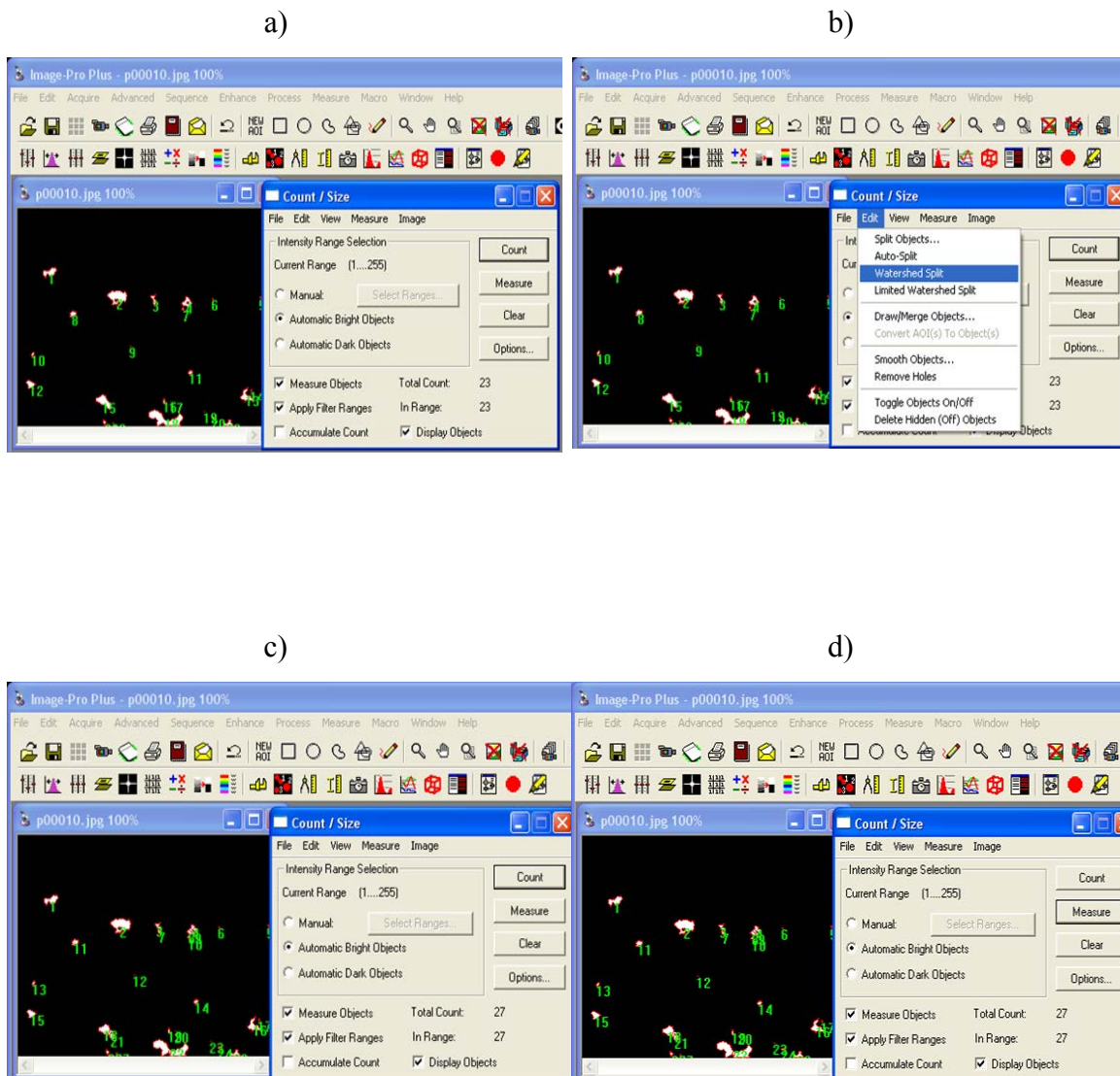
- 1- Na barra de ferramentas selecionar *measure* → *count/size*. Na janela *count/size* clicar em *measure* → *select measurements*. Em *select measurements* selecionar: area, aspecto, diâmetro médio e perímetro e clicar em *ok*. Verificar que em todos os parâmetros selecionados *start* seja 0 e caso contrário alterar manualmente para valor 0. (Figura 23).

Figura 23 - a) Seleção da ferramenta de contagem de objetos. b) Seleção do comando de escolha dos parâmetros a serem medidos. c) Seleção dos atributos que se deseja determinar.



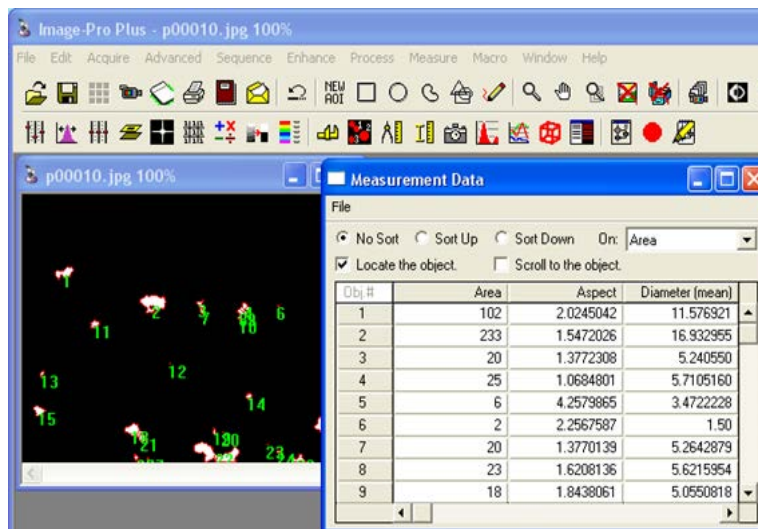
2- Feita a escolha dos parâmetros a tela *count/size* irá aparecer. Selecionar *automatic bright objects* e clicar em *count*. Os objetos são delineados, o número de cada objeto é apresentado e a contagem é mostrada em *total count*. Uma vez que pode haver objetos com intersecção deve-se clicar em *edit* e selecionar *watershed split* para separá-los. Um novo *total count* irá aparecer. Depois de identificados os objetos devem ser analisados. Para isso selecionar o comando *measure* para a obtenção de suas medidas (Figura 24).

Figura 24 - a) Contagem do número de objetos presentes na imagem. b) Separação dos objetos por meio da utilização da ferramenta *watershed split*. c) Nova contagem de objetos posteriormente ao uso da ferramenta *watershed split* com a detecção, ou segmentação, do número de flocos da imagem. d) Medição dos objetos.



- 3- Para a visualização dos valores, das medidas obtidas para cada parâmetro selecionado para cada objeto identificado, selecionar *view* → *measurements data*. Estes dados foram tabelados em planilha em Excel sendo determinadas 19 classes de tamanho de acordo com os diâmetros obtidos (Figura 25).

Figura 25 – Aba de visualização das medidas obtidas para os parâmetros analisados para cada objeto identificado.



Os procedimentos de tratamento descritos devem ser repetidos para cada grupo de imagem analisado. Sempre que o programa for iniciado, deve-se realizar a etapa de calibração ou deve-se efetuar a leitura da calibração previamente realizada.

Os dados obtidos são tratados em planilha eletrônica, com definição das classes de tamanho por meio dos valores dos diâmetros obtidos, uma vez que o número máximo de classificação permitido pelo programa *Image - Pró Plus 7.0* são 16. Observada maior necessidade de classificação, para o presente trabalho, foram determinadas 19 classes com faixa inicial de 0,001 a 0,05 mm e faixa final de 0,9 a 0,95 mm com variação de 0,05 por classe.

Rotinas através do *script* do programa podem ser criadas com a finalidade de automatizar o processo e otimizar o tempo de trabalho, sendo empregado neste estudo um comando macro que automatizou todo o procedimento desencadeado para a aquisição, tratamento e obtenção dos tamanhos dos flocos analisados.

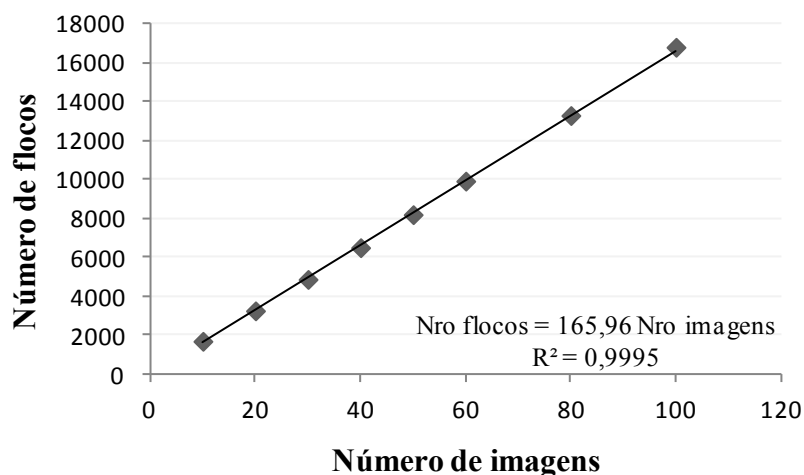
RESUMO SEGMENTAÇÃO E DETECÇÃO DOS OBJETOS E OBTENÇÃO DOS TAMANHOS

- 1- Para a detecção dos objetos selecionar *measure* → *count/size*. Na janela *count/size* clicar em *measure* → *select measurements*. Em *select measurements* selecionar: *area*, *aspecto*, *diâmetro médio* e *perímetro* e clicar em *ok*;
- 2- Em *count/size* selecionar *automatic bright objects* e clicar em *count*. Os objetos são delineados, o número de cada objeto é apresentado e a contagem é mostrada em *total count*;
- 3- Para a segmentação de objetos com intersecção deve-se clicar em *edit* e selecionar *watershed split* para separá-los. Um novo *total count* irá aparecer;
- 4- Para a análise dos objetos selecionar o comando *measure* para a obtenção de suas medidas;
- 5- Para a visualização dos valores, das medidas obtidas para cada parâmetro selecionado para cada objeto identificado, selecionar *view* → *measurements data*.

5.1.3 Erros associados ao método de aquisição e tratamento da imagem

5.1.3.1 Amostral

A estimativa do valor médio de partículas capturadas por imagem, obtida por meio da regressão linear do número de objetos capturados por número de um conjunto preliminar de imagens, é evidenciado na Figura 26.

Figura 26 - Número de flocos obtidos por número de imagens tratadas.

Observa-se uma distribuição homogênea dos flocos na massa líquida com média aproximada de 165 flocos por imagem e coeficiente angular de 165,96 para um coeficiente de determinação de 99,95%.

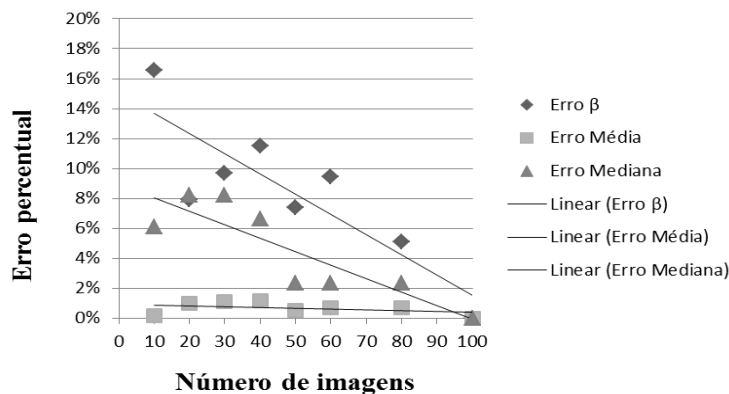
O erro amostral relativo à média, para intervalos de confiança de 90%, 95% e 99%, para uma amostra de 100 imagens considerando uma população infinita como universo amostral foi de 0,8% com erro máximo admitido (EMA) em valor absoluto de $11,40 \cdot 10^{-4}$ mm, 0,9% com EMA de $13,58 \cdot 10^{-4}$ mm e 1,1% com EMA de $16,14 \cdot 10^{-4}$ mm, respectivamente (Tabela 1). O erro máximo admitido em valor absoluto foi determinado a partir no número de amostras (flocos) presentes em cada fase do estudo. Os resultados mostraram, dessa maneira, que os erros foram muito pequenos para intervalos de confiança elevados.

Tabela 1 - Erro amostral relativo à média e erro máximo admitido para intervalos de confiança de 90, 95 e 99%.

Intervalo de confiança (%)	Erro máximo admitido em valor absoluto (mm)	Erro amostral relativo à média (%)
90	0,001140	0,8
95	0,001358	0,9
99	0,001614	1,1

O erro de β (parâmetro característico de distribuição de tamanho de partícula), média e mediana para os grupos de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 80 imagens, tendo como referência os valores obtidos para 100 imagens, pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 – Erro percentual para diferentes grupos de imagens tendo os valores obtidos para 100 imagens como referência.



Conforme ilustra a Figura 27 os diferentes erros devem ser analisados de maneira isolada. Para erro médio, observa-se que a análise de um grupo de 10 imagens é suficiente para a representação do universo amostral. Entretanto, os valores da mediana e de β mostraram sensibilidade com a variação do número de imagens, uma vez que houve decréscimo do erro com seu aumento. Portanto, a depender do parâmetro a ser analisado deve-se atentar ao número de fotos a serem analisadas, fator de grande importância para a confiabilidade dos resultados.

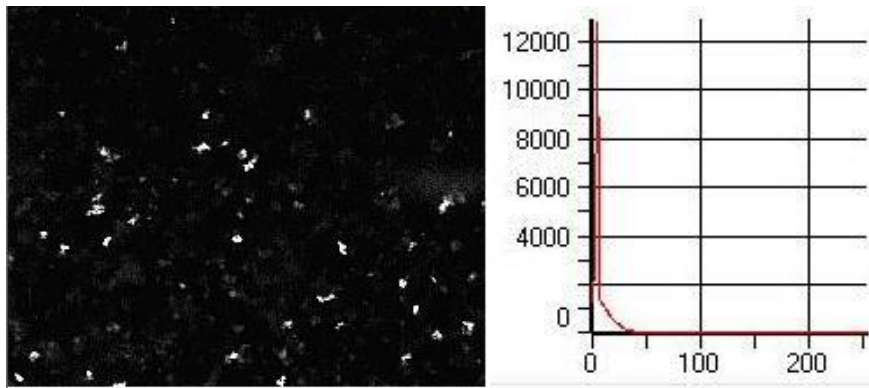
5.1.3.2 Erro inerente ao método de aquisição e tratamento das imagens

1-Erro referente à qualidade da imagem

A Figura 28 ilustra cinco imagens distintas entre si pelo aumento da entrada de luz no sistema, devido às distintas aberturas de diafragma adotados. Nota-se que conforme houve maior abertura do diafragma (crescente de a para e), maior foi o nível de interferências caracterizadas por distorções devido à presença de pontos não associados às partículas e consequentemente maior foi o desvio padrão e a média aritmética.

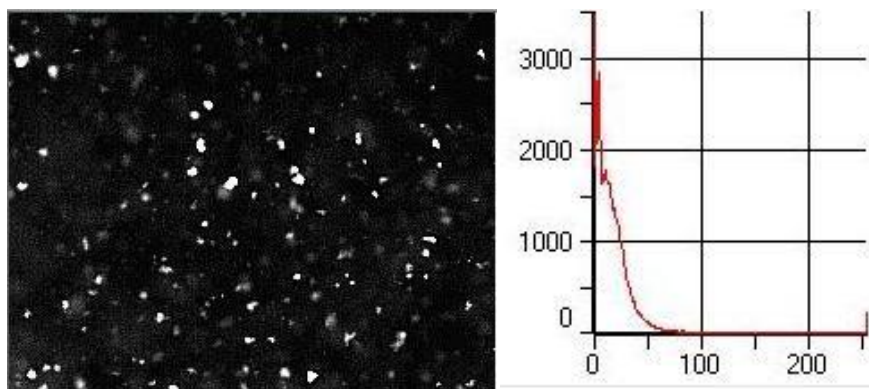
Figura 28 - Imagens de flocos capturados para cinco aberturas distintas de diafragma (entrada de luz) crescente de a para e, e seus respectivos histogramas (número de ocorrência de cada nível de cinza na imagem $0 \leq X \leq 255$) com informações de desvio padrão (σ) e média aritmética (\bar{X}). As imagens foram adquiridas em 8 bits.

a)



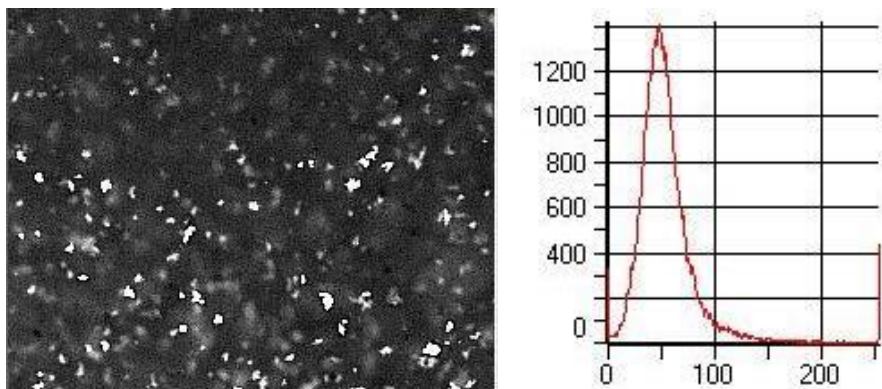
$\sigma: 21,87$ e $\bar{X}: 11,34$

b)



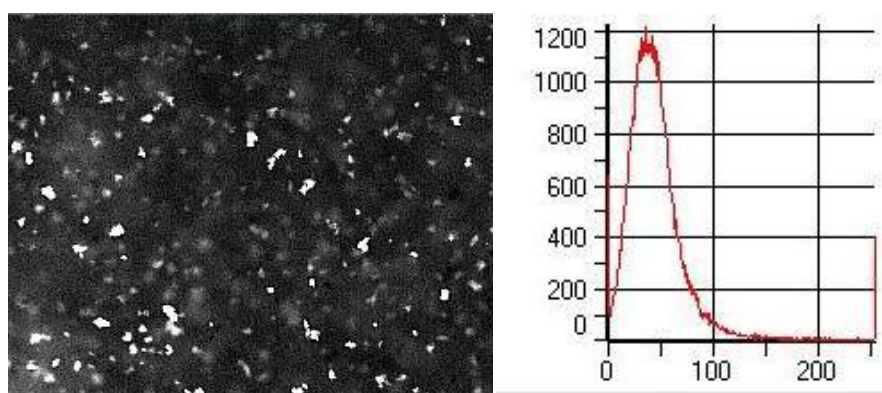
$\sigma: 31,05$ e $\bar{X}: 20,4$

c)



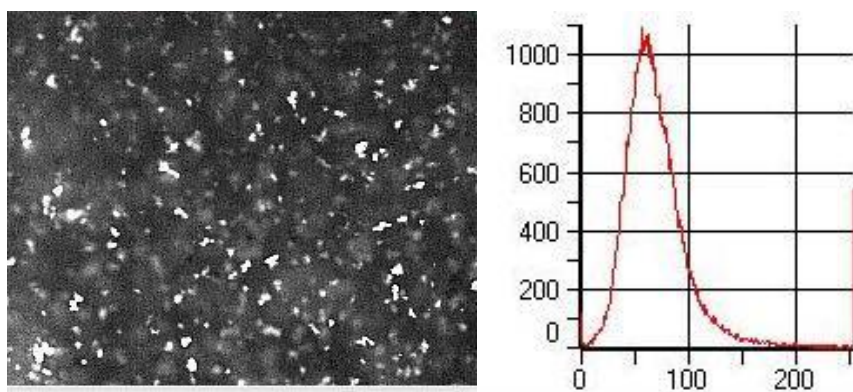
$\sigma: 36,78$ e $\bar{X}: 58,24$

d)



$\sigma: 37,17$ e $\bar{X}: 48,52$

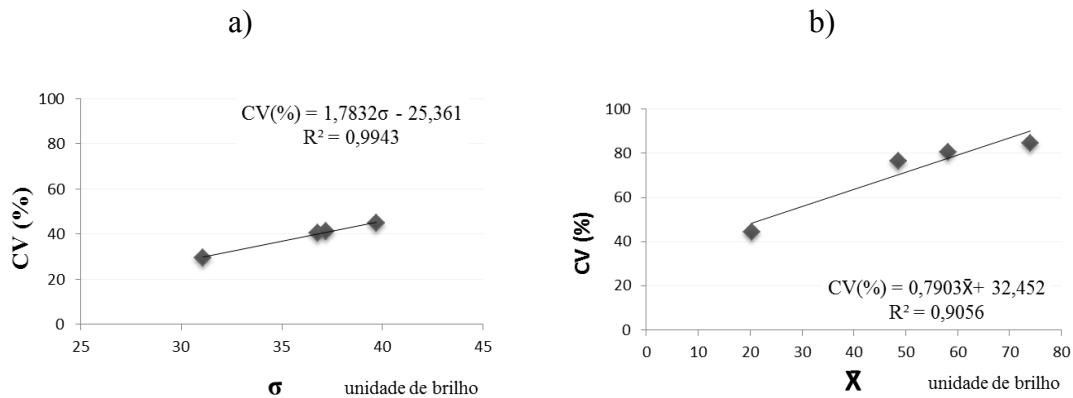
e)



$\sigma: 39,70$ e $\bar{X}: 74,00$

O coeficiente de variação (CV) obtido da análise dos cinco histogramas para desvio padrão (σ) e média aritmética (\bar{X}) pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 - Coeficiente de variação, tendo como referência o menor valor obtido para cada parâmetro, para: a) Desvio padrão. b) Média aritmética.

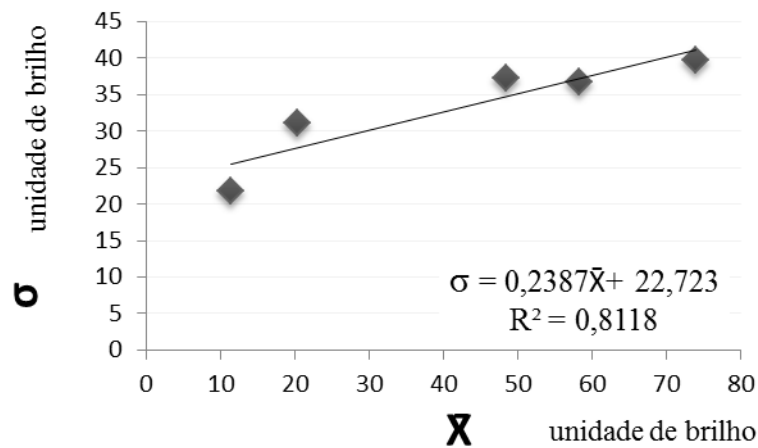


A Figura 29 evidencia que o coeficiente de variação aumenta à medida que o desvio padrão avaliado se distancia do valor adotado como referência. O valor adotado como referência foi o menor valor obtido, ou seja, aquele que gera menor distorção devido à presença de pontos não associados às partículas. O mesmo comportamento foi observado quanto à média aritmética.

A Figura 30 ilustra a relação $\sigma \times \bar{X}$ evidenciando uma relação de dependência direta entre os parâmetros, em que o aumento dos valores de desvio padrão estão associados ao aumento dos valores da média aritmética.

Portanto, imagens devem ser capturadas de maneira a se obter um histograma com baixo valor de dispersão estatística, ou seja, menor desvio padrão e transladado para o eixo da esquerda, o que resulta em menor valor da média aritmética. Assim, mais próximo à ausência de cor (preto) será o plano de fundo da imagem e conseqüentemente mais fácil é a sua binarização uma vez que a imagem possui maior qualidade em decorrência da ausência de interferência por pontos externos.

Figura 30 - Desvio padrão (σ) por média aritmética (\bar{X}).



2-Erro referente à escolha do limiar de binarização

Os erros relativo e em relação ao parâmetro representativo de distribuição de tamanho de partícula β foram sensíveis à escolha do limiar de binarização. A média do erro relativo por classe, referentes ao tratamento de dois grupos de imagens com seu limiar específico e com limiar extrapolado foi de 10 e 16 %, respectivamente. Para β os erros foram de 15 e 31% (Tabela 2).

A análise do erro relativo por faixa de tamanho evidenciou um aumento do erro com o aumento da faixa de tamanho. Este fato reforça a importância de se adotar um limiar específico para cada grupo de imagens analisados, uma vez que as partículas de interesse para o estudo de floculação encontram-se nas faixas de maiores tamanhos, que foram as que apresentaram maior erro relativo.

Para a média, mediana, moda e desvio padrão da distribuição de tamanho de partícula para os dois casos de extrapolação de limiar, ou seja, tendo como referência em uma análise o limiar 1 e em outro o limiar 2, os resultados obtidos evidenciaram pouca alteração com erros variando de 0 a 3% (Tabela 3).

Apesar da interferência pouco significativa na média, mediana, moda e desvio padrão da DTP deve ser definido um limiar de binarização para cada agrupamento de resultados, referentes a uma mesma aquisição de imagem uma vez que o parâmetro característico de DTP, β e o número de partículas por faixa de tamanho foram sensíveis à variação do limiar de binarização adotado.

Tabela 2 - Erros absoluto e relativo, para cada faixa de tamanho de partícula investigada, média do erro relativo e erro de β , em porcentagem, para: a) limiar específico b) limiar extrapolado.

a)

Intervalo (mm)	Limiar específico (número de flocos)	Limiar extrapolado (número de flocos)	Erro absoluto (número de flocos)	Erro relativo (%)	β (%)
0,001-0,05	0	0	0	0	
0,05-0,1	2901	3093	-192	-7	
0,1-0,15	1264	1381	-117	-9	
0,15-0,2	952	1072	-120	-13	
0,2-0,25	409	506	-97	-24	
0,25-0,3	134	154	-20	-15	
0,3-0,35	23	45	-22	-96	
0,35-0,4	10	12	-2	-20	
0,4-0,45	1	0	1	100	
0,45-0,5	0	0	0		
0,5-0,55	0	0	0		
0,55-0,6	0	0	0		
0,6-0,65	0	0	0		
0,65-0,7	0	0	0		
0,7-0,75	0	0	0		
0,75-0,8	0	0	0		
0,8-0,85	0	0	0		
0,85-0,9	0	0	0		
0,9-0,95	0	0	0		
			Média	-10	15%

b)

Intervalo (mm)	Limiar específico (número de flocos)	Limiar extrapolado (número de flocos)	Erro absoluto (número de flocos)	Erro relativo (%)	β (%)
0,001-0,05	0	0	0	0	
0,05-0,1	5079	5823	-744	-13	
0,1-0,15	2335	2645	-310	-12	
0,15-0,2	2208	2518	-310	-12	
0,2-0,25	1665	1891	-226	-12	
0,25-0,3	1056	1192	-136	-11	
0,3-0,35	576	677	-101	-15	
0,35-0,4	175	199	-24	-12	
0,4-0,45	72	89	-17	-19	
0,45-0,5	35	44	-9	-20	
0,5-0,55	11	15	-4	-27	
0,55-0,6	3	4	-1	-25	
0,6-0,65	0	2	-2		
0,65-0,7	0	0	0		
0,7-0,75	0	1	-1		
0,75-0,8	0	0	0		
0,8-0,85	0	0	0		
0,85-0,9	0	0	0		
0,9-0,95	0	0	0		
			Média	-16	-31

Tabela 3 - Erros médios, mediana, moda e desvio padrão, para os dois grupos de imagens binarizados com limiar específico e limiar extrapolado, sendo o limiar específico adotado como referência.

	Grupo 1 (%)	Grupo 2 (%)
Média	2	0
Mediana	3	0
Moda	0	0
Devio Padrão	3	1

3-Erro referente à resolução e à magnitude de ampliação adotada na captura da imagem (tamanho do *pixel*)

O erro médio, referente à resolução e o grau de aumento adotado na captura da imagem, foi de 15% para área subestimada e de 25% para área superestimada. A média do erro subestimado e superestimado para as faixas de 0,1 a 0,25; 0,3 a 0,6 e 0,65 a 0,9 foram, respectivamente: 20 e 35%; 11 e 11% e 1 e 4%. Portanto, para as partículas de maior diâmetro, ou seja, de interesse para o processo de floculação nota-se que o erro foi menor quando comparado aos das partículas que se encontram nas primeiras faixas de tamanho (Tabela 4).

Charkraborti et. *al* (2003) encontrou resultados similares ao afirmar que com o aumento da resolução, ou seja, aumento do número de *pixels* que representam uma determinada partícula, o erro da área medida é reduzido. Mostrou que muitos dos agregados analisados eram maiores que as partículas primárias e conseqüentemente os erros associados às medições dessas partículas de tamanhos maiores, foram menores.

Portanto, foram obtidos bons resultados que evidenciaram um sistema de aquisição e tratamento de imagens digitais robusto, sendo a metodologia desenvolvida confiável e passível de aplicação a outros trabalhos.

Tabela 4 - Erro referente à área subestimada e superestimada, em porcentagem, por faixa de tamanho de partículas.

Faixa		$D_{\text{médio}}$ do flocó (mm)	Área real (mm ²)	Diâmetro equivalente com base na área subestimada (mm ²)	Diâmetro equivalente com base na área superestimada (mm ²)	Faixa de Erro (%)		Média do erro (%) para grupos de faixas de diâmetro	
D_{min} (mm)	$D_{\text{máx}}$ (mm)					Subest	superest	subest	superest
0,001	0,05	0,0255	0,00051	0	0,05792	100	127		
0,05	0,1	0,075	0,00442	0,05792	0,11584	23	54		
0,1	0,15	0,125	0,01227	0,11584	0,20064	7	61		
0,15	0,2	0,175	0,02405	0,11584	0,23168	34	32	20	35
0,2	0,25	0,225	0,03976	0,20064	0,28375	11	26		
0,25	0,3	0,275	0,0594	0,20064	0,32764	27	19		
0,3	0,35	0,325	0,08296	0,28375	0,38854	13	20		
0,35	0,4	0,375	0,11045	0,32764	0,41766	13	11		
0,4	0,45	0,425	0,14186	0,36632	0,47762	13	12		
0,45	0,5	0,475	0,17721	0,41766	0,52449	13	10	13	11
0,5	0,55	0,525	0,21648	0,47762	0,59067	13	13		
0,55	0,6	0,575	0,25967	0,51805	0,61296	13	7		
0,6	0,65	0,625	0,3068	0,56749	0,66545	13	6		
0,65	0,7	0,675	0,35785	0,62381	0,74173	8	10		
0,7	0,75	0,725	0,41282	0,6804	0,79415	6	10		
0,75	0,8	0,775	0,47173	0,74173	0,84927	4	10		
0,8	0,85	0,825	0,53456	0,77707	0,87457	6	6	-1	14
0,85	0,9	0,875	0,60132	1,01649	1,09895	-16	26		
0,9	0,95	0,925	0,67201	1,04255	1,13055	-13	22		
Média						15	25		

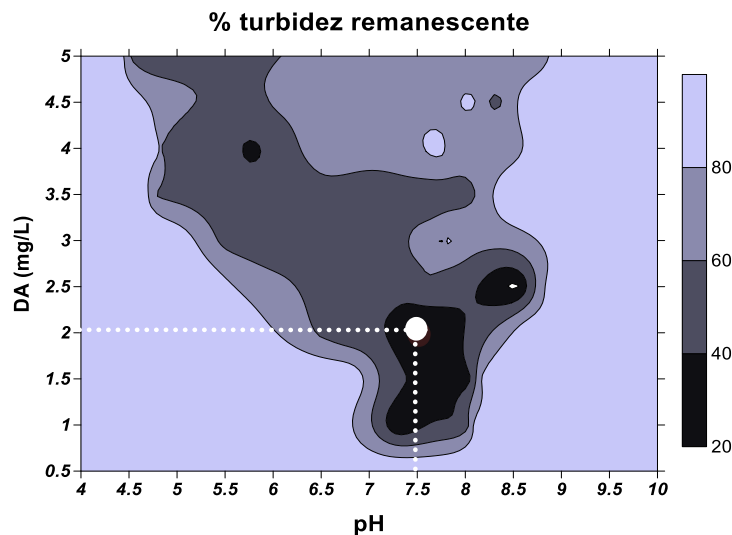
5.2 Estudo da cinética da floculação tendo como referência aspectos colisionais, com ênfase na distribuição de tamanho de partícula (dtp)

5.2.1 Avaliação do diagrama de coagulação, para o sulfato de alumínio, e da eficiência de remoção de turbidez dos ensaios realizados para o estudo da cinética da floculação.

Na Figura 31 são apresentados os resultados do diagrama de coagulação construído com os resultados das porcentagens de turbidez remanescente, obtidos dos ensaios

iniciais de coagulação/floculação da água preparada com caulinita, para velocidade de sedimentação de 2,5 cm/min.

Figura 31 - Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio em termos de porcentagem de turbidez remanescente para velocidade de sedimentação de 2,5 cm/min.

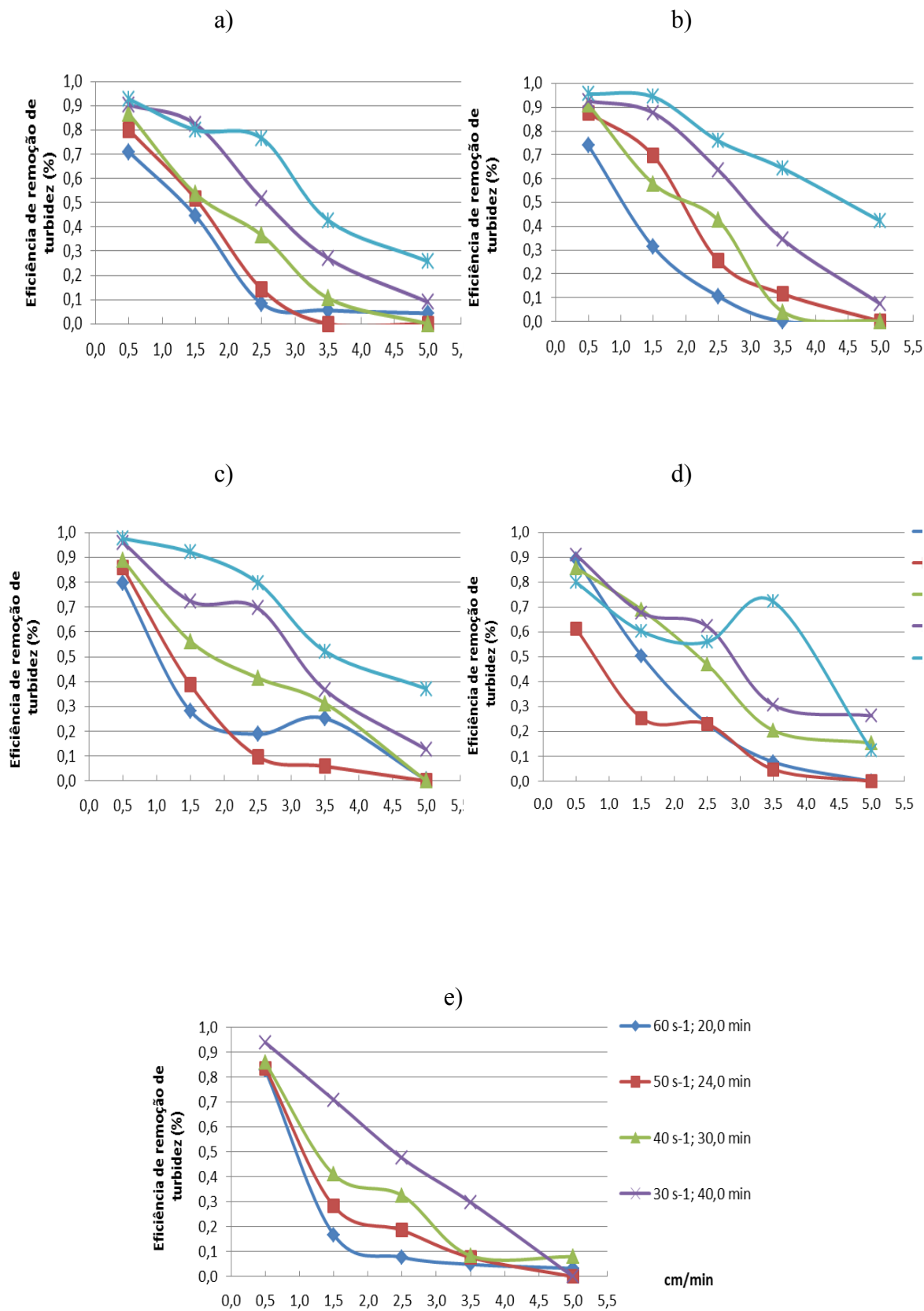


Observam-se distintas áreas de eficiência de remoção de turbidez para diferentes configurações do par de valores, dosagem de coagulante x pH de coagulação. Foi adotada a dosagem de coagulante de 2 mgAl³⁺/L em pH de 7,5, pois esse apresentou a melhor eficiência em faixa ampla de pH (aproximadamente entre 7 e 8). Outras dosagens apresentaram mesma faixa de remoção de turbidez, porém mais sensíveis à variação de pH. A dosagem de coagulante de 2,5 mgAl³⁺/L, por exemplo, apresentou faixa de variação de pH mais estreita, variando de, aproximadamente 8,0 a 8,5.

Na Figura 32 são apresentadas as curvas de sedimentação, obtidas para cada número de Camp e gradientes médio de velocidade de floculação investigados. Essas curvas foram construídas adotando-se melhor condição de coagulação, definida por meio do diagrama de coagulação do sulfato de alumínio. Nas curvas são apresentadas as eficiências de remoção de turbidez para as velocidades de sedimentação de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min.

Figura 32 - Eficiência de remoção de turbidez, em porcentagem, para gradientes médio de velocidade de floculação de 60, 50, 40, 30 e 20 s⁻¹, avaliados para velocidades de

sedimentação de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min para os seguintes números de Camp: a) NC=18000, b) NC=24000, c) NC=36000, d) NC=54000, e) NC=72000.



Conforme ilustra Figura 32 o aumento das eficiências de remoção de turbidez foi inversamente proporcional ao aumento dos valores dos gradientes médios de velocidade de floculação. Voltan (2007) apresentou resultados similares ao analisar a eficiência de remoção de turbidez durante a etapa de refloculação, em que valores menores de gradiente de velocidade causaram a queda nos valores da turbidez remanescente do sobrenadante.

Observa-se que para $NC=54000$ tem-se quebra da tendência observada para o comportamento da eficiência de remoção de turbidez obtida para as demais energias estudadas. Uma vez que os dados guardaram uma coerência de desempenho, esta diferença provavelmente foi ocasionada por questões experimentais diversas ou erros nas medidas de turbidez.

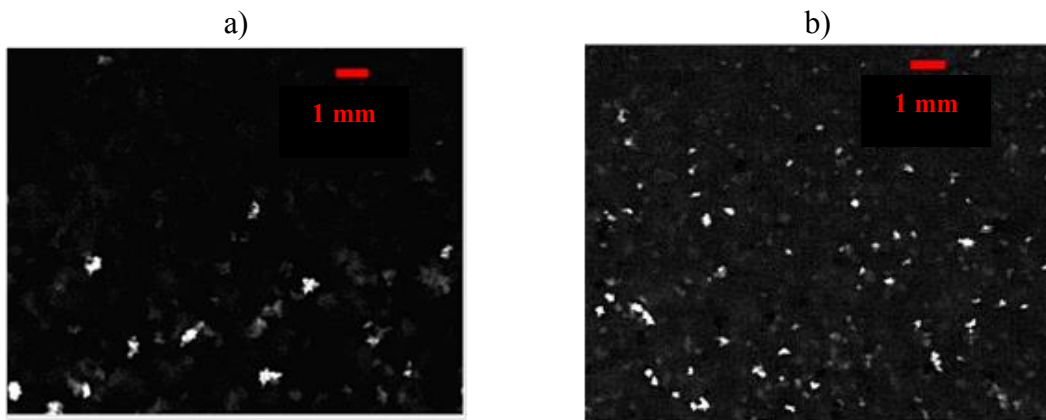
Analisando o gradiente médio de velocidade de $30s^{-1}$ para velocidade de sedimentação de $2,5cm/min$ nota-se que para os extremos de energia, ou seja, $NC=18000$ e $NC=72000$ a eficiência de remoção de turbidez foi inferior as obtidas para os demais números de Camp estudados. Para número de Camp 24000 , 36000 e 54000 a eficiência manteve-se praticamente constante, atingindo aproximadamente 70% para $NC=36000$.

Portanto, o gradiente médio de velocidade e o tempo de floculação, contribuem simultaneamente para o alcance de um estado estacionário. Elevados valores de NC contribuem com o fenômeno de ruptura das partículas floculentas, interferindo na sua sedimentabilidade e, conseqüentemente, na eficiência do tratamento pretendido.

Moruzzi e Oliveira (2013) afirmaram que altos gradientes médios de velocidade promovem o aumento da quebra dos flocos e como consequência não é possível atingir elevada eficiência do sistema, quando a sedimentação é empregada na separação sólido/líquido.

Por meio da análise da distribuição de tamanho de partícula (DTP) foi possível notar que, para um mesmo número de Camp e menor gradiente médio de velocidade de floculação, ou seja, menor energia fornecida ao sistema, flocos com tamanhos maiores foram gerados (Figura 33).

Figura 33 - Imagem dos flocos obtidos tendo fixo número de Camp de 54000. a) $Gf=20s^{-1}$ e $Tf=45min$. b) $Gf=60s^{-1}$ e $Tf=15min$.



Observa-se, assim, que para maior tempo de floculação e menor gradiente médio de velocidade (33a) têm-se partículas de maior tamanho e em menor número ao passo que flocos formados com menor tempo de floculação e maior gradiente médio de velocidade (33b) são menores e em maior quantidade.

Os flocos de maior tamanho apresentaram melhores características de sedimentabilidade, em função do tamanho, DTP, volume, área, densidade e morfologia. Argaman (1971) relatou que a quebra dos flocos devido ao aumento do gradiente de velocidade de floculação (Gf) altera suas características o que torna o NC um parâmetro insuficiente para descrever adequadamente os efeitos da cinética da floculação.

Conforme Bratby (1981) a relação de agregação e ruptura dos flocos possui influência direta na distribuição de tamanho de partícula em que o aumento de energia caracteriza uma DTP com maior concentração de partículas de tamanhos menores como pode ser observado na (Figura 34). Foram avaliadas 100 imagens para cada gradiente médio de velocidade de floculação, com total de 2242 flocos para $Gf=20s^{-1}$ e 6885 para $Gf=60s^{-1}$.

Figura 34 - Distribuição de tamanho de partícula (DTP) para $Gf=20s^{-1}$ e $Gf=60s^{-1}$.

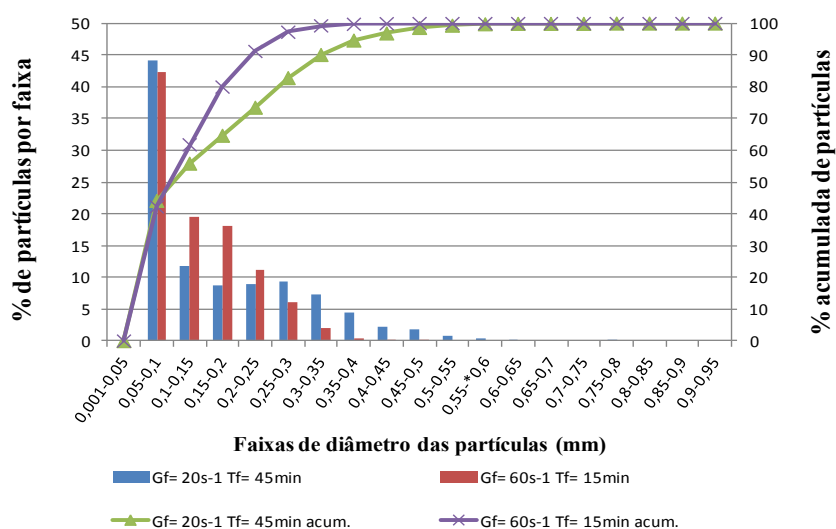


Tabela 5 - Dados estatísticos referentes à DTP (assimetria, média, mediana, curtose, moda e desvio padrão) para $Gf=20s^{-1}$ e $Gf=60s^{-1}$.

	$20 s^{-1}$	$60 s^{-1}$
Assimetria	1,03	0,81
Média	0,17	0,14
Mediana	0,13	0,13
Curtose	0,52	0,17
Moda	0,05	0,05
Desvio Padrão	0,12	0,07

Na Figura 34 é evidenciada uma concentração maior de partículas com diâmetros menores para o $Gf=60s^{-1}$ e uma distribuição mais uniforme em direção às partículas de maior diâmetro para o $Gf=20s^{-1}$. Observa-se assim, que na faixa de diâmetro de 0,25 a 0,3 mm concentram-se 97,25% dos flocos para $Gf=60s^{-1}$ e 82,80% para $Gf=20s^{-1}$. Esses resultados demonstram que com maior energia de floculação, portanto, maior gradiente médio de velocidade, maior é a ação na ruptura das partículas floculentas e, conseqüentemente partículas com menores tamanhos são obtidas.

A análise estatística da DTP, ilustrada na Tabela 5, resume as diferenças entre as duas curvas de distribuição de tamanho de partículas apresentadas. A assimetria consiste

no grau de desvio, ou afastamento da simetria, de uma distribuição (SPIEGEL, 1972). Percebe-se uma assimetria positiva para ambos os casos, com “cauda” da curva mais longa para $Gf=20s^{-1}$ caracterizando um maior afastamento da simetria, uma vez que a DTP se deslocou para faixas de tamanho de diâmetro médio maiores.

A média dos diâmetros médios para $Gf=20s^{-1}$ e $Gf=60s^{-1}$ foi de 0,17 e de 0,14 mm, respectivamente. Bouyer (2005) encontrou-se resultados similares em seu trabalho cujo objetivo foi analisar a relação entre o tamanho do floco e a hidrodinâmica em um tanque de mistura em estado estático. O autor concluiu que o tamanho do floco decresce com o aumento do gradiente médio de velocidade por meio dos resultados ilustrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Diâmetro dos flocos, em μm , para $\text{pH}=3,5$ e $\text{pH}=5,0$ para valores de gradientes médio de velocidade de 30, 45 e 60 rpm.

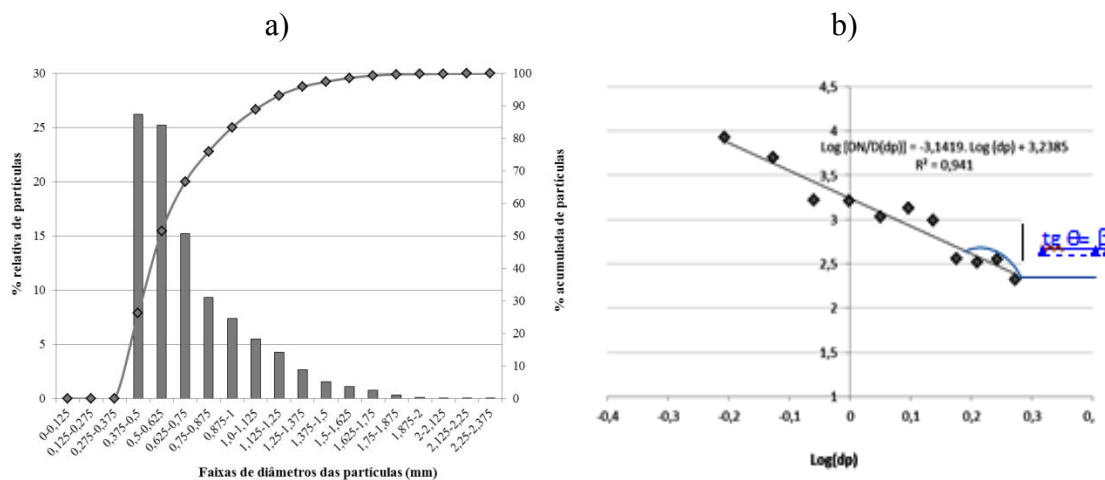
Rotação (rpm)	Diâmetro (μm)	
	pH = 3,5	pH = 5,0
30	280	80
45	220	70
60	180	40-60

Fonte: Adaptado de Bouyer (2005).

5.2.2 Estudo da cinética da floculação adotando distintos números de Camp como referência colisional

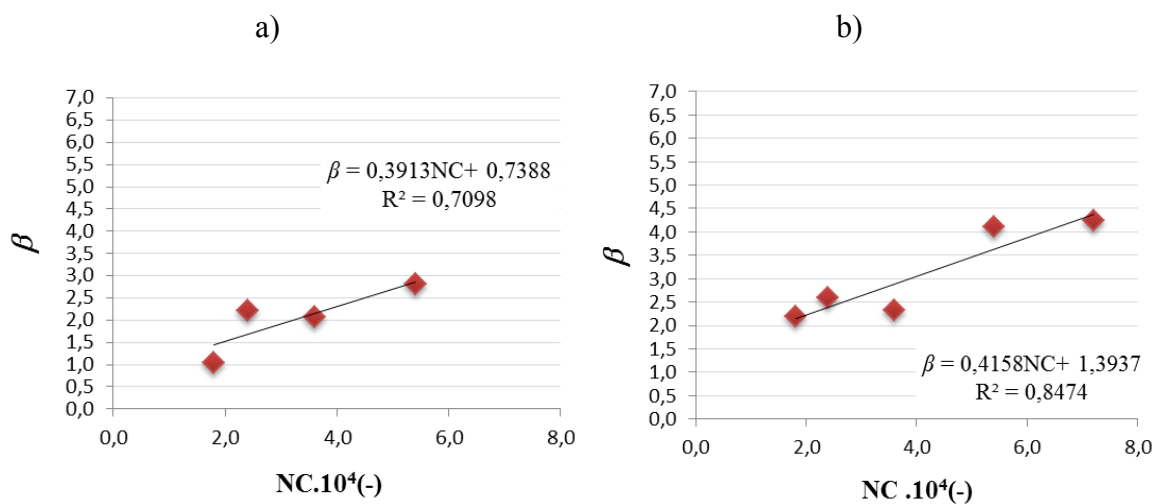
Na Figura 35 é apresentado um exemplo de curva de distribuição de tamanho de partícula (DTP) (relativa e acumulada) obtida experimentalmente e de uma função contínua da DTP, expressa pela Equação 15, ajustada aos dados experimentais. O valor de β corresponde, na forma linearizada, ao coeficiente angular da reta ajustada. No caso específico, o valor obtido em módulo foi de 3,14, que, segundo Crittenden et al. (2005), indica domínio de partículas de menor diâmetro (maior inclinação da reta descendente).

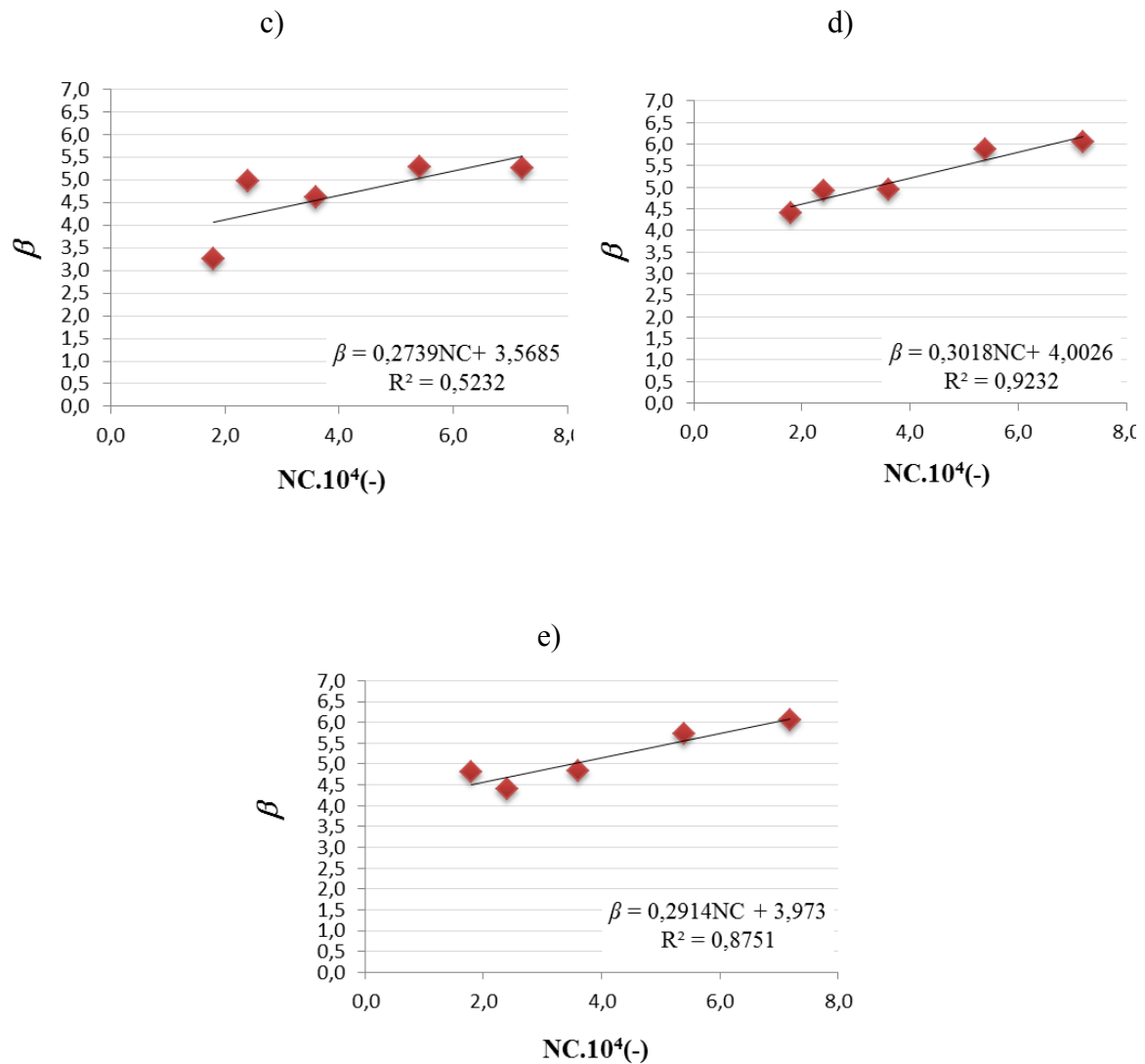
Figura 35: a) Exemplo de curva de DTP obtida experimentalmente. b) Exemplo da função contínua linearizada e ajustada aos dados experimentais.



A relação do Número de Camp (NC) com o parâmetro representativo de distribuição de tamanho de partícula β , para distintos gradientes médios de velocidade de floculação fixos (Gf), evidenciou que com o aumento de Gf houve uma tendência de queda e estabilização do coeficiente angular β , indicando sua menor dependência em relação ao NC para maiores valores de Gf (Figura 36).

Figura 36: Figura comparativa da interferência do número de Camp em β com o aumento do gradiente médio de velocidade de floculação. a) $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$, b) $Gf = 30 \text{ s}^{-1}$, c) $Gf = 40 \text{ s}^{-1}$, $Gf = 50 \text{ s}^{-1}$, e) $Gf = 60 \text{ s}^{-1}$.





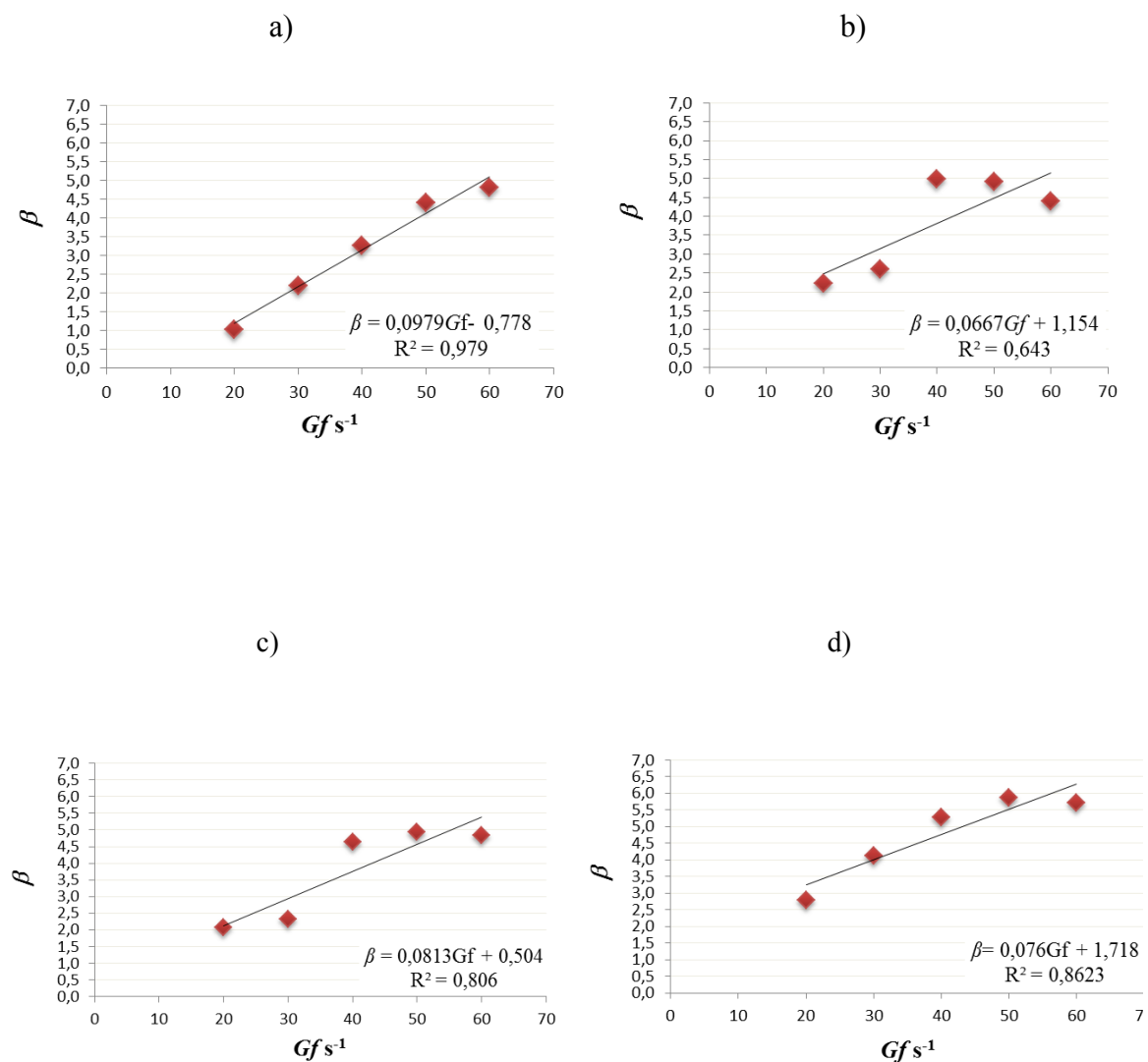
A energia fornecida a um sistema, expressa por meio do gradiente médio de velocidade de floculação, interfere na dinâmica da distribuição de tamanho das partículas. Sendo assim, há uma relação inversa de proporção em que o aumento do gradiente médio de velocidade de floculação resulta em uma menor alteração da dinâmica de β .

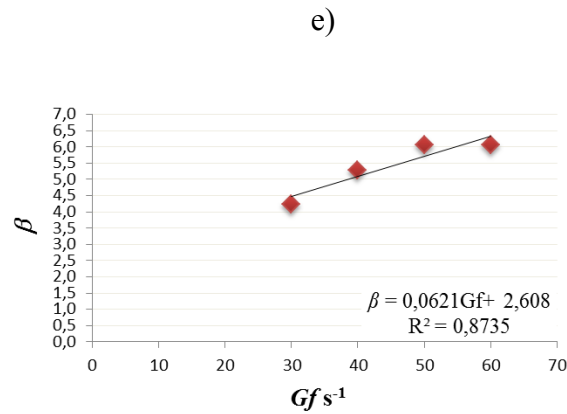
Quanto menor o valor de β , em módulo, maior o número de partícula em faixas de tamanhos maiores, ao passo que β com valores maiores significa maior número de partículas concentradas em faixas de tamanhos menores.

Partindo da hipótese de que a distribuição de tamanho de partícula, antes da floculação, concentra-se nas menores faixas de tamanho, menor interferência no parâmetro β significa dizer que não há modificação dessa condição inicial. Assim, tem-se o predomínio de partículas de menores tamanhos, pois o aumento do gradiente médio de velocidade de floculação provoca o aumento do efeito de ruptura.

A relação do gradiente médio de velocidade de floculação (Gf) com o parâmetro representativo de distribuição de tamanho de partícula (β) para distintos Números de Camp (NC) fixos seguiu o mesmo comportamento, em que o aumento de NC provocou uma tendência de queda da dependência de β em relação ao Gf , sendo que quanto maior o NC menor a interferência no parâmetro β . (Figura 37).

Figura 37 - Figura comparativa da interferência do Gf em β com o aumento do número de Camp. a) NC=18000 (-), b) NC=24000 (-), c) NC=36000 (-), d) NC=54000 (-), e) NC=72000 (-).

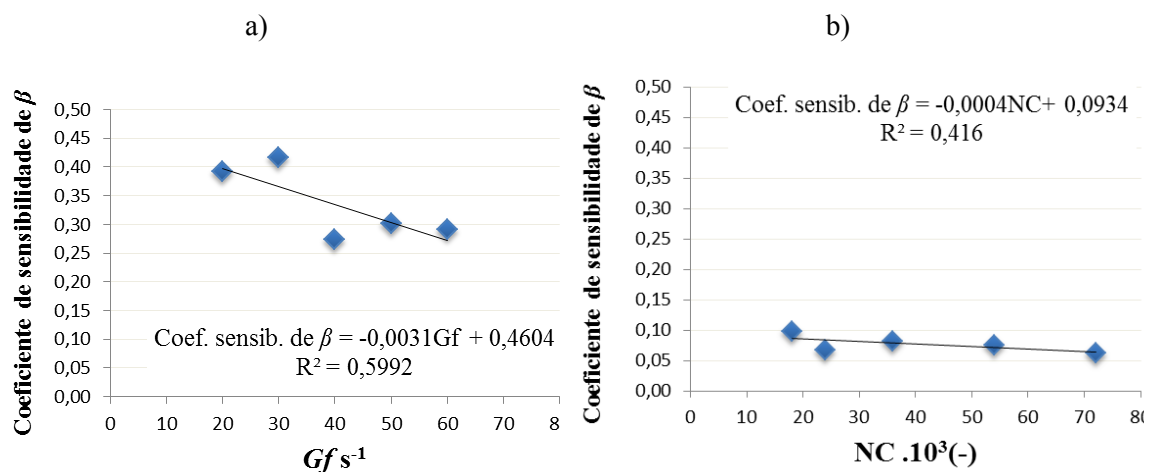




Generalizando os dados obtidos, foram definidos dois coeficientes de sensibilidade (C.S), sendo um o C.S de β por Gf , obtido da relação β x NC, e o outro C.S de β por NC, obtido da relação β x Gf . Dessa maneira, relacionou-se para cada Gf e NC seu correspondente C.S. de β (Figura 38).

O aumento do Gf ou do NC implicaram em menores coeficientes de sensibilidade de β , conseqüentemente menos sensível e menos modificado levando a uma DTP com maior concentração de partículas de tamanhos menores.

Figura 38 - Coeficientes de sensibilidade de β . a) Avaliação com base nos valores de Gf ; b) Avaliação com base nos valores de NC.



Bratby (1981) estudou a cinética da floculação em reator estático e afirmou que após determinado tempo de floculação o estado estacionário é atingido, ou seja, a taxa de agregação de partículas se iguala a taxa de ruptura, como foi observado ao se analisar os coeficientes angulares obtidos das relações de β com NC e de β com Gf .

O autor ainda concluiu que com o aumento do gradiente médio de velocidade de floculação (Gf), o estado estacionário é mais rapidamente atingido, determinando um desempenho inferior à alcançada por gradientes médios de velocidade com valores menores.

Portanto, o estado de equilíbrio é atingido em menor tempo, devido ao aumento da ruptura das partículas causado pelo aumento dos valores de Gf ou de NC. Desta maneira, há uma menor interferência na distribuição de tamanho de partícula (DTP) determinando uma DTP mais deslocada para o eixo da esquerda, ou seja, concentrada na faixa de partículas de menor tamanho.

Por outro lado, menor valor de Gf implica em maior tempo para o alcance da estabilidade da floculação, com maior desempenho e maior interferência na DTP, resultando em menor número de partículas com distribuição mais deslocada para o eixo da direita em direção as partículas de tamanhos maiores.

Spicer e Pratsinis (1996) estudaram o efeito da aplicação de distintas taxas de cisalhamento durante a coagulação e também afirmaram que os agregados originados alcançam estado de equilíbrio de sua estrutura e distribuição de tamanho de partícula em menor tempo quando expostos a maiores energias. Os autores concluíram, dessa maneira, que a quebra dos flocos foi responsável por manter o tamanho da partícula estável e limitar seu posterior crescimento.

A análise da influência da DTP na eficiência de processos de separação sólido-líquido carece de estudos dedicados sendo importante determinar a relação entre a eficiência de separação/remoção de partículas com a tecnologia adotada. O emprego de medidas diretas, tais como a DTP no controle do desempenho da floculação possibilita o aprimoramento de projetos e operação de sistemas de tratamento de água para abastecimento público.

6 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

Com base no trabalho realizado os principais resultados foram:

- 1- A sequência de procedimentos desencadeados para a aquisição e tratamento de imagens digitais mostrou-se eficiente, sendo sua metodologia, passível de aplicação em trabalhos com finalidade similar.
- 2- A média de flocos capturados por imagem foi de 165 unidades com coeficiente angular de 165,96 unidades para um coeficiente de determinação de 99,95% evidenciando uma distribuição homogênea das partículas flocculentas na massa líquida.
- 3- O erro amostral relativo à média, para intervalos de confiança de 90%, 95% e 99%, para uma amostra de 100 imagens considerando uma população infinita como universo amostral foi de 0,8, 0,9 e 1,1% evidenciando representatividade da amostra estudada.
- 4- O número de imagens tratadas mostrou ter grande influência no valor do erro calculado para mediana e para o parâmetro característico de distribuição de tamanho de partícula (β), uma vez que apresentou queda do valor com o aumento do número de imagens, indicando a importância no número de fotos avaliadas. Para erro médio, entretanto, observou-se que a análise de um grupo de 10 imagens foi suficiente para a representação do universo amostral.
- 5- As imagens devem ser capturadas de maneira a se obter um histograma com baixo valor de dispersão estatística, ou seja, menor desvio padrão e baixo valor de média aritmética, portanto, deslocado para o nível 0, que representa o nível preto.
- 6- O limiar de binarização deve ser definido de maneira específica para cada agrupamento de resultados, referentes a uma mesma aquisição de imagens.

- 7- O erro médio, relativo à resolução e a magnitude de ampliação adotada na captura da imagem, foi de 15% para área subestimada e de 25% para área superestimada. Foi observado que para as partículas de maior diâmetro o erro sub ou superestimado é menor quando comparado aos das partículas que se encontram nas primeiras quatro faixas de tamanho.
- 8- A condição ótima de coagulação, com emprego de sulfato de alumínio comercial ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) como coagulante, foi obtido para concentração de 2 mg Al^{+3}/L de alumínio para pH de coagulação de 7,5.
- 9- O aumento das eficiências de remoção de turbidez foi inversamente proporcional ao aumento dos valores dos gradientes médios de velocidade de floculação tendo fixo um mesmo número de Camp (NC).
- 10- O aumento do valor do gradiente médio de velocidade de floculação (Gf) e a redução do tempo de floculação (Tf) mantendo $NC=54000$ provocaram grandes alterações na morfologia dos flocos prejudicando suas características de sedimentabilidade. A análise da distribuição de tamanho de partícula (DTP) por meio de uma equação diferencial resultou confiável e sua aplicação pode ser uma importante ferramenta para análise mais minuciosa do processo de floculação.
- 11- O aumento do gradiente médio de velocidade de floculação e do número de Camp, tendo fixa a relação $NC=GT$, implicou em menor alteração da dinâmica da distribuição de tamanho de partículas. Portanto, para maiores valores de Gf e NC , maior foi o valor, em módulo, de β para a reta descendente com maior translação do eixo para a faixa de partículas de tamanhos menores.

7 CONCLUSÕES

A técnica dedicada de análise de imagem na avaliação do produto GT no desempenho da floculação foi adequada e as conclusões específicas de desempenho são apresentadas a seguir:

- 1- A metodologia desenvolvida para a aquisição e tratamento de imagens digitais mostrou-se confiável e eficiente. Os erros de aquisição de imagens foram pequenos (da ordem de 0,8% a 1,1%), sendo a amostra estudada representativa do universo amostral (erro de 0,9 % para 95% de confiança). Para a etapa de tratamento, a quantidade de imagens analisadas deve ser definida de acordo com o parâmetro que se deseja analisar. Para erro médio foram necessárias 10 imagens. Para β 100 imagens. O histograma de níveis de brilho da imagem deve ser obtido de maneira a possuir baixos valores de desvio padrão e média aritmética deslocada para a esquerda e o limiar de binarização deve ser específico para cada grupo de imagens analisados, referentes a uma mesma condição de aquisição.
- 2- O aumento do gradiente médio de velocidade de floculação ou o aumento do número de Camp, mantendo-se fixa a relação $NC=GT$, implicou em menor alteração da dinâmica da distribuição de tamanho de partícula (DTP). Portanto, as partículas concentraram-se nas faixas de diâmetro de menor tamanho com maiores valores, em módulo, de β . Valores de coeficiente angular da relação de $Gf \times \beta$ da ordem de 0,0979 Gf a 0,0621 Gf foram obtidos para NC de 18000 a 72000, respectivamente.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-MALACK, M.H.; ABUZAID, N.S.; EL-MUBARAK, A.H. *Coagulation of polymeric wastewater discharged by a chemical factory*. *Water Research*, Londres, v.33, n.2, p.521-9, 1999.
- ALLEN, T. *Powder sampling and particle size measurement*. 5.ed. London.1997.
- AMIRTHARAJAH, A. and MILLS, K.M. *Rapid-mix design for mechanisms os alum coagulation*. *J. Am. Wat. Wks. Assoc.* 74, p. 210-216, 1982.
- AMIRTHARAJAH, A. e O'MÉLIA, C.R. *Coagulation Processes: Destabilisation, Mixing and Flocculation*. In: *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Suplies*. MacGraw-Hill, New York, p. 269-365, 1990.
- ARBOLEDA, J. *Teoria y Practica de la Purificación Del Agua*. In: Asociación Colombiana de Ingenieria Sanitaria y Ambiental – ACODAL, 1992, Colombia, 684p.
- ARGMAN, Y. *Turbulence in Orthokinet Flocculation*. *Phd. Thesis presented to University of California*, Berkely. 1968.
- ARGAMAN, Y.; KAUFMAN, W.J. *Turbulence and flocculation*. *JEED-ASCE*, v. 96, n. AS 2, p. 223-241, Apr. 1970.
- ARGAMAN, Y. *Pilot-Plant Studies of flocculation*. *Journal AWWA*, v.63 n.12, p.775-777, 1971.
- BOUYER, D.; COUFORT, C.; LINÉ, A.; DO-QUANG, Z. *Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions*. *Elsevier - Journal of Colloid and Interface Science*, 292, p.413-428, 2005.
- BRATBY, J.R.; MILLER, M.W.; MARAIS, G.R. *Design of flocculation systems from batch test data*. *Water S.A.*, v. 3, n. 4, p. 173-182, Oct. 1977.
- BRATBY, J.R. *Interpreting laboratory results for the design of rapid mix and flocculation systems*. *Journal of the American Water Works Association*, v. 73, n.6, p.318-325, Jun, 1981.
- BRITO, S.A. *Influência da velocidade de sedimentação na determinação dos coeficientes de agregação e ruptura durante a floculação*. São Carlos. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1998.
- BROWN, G.M.; GREGORY, J.; JACKSON, P.J.; NELSON, D.W.; TOMLINSON, E.J. *An on-line monitor for flocculation control*. In: *Instrumentation and Control of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems* (Edited by Drake R. A. R.), Pergamon Press, Oxford, p.239-245, 1985.
- CAMP, T.R.; STEIN, P.C. *Velocity gradients and internal work in fluid motion*. *J Boston Soc. Civ. Eng.* 30:219-237, 1943.

CAMPOS, L.C.; GREGORY, J.; YU, W. *Breakage and re-growth of flocs formed by charge neutralization using alum and polyDADMAC*. Elsevier - Water Research, 44: 3959-6449, 2010.

CHAKRABORTI, R.K.; GARDNER, K.H.; ATKINSON, J.F.; VAN BENSCHOTEN, J.E. *Changes in fractal dimension during aggregation*. Water Research 37, 873–883, 2003.

CONSTANTINO, L.T. **Ruptura e recrescimento de flocos em água com substâncias húmicas aquáticas coagulada com sulfato de alumínio e cloreto férrico**. 2008. 160f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 2008.

COVENTYA. **WaterCare - Coagulação e floculação**. Disponível em: <<http://www.coventya.com/assets/Technical-Information/Watercare/portuguese/pt-watercare-coagulacaoefloculacao.pdf>>. Acesso em: 17 de abril de 2014.

CRITTENDEN, J. C; Trussell, R. R; Hand, D. W, Howe, K. J. and Tchobanoglous, G. *Water Treatment: Principles and Design*. 2nd ed. 2005.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P.L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos. RiMA. p.237, 2002.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. Di B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2.ed. LDiBe. 2005.

DUAN, J.; GREGORY, J. *Coagulation by hydrolysing metal salts*. *Advances in Colloid and Interface Science*, Elsevier, 100-102, p.475-502, 2003.

DUMAS, C.; COUFORT, C.; BOYER, D.; LINÉ, A. *Analysis of floc size distributions in a mixing tank*. *Science Direct: Chemical Engineering and Processing*. n.47,p.287-294, 2008.

EDZWALD, J.K. *Coagulation in drinking water treatment: particles, organics, and coagulations*. *Wat. Sci. Tech*. v. 27, n. 11, p. 21-35, 1993.

FITZPATRICK, C.S.B.; FRADIN, E.; GREGORY, J. *Temperature effects on flocculation, using different coagulants*. *Water Science and Technology*, 50(12), p.171-175, 2004.

GIBBS, A.; PELTON, R. *Effect of PEO molecular weight on the flocculation and resultant floc properties of polymerinduced PCC flocs*. *Journal Of Pulp And Paper Science* 25 (7), 267-271, 1999.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. 2002.

GREGORY, J. *Turbidity fluctuations in flowing suspensions*. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.105, n.2, p.357-371, June, 1985.

GREGORY, J.; NELSON, D.W. *Monitoring of aggregates in flowing suspensions. Colloids and Surfaces*, 18, p.175-188, 1986.

GREGORY, J. *Polymer adsorption and flocculation in sheared suspensions. Colloids and Surfaces, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam – Printed in The Netherlands*, 31, p.231-253, 1988.

GREGORY, J.; LI, G. *Effects of dosing and mixing conditions on polymer flocculation of concentrated suspensions. Chem. Eng. Comm. Gordon and Breach Science Publishers S.A., Printed in the USA*, v.108, p.3-21, 1991.

GREGORY, J.; CHUNG, H. *Continuous monitoring of floc properties in stirred suspensions. J. Water SRT – Aqua, Blackwell Science Ltd*, v.44, n.3, p.125-131, 1995.

GREGORY, J.; HILLER, N. *Interpretation of flocculation test data. Proc. Filtech Europa/95, Karlsruhe*, p.405-414, 1995.

GREGORY, J.; ROSSI, L. *Dynamic testing of water treatment coagulants. Water Science and Technology: Water Supply, IWA*, v.1, n.4, p.65-72, 2001.

GREGORY, J.; YUKSELEN, M.A. *The reversibility of floc breakage. Elsevier*, p. 251-259, 2004.

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

HAMMER, J.M. *Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotos. Livros técnicos e científicos, editora S.A.* 1979.

HAN, M.; KIM, T.; KIM, J. *Application of image analysis to evaluate the flocculation process. Journal of Water Supply: Research and Technology*, v. 55, n. 7-8, p. 452-459, Nov. 2006.

JARVIS, P.; GREGORY, J.; JEFERSON, B. PARSONS, S.A. *A review of floc strength and breakage. Water Research*, n.39, p. 3121- 3137, 2005b.

JARVIS, P.; JEFERSON, B.; PARSONS, S.A. *Floc structural characteristics using conventional coagulation for a high doc, low alkalinity surface water source. Water Research*, v. 40, n.14, p. 2727 – 2737, August, 2006.

JUNKER, B. *Measurement of bubble and pellet size distributions: past and current image analysis technology. Bioprocess Byosist Eng*, 29:185-206, 2006.

KRAMER, T.A.; CLARK, M.M. *The measurement of particles suspended in a stirred vessel using microphotography and digital image analysis. Part. Part. Syst. Charact.* n.13, p.3-9, 1996.

KIM, J.; TOBIASON, J.E. *Origins of filter effluent particles: experimental study of particle deposition and detachment*. *Water Science and Technology, IWA*, v.50, n.12, p. 215-222, 2004^b.

KOBLER, D.; BOLLER, M. *Particle removal in different filtration systems for tertiary wastewater treatment – a comparison*. *Wat. Sci. Tech.*, v. 36, n. 04, p. 259-267, 1997.

LAWLER, D.F. *Particle size distribution in treatment processes: theory and practice*. *Wat. Sci. Tech.*, v. 36, n. 4, p. 15-23, 1997.

LI, G.; GREGORY, J. **Flocculation and sedimentation of high-turbidity waters**. *Water Research*, Pergamon Press plc, Printed in Great Britain, v.25, n.9, p.1137-1143, 1991.

LI, T.; ZHU, Z.; WANG, D.; YAO, C.; TANG, A. *Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms*. *Science Direct: Powder Technology*. n.168, p.104-110, 2006.

LIBÂNIO, M. **Avaliação da floculação em reatores estáticos e de escoamento contínuo com gradientes de velocidade constante e variável**. 1995. 136f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 1995.

MASSCHELEIN, W. *Coagulation*. In: Marcel Dekker, Inc. (eds.) *Unit Processes in Drinking Water Treatment*. Nova Iorque, E.U.A. 165-190.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

MOON, B-H.; LEE, H-I.; KIM, S-H. *Effects of ph and dosage on pollutant removal and floc structure during coagulation*. *Microchemical journal. Elsevier*. v. 68, p. 197-203, 2001.

MORUZZI, R.B. **Avaliação da Influência da Distribuição de Tamanho de Partículas e do Binômio Velocidade/Tempo de Detenção na Zona de Reação no Desempenho da Flotação com Utilização de Sonda Ultrasônica e Técnica de Análise por Imagem**. 2005. 240f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 2005.

MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. **Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas de flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.12, n.3, p. 273-283, 2007.

MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. *Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by anon-intrusive image analysis system and tracer tests*. *IWA Publishing 2010 WaterScience & Technology, WST*, 61, (1), p.253-262, 2010.

MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, S. C. *Mathematical modeling and analysis of the flocculation process in chambers in series*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 36, n. 3, p. 357-363, March. 2013.

MS TECNOPON Instrumentação. Disponível em: <<http://www.tecnopon.com.br/category/produtos/medidoresdeph>>. Acesso em: 18 de Junho de 2014.

NGUYEN, T.P.; HANKINS, N.P.; HILAL, N. *A comparative study of the flocculation behaviour and final properties of synthetic and activated sludge in wastewater treatment*. *Desalination* 204 (1-3), 277-295, 2007.

O'MÉLIA, C.R. *Coagulation and Flocculation*. In: *Weber, Jr. W.J. (ed.) Physicochemical Processes for Water Quality Control*. Wiley-Interscience. E.U.A., 61-107, 1972.

PADILHA, A.J. **Processamento e Análise de Imagem**. 1998.

PÁDUA, V.L. Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de ensaios em reatores estáticos. São Carlos. 165p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.1994.

PÁDUA, V.L; DIBERNARDO, L; LIBÂNIO, M. Optimización de Gradientes de Velocidad em la Floculación. In: Seminário sobre Optimización de Plantas de Potabilización. Lima, Peru. 1998.

PARKER, D.S.; KAUFMAN, W.J.; JENKINS, D. *Floc breakup in turbulent flocculation process*. *JSED Proc. ASCE*, v. 96, n. AS 1, p.79, Feb. 1972.

PRATSINIS, S.E.; SPICER, P.T. *Shear-induced flocculation: The evolution of floc structure and the shape of the size distribution ate steady-state*. *Elsevier Science. Wat. Res.* v.30, n5, p.1049-1056, 1996.

PRATSINIS, S.E.; KELLER, W.; SPICER, P.T. *The effect of impeller type on floc size and structure during shear – induced flocculation*. *Journal of colloid and interface science*. n.184, p.112-122, 1996.

RAHMANI, N.H.G.; DABROS, T.; MASLIYAH, J.H. *Online optical monitoring of asphaltene aggregation*. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 44 (1), 75-84, 2005.

RUSS, J.C. *The image processing handbook*. CRC Press.1992.

SANTOS, H.R.; PRADO,G.S.; VIDAL,C.M.S.; MORUZZI, R.B.; CAMPOS,J.R. **Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas e sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário.** v. 9, n. 4, p. 291-300, 2004.

SANTOS, H.R. **Coagulação/ precipitação de efluentes de reator anaeróbio de leito expandido e de sistemas de lodo ativado precedido de reator UASB, com remoção de partículas por sedimentação ou flotação.** 2006. 331f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 2006.

SMOLUCHOWSKI, M. **Versuch einer Mathematischen Theorie der Koagulationskinetik kolloider LoÉ sungen.** Z Phys Chem 92:129-168, 1917.

SPIEGEL, M.R. **Estatística - Resumo da teoria, 875 problemas resolvidos, 619 problemas propostos.** 5ed. LTDA. 1972

Sovereign **Argentina.** Disponível em:
[http://www.sovnet.com/argentina/secoes.asp?secao=produtos_hach&nome=Produtos.](http://www.sovnet.com/argentina/secoes.asp?secao=produtos_hach&nome=Produtos)
 Acesso em: 18 de Junho de 2014.

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 Res.*; 30 (5) : 1049–56, 1996.

TCHOBANOGLIOUS, G. **Particle size characterization: the next frontier.** *Journal of Environmental Engineering, ASCE.* v.121, n.12, p. 844-845, 1995.

THOMAS, D. N.; JUDD, S. J.; FAWCETT, N. **Flocculation modeling: a review.** *Wat. Res.* v. 33, n. 7, p. 1579-1592, 1999.

VOLTAN, P.E.N. **Avaliação da ruptura e do recrescimento de flocos na eficiência de sedimentação em água com turbidez elevada.** 2007. 135f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 2007.

ZHANG, X.H.; ZHONG, R.S.; LI, X.Y.; LAM, K.M.; XIAO, F. **PIV characterisation of flocculation dynamics and floc structure in water treatment.** *Elsevier. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 379, 27–35, 2011.

YUKSELEN, M.A.; GREGORY, J. **Breakage and re-formation of alum flocs.** *Environmental Engineering Science, Mary Ann Liebert, Inc.*, v.19, n.4, p.229-236, 2002a.

YUKSELEN, M.A.; GREGORY, J. **Properties of flocs formed using different coagulants.** *Water Science and Technology: Water Supply, IWA*, v.2, n.5-6, p.95-101, 2002b.

YUKSELEN, M.A.; GREGORY, J. **The reversibility of floc breakage.** *International Journal of Mineral Processing, Elsevier B.V.*, 73, p.251-259, 2004a.

YUKSELEN, M.A.; GREGORY, J. ***The effect of rapid mixing on the break-up and re-formation of flocs.*** *Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Society of Chemical Industry*, 79, p.782-788, 2004b.

WESNER, G. ***Mixing, Coagulation and Flocculation.*** In: *MacGraw-Hill, Inc. (eds.) Water Treatment Plant Design*. 3. ed. *American Water Works Association e American Society of Civil Engineers*. E.U.A., p. 87-110, 1998.

APÊNDICE A

Comando Macro

O comando macro desenvolvido para a automatização do processo de tratamento de um grupo de imagens foi criado segundo algoritmo cuja rotina de processamento é descrita conforme segue:

Declaração das variáveis utilizadas no teste de consistência dos valores de entrada e no laço de repetição do processamento ;

Exposição de caixa de texto para entrada de valores das imagens a serem processadas;

Teste de consistência dos valores de entrada numérica de 1 a 65000;

Atribuição dos valores inicial e final para as variáveis utilizadas na repetição do processamento;

Início do laço de repetição para o processamento;

Carregamento da imagem a ser processada;

Abertura da janela do processo de binarização (IpSeg);

Carregamento do arquivo contendo o limiar de binarização;

Ação do botão de aplicar máscara;

Abertura da janela do processo de contagem e medição (IpBlb);

Definição do range de todos os parâmetros de medição do software como iniciando do valor zero;

Ação do botão de contar IpBlbCount();

Ação do botão de medir IpBlbMeasure();

Abertura da janela da tabela de dados brutos da medição IpBlbShowData;

Salvamento da tabela de dados brutos como append em arquivo de extensão .cnt;

Fim do laço de repetição para o processamento.