**AVALIAÇÃO DA RUPTURA E DO RECRESCIMENTO
DE FLOCOS NA EFICIÊNCIA DE SEDIMENTAÇÃO
EM ÁGUA COM TURBIDEZ ELEVADA**

Paulo Eduardo Nogueira Voltan

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Di Bernardo

São Carlos

2007

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Luiz Di Bernado pelos ensinamentos, pela orientação e pela oportunidade de realizar este trabalho.

Aos meus pais Eduardo e Matilde, minhas irmãs Julia e Sandra e toda minha família, pelo incentivo e apoio durante toda esta jornada.

Um agradecimento especial para Angela Di Bernardo Dantas, por toda a contribuição durante a realização da pesquisa.

Aos amigos e colegas que ajudaram a desenvolver este trabalho, Fabian, Luis, Eliane, Emília e Marcelo.

A Ana, pelo carinho, amizade, companhia, incentivo e apoio nos momentos difíceis.

Aos professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP, pelos ensinamentos adquiridos. Aos funcionários e técnicos deste departamento que sempre se encontram à disposição na prestação de serviços, realizando-os com ânimo e disposição.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos colegas de república, Renato, Glauber, Salmo, Jaziel, Ronaldo, Fabião, Luis P.B., Guadalupe e Danusa pela convivência durante esses anos.

E aos colegas e amigos do curso de Pós Graduação em Hidráulica e Saneamento da USP São Carlos.

SUMÁRIO

RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA	5
3.1 Aspectos da agitação	5
3.2 Coagulação.....	8
3.3 Floculação	10
3.4 Ruptura e recrescimento de flocos	18
3.5 Considerações finais sobre a revisão da literatura	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	27
4.2 METODOLOGIA	30
4.2.1 Preparo da água de estudo.....	32
4.2.2 Programação do equipamento jarteste	32
4.2.3 Ensaio no equipamento de jarteste	38
4.2.4 Escolha da dosagem de coagulante e pH de coagulação.....	41
4.2.5 Escolha dos parâmetros da Mistura Rápida	42
4.2.6 Escolha dos parâmetros de Floculação	44
4.2.7 Ensaio de Coagulação, Floculação e Sedimentação	46
4.2.8 Ensaio de Ruptura.....	47
4.2.9 Ensaio de Refloculação	48

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1	Caracterização da água de estudo	49
5.2	Escolha da dosagem de coagulante e pH de coagulação	50
5.3	Escolha dos parâmetros da Mistura Rápida	54
5.4	Escolha dos parâmetros de Floculação	57
5.5	Ensaio de Coagulação, Floculação e Sedimentação (Etapa 1)	65
5.6	Ensaio de Ruptura (Etapa 2)	66
5.7	Ensaio de Refloculação (Etapa 3)	69
5.7.1	Ensaio de Refloculação para $Gr\ 75\ s^{-1}$	70
5.7.2	Ensaio de Refloculação para $Gr\ 150\ s^{-1}$	74
5.7.3	Ensaio de Refloculação para $Gr\ de\ 250\ s^{-1}$	79
5.7.4	Comentários gerais sobre os ensaios de refloculação	82
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXO A		91
ANEXO B		99
ANEXO C		103
ANEXO D		109

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Representação esquemática dos turbilhões em um campo turbulento estacionário.	6
Figura 3.2 – Representação esquemática dos turbilhões em um campo turbulento estacionário.	7
Figura 3.3 – Diagrama típico de coagulação com o sulfato de alumínio e potencial zeta para água com turbidez alta em relação a cor verdadeira (Fonte: DI BERNARDO E DANTAS, 2005).	9
Figura 3.4 – Desempenho da floculação (N_0/N) para uma faixa de valores de T_f e G_f quando utilizado Sulfato de Alumínio como coagulante. Dosagem = 15mg/L; pH = 7,6; $N_0=3,13$ uT; $G_{mr} = 500 \text{ s}^{-1}$ e $T_{mr} = 10\text{s}$. Fonte: BRATBY (1981) <i>apud</i> DI BERNARDO E DANTAS (2005)	12
Figura 3.5 – Imagem de um dos flocos analisados, captada com uma câmera digital acoplada à um microscópio, com a maior distancia horizontal de 32 μm e a maior distância vertical de 21 μm . Fonte: HAN <i>et. al.</i> (2006).	13
Figura 3.6 – Fator de Tamanho médio (FT), Fator de Forma médio (FF) e Turbidez residual do sobrenadante (uT) para: diferentes gradientes de velocidade e tempos de floculação.	14
Figura 3.7 – Fator de Tamanho médio (FT), Fator de Forma médio (FF) e Turbidez residual do sobrenadante (uT) para gradientes de velocidade de floculação de 83 e 143 s^{-1} . Fonte: HAN <i>et. al.</i> (2006).	15
Figura 3.8 – Fator de Tamanho médio (FT), Fator de Forma médio (FF) e Turbidez residual do sobrenadante (uT) para tempos de floculação de 900 e 1500 s^{-1} . Fonte: HAN <i>et. al.</i> (2006).	16

Figura 3.9 – Esquema do sistema de monitoramento óptico. Fonte: GREGORY (2004). ...	19
Figura 3.10 – Desempenho da floculação, ruptura e refloculação, para diferentes rotações durante a ruptura. Fonte: YUKELSEN E GREGORY (2002).	20
Figura 3.11 – Desempenho da floculação, ruptura e refloculação, para diferentes tempos de ruptura. A ruptura ocorreu à 400 rpm. Fonte: YUKELSEN E GREGORY (2004a).	21
Figura 3.12 – Desempenho da floculação, ruptura e refloculação, para diferentes tempos de mistura rápida. A ruptura ocorreu à 400 rpm durante 10 s. Fonte: YUKELSEN E GREGORY (2004b).	22
Figura 3.13 – Turbidez residual do sobrenadante antes e após a ruptura e refloculação, para as mesmas condições da Figura 3.12. Fonte: YUKELSEN E GREGORY (2004b).	23
Figura 3.14 – Distribuição do tamanho dos flocos durante a floculação, ruptura e refloculação, para os coagulantes: Sulfato de Alumínio e Sulfato Férrico; Fonte: JARVIS <i>et al.</i> (2005a).	24
Figura 4.1 – Foto dos equipamentos utilizados nos ensaios de bancada.	28
Figura 4.2 – Foto do equipamento Jarteste (reator estático de bancada).	29
Figura 4.3 – Foto e esquema das alterações realizadas no equipamento Jarteste.	29
Figura 4.4 - Fluxograma dos procedimentos realizados.	31
Figura 4.5 – Foto do painel do controlador digital do equipamento Jarteste.	33
Figura 4.6 – Exemplo da variação da rotação das paletas do equipamento Jarteste em função do tempo de ensaio.	35
Figura 4.7 – Rotação da paletas do equipamento Jarteste em função do gradiente de velocidade médio e a relação entre a temperatura da água e o fator de correção do gradiente de velocidade.	36

Figura 4.8 – Rotação das paletas do equipamento Jarteste em função do tempo de ensaio e a relação entre a rotação e o respectivo gradiente de velocidade, para os ensaios realizados neste trabalho.	38
Figura 4.9 – Diagrama de coagulação típico do sulfato de alumínio para remoção de turbidez, com curvas de mesma turbidez remanescente. . Fonte: DI BERNARDO E DANTAS (2005).....	42
Figura 4.10 - Gráfico típico para realizar a escolha dos parâmetros da Mistura Rápida.	43
Figura 4.11 - Gráfico típico para verificar a turbidez mínima remanescente e o respectivo gradiente de velocidade, para cada tempo de floculação. Fonte: DI BERNARDO E DANTAS. (2005)	45
Figura 4.12 - Gráfico típico para realizar a escolha dos parâmetros de floculação.	45
Figura 4.13 – Esquema dos jarros do equipamento jarteste mostrando altura de sedimentação média em cada coleta.	47
Figura 5.1 - Diagrama de coagulação com turbidez remanescente (uT) em função da dosagem de coagulante versus pH de coagulação ($V_s = 5\text{cm/min}$).....	51
Figura 5.2 - Diagrama de coagulação com turbidez remanescente (uT) em função da dosagem de coagulante versus pH de coagulação ($V_s = 2,5\text{cm/min}$).....	52
Figura 5.3 - Diagrama de coagulação com turbidez remanescente (uT) em função da dosagem de coagulante versus pH de coagulação ($V_s = 1\text{cm/min}$).....	53
Figura 5.4 – Turbidez remanescente em função do Gradiente de Mistura Rápida (Gmr) versus Tempo de Mistura Rápida (Tmr) para a velocidade de sedimentação $V_{s1} = 5\text{ cm/min}$	55
Figura 5.5 – Turbidez remanescente em função do Gradiente de Mistura Rápida (Gmr) versus Tempo de Mistura Rápida (Tmr) para a velocidade de sedimentação $V_{s2} = 2,5\text{ cm/min}$	56

Figura 5.6 – Turbidez remanescente em função do Gradiente de Mistura Rápida (G_{mr}) versus Tempo de Mistura Rápida (T_{mr}) para a velocidade de sedimentação $V_{s3} = 1 \text{ cm/min}$	56
Figura 5.7 – Deposição dos flocos durante os primeiros 5 minutos do ensaio para o $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$	58
Figura 5.8 – Turbidez mínima remanescente e o respectivo gradiente de velocidade, para cada tempo de floculação ($V_{s1} = 5 \text{ cm/min}$). Fonte: Tabelas C.1 a C.12, Anexo C.	59
Figura 5.9 – Turbidez mínima remanescente e o respectivo gradiente de velocidade, para cada tempo de floculação ($V_{s2} = 2,5 \text{ cm/min}$). Fonte: Tabelas C.1 a C.12, Anexo C.	60
Figura 5.10 – Turbidez mínima remanescente e o respectivo gradiente de velocidade, para cada tempo de floculação ($V_{s3} = 1 \text{ cm/min}$). Fonte: Tabelas C.1 a C.12, Anexo C.	61
Figura 5.11 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação com os respectivos gradientes de velocidades de Floculação (G_f), para a velocidade de sedimentação $V_{s1} = 5 \text{ cm/min}$	62
Figura 5.12 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação com os respectivos gradientes de velocidades de Floculação (G_f), para a velocidade de sedimentação $V_{s2} = 2,5 \text{ cm/min}$	63
Figura 5.13 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação com os respectivos gradientes de velocidades de Floculação (G_f), para a velocidade de sedimentação $V_{s3} = 1 \text{ cm/min}$	63
Figura 5.14 – Jarros com flocos formados, ao final da floculação, para $T_f = 20 \text{ min}$ e $G_f = 25 \text{ s}^{-1}$	66
Figura 5.15 – Vista frontal dos jarros mostrando os flocos ao final da floculação e após a ruptura, para os gradientes de velocidade de ruptura de $75, 150$ e 250 s^{-1}	67

Figura 5.16 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para diferentes gradientes de velocidade de ruptura.	68
Figura 5.17 – Vista frontal dos jarros durante o ensaio para Gr igual a 75 s^{-1} e Gr_f igual a 25 s^{-1}	71
Figura 5.18 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 75 s^{-1} e gradiente de velocidade de refloculação de 25 s^{-1}	72
Figura 5.19 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 75 s^{-1} e gradiente de velocidade de refloculação de 20 s^{-1}	73
Figura 5.20 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 150 s^{-1} e gradiente de velocidade refloculação de 25 s^{-1} . Fonte: Tabela D.3, Anexo D.	75
Figura 5.21 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 150 s^{-1} e gradiente de velocidade de refloculação de 20 s^{-1}	76
Figura 5.22 – Vista frontal dos jarros mostrando os flocos durante a refloculação, para o gradiente de velocidade de ruptura de 150 s^{-1}	77
Figura 5.23 – Vista frontal do jarro onde pode-se notar claramente a diferença de concentração dos flocos durante o ensaio para o $Gr_f = 15\text{ s}^{-1}$	78
Figura 5.24 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 150 s^{-1} e gradiente de velocidade de refloculação de 15 s^{-1}	78
Figura 5.25 – Vista frontal dos jarros durante um ensaio. Observa-se o primeiro jarro ao final da sedimentação, o segundo no início da sedimentação e o terceiro ainda refloculando.	79

Figura 5.26 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 250 s^{-1} e gradiente de refloculação de 25 s^{-1} 80

Figura 5.27 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 250 s^{-1} e gradiente de refloculação de 20 s^{-1} 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1– Características Físicas e Composição do Caulim Micronizado	27
Tabela 4.2– Relação entre a rotação das paletas do Jarreste e o gradiente de velocidade médio.....	37
Tabela 5.1– Faixa de valores dos parâmetros da água de estudo.....	49
Tabela 5.2 - Resultados do ensaio de reprodução dos pontos selecionados.	54
Tabela 5.3 - Resultados dos ensaios de escolha dos parâmetros de floculação.	64
Tabela 5.4 - Resultados do ensaio de coagulação, floculação e sedimentação.....	65
Tabela 5.5 - Resultados do ensaio de ruptura, para diferentes gradientes de velocidade durante a ruptura.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

ETA - estação de tratamento de água

FF - fator de forma médio dos flocos

FT - fator de tamanho médio dos flocos

IF - índice de floculação

USP - Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

G	- gradiente de velocidade médio (s^{-1})
G _f	- gradiente de velocidade médio na floculação (s^{-1})
G _{mr}	- gradiente de velocidade médio na mistura rápida (s^{-1})
G _r	- gradiente de velocidade médio na ruptura (s^{-1})
G _{rf}	- gradiente de velocidade médio na refloculação (s^{-1})
pH	- potencial hidrogeniônico
rpm	- rotações por minuto
T _f	- tempo de floculação (min)
T _{mr}	- tempo de mistura rápida (s)
T _r	- tempo de ruptura (s)
T _{rf}	- tempo de refloculação (min)
R	- rotação das paletas (rpm)
rpm	- rotações por minuto
uH	- unidade de cor
U _i	- velocidade instantânea
uT	- unidade de turbidez
V _s	- velocidade de sedimentação (cm/min)

RESUMO

VOLTAN, P.E.N. (2007). *Avaliação da ruptura e do recrescimento de flocos na eficiência da sedimentação em água com turbidez elevada*. São Carlos, 2007. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Durante a floculação, a agitação promove dois efeitos simultaneamente, a agregação e a ruptura. A ruptura ocorre devido à atuação de forças de cisalhamento sobre os flocos. O aumento da agitação com, conseqüentemente, aumento do gradiente de velocidade médio, em água com flocos formados, promove o aumento das forças de cisalhamento e a degradação parcial ou total dos mesmos, em poucos segundos. Retornando à condição anterior de agitação, pode ocorrer o recrescimento dos flocos.

Através de ensaios em reatores estáticos (em equipamento de jarreste) foram estudados os efeitos da ruptura e da refloculação na sedimentação dos flocos, para velocidades de sedimentação entre 0,9 e 7,0 cm/min. A água de estudo foi preparada com caulinita, resultando turbidez de 100 uT, e coagulada com sulfato de alumínio. Foram realizadas as etapas de coagulação, mistura rápida, floculação, ruptura ($G=75, 150$ e 250 s^{-1}) e refloculação ($G=25, 20$ e 15 s^{-1}). A ruptura, em poucos segundos, prejudicou a remoção dos flocos por sedimentação. Quanto maior o gradiente de velocidade na ruptura, maiores foram os valores da turbidez remanescente do sobrenadante, mesmo após a refloculação. A refloculação, mesmo nos primeiros minutos, diminuiu a turbidez remanescente do sobrenadante se comparada a logo após a ruptura. Quanto menor o gradiente de velocidade durante a refloculação, menores foram os valores da turbidez remanescente do sobrenadante. Apenas para velocidades de sedimentação, gradientes de velocidade de ruptura e gradientes de velocidade de refloculação menores ou iguais a 2,5 cm/min, 75 s^{-1} e 15 s^{-1} , respectivamente, foi possível obter sobrenadante com valores de turbidez remanescente similares aos encontrados inicialmente, sem ruptura.

Palavras-chave: floculação, ruptura, refloculação, sedimentação, flocos.

ABSTRACT

VOLTAN, P.E.N. (2007). *Evaluation of the effects of breakage and regrowth of flocs on the efficiency of sedimentation in water with high turbidity*. São Carlos, 2007. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

During the flocculation, the shear rate promotes two effects simultaneously, growth and breakage of flocs. The break up of flocs is caused as a result of disruptive forces. The increase of the shear rate in water with formed flocs increases the disruptive forces and it also can break the flocs partial or totally in a few seconds. Restoring the previous low shear conditions, flocs can grow back.

By using the jar test equipment, the effects of breakage and reflocculation on the efficiency of floc sedimentation were studied, using settling velocities between 0.9 e 7.0 cm/min. Water of study was prepared with groundwater and kaolin, resulting a turbidity of approximately 100 NTU. Coagulation was performed by using aluminum sulfate. Coagulation, flocculation, breakage ($G=75, 150$ e 250 s^{-1}) and reflocculation tests were carried out. In a few seconds the breakage of flocs hindered the settling removal of turbidity. The higher the average shear rate in the break-up, the higher result the residual turbidity even after the reflocculation. In the first minutes, the reflocculation decreased the residual turbidity after sedimentation if compared to the residual turbidity just after the break-up and sedimentation. The lower the average shear rate during the reflocculation, the lower result the supernatant values of residual turbidity. Supernatant could only be obtained with the value of residual turbidity similar to the values found initially (without breakage of flocs) for the settling velocity, the average velocity gradient of break-up and the average velocity gradient of reflocculation equal or less than 2.5 cm/min, 75 s^{-1} e 15 s^{-1} , respectively.

Keywords: flocculation, flock break up, reflocculation, settling, velocity gradient.

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A coagulação e a floculação são operações utilizadas em Estações de Tratamento de Água para propiciar a remoção de impurezas da água. A coagulação consiste em alterar a força iônica do meio, desestabilizando as partículas, e é realizada através de uma agitação intensa e adição de sais de alumínio ou ferro, ou de polímeros catiônicos sintéticos ou vegetais. A floculação acontece por meio de uma agitação relativamente lenta e em tempo mais longo, promovendo formação e crescimento de flocos para posterior remoção através de sedimentação, flotação ou filtração.

A cinética dos encontros entre partículas durante a floculação leva em consideração dois efeitos: a agregação e a ruptura. A agregação é resultado dos encontros das partículas desestabilizadas, sendo que a agitação promove uma maior taxa de encontros, formando aglomerados ou flocos. Na ruptura, ocorre erosão dos flocos por forças de cisalhamento, as quais são normalmente acentuadas com uma agitação intensa ou um grande tempo de floculação. De acordo com YUKSELEN E GREGORY (2002), o aumento do gradiente de velocidade médio da agitação, após a floculação, promove a ruptura dos flocos, reduzindo seu tamanho.

Velocidades relativamente altas nas passagens de água entre as câmaras de uma unidade de floculação e na sua saída, na entrada do decantador, flotador ou filtro, podem gerar a formação de gradientes de velocidade que propiciam a erosão dos flocos antes de sua remoção. Isto ocorre devido a diversos fatores, tais como: mau dimensionamento das passagens e dos orifícios das cortinas de distribuição de água nos decantadores, operação precária e/ou variação de vazão nas ETAs.

YUKSELEN E GREGORY (2002, 2004a e 2004b), YOON E DENG (2004) e JARVIS *et al.* (2005a) estudaram os efeitos da ruptura e refloculação no tamanho dos flocos. De modo geral, observa-se nestes trabalhos que, retornando à condição de agitação anterior, os flocos voltam a crescer. A refloculação depende do

tempo de agitação e do gradiente de velocidade de ruptura. O tamanho dos flocos durante o recrescimento é limitado, raramente atingindo o tamanho anterior à ruptura.

Na maioria dos trabalhos sobre a ruptura dos flocos, raramente relaciona-se o tamanho dos flocos à sua velocidade de sedimentação. Nos casos em é possível observar esta comparação, os tempos de sedimentação são demasiadamente altos levando a velocidades de sedimentação excessivamente baixas, raramente encontradas na prática.

É justamente neste contexto que o presente trabalho se insere, pois pretende avaliar os efeitos da ruptura e da refloculação na remoção de turbidez por sedimentação. Para tanto, será feita uma comparação da turbidez remanescente do sobrenadante, para velocidades de sedimentação entre 0,9 e 7,0 cm/min, para três condições: logo após a floculação; após a ruptura (para três gradientes de velocidades diferentes); e após a refloculação (por diversos tempos e gradientes de velocidades). Desta forma, esta comparação pretende avaliar os efeitos da ruptura e da refloculação nos valores turbidez remanescente do sobrenadante, para as velocidades de sedimentação estudadas.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral foi avaliar a formação, ruptura e o recrescimento de flocos, em água com turbidez elevada, 100 uT, através da comparação da turbidez residual do sobrenadante. Para tanto, foram realizados ensaios em reatores estáticos (jarteste) utilizando Sulfato de Alumínio Líquido Comercial como coagulante.

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) Selecionar, para a água de estudo, as condições de coagulação (pH e dosagem), de mistura rápida (Gradiente Médio de Velocidade e Tempo de Agitação), e as de floculação (Gradiente Médio de Velocidade e Tempo de Agitação).
- b) Estudar a sedimentação dos flocos (turbidez remanescente em função da velocidade de sedimentação) para a água coagulada e floculada nas condições selecionadas no item a.
- c) Estudar a sedimentação dos flocos (turbidez remanescente em função da velocidade de sedimentação) para a água coagulada, floculada, e submetida à ruptura dos flocos (com diferentes Gradientes Médio de Velocidade e Tempos de Agitação).
- d) Estudar a sedimentação (turbidez remanescente em função da velocidade de sedimentação) para a água coagulada, floculada, submetida à ruptura e à refloculação (com diferentes Gradientes Médio de Velocidade e Tempos de Agitação).

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Aspectos da agitação

Os dois tipos de escoamento, laminar e turbulento, estão relacionados à viscosidade e inércia das moléculas de água. No escoamento laminar predominam os efeitos viscosos, os quais impedem a agitação enquanto que no escoamento turbulento, as forças inerciais são significativamente maiores que as viscosas, apresentando então, variações aleatórias das grandezas físicas (velocidade, pressão) com o tempo e as coordenadas do escoamento. Mesmo para o escoamento turbulento, não se têm as características intrínsecas da turbulência importantes para a obtenção do gradiente de velocidades médio de uma agitação.

Segundo AMIRTHARAJAH E TRUSLER (1986), em campos turbulentos, estatisticamente estacionários, o movimento da água é caracterizado por variações aleatórias da velocidade no tempo e espaço, resultando valores médios distintos. Desta forma, a velocidade instantânea em um ponto qualquer (U_i) pode ser representada pelo valor médio (U_m) somado a uma flutuação (u_i) como mostra a equação 1, e representada pela .

$$U_i = U_{med} + u_i \quad (1)$$

Em que:

U_i : velocidade instantânea em um ponto qualquer;

U_m : velocidade instantânea média;

u_i : flutuação dos valores de velocidade instantânea;

Figura 3.1 – Representação esquemática dos turbilhões em um campo turbulento estacionário.
Fonte: DI BERNARDO E DANTAS (2005).

O valor médio destas flutuações é necessariamente igual a zero, porém, a raiz quadrada do valor médio das flutuações ao quadrado representa a variância da velocidade naquele ponto considerado, definida como intensidade de turbulência u_t . A equação que define a intensidade de turbulência é dada por:

$$u_t = \sqrt{\frac{\sum u_i^2}{N_m}} \quad (2)$$

em que:

u_i : flutuação dos valores de velocidade instantânea;

N_m : número de medidas da velocidade instantânea

A turbulência pode ser associada a um conjunto de turbilhões caracterizados por suas velocidades, ou pelas distâncias em que elas mudam significativamente. Há um elevado grau de correlação entre velocidades em pontos localizados a distâncias pequenas se comparadas com o tamanho dos turbilhões (ou escala de turbulência) e pouca ou nenhuma correlação entre velocidades em pontos localizados a distâncias maiores que o tamanho dos turbilhões (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Representação esquemática dos turbilhões em um campo turbulento estacionário.
Fonte: DI BERNARDO E DANTAS (2005).

A escala de turbulência representa o tamanho médio dos turbilhões turbulentos ou o tamanho do volume unitário na água no qual existe grau elevado de correlação de velocidades. Os turbilhões maiores contêm grande parte da energia turbulenta do sistema. As forças inerciais do sistema possibilitam a transferência de energia dos maiores para os menores turbilhões, estes dissipados pelos efeitos da viscosidade. Para grandes intensidades de turbulência, a faixa do equilíbrio universal é dividida em duas subfaixas, uma de menores turbilhões (microescala de turbulência) considerada como a subfaixa de dissipação viscosa, e outra de turbilhões maiores (macroescala de turbulência), denominada subfaixa de convecção inercial. Desta forma, quando menor a microescala de turbulência de uma agitação, maior a energia dissipada.

O gradiente de velocidade de uma agitação é proporcional à potência dissipada pela viscosidade da água. Sendo assim, existe uma forte relação entre a microescala de turbulência (subfaixa de dissipação viscosa) e o gradiente de velocidade de uma agitação. Com o aumento da agitação e o aumento da energia dissipada por ela, a microescala de turbulência diminuiu, aumentando o gradiente de velocidade médio desta agitação. Em uma câmara de mistura, o gradiente de velocidade está associado à potência média introduzida por unidade de volume.

3.2 Coagulação

A maior parte das tecnologias de tratamento de água utilizam a operação de coagulação como etapa inicial, a qual é realizada normalmente através da adição de sais de alumínio ou ferro. Esta operação é resultado da reação do coagulante com a água, formando espécies hidrolisadas com carga positiva, e do contato destas espécies com as impurezas. Assim, a força iônica do meio é alterada, permitindo que partículas se aproximem e se juntem, formando flocos que podem ser removidos através de sedimentação, flotação e/ou filtração. Tais impurezas – dentre as quais destacam-se: partículas coloidais, substâncias húmicas e organismos – possuem cargas superficiais negativa, o que impede a sua aproximação, permanecendo, portanto, suspensas no meio se suas características não forem alteradas.

Segundo DI BERNARDO E DANTAS (2005), atualmente considera-se a coagulação como a atuação individual ou a combinação de quatro mecanismos distintos: compressão da camada difusa; adsorção e neutralização de cargas; varredura; e formação de pontes. O mecanismo da varredura é importante quando se deseja formar flocos de maior tamanho e com velocidades de sedimentação relativamente altas se comparados com flocos obtidos através da coagulação em outros mecanismos.

O mecanismo da varredura é muito utilizado nas estações de tratamento de água nas quais a floculação e sedimentação (ou flotação) antecedem a filtração rápida. De acordo com a dosagem de coagulante adicionada, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água, poderá ocorrer a formação de precipitados. As partículas coloidais presentes comportam-se como núcleos de condensação para estes precipitados.

ARMITHARAJAH E MILLS (1982) propuseram uma forma mais simples de se estudar a coagulação, baseada nos diagramas de solubilidade do alumínio e nas condições de coagulação, como dosagem de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14,3 \text{ H}_2\text{O}$ e pH da mistura, de uma água com turbidez relativamente alta se comparada com a cor verdadeira. Neste diagrama (Figura 3.3), além das curvas das espécies hidrolisadas do alumínio, há a delimitação das regiões nas quais predominam os diferentes mecanismos de coagulação. Segundo os autores, o diagrama da Figura 3.3 corresponde a uma situação particular do uso do diagrama de coagulação do sulfato de alumínio, pois as

linhas que delimitam as regiões se alteram com as características da água. Dentre estas, mostradas no diagrama e delineadas pelo pH de coagulação e dosagem de coagulante, destaca-se a da coagulação na varredura com pH normalmente entre 6 e 8, e com dosagens de Sulfato de Alumínio geralmente maiores que 30 mg/L. Esta região é relativamente ampla para uma mesma eficiência de remoção de turbidez por sedimentação.

Figura 3.3 – Diagrama típico de coagulação com o sulfato de alumínio e potencial zeta para água com turbidez alta em relação a cor verdadeira (Fonte: DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

É importante esclarecer que não há dosagem ótima de coagulante, tampouco pH de coagulação ótimo. Na verdade existe um par de valores “dosagem de coagulante x pH de coagulação” apropriado para cada situação, levando em conta a necessidade de utilização de acidificante ou alcalinizante, os custos dos produtos químicos, a turbidez remanescente desejada, etc. Para a escolha deste par de valores, PAVANELLI (2001) reforça a importância de se construir o diagrama de coagulação para cada água de estudo e, assim, definir as regiões de maiores remoção de turbidez.

3.3 Floculação

Durante a floculação, as interações ocorrem entre as impurezas desestabilizadas e os precipitados de metal ou espécies hidrolisadas positivas, formando partículas ou flocos que são removidos posteriormente por sedimentação, flotação ou filtração. Estas interações ocorrem devido a três mecanismos distintos: interação pericínética (movimento Browniano), em que a energia térmica causa o movimento errático das partículas; interação ortocinética, quando os encontro das partículas são decorrentes do gradiente de velocidade, tanto no escoamento laminar quanto no turbulento; sedimentação diferenciada, na qual partículas com diferentes velocidades de sedimentação podem se encontrar.

Como a maioria das dispersões coloidais possui partículas relativamente grandes para se movimentarem com energia própria, a agregação destas pelo movimento Browniano não produz resultados relevantes. Este tipo de interação poderá ser significativo para as partículas menores, as quais se agregam e formam partículas maiores. Segundo DI BERNARDO E DANTAS (2005) a existência de efeitos hidrodinâmicos tende a retardar, ou até evitar, o contato entre duas partículas pela ação da interação pericínética. Neste caso, a contribuição dada pela interação pericínética não é significativa em tratamento de água.

A agitação lenta promovida durante a floculação aumenta a taxa de encontros entre as partículas, que se agregam para formar partículas maiores, denominadas flocos. De acordo com o tamanho dos flocos, as forças de cisalhamento geradas pela agitação podem causar a sua ruptura. Desta forma, a agregação e ruptura ocorrem simultaneamente. Segundo BRATBY *et. al.* (1977), a equação para descrever a cinética da floculação em reator estático, assumindo o número de partículas primárias igual a turbidez remanescente, é semelhante à equação 3 dada por:

$$\frac{N_0}{N_1} = \left[\frac{K_B}{K_A} G_f + \left(1 - \frac{K_B}{K_A} G_f \right) e^{-K_A G_f T_f} \right]^{-1} \quad (3)$$

em que:

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 (s);

G_f : gradiente de velocidade médio durante a floculação (s^{-1});

T_f : tempo de floculação (s).

Segundo BRATBY (1981), para a determinação dos coeficientes de agregação e ruptura na floculação são realizados ensaios de coagulação, floculação e sedimentação por um tempo longo (geralmente maior que 2h) para condições otimizadas da mistura rápida e diferentes tempos de agitação e de gradiente de velocidade de floculação, e construídas figuras de N_0/N_1 em função do tempo de floculação, para cada gradiente de velocidade estudado, conforme mostrado na Figura 3.4. Nesta Figura, tem-se o valor de N_0/N ($N=N_1$) para cada valor de G_f , a partir da porção horizontal da curva de melhor ajuste de todos os dados experimentais.

Figura 3.4 – Desempenho da floculação (N_0/N) para uma faixa de valores de T_f e G_f quando utilizado Sulfato de Alumínio como coagulante. Dosagem = 15 mg/L; pH = 7,6; N_0 = 3,13 uT; G_{mr} = 500 s^{-1} e T_{mr} = 10s. Fonte: BRATBY (1981) *apud* DI BERNARDO E DANTAS (2005)

Segundo PÁDUA (1994) a metodologia proposta por BRATBY (1981) não apresentava resultados satisfatórios, pois não notava-se a tendência assintótica da eficiência de remoção de turbidez com o aumento do tempo de floculação. LIBÂNIO (1995) observou que diversos trabalhos experimentais mostram nítida redução da eficiência da floculação com o contínuo aumento do período de agitação. Assim, durante a floculação, os flocos atingem o seu tamanho máximo a partir do qual passa a prevalecer o mecanismo de ruptura, de forma que o aumento do tempo de floculação tende a reduzir as dimensões dos flocos e também a eficiência da floculação.

HAN *et al.* (2006) realizaram um trabalho comparando o tamanho e forma dos flocos (através de imagens) com a turbidez residual. Para tanto, foram realizados ensaios de jarreste, nos quais a cada 300 s coletava-se uma amostra do interior dos jarros. Esta amostra era depositada numa célula para poder capturar a imagem através de uma câmera digital acoplada a um microscópio. Através de um programa computacional, relacionava-se a imagem obtida a diversas propriedades dos flocos, como tamanho e forma, entre outros. Na Figura 3.5, é possível observar a fotografia de um dos flocos e os valores da maior distância horizontal e da maior distância vertical. Foram escolhidos dois parâmetros para avaliar o tamanho e forma dos flocos: Fator de Tamanho (FT) definido pela média da maior distância horizontal do floco e da maior distância vertical; e o Fator de Forma (FF), proporcional à área dividida pelo perímetro ao quadrado – assim flocos mais compactos possuem maior valor de FF.

Figura 3.5 – Imagem de um dos flocos analisados, captada com uma câmera digital acoplada à um microscópio, com a maior distância horizontal de 32 μm e a maior distância vertical de 21 μm . Fonte: HAN *et al.* (2006).

Ressalta-se que estes dois parâmetros, FT e FF, avaliam os flocos apenas no plano, ou seja, não foi possível estudar parâmetros relativos ao volume dos flocos. No mesmo instante da coleta, outro jarro do equipamento era submetido à sedimentação por 30 min e o sobrenadante era coletado para medir-se a turbidez.

Os resultados de turbidez remanescente, FT médio e FF médio, obtidos para diversos gradientes de velocidade de floculação e tempos de floculação estão mostrados na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Fator de Tamanho médio (FT), Fator de Forma médio (FF) e Turbidez residual do sobrenadante (uT) para: diferentes gradientes de velocidade e tempos de floculação.

Fonte: HAN *et. al.* (2006).

Na Figura 3.7 são apresentados diagramas que fazem uma comparação dos valores FT, FF e da turbidez remanescente do sobrenadante para dois gradientes de velocidades diferentes: 83 e 143 s^{-1} . Nesta Figura observa-se que com o aumento do tempo de floculação o FT aumentou até um tamanho limitado, a partir do qual o valor diminuiu. Por outro lado, o FF apresentou mudanças significativas apenas para tempos de floculação altos, mesmo momento em que se observou a diminuição do valor de FF. Entretanto, o valor de turbidez residual, a partir do tempo de floculação de 600 s não apresentou mudanças significativas.

Figura 3.7 – Fator de Tamanho médio (FT), Fator de Forma médio (FF) e Turbidez residual do sobrenadante (uT) para gradientes de velocidade de floculação de 83 e 143 s^{-1} . Fonte: HAN *et. al.* (2006).

Na Figura 3.8 é apresentada uma comparação dos valores FT, FF e da turbidez remanescente do sobrenadante para dois tempos de floculação diferentes: 900 e 1500 s^{-1} . Nesta Figura é possível observar que o FT aumentou com o aumento do gradiente de velocidade até por volta de 100 s^{-1} , momento em que o valor do FT diminuiu bruscamente. Por outro lado, conforme o FT diminuiu, o FF aumentou. É possível observar neste caso, também, que para ambos tempos de floculação a turbidez residual teve valores menores para valores maiores de FT.

Figura 3.8 – Fator de Tamanho médio (FT), Fator de Forma médio (FF) e Turbidez residual do sobrenadante (uT) para tempos de floculação de 900 e 1500 s^{-1} . Fonte: HAN *et. al.* (2006).

Com os resultados obtidos neste trabalho, é possível observar que: tempos de floculação maiores levam a flocos de maior tamanho (FT médio maior) e mais compactos (FF médio maior), embora o valor de turbidez residual não apresente mudança significativa de valor; gradientes de velocidade maiores geram flocos menores e mais compactos, porém com pouca eficiência de remoção por sedimentação; e que nem sempre flocos com FF maior possuem maior remoção por sedimentação. Os autores concluíram que existe uma relação entre a densidade dos flocos, o gradiente de velocidade e o tempo de floculação, contudo não foi possível relacionar o tamanho e forma dos flocos à eficiência de remoção por sedimentação, uma vez que isso dependeria também de fatores como densidade e força das ligações internas dos flocos. Destaca-se também que, após os 30 min de sedimentação, a velocidade de sedimentação resultante é inferior a 0,5 cm/min, raramente encontrada em ETAs.

3.4 Ruptura e recrescimento de flocos

A coagulação envolve a adição do coagulante e agitação intensa, a fim de promover a hidrólise do coagulante e assim desestabilizar as impurezas presentes na água. Após este processo, com o intuito de promover o crescimento dos flocos, geralmente inicia-se a floculação. Esta, por sua vez, propicia o encontro ortocinético das partículas através de agitação lenta, formando flocos e promovendo o seu crescimento, como discutido anteriormente. Um balanço entre os efeitos de agregação e ruptura dos flocos leva a um estado estático da distribuição dos tamanhos dos flocos, em que o tamanho dos mesmos depende do gradiente de velocidade da agitação. A desagregação é decorrente da atuação de: forças de cisalhamento sobre os flocos, de forma que a energia dissipada durante a floculação ocasiona o aumento destas forças, e da diferença de pressão em lados opostos de flocos relativamente grandes, provocando sua fragmentação. Conforme o aumento do gradiente de velocidade, flocos pré-formados podem ser levados à ruptura dependendo do seu tamanho em relação à micro-escala de turbulência. Entretanto, não existe nenhuma razão para os flocos não se formarem novamente após o seu rompimento, uma vez que as interações entre as partículas são fenômenos físicos.

Com o objetivo de estudar os efeitos da ruptura e da refloculação, YUKSELEN E GREGORY (2002, 2004a e 2004b) realizaram ensaios em jarrete monitorando o tamanho dos flocos através de um sensor óptico. A técnica utilizada nestes trabalhos foi descrita no trabalho de GREGORY (2004). Neles foram utilizados reatores estáticos, jarros de forma cilíndrica, com volume de 800 ml. O sistema de monitoramento óptico utilizado era composto de uma pequena mangueira transparente que conduzia o sobrenadante do jarro para o equipamento de leitura óptica. Este equipamento, chamado de AFD (Analisador Fotométrico de Dispersões, PDA 2000, Rank Brothers Ltd, UK), é baseado na aferição da intensidade de luz transmitida através da mangueira transparente. A relação entre a luz transmitida e a recebida no sensor durante o escoamento aumenta durante a floculação e diminui durante a ruptura. Desta forma, nestes trabalhos a relação entre a luz transmitida e recebida está expressa através do Índice de Floculação (IF), calculado através de uma fórmula semi-empírica diretamente proporcional à raiz quadrada do número de partículas primárias por floco, de forma que também é possível associar este parâmetro ao tamanho do floco. Após

passar pelo AFD, o escoamento da mangueira segue para uma bomba, que controla a recirculação do líquido, e, depois, é finalmente retornado ao jarro. Na Figura 3.9 é possível observar um esquema de um ensaio com monitoramento óptico dinâmico.

Figura 3.9 – Esquema do sistema de monitoramento óptico. Fonte: GREGORY (2004).

Através de reatores estáticos e do monitoramento óptico dinâmico mencionado anteriormente, YUKSELEN E GREGORY (2002) estudaram a ruptura de flocos, com agitações respectivas a gradientes de velocidade entre 180 e 520 s^{-1} e de 10 s de duração. Na Figura 3.10 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados para dois gradientes de ruptura, respectivos a rotações das paletas de 400 e 200 rpm . Nestes ensaios, a água foi coagulada, floculada por 10 minutos com rotação das paletas de 50 rpm (G_f em torno de 23 s^{-1}) e, a partir deste momento, submetida à ruptura e refloculação diversas vezes. Observa-se nesta figura que: a ruptura se mostrou mais pronunciada para a agitação de 400 rpm do que para 200 rpm ; logo aos primeiros segundos da agitação respectiva à ruptura, o IF diminuiu sensivelmente; e, após o restabelecimento das condições de floculação, o IF voltou a aumentar. Os autores concluíram que: flocos formados com suspensão de argila e sulfato de alumínio se rompem em poucos segundos quando a intensidade da agitação aumenta; retornando às condições de agitação anteriores, observa-se o recrescimento dos flocos até um tamanho limitado, menor do que o tamanho encontrado anteriormente; o recrescimento se mostrou mais limitado para agitação mais intensa; e que, desta forma, nota-se que a irreversibilidade da ruptura dos flocos é parcial.

Figura 3.10 – Desempenho da floculação, ruptura e refloculação, para diferentes rotações durante a ruptura. Fonte: YUKELSEN E GREGORY (2002).

Utilizando o mesmo monitoramento óptico dinâmico, YUKELSEN E GREGORY (2004a) estudaram a ruptura e recrescimento dos flocos para diversos coagulantes a base de alumínio e a influência do tempo de agitação relativo à ruptura dos flocos. Para tanto, foram realizados ensaios em reatores estáticos, nos quais, após os 10 min de floculação, a rotação das paletas aumentava de 50 para 400 rpm, permanecendo nesta rotação durante tempos variados entre 5 e 300 s. Após este tempo, a rotação retornava a 50 rpm. Os resultados destes ensaios podem ser observados na Figura 3.11. Nesta figura, nota-se que: durante a floculação, os flocos atingem um valor constante do IF, indicando que neste momento os efeitos de agregação e ruptura entraram em equilíbrio; para maiores tempos de ruptura, mais limitado torna-se o recrescimento dos flocos; e que mesmo para a agitação de menor duração, 5 s, foi possível observar que a os flocos, durante a refloculação, não retornaram as condições iniciais.

Figura 3.11 – Desempenho da floculação, ruptura e refloculação, para diferentes tempos de ruptura. A ruptura ocorreu à 400 rpm. Fonte: YUKELSEN E GREGORY (2004a).

No trabalho supracitado, verifica-se que a maior parte dos casos de ruptura ocorrem nos primeiros segundos após o aumento da agitação. Neste trabalho, os autores concluíram que: retornando às condições de floculação inicial, flocos previamente rompidos voltam a crescer; o recrescimento foi limitado, sempre sendo menor do que a condição inicial; e que o recrescimento se mostrou mais limitado para agitação mais intensa, assim como de maior duração.

YUKSELEN E GREGORY (2004b) avaliaram o efeito da refloculação de águas submetidas a diferentes tempos de mistura rápida através do monitoramento óptico dinâmico, descrito no trabalho de GREGORY (2004), e do valor de turbidez residual do sobrenadante coletado. O gradiente de velocidade durante a mistura rápida foi o de 518 s^{-1} (400 rpm) e o tempo foi variado entre 5 e 60 s. Em seguida, iniciou-se a floculação com gradiente de velocidade de 23 s^{-1} (50 rpm) durante 10 minutos. Ao final da floculação, aumentava-se novamente a rotação das paletas para 400 rpm, sendo mantida nesta rotação durante 10 s – a fim de promover a ruptura dos flocos. A partir deste ponto, a rotação das paletas retornava a 50 rpm, promovendo a refloculação durante o tempo restante do ensaio (num total de 20 minutos de ensaio). Ao final do

ensaio, dava-se início à sedimentação por 30 min e o sobrenadante era coletado. O resultados dos ensaios estão mostrados na Figura 3.12 na forma de gráfico relacionando o IF com o tempo do ensaio, para diferentes tempos de mistura rápida. Neste gráfico, é possível observar que: flocos formados após a ruptura têm o valor do IF próximo ao dos formados com maior tempo de mistura rápida, antes da ruptura; e que praticamente não há influência do tempo de mistura rápida nos flocos formados durante a refloculação. Nota-se, inclusive, que o valor do IF durante a refloculação foi praticamente o mesmo para todos os casos, indicando que o tamanho dos flocos na refloculação é função das condições de ruptura, e não do modo de formação do floco. Na Figura 3.13 é possível observar os resultados da turbidez do sobrenadante coletado antes da ruptura, e após a refloculação. Observa-se, nesta figura, que o valor de turbidez residual antes e depois se distanciam para o tempo de mistura rápida de 5 s e se aproximam para 60 s. Fica evidente, portanto, que existe alguma relação entre o IF e a sedimentação dos flocos.

Figura 3.12 – Desempenho da floculação, ruptura e refloculação, para diferentes tempos de mistura rápida. A ruptura ocorreu à 400 rpm durante 10 s. Fonte: YUKELSEN E GREGORY (2004b).

Figura 3.13 – Turbidez residual do sobrenadante antes e após a ruptura e refloculação, para as mesmas condições da Figura 3.12. Fonte: YUKELSEN E GREGORY (2004b).

YOON E DENG (2004) estudaram a floculação e refloculação de uma suspensão de argila utilizando diferentes polímeros como coagulantes. Para avaliar o crescimento e o recrescimento dos flocos, utilizou-se um equipamento jarteste e um microscópio provido de um leitor a laser, o qual era inserido no jarro por meio de fibras ópticas, onde era medido o tamanho e a distribuição das partículas que entravam na região do foco do equipamento. Foram testados variados tipos de polímeros e os autores concluíram que a floculação é mais efetiva, ou seja, forma flocos de maior tamanho para polímeros em que o mecanismo de coagulação é preferencialmente a formação de pontes. Entretanto, a refloculação só foi possível quando induzida pela força eletrostática de atração entre as partículas suspensas. Desta forma, polímeros com alta densidade de carga mostraram grande capacidade de refloculação, mesmo tendo formado inicialmente flocos de tamanho menor e polímeros de menor carga eletrostática, em que a formação de pontes é mais expressiva, mostraram pequena ou quase nenhuma capacidade de refloculação.

Segundo JARVIS *et al.* (2005a), os flocos quebram em seus pontos fracos, portanto quando eles se reagrupam tendem a formar estruturas mais estáveis e compactas. Essas estruturas compactas são a causa do limitado tamanho dos flocos durante o recrescimento. Isto ocorre porque as ligações químicas se quebram durante a ruptura, e assim, sítios de ligação que estavam disponíveis antes da desagregação ficam indisponíveis. Os autores também concluíram que as ligações físicas têm maior

capacidade de serem re-feitas após a ruptura dos flocos. A água de estudo possuía uma quantidade considerável de matéria orgânica natural e estudou os seguintes coagulantes: sulfato de alumínio; cloreto de polialumínio (*PolyDAMAC*); sulfato férrico; e Fe precipitado. A ruptura e a reagregação foram avaliadas através do tamanho dos flocos, utilizando equipamento contador de partículas por difração de laser. O comportamento para os diferentes coagulantes durante a floculação, ruptura e refloculação podem ser observados na Figura 3.14. Através dessa diferença de comportamento os autores propuseram uma comparação da força dos flocos formados.

Sulfato de Alumínio

Sulfato Férrico

Figura 3.14 – Distribuição do tamanho dos flocos durante a floculação, ruptura e refloculação, para os coagulantes: Sulfato de Alumínio e Sulfato Férrico; Fonte: JARVIS *et al.* (2005a).

Com o objetivo de validar uma forma de calcular a força dos flocos, JARVIS *et al.* (2005b) estudaram diversas formas de realizar esta análise e concluíram que esta força deveria ser medida indiretamente, relacionando-se o tamanho dos flocos no final da floculação com aquele obtido no fim da ruptura. Deste modo, os flocos rompidos que permanecerem de tamanho mais próximo àquele anterior à ruptura possuem maior força. De modo geral, os autores também concluíram que conforme o tamanho dos flocos aumenta, sua força diminui.

3.5 Considerações finais sobre a revisão da literatura

Os resultados dos trabalhos sobre o efeito da ruptura e refloculação de YUKSELEN E GREGORY (2002, 2004a e 2004b), YOON E DENG (2004) e JARVIS *et al.* (2005a) abordam, principalmente, os tamanhos dos flocos. Raramente se observa, nestes trabalhos, a relação da ruptura e refloculação com a sedimentação. Os resultados sobre a sedimentação dos flocos apresentados são relativos a tempos de sedimentação muito longos (em geral maiores que 20 min) conduzindo a velocidades de sedimentação extremamente baixas, menores que 0,3 cm/min. Estas velocidades são muito distantes das encontradas na prática em decantadores, na ordem de 1 à 5 cm/min.

HAN *et al.* (2006) concluiu que flocos com tamanhos e características diferentes podem ter a mesma capacidade de sedimentação. Isto ocorre, pois a sedimentação não depende só do tamanho e largura do flocos, mas também de características como densidade e força de ligação, entre outros. Neste sentido, este trabalho foi proposto visando esclarecer os efeitos da ruptura e da refloculação, na sedimentação dos flocos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos e a metodologia utilizados para a realização do trabalho.

4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Foi utilizado Sulfato de Alumínio Líquido Comercial $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14,3 \text{ H}_2\text{O}$ (50 % do valor de massa em água) como coagulante, preparado-se em uma solução com concentração final de 20 mg/L do produto comercial. Para correção de pH, foram utilizadas soluções de Ácido Clorídrico HCl a 0,1 N e de Hidróxido de Sódio NaOH com concentração de 1 mg/L. As soluções foram preparadas semanalmente, com água deionizada. Para conferir turbidez à água de estudo foi utilizada caulinita, com nome comercial de caulim micronizado, com as principais características apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1– Características Físicas e Composição do Caulim Micronizado

Propriedades Físicas	
Aspecto	Pó fino
Cor	Branca
Peso Específico (g/cm ³)	2,60 ± 0,05
Densidade Aparente solta (g/cm ³)	0,47 ± 0,02
Densidade Aparente compactada (g/cm ³)	0,57 ± 0,02
pH (solução 5%)	7,70 ± 1,0
Carbonatos	Isento
Composição	Porcentagem expressa em óxidos
SiO ₂ (Dióxido de Silício)	47,3
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	36,3
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	0,63
TiO ₂ (Dióxido de Titânio)	0,51
CaO (Óxido de Cálcio)	< 0,05
MgO (Óxido de Magnésio)	< 0,10
MnO (Óxido de Manganês)	< 0,01
Na ₂ O (Óxido de Sódio)	0,52
K ₂ O (Óxido de Potássio)	9,3

Fonte: CIA COMERCIAL PROMINÉRIOS (2002)

Os equipamentos utilizados para a execução dos ensaios e para medir os parâmetros, estão descritos a seguir:

- Potenciômetro modelo 420A da marca ORION com eletrodo combinado para medição do pH.
- Turbidímetro modelo 2100P da marca HACH e cubeta para medição da turbidez.
- Espectrofotômetro de leitura digital, modelo DR4000 da marca HACH, com duas cubetas (mostrados na Figura 4.1) para medição da cor verdadeira e cor aparente.
- Reatores estáticos de bancada, jarreste, da marca NOVA ÉTICA, com seis jarros com capacidade de 2 L cada, provido de eixos com paletas e rotações de variação programável entre 20 e 600 rpm (ver Figura 4.2). Destaca-se que as rotações das paletas neste equipamento são ajustadas por um controlador digital com capacidade para seis programações diferentes.
- Equipamentos diversos: Cronômetro digital; Termômetro de bulbo; Balança eletrônica da marca METTLER, vidrarias variadas, e copos descartáveis de 50 ml de volume para efetuar as coletas.

Figura 4.1 – Foto dos equipamentos utilizados nos ensaios de bancada.

Figura 4.2 – Foto do equipamento Jarteste (reator estático de bancada).

Fez-se necessário adaptar registros globo de 3,2 mm de diâmetro, nos jarros do equipamento jarteste, com eixo situado à 7 cm da superfície do nível máximo de água (ponto de coleta) de modo a permitir coletas individuais dos jarros, mostrados na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Foto e esquema das alterações realizadas no equipamento Jarteste.

4.2 METODOLOGIA

O trabalho foi realizado com uma única água de estudo, a qual será apresentada mais adiante, e um único tipo de coagulante, o Sulfato de Alumínio Líquido Comercial. Os procedimentos foram agrupados em três fases, descritas a seguir e ilustradas pelo fluxograma apresentado na Figura 4.4. Destaca-se que a terceira fase foi subdivida em três etapas, também descritas neste trabalho.

FASE 1: Preparo e caracterização da água de estudo.

FASE 2: Ensaios em reatores estáticos jarteste para seleção dos parâmetros dos ensaios

Fase 2.1 - Escolha da dosagem e pH de coagulação

Fase 2.2 - Escolha dos parâmetros de mistura rápida (Gmr e Tmr)

Fase 2.3 – Escolha dos parâmetros de floculação (Gf e Tf).

FASE 3: Ensaios em reatores estáticos jarteste para avaliação da remoção de turbidez por sedimentação para três etapas de procedimentos:

Etapa 1 - Ensaios de coagulação, floculação e sedimentação;

Etapa 2 - Ensaios de coagulação, floculação, ruptura e sedimentação dos flocos;

Etapa 3 - Ensaios de coagulação, floculação, ruptura, refloculação e sedimentação dos flocos.

Figura 4.4 - Fluxograma dos procedimentos realizados.

4.2.1 Preparo da água de estudo

A água de estudo foi preparada a partir da água do Poço EESC/USP. Para conferir turbidez a essa água, além da turbidez inicial da própria, foi empregada uma suspensão de argila (caulinita).

A suspensão-mãe de argila foi preparada conforme a metodologia proposta por DI BERNARDO (2004), misturando 1.000 gramas de caulinita a 50 litros de água e agitando por 2 horas. Após 10 horas de repouso, o sobrenadante foi coletado da suspensão-mãe, para que as partículas de maior tamanho fossem, então, removidas, de forma a reduzir os erros na preparação da água de estudo. Do sobrenadante, obtido com turbidez de 382 uT, adicionou-se um volume de 30 L a aproximadamente 500L de água do poço da EESC/USP, resultando ao final, turbidez à água de estudo no valor da ordem de 100 uT.

4.2.2 Programação do equipamento jarteste

O equipamento de jarteste utilizado na realização destes ensaios possui um painel provido de um controlador digital, no qual é possível programar os ensaios a serem executados. Ressalta-se que nem todos os equipamentos de jarteste possuem este controle automatizado, sendo que nestes equipamentos o controle da rotação das paletas é feito manualmente. Os ensaios realizados neste trabalho foram feitos com a programação do equipamento, embora a metodologia possa ser seguida com um equipamento de ajuste manual da rotação das paletas.

A memória deste equipamento permite o armazenamento de seis programas. Nestes programas, devem-se definir os parâmetros para, no máximo, doze intervalos. Para cada intervalo, define-se a rotação inicial do equipamento, o tempo de agitação e a rotação a ser atingida ao final. Desta forma, o aparelho deverá iniciar o programa com a rotação das paletas no valor definido, e ir variando a rotação das mesmas, conforme for passando o tempo de agitação, de modo que, ao final deste tempo, a rotação das paletas seja igual à rotação final. Para o próximo intervalo, a rotação inicial das paletas é a rotação final das paletas do intervalo anterior.

Para facilitar a compreensão do funcionamento da programação do controlador digital, serão definidos os seguintes parâmetros: i , número de intervalos (no máximo 12); R_0 , a rotação inicial do equipamento; R_1 , a rotação ao final do primeiro intervalo e do início do segundo; R_2 , a rotação ao final do segundo intervalo e do início do terceiro; e assim sucessivamente até o R_i , rotação ao final do último intervalo (em que i é o número de intervalos); T_1 , tempo de agitação do primeiro intervalo; T_2 , tempo de agitação do segundo intervalo; e assim sucessivamente até o T_i , tempo de agitação do último intervalo.

O painel do controlador digital está mostrado na Figura 4.5. Neste painel existe um visor de cristal líquido e cinco botões: $\uparrow$, seta para cima; $\downarrow$, seta para baixo; $\curvearrowright$, modo programação; $\odot$, inicia/para (a rotação das paletas); e $\leftarrow$, entre.

Figura 4.5 – Foto do painel do controlador digital do equipamento Jarteste.

Ressalta-se que o equipamento também pode ser operado no modo manual. Para realizar um ensaio no modo manual, deve-se:

- ligar o equipamento;
- escolher a rotação das paletas com os botões $\uparrow$ e $\downarrow$;
- pressionar $\odot$ para iniciar a rotação das paletas;
- pressionar os botões $\uparrow$ e $\downarrow$ para aumentar ou diminuir a rotação das paletas;
- pressionar $\odot$ para parar a rotação das paletas.

Para realizar a programação de um ensaio e armazenar na memória, deve-se:

- ligar o equipamento;
- pressionar ;
- com o auxílio dos botões e selecionar o número do programa (de 1 a 6) e pressionar ;
- com o auxílio dos botões e selecionar a opção “EDITAR” e pressionar ;
- escolher o número i de intervalos (de 1 a 12), pressionando os botões e e pressionar ;
- escolher a R_0 (rotação inicial das paletas, em rpm) e apertar ; o T_1 (tempo do primeiro intervalo, em segundos) e pressionar ; o R_1 (rotação ao final do primeiro intervalo e início do segundo) e apertar ; assim sucessivamente até terem sido determinados o T_i e o R_i (onde i é o número de intervalos);
- Ao escolher o valor da rotação das paletas do último intervalo (R_i) e pressionar , o controlador armazena automaticamente o programa na memória.

Desta forma, a rotação do equipamento deverá variar durante o tempo do ensaio, conforme o exemplo ilustrado pela Figura 4.6. Neste exemplo foram definidos: o número de intervalos (i) igual a 4; R_0 igual a 100 rpm; T_1 igual a 60 s; R_1 igual a 300 rpm; T_2 igual a 10 s; R_2 igual a 300 rpm; T_3 igual a 1 s; R_3 igual a 32 rpm; T_4 igual a 1199 s; e R_4 igual a 32 rpm.

Figura 4.6 – Exemplo da variação da rotação das paletas do equipamento Jarteste em função do tempo de ensaio.

Para executar um dos programas previamente armazenados na memória, deve-se:

- ligar o equipamento;
- pressionar o botão ;
- com o auxílio dos botões e selecionar o número do programa (de 1 a 6) e pressionar o botão ;
- com o auxílio dos botões e selecionar a opção “INICIAR” e pressionar o botão ;
- Após o tempo total do ensaio ($T_1 + T_2 + \dots + T_i$) pressionar o botão , para interromper a rotação das paletas. Caso não seja pressionado o botão , o equipamento continuará a agitação com rotação igual a do último intervalo (R_i).

Destaca-se que, durante os ensaios, o tempo real foi de 5 a 8% maior do que o tempo inserido no programa (T). Este erro se mostrou expressivo para tempos relativamente grandes. Desta forma, antes de iniciar um ensaio, foi calibrado o valor tempo do equipamento com o auxílio de um cronômetro. Assim, o valor do tempo T inserido no equipamento era de menor valor que o tempo real, porém que representasse o tempo que realmente se desejava manter a agitação.

O gráfico da Figura 4.7 mostra a relação entre a rotação das paletas do equipamento jarteste e o respectivo gradiente de velocidades. Nesta Figura também é possível observar a relação entre a temperatura da água e o fator de correção do gradiente de velocidade médio.

Figura 4.7 – Rotação da paletas do equipamento Jarteste em função do gradiente de velocidade médio e a relação entre a temperatura da água e o fator de correção do gradiente de velocidade.

Fonte: DI BERNARDO *et al.* (2002)

Através do gráfico da Figura 4.7 e da relação entre a temperatura do ensaio e o fator de correção do valor do gradiente de velocidades, 25 °C e 0,985 respectivamente, foi construída a

Tabela 4.2, relacionando a rotação das paletas do equipamento jarteste e o gradiente de velocidade médio.

Tabela 4.2– Relação entre a rotação das paletas do Jarteste e o gradiente de velocidade médio.

Rotação das paletas (rpm)	Gradiente de velocidade médio (s^{-1})	Rotação das paletas (rpm)	Gradiente de velocidade médio (s^{-1})
25	15	76	75
32	20	140	150
35	25	190	250
42	30	235	400
46	35	300	600
51	40	355	800
55	45	420	1000
68	60	485	1200

Neste trabalho, os ensaios seguiram a seguinte programação: número de intervalos de tempo igual a 8; R_0 igual a 100 rpm; T_1 igual a 60 s; R_1 respectivo ao Gmr; T_2 respectivo ao Tmr; R_2 respectivo ao Gmr; T_3 igual a 1 s; R_3 respectivo ao Gf; T_4 igual ao Tfloc; R_4 respectivo ao Gf; T_5 igual a 4 s; R_5 respectivo ao Gr; T_6 igual a 5 s; R_6 respectivo ao Gr; T_7 igual a 1 s; R_7 respectivo ao Grf; T_8 igual ao Trf; e R_8 respectivo ao Grf. Nos ensaios nos quais não foram realizados os procedimentos de ruptura, a rotação das paletas foi desligada após o final do T_4 . Nos ensaios nos quais se realizou a ruptura e não a refloculação, a rotação das paletas foi interrompida após o final do T_7 . Nos demais ensaios, a rotação das paletas foi interrompida no final do tempo T_8 . O gráfico da Figura 4.8 ilustra a programação dos ensaios realizados neste trabalho.

Figura 4.8 – Rotação das paletas do equipamento Jarteste em função do tempo de ensaio e a relação entre a rotação e o respectivo gradiente de velocidade, para os ensaios realizados neste trabalho.

4.2.3 Ensaios no equipamento de jarteste

Os ensaios no equipamento jarteste foram realizados de acordo com a sequência e procedimentos descritos a seguir:

- Programar o equipamento jarteste, para o ensaio a ser realizado. Inserir os tempos de agitação previamente calibrados no equipamento, e as respectivas agitações. Realizar um teste para aferir se o tempo de agitação programado está condizente com o tempo que realmente se deseja manter a agitação.
- A água bruta, mantida a uma temperatura de 25°C , deve ser adicionada, aleatoriamente, em porções de 300 a 500 mL, em cada um dos jarros, de

forma a distribuí-la de modo homogêneo entre os 6 jarros. Cinco a seis porções completam os 2 L necessários para iniciar o teste;

- c. Colocar os volumes correspondentes às dosagens do coagulante nas cubetas do equipamento;
- d. Colocar, com o auxílio de pipetas, os volumes correspondentes ao acidificante ou alcalinizante dentro dos jarros.
- e. Ligar o aparelho, acionar o cronômetro e ao mesmo tempo iniciar o programa preestabelecido, com as paletas abaixadas. Todos os programas iniciam com a rotação de 100 rpm, agitando a água dos jarros para misturar o acidificante ou alcalinizante por 60 s, antes de adicionar o coagulante.
- f. Passado os 60 s iniciais, a rotação das paletas deve estar naquela respectiva ao gradiente de velocidade médio da mistura rápida (Gmr). Neste instante deve ser adicionado o coagulante. Logo após a adição do coagulante, deverá ser realizada a leitura do pH de coagulação da água de cada jarro.
- g. Após o tempo estabelecido para a mistura rápida (Tmr), a programação do aparelho deverá ajustar a rotação do aparelho para aquela correspondente ao gradiente de velocidade médio de floculação (Gf).
- h. Nos ensaios nos quais não será realizada a ruptura, após o tempo de floculação, Tf (60 s + Tmr + Tf, no cronômetro), desligar o aparelho e erguer as paletas.
- i. Nos ensaios nos quais se realizarem o procedimento de ruptura (itens 4.2.8 e 4.2.9) a programação do aparelho deve ajustar a rotação do equipamento para obter o gradiente médio de velocidades de ruptura

(Gr), durante o tempo de 4 s; após este tempo, deverá ser mantida a rotação do aparelho durante 5 s e, a partir deste momento a rotação do equipamento deve desacelerar pelo tempo de 1 s. Caso não seja realizada a refloculação, neste momento deve-se interromper a rotação e erguer as paletas (item 4.2.8).

- j. Nos ensaios nos quais se realizar a refloculação (item 4.2.9), a programação do aparelho deve ajustar a rotação do aparelho, para obter o gradiente de velocidade médio correspondente à Refloculação (Gr_f). Após o tempo de refloculação ($60\text{ s} + T_{mr} + T_f + 10\text{ s} + T_{rf}$), deve-se parar a rotação do aparelho e erguer as paletas.
- k. Com o aparelho desligado, erguer as paletas e realizar as coletas nos tempos preestabelecidos, para representar as velocidades de sedimentação (V_s). A velocidade de sedimentação deve ser calculada dividindo a altura média entre a superfície de água e o tubo de coleta pelo intervalo de tempo entre o fim da agitação e o tempo médio da coleta.
- l. Efetuar, 5 segundos antes da coleta, descarte para que a água coletada não sofra interferência da água remanescente na mangueira de coleta.
- m. Coletar as amostras no tempo de 10 segundos começando 5 segundos antes e com término 5 segundos depois do tempo de coleta.
- n. Medir os parâmetros desejados, pH, turbidez e/ou cor nas amostras coletadas.
- o. Limpar os jarros do equipamento jarteste, com água corrente. Os demais equipamentos devem ser limpos também, de acordo com as recomendações dos fabricantes. Os frascos de coleta devem ser limpos com água correntes e enxaguados com água deionizada.

4.2.4 Escolha da dosagem de coagulante e pH de coagulação

O objetivo desta etapa foi selecionar a dosagem do coagulante e o pH de coagulação, adequados para a realização dos demais ensaios deste trabalho. Para tanto, adotaram-se os seguintes parâmetros com referência ao trabalho feito por Pavanelli (2001) – o qual utilizou uma água com características similares à água de estudo do presente trabalho (turbidez de 100uT): tempo de mistura rápida (Tmr) igual à 10 s; gradiente de velocidade médio da mistura rápida (Gmr) igual a 1000 s^{-1} ; tempo de floculação (Tf) igual à 20 min; gradiente de velocidade médio na floculação (Gf) igual a 25 s^{-1} ; e coletou-se amostras correspondentes às velocidades de sedimentação de 1,0, 2,5 e 5,0 cm/min.

Inicialmente foram realizados dois ensaios, nos quais foi adicionado um volume diferente da solução de coagulante em cada jarro. Desta forma, cada jarro possuía dosagem diferente do coagulante. As dosagens resultantes nos jarros variaram de 20 até 75 mg/L (de 5 em 5 mg/L). Notou-se que para as dosagens de 25 mg/L ou maiores, a remoção de turbidez por sedimentação foi relevante, para as três velocidades de sedimentação.

Em seguida foram realizados ensaios, em que em cada jarro era adicionado o volume de coagulante respectivo à dosagem de 25 mg/L e o volume da solução de acidificante ou de alcalinizante, visando obter diferentes valores de pH em cada jarro. Desta maneira procurou-se obter os valores de turbidez residual do sobrenadante para a mesma dosagem de coagulante, e pH variando entre 6 e 7,3. Este procedimento foi repetido também para as dosagens maiores que 25 mg/L, até a dosagem de 75 mg/L. Deste modo, obteve-se, para cada velocidade de sedimentação, o valor de turbidez remanescente em função do par de valores “pH de coagulação e dosagem de coagulante”.

Esses pares de valores foram plotados em forma de diagramas similares ao da Figura 4.9, um para cada velocidade de sedimentação marcando-se o valor da turbidez remanescente do sobrenadante. Traçaram-se curvas de mesma turbidez remanescente visando obter a região cuja eficiência de remoção seja a maior possível, onde o mecanismo de coagulação é preferencialmente o da varredura.

Figura 4.9 – Diagrama de coagulação típico do sulfato de alumínio para remoção de turbidez, com curvas de mesma turbidez remanescente. . Fonte: DI BERNARDO E DANTAS (2005).

Foram escolhidos três pontos nas regiões de maior remoção de turbidez, para as três velocidades de sedimentação, pois estas foram diferentes para cada velocidade de sedimentação, dificultando a escolha do ponto com maior eficiência de remoção. Em seguida, foi realizado um ensaio de reprodução destes pontos, em réplica, para escolher aquele que apresentar sobrenadante com a menor turbidez.

4.2.5 Escolha dos parâmetros da Mistura Rápida

Com a dosagem de coagulante e pH de Coagulação selecionados na etapa anterior, selecionaram-se os parâmetros de mistura rápida (T_{mr} e G_{mr}). Foram fixados, de acordo com o item anterior: tempo de floculação (T_f) em 20 min; gradiente de velocidade médio da floculação (G_f) em 25 s^{-1} ; e coletadas amostras correspondentes às velocidades de sedimentação de 1,0 , 2,5 e 5,0 cm/min.

Os dois parâmetros de mistura rápida, T_{mr} e G_{mr} , foram variados. Os tempos de mistura rápida adotados foram de 5, 10, 20, 30, 45 e 60 s. Os gradientes médios de velocidade foram de 400, 600, 800, 1000 e 1200 s^{-1} .

Para essa etapa, foram realizados os procedimentos descritos no item 4.2.3, sendo que, para a etapa 4.2.3.f, a programação do aparelho jarteste elevou a rotação do equipamento para a rotação respectiva a um dos Gmr determinados. Neste momento, os volumes da solução de coagulante foram adicionados em tempos diferentes, de modo que em cada jarro houvesse um tempo de mistura rápida correspondente aos escolhidos acima. Assim, obteve-se para um determinado Gmr, os valores de turbidez remanescente do sobrenadante para todos os valores de Tmr. Este procedimento foi realizado até se obter todos os valores de turbidez remanescente do sobrenadante, para o par de valores Tmr e Gmr e respectivas velocidades de sedimentação. Com estes valores, foram construídos três gráficos (um para cada velocidade de sedimentação) com o valor de turbidez remanescente para cada par de valores, Tmr e Gmr, similares ao gráfico apresentado na Figura 4.10. Foi escolhido o par de valores, Tmr e Gmr, que apresentou a menor turbidez remanescente para as diversas velocidades de sedimentação.

Figura 4.10 - Gráfico típico para realizar a escolha dos parâmetros da Mistura Rápida.
Fonte: DI BERNARDO *et al.* (1999)

4.2.6 Escolha dos parâmetros de Floculação

Tendo sendo selecionados a dosagem de coagulante, o pH de coagulação e os parâmetros da mistura rápida (Tmr e Gmr) de acordo com os resultados dos ensaios dos itens 4.2.4 e 4.2.5, foram estudados, a partir de então, os diversos parâmetros de floculação (Tf e Gf) em busca dos valores adequados para essa água de estudo. Foram fixadas as coletas das amostras correspondentes às velocidades de sedimentação de 1,0, 2,5 e 5,0 cm/min. Foram variados os dois parâmetros de floculação, Tf e Gf. Os tempos de floculação foram de 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 22,5, 25, 30, 35 e 40 min, e os gradientes de velocidade médios de floculação 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 60 s⁻¹.

Para essa etapa, procedeu-se da forma descrita no item 4.2.3, sendo que, para a etapa 4.2.3.h, a paleta de cada jarro foi erguida no tempo correspondente ao tempo de floculação em cada jarro. A floculação de cada jarro foi, portanto, interrompida no tempo correspondente ao Tf e neste instante iniciou-se a sedimentação. Para cada gradiente de velocidade de floculação foram realizados dois ensaios, em que o tempo de floculação era diferente para cada jarro. Desta forma, para cada gradiente de velocidade, foram obtidos os resultados para os doze tempos de floculação. Foram obtidos para um determinado Gf, os valores de turbidez remanescente para os doze os tempos de floculação.

Esse procedimento foi realizado até serem obtidos todos os valores de turbidez remanescente para o par de valores Tf e Gf. Os valores de turbidez remanescente para um mesmo tempo de floculação foram plotados em gráficos de turbidez remanescente em função do gradiente de velocidade médio de floculação, similar ao gráfico da , um para cada velocidade de sedimentação. Desta forma, para cada tempo de floculação, selecionou-se o gradiente de velocidade médio que apresentou o menor valor de turbidez remanescente do sobrenadante.

Figura 4.11 - Gráfico típico para verificar a turbidez mínima remanescente e o respectivo gradiente de velocidade, para cada tempo de floculação. Fonte: DI BERNARDO E DANTAS. (2005)

Os valores da turbidez remanescente mínima e do respectivo gradiente de velocidade médio, para cada tempo de floculação foram plotados em três gráficos, um para cada velocidade de sedimentação, similares ao apresentado na Figura 4.12. A partir destes gráficos, selecionou-se o tempo de floculação, bem como seu respectivo gradiente de velocidade, os quais forneceram um valor de turbidez remanescente satisfatório, ou seja, que não apresentasse aumento de remoção de turbidez significativa com o aumento do tempo de floculação.

Figura 4.12 - Gráfico típico para realizar a escolha dos parâmetros de floculação. Fonte: DI BERNARDO *et al.* (1999)

4.2.7 Ensaios de Coagulação, Floculação e Sedimentação

Nesta etapa foram feitos ensaios em jarreste, seguindo o procedimento descrito no item 4.2.3, utilizando-se os parâmetros selecionados de acordo com os itens 4.2.4, 4.2.5, 4.2.6, e 4.2.7 (dosagem de coagulante e acidificante/alcalinizante, Tmr e Gmr, Tf e Gf).

Posteriormente, foram coletadas amostras nos tempos 1, 2, 3, 4, e 6 min. As velocidades de sedimentação correspondentes foram calculadas dividindo-se a distância entre a superfície da água e o ponto de coleta pelo tempo de sedimentação. Devido ao grande número de coletas, ao volume descartado e ao volume coletado, houve um rebaixamento significativo na superfície da água. Fez-se necessário, portanto, considerar este rebaixamento. Notou-se que, a cada descarte, o nível de água abaixou 0,1 cm e, a cada coleta, 0,3 cm. Sendo assim, na Figura 4.13, representa-se graficamente a distância média em cada coleta entre o nível de água no jarro e o ponto de coleta, para poder calcular as velocidades de sedimentação correspondentes.

Para os tempos de coleta de 1, 2, 3, 4 e 6 min, as alturas médias de sedimentação encontradas foram de 7,0; 6,6; 6,2; 5,8; e 5,4 centímetros, e a partir destes valores foram calculadas as velocidades de sedimentação respectivas de cada coleta: 7,00; 3,30; 2,07; 1,45 e 0,90 cm/min.

Os ensaios realizados nessa etapa foram feitos em réplica. Para comparação posterior, foram considerados os valores médios dos resultados dos dois ensaios.

Figura 4.13 – Esquema dos jarros do equipamento jarteste mostrando altura de sedimentação média em cada coleta.

4.2.8 Ensaios de Ruptura

Para avaliar os efeitos da ruptura dos flocos na eficiência da sedimentação foram realizados ensaios em equipamento jarteste, seguindo o procedimento descrito no item 4.2.3, e com os parâmetros selecionados de acordo com os itens 4.2.4, 4.2.5, 4.2.6, e 4.2.7 (DSA, pH coag, Tmr, Gmr, Tf e Gf). Ao final da floculação, executou-se o procedimento descrito no item 4.2.3.i., com gradientes de velocidade médio de ruptura dos flocos (Gr) de 75, 150 e 250 s^{-1} . O tempo de ruptura (Tr) foi de 10 s, sendo 4 s de aceleração da rotação do equipamento até atingir a rotação equivalente ao Gr, 5 s de agitação nesta rotação, e 1 s para desaceleração das paletas.

Mesmo que o objetivo deste estudo não fosse o de reproduzir uma situação de ruptura de flocos em passagens e comportas de uma Estação de Tratamento de Água, buscou-se trabalhar com o menor tempo de ruptura possível, uma vez que resultados para grandes tempos de ruptura, da ordem de minutos, não teriam significado prático nenhum, pois não ocorrem nas ETAs.

Após o termino do Tr ($T_{mr}+T_f+T_r$, no cronômetro), foram coletadas amostras nos tempos 1, 2, 3, 4, e 6 min, correspondentes às velocidades de sedimentação de 7,00; 3,30; 2,07; 1,45 e 0,90 cm/min, calculadas conforme o item 4.2.7.

4.2.9 Ensaios de Refloculação

Os ensaios desta etapa foram realizados em equipamento jarteste, seguindo o procedimento descrito no item 4.2.3, e com os parâmetros selecionados de acordo com os itens 4.2.4, 4.2.5 e 4.2.6, (DSA, pH coag, T_{mr} , G_{mr} , T_f e G_f). Logo após o termino da floculação, procedeu-se a fuptura dos flocos, descrita no item anterior, para os mesmos Gr. Após a ruptura, retornaram as condições de floculação (Refloculação), com os gradientes de velocidades médio durante a refloculação (G_{rf}) iguais aos escolhido no item 4.2.6 ou menores. Os tempos de refloculação foram de 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 25, 30, 35 e 40 min.

Com o fim do Trf ($T_{mr}+T_f+T_r+T_{rf}$, no cronômetro), coletaram-se amostras nos tempos 1, 2, 3, 4, e 6 minutos, correspondentes às velocidades de sedimentação de 7,00; 3,30; 2,07; 1,45 e 0,90 cm/min, calculadas conforme o item 4.2.7.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os dados obtidos nos ensaios e os parâmetros medidos e adotados, bem como a discussão dos resultados encontrados.

5.1 Caracterização da água de estudo

Na Tabela 5.1, apresentam-se as principais características da água de estudo observadas durante o período de execução dos ensaios. Esta água apresentou uma variação de pH considerável: inicialmente o pH era de 6,81, passando a ser, cerca de 7,52 após duas semanas. Deste momento em diante, a água não apresentou mais mudança significativa dos parâmetros. Esta variação de pH ocorreu devido, provavelmente, ao desprendimento de gases dissolvidos – como a água bruta é proveniente de poço artesiano, ela sofre uma diminuição de pressão quando exposta à atmosfera, de forma que esta variação de pressão leva a uma nova condição de equilíbrio.

Tabela 5.1– Faixa de valores dos parâmetros da água de estudo.

Parâmetro	Valor
Temperatura (°C)	24,5 a 25,5
pH	7,50 a 7,55
Turbidez (uT)	99 a 103
Cor Aparente (uH)	420 a 440
Cor Verdadeira (uH)	2
Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃)	25,6 a 26,2
Condutividade (µS/cm)	46,5
Dureza (mg/L de CaCO ₃)	17 a 18

Visando não comprometer os resultados, os ensaios foram iniciados após a estabilização do pH da água de estudo. A princípio, a medição dos valores dos parâmetros foi realizada diariamente. Porém, devido à pequena variação dos valores, estendeu-se os intervalos entre as medições. Não houve influência perceptível dessa variação nos resultados do trabalho.

5.2 Escolha da dosagem de coagulante e pH de coagulação

Os ensaios desta série foram realizados segundo a metodologia descrita no item 4.2.4, com os valores de Gmr, Tmr, Gf e Tf obtidos no trabalho de Pavanelli (2001): 1000 s^{-1} ; 10 s; 25 s^{-1} ; e 20 min, respectivamente. Os ensaios foram feitos para três velocidades de sedimentação, a fim de evitar a influência desta na escolha correta dos parâmetros de coagulação. Procurou-se sempre trabalhar na faixa de pH de 6 a 8, recomendada para o sulfato de alumínio.

Primeiramente, realizaram-se dois ensaios para dosagens entre 10 e 75 mg/L de coagulante, buscando a faixa de dosagens em que se observasse remoção considerável de turbidez. Notou-se que, a partir da dosagem de 25 mg/L, a remoção de turbidez começou a apresentar resultados de alguma relevância (menor que 10 para as duas últimas velocidades de sedimentação). Neste momento, realizou-se um ensaio com a dosagem de 25mg/L de coagulante, e com dosagens de alcalinizante/coagulante de modo a variar o pH em cada jarro, em torno de 0,2. Este procedimento foi repetido para as demais dosagens de coagulante, a partir de 25 mg/L até a dosagem de 75 mg/L (variando de 5 em 5 mg/L), visando preencher as regiões em gráficos com “dosagem de coagulante *versus* pH de coagulação” com os valores de turbidez residual dos ensaios.

Ao final, foram realizados 17 ensaios, totalizando 102 pontos do diagrama para cada velocidade de sedimentação. Os resultados dos ensaios desta etapa estão mostrados nas Tabelas do Anexo A, A.1 a A.17. Nelas, encontram-se: as dosagens de Sulfato de Alumínio Líquido Comercial (50% do valor de massa em água) adicionado nos jarros; as dosagens de alcalinizante ou de acidificante adicionadas para variação do pH; o pH medido ao final da coagulação; e a turbidez remanescente do sobrenadante para os diferentes tempos de sedimentação.

De posse destes resultados, os valores de turbidez remanescente foram plotados em diagramas de coagulação (“dosagem de coagulante *versus* pH de coagulação”). Nestes diagramas foram traçadas, sempre que possível, curvas de mesma turbidez remanescente. Foram, então, determinadas as regiões de maior eficiência de remoção de turbidez, para cada velocidade de sedimentação. Estes diagramas estão mostrados na Figura 5.1 para a Vs de 5,0 cm/min, na Figura 5.2 para a Vs de 2,5 cm/min e na Figura 5.3 para a Vs de 1,0 cm/min.

Figura 5.1 - Diagrama de coagulação com turbidez remanescente (uT) em função da dosagem de coagulante versus pH de coagulação ($V_s = 5\text{ cm/min}$).
Fonte: Tabelas A.1 a A.17 do Anexo A.

Diagrama de coagulação

Velocidade de Sedimentação 2,5 cm/min

Figura 5.2 - Diagrama de coagulação com turbidez remanescente (uT) em função da dosagem de coagulante versus pH de coagulação ($V_s = 2,5\text{ cm/min}$)
Fonte: Tabelas A.1 a A.17 do Anexo A.

Figura 5.3 - Diagrama de coagulação com turbidez remanescente (uT) em função da dosagem de coagulante versus pH de coagulação ($V_s = 1\text{ cm/min}$)

Fonte: Tabelas A.1 a A.17 do Anexo A.

A escolha de um único ponto nos três diagramas de coagulação não foi possível, pois as regiões com maior remoção de turbidez mostraram-se diferentes para cada velocidade de sedimentação. Assim, ficou evidente a influência da velocidade de sedimentação nos diagramas de coagulação. Com a finalidade de facilitar a escolha do par de valores “dosagem de coagulante e pH de coagulação” adequado para esta água de estudo, foram escolhidos três pontos do diagrama de coagulação e reproduzidos ensaios em jarreste para validação da eficiência de remoção de turbidez dos mesmos. Os pontos escolhidos foram: A, com dosagem de coagulante de 40 mg/L e pH de coagulação de 6,60; B, com dosagem de coagulante de 55 mg/L e pH de coagulação de 6,50; C, com dosagem de coagulante de 70 mg/L e pH de coagulação de 6,32.

Em seguida, realizou-se um ensaio com as mesmas características dos anteriores, para a validação destes três pontos encontrados. Este ensaio foi replicado: cada dois jarros foram submetidos às mesmas condições de coagulação, mistura rápida e floculação. Os resultados estão disponíveis na Tabela 5.2. De acordo com os dados apresentados, o ponto que produziu os melhores resultados foi o ponto B, com dosagem de coagulante de 55 mg/L e pH de coagulação de 6,50. Este par de valores foi o escolhido para a realização dos ensaios seguintes.

Tabela 5.2 - Resultados do ensaio de reprodução dos pontos selecionados.

Jarro (Ponto)	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio	Hidróxido de Sódio		Ts1= 1,4 min	Ts2= 2,8 min	Ts3= 7 min
	Líquido Comercial			Vs1= 5,0 cm/min	Vs2= 2,5 cm/min	Vs3= 1,0 cm/min
	(mg/L)	(mL)				
1 (A)	40,0	1,0	6,60	13,0	4,95	4,31
2 (A)	40,0	1,0	6,60	12,8	5,11	4,23
3 (B)	55,0	2,0	6,49	16,7	3,51	2,73
4 (B)	55,0	2,0	6,50	15,2	3,19	2,48
5 (C)	70,0	4,0	6,32	18,8	5,71	3,94
6 (C)	70,0	4,0	6,31	20,7	4,31	3,86

5.3 Escolha dos parâmetros da Mistura Rápida

Seguindo a metodologia proposta no item 4.2.5, foram realizados os ensaios para escolha dos parâmetros da Mistura Rápida. A dosagem de coagulante e o pH de coagulação utilizados durante esta etapa de ensaios foram os selecionados no item 5.2: DSA de 55 mg/L; e pH coag de 6,50. As condições de floculação foram as

mesmas utilizadas anteriormente, ou seja, gradiente médio de velocidade durante a floculação de 25 s^{-1} e tempo de floculação de 20 minutos.

Foram testados os gradientes de velocidade de mistura rápida (Gmr) de 400, 600, 800, 1000 e 1200 s^{-1} , e os tempos de mistura (Tmr) de 5, 10, 20, 30, 45 e 60 s. A cada ensaio, o equipamento jarreste foi ajustado na rotação referente ao Gmr, e foram adicionados o volume da solução de coagulante em tempos diferentes buscando obter, em cada jarro, um tempo de mistura diferente para um mesmo gradiente de velocidade.

Os resultados dos ensaios para as três velocidades de sedimentação são explicitados no Anexo B, Tabelas B.1 a B.5. No total, realizaram-se 5 ensaios, um para cada gradiente de velocidade. Para facilitar a análise, estes resultados foram plotados em gráficos tridimensionais, com os gradientes de velocidade no eixo das abscissas, o tempo de mistura no eixo das ordenadas e a turbidez residual como sendo a terceira dimensão. Foram feitos três gráficos, um para cada velocidade de sedimentação, os quais são mostrados na Figura 5.4 para a V_s de 5,0 cm/min, na Figura 5.5 para a V_s de 2,5 cm/min e na Figura 5.6 para a V_s de 1,0 cm/min, respectivamente.

Figura 5.4 – Turbidez remanescente em função do Gradiente de Mistura Rápida (Gmr) versus Tempo de Mistura Rápida (Tmr) para a velocidade de sedimentação $V_{s1} = 5 \text{ cm/min}$

Fonte: Tabelas B.1 a B.5 do Anexo B.

Figura 5.5 – Turbidez remanescente em função do Gradiente de Mistura Rápida (Gmr) versus Tempo de Mistura Rápida (Tmr) para a velocidade de sedimentação Vs2 = 2,5 cm/min
 Fonte: Tabelas B.1 a B.5 do Anexo B.

Figura 5.6 – Turbidez remanescente em função do Gradiente de Mistura Rápida (Gmr) versus Tempo de Mistura Rápida (Tmr) para a velocidade de sedimentação Vs3 = 1 cm/min
 Fonte: Tabelas B.1 a B.5 do Anexo B.

Analisando-se os gráficos obtidos, vários gradientes e tempos se mostraram eficientes para as velocidades de sedimentação de 5,0 e 2,5 cm/min.

Contudo, ao analisar os resultados para a velocidade de sedimentação de 1,0 cm/min, nota-se que os melhores resultados são os correspondentes ao gradiente de velocidade de 600 s^{-1} e tempos de 10 e 20 s, e ao gradiente de velocidade de 400 s^{-1} e tempo de 20 s. Para as demais velocidades de sedimentação, o gradiente de velocidade e o tempo de mistura que produziram os melhores resultados foram $G_{mr} = 600 \text{ s}^{-1}$ e $T_{mr} = 10 \text{ s}$. Este par de valores foi utilizado nos ensaios dos próximos itens.

5.4 Escolha dos parâmetros de Floculação

De acordo com os resultados encontrados nas etapas anteriores, os parâmetros adotados para os ensaios desta série foram: DSA de 55mg/L, pH coag de 6,50, G_{mr} de 600 s^{-1} e T_{mr} de 10 s. Os ensaios foram realizados conforme descrição do Capítulo 4, no item 4.2.6.

Após a mistura rápida, a rotação das paletas diminuiu para a rotação correspondente ao gradiente de velocidade de floculação (G_f), de acordo com a programação do aparelho jarteste. Cada jarro do equipamento foi submetido a um tempo diferente de floculação, erguendo-se a paleta do jarro correspondente no tempo de floculação desejado. Desta forma, iniciava-se a sedimentação neste jarro, enquanto nos outros prosseguia a floculação.

Nesta série de ensaios, os gradientes de velocidade médio (G_f) foram de 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 60 s^{-1} e os tempos de agitação (T_f) foram de 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 22,5, 25, 30, 35 e 40 min. Para cada gradiente de velocidade foram realizados dois ensaios em jarteste. Foram coletadas amostras do sobrenadante correspondentes às velocidades de sedimentação de 5,0, 2,5, e 1,0 cm/min. Os valores de turbidez remanescente do sobrenadante, para as três velocidades de sedimentação, estão mostrados no Anexo C, nas Tabelas C.1 a C.12. Ressalta-se, no ensaio para o gradiente de velocidade de 20 s^{-1} , que no decorrer dos primeiros cinco minutos houve a formação de depósitos dos flocos no fundo do jarro, como mostra a foto da Figura 5.7. Por tal motivo, este gradiente de velocidade não foi considerado na escolha dos parâmetros de floculação.

Figura 5.7 – Deposição dos flocos durante os primeiros 5 minutos do ensaio para o $Gf = 20s^{-1}$.

Os resultados, para um mesmo tempo de floculação, foram colocados em gráficos de turbidez remanescente do sobrenadante em função do gradiente de velocidades médio. Desta forma, observando-se as curvas para um mesmo tempo de floculação é possível determinar qual o gradiente de velocidade que produz o menor valor de turbidez remanescente. Os gráficos estão mostrados nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10, referentes as velocidades de sedimentação de 5,0, 2,5 e 1,0 cm/min, respectivamente. Nestes gráficos, foram agrupados os tempos de floculação de 5, 10, 15, 20, 25 e 35 min e de 7,5, 12,5, 17,5, 22,5, 30 e 40 min de modo a permitir uma melhor visualização destes resultados.

Figura 5.8 – Turbidez mínima remanescente e o respectivo gradiente de velocidade, para cada tempo de floculação (Vs1 = 5 cm/min). Fonte: Tabelas C.1 a C.12, Anexo C.

Figura 5.9 – Turbidez mínima remanescente e o respectivo gradiente de velocidade, para cada tempo de floculação (Vs2 = 2,5 cm/min). Fonte: Tabelas C.1 a C.12, Anexo C.

Figura 5.10 – Turbidez mínima remanescente e o respectivo gradiente de velocidade, para cada tempo de floculação (Vs3 = 1 cm/min). Fonte: Tabelas C.1 a C.12, Anexo C.

Observando os gráficos das Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, selecionou-se o resultado referente ao gradiente de velocidade que obteve a menor turbidez remanescente para cada tempo de floculação. Estes resultados foram plotados em gráficos de “turbidez mínima remanescente *versus* tempo de floculação”, um para cada velocidade de sedimentação. Foram traçadas também linhas de tendência dos pontos para uma melhor avaliação dos resultados.

Figura 5.11 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação com os respectivos gradientes de velocidades de Floculação (G_f), para a velocidade de sedimentação $V_{s1} = 5 \text{ cm/min}$

Fonte: Tabelas C.1 a C.12, Anexo C.

Figura 5.12 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação com os respectivos gradientes de velocidades de Floculação (Gf), para a velocidade de sedimentação $V_{s2} = 2,5$ cm/min
Fonte: Tabelas C.1 a C.12, Anexo C.

Figura 5.13 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação com os respectivos gradientes de velocidades de Floculação (Gf), para a velocidade de sedimentação $V_{s3} = 1$ cm/min
Fonte: Tabelas C.1 a C.12, Anexo C.

Observando os gráficos das Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, nota-se que a partir do tempo de 15 minutos começa a mudar a curvatura da linha de tendência dos pontos, passando por um mínimo, em que o aumento de tempo de floculação não implica no aumento de remoção de turbidez por sedimentação. E, para tempos de floculação superiores a 25 minutos, aumenta a turbidez remanescente do sobrenadante. Deste modo, observa-se que para valores de T_f entre 15 e 25 minutos e G_f de 25 s^{-1} a turbidez remanescente mínima possui menor valor.

Na Tabela 5.3 estão mostrados os valores de turbidez mínima do sobrenadante para cada tempo de floculação e o correspondente gradiente de velocidade de floculação. Observa-se que para valores de T_f entre 15 e 25 minutos e G_f de 25 s^{-1} a turbidez remanescente mínima possui menor valor. Nota-se, também, que para o tempo de floculação de 20 minutos, destacado na linha rosa, obtém-se um valor de turbidez remanescente do sobrenadante, para as velocidades de sedimentação de 1,0 e 5,0 cm/min, ligeiramente superior ao ponto referente ao obtido com o 17,5 minutos, destacado na linha amarela. Esta diferença é pouco significativa em vista da turbidez inicial (100 uT). Para a velocidade de sedimentação de 2,5 cm/min, a turbidez remanescente do sobrenadante respectiva ao tempo de floculação de 20 minutos possui menor valor do que a respectiva ao tempo de floculação de 17,5 min. Sendo assim, foram escolhidos o gradiente de velocidade de 25 s^{-1} e tempo de floculação de 20 min como parâmetros de floculação adequados para esta água de estudo, os quais foram utilizados nas etapas subseqüentes deste trabalho.

Tabela 5.3 - Resultados dos ensaios de escolha dos parâmetros de floculação.

Tempo de Floculação, T_f (min)	Vs1 = 5,0 cm/min		Vs2 = 2,5 cm/min		Vs3 = 1,0 cm/min	
	Gradiente de velocidade na floculação, G_f (s^{-1})	Turbidez residual mínima	Gradiente de velocidade na floculação, G_f (s^{-1})	Turbidez residual mínima	Gradiente de velocidade na floculação, G_f (s^{-1})	Turbidez residual mínima
5,0	40	38,8	35	8,29	40	9,26
7,5	25	22,3	25	6,48	35	3,92
10,0	25	15,5	25	5,52	35	3,02
12,5	25	14,2	25	4,09	25	2,80
15,0	25	11,5	25	4,02	25	1,81
17,5	25	10,6	25	2,19	25	1,38
20,0	25	12,4	25	1,93	25	1,55
22,5	25	16,5	25	2,00	25	1,05
25,0	25	18,0	25	2,25	25	1,44
30,0	25	18,5	25	1,66	25	1,43
35,0	25	23,2	25	3,19	25	1,41
40,0	25	26,5	25	4,57	25	1,82

5.5 Ensaios de Coagulação, Floculação e Sedimentação (Etapa 1)

Determinados os parâmetros de coagulação, mistura rápida e floculação, foram executados os ensaios de coagulação, floculação e sedimentação. Tal procedimento objetivou fornecer dados que servissem como base para posterior análise por comparação do efeito da ruptura e da refloculação. Os ensaios dessa etapa foram feitos em réplica e foi considerado o valor médio dos resultados. As coletas foram feitas para as velocidades de sedimentação foram de 7,00; 3,30; 2,07; 1,45 e 0,90 cm/min. O procedimento destes ensaios foram descritos no Capítulo 4, item 4.2.7. Observa-se na Tabela 5.4 os resultados dos ensaios desta etapa. Nota-se que houve pequena variação entre os resultados dos Jarro 1 e 2.

Tabela 5.4 - Resultados do ensaio de coagulação, floculação e sedimentação.

Jarro	Produtos químicos			Turbidez do sobrenadante coletado (uT)				
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	pH de Coag.	Ts1= 1 min	Ts2= 2 min	Ts3= 3 min	Ts4= 4 min	Ts3= 6 min
				Vs1= 7,0 cm/min	Vs2= 3,3 cm/min	Vs3= 2,07 cm/min	Vs4= 1,45 cm/min	Vs3= 0,9 cm/min
1	55,0	2,0	6,49	29,00	3,88	3,05	2,57	1,98
2	55,0	2,0	6,48	27,80	3,96	3,36	2,43	1,85
			média	28,40	3,92	3,21	2,50	1,92

A Figura 5.14 contém a foto dos jarros deste ensaio ao final da floculação, momentos antes de parar a rotação das paletas. Neste instante, o gradiente de velocidade era de $25s^{-1}$ e o tempo de floculação por volta de 20 minutos. Os flocos estavam formados e imediatamente se iniciaria a sedimentação. Nota-se que não há deposição no fundo, nem variação visível da concentração de flocos pelo jarro.

Figura 5.14 – Jarros com flocos formados, ao final da floculação, para $T_f = 20$ min e $G_f = 25\text{s}^{-1}$.

5.6 Ensaios de Ruptura (Etapa 2)

Os ensaios de ruptura e sedimentação foram executados conforme descrito no item 4.2.8. Inicialmente, foram realizados ensaios utilizando o gradiente de velocidade de ruptura (Gr) de 150 s^{-1} . Neste momento, visualmente notou-se que, para este Gr , não houve rompimento total dos flocos, como se vê na Figura 5.15. Analisando esta mesma Figura, é possível observar que o tamanho diminuiu e a distribuição dos flocos mudou da condição inicial (Etapa 1), ao final da floculação. Sendo assim, julgou-se necessário avaliar um gradiente de velocidade maior (250 s^{-1}), que aparentemente rompesse os flocos por completo, para estudar as condições de sedimentação e refloculação. Também se optou por considerar um Gr menor, de 75 s^{-1} , por dois motivos: para estudar os efeitos da ruptura e refloculação quando a ruptura é realizada através de uma agitação não muito intensa; e também para aproximar de um caso real, em que a ruptura acontece em comportas e passagens.

Figura 5.15 – Vista frontal dos jarros mostrando os flocos ao final da floculação e após a ruptura, para os gradientes de velocidade de ruptura de 75, 150 e 250 s^{-1}

Os resultados desta série de ensaios para os gradientes de velocidade de ruptura de 75, 150 e 250 s^{-1} estão mostrados na Tabela 5.5. Estes resultados foram dispostos em gráficos de “Velocidade de Sedimentação *versus* Fração de Turbidez Remanescente Mínima”, juntamente com a condição inicial (sem ruptura), ilustrados na Figura 5.16. Percebe-se, no gráfico desta Figura, a influência do gradiente de velocidade

durante a ruptura, pois quanto maior o Gr, maiores foram os valores de turbidez remanescente para todas as velocidades de sedimentação. Observa-se que, para as velocidades de sedimentação mais altas, a influência do Gr na turbidez remanescente é mais expressiva. Isto se deve, provavelmente, ao fato dos flocos ficarem menores após a ruptura com agitação mais intensa.

Tabela 5.5 - Resultados do ensaio de ruptura, para diferentes gradientes de velocidade durante a ruptura.

Amostra	Gradiente de velocidades durante a ruptura	Turbidez do sobrenadante coletado (uT) para as velocidades de sedimentação (cm/min)				
		7	3,3	2,07	1,45	0,9
1	sem ruptura	28,4	3,92	3,21	2,50	1,92
2	75 s ⁻¹	67,7	22,9	9,49	6,03	4,64
3	150 s ⁻¹	79,4	46,1	23,8	18,9	15,3
4	250 s ⁻¹	94,2	68,1	46,9	31,4	29,0

Figura 5.16 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para diferentes gradientes de velocidade de ruptura.

Destaca-se que, para esta água de estudo, com turbidez elevada, a ruptura de flocos aumenta a turbidez remanescente do sobrenadante. Ademais, este efeito é bastante evidente para velocidades de sedimentação entre 1,5 e 4 cm/min, comumente utilizadas como parâmetros para projeto da maioria das unidades de decantação.

5.7 Ensaios de Refloculação (Etapa 3)

Neste item são mostrados os resultados dos ensaios de Refloculação. Foram utilizados nestes ensaios os mesmos parâmetros de coagulação, floculação e ruptura do item anterior e a metodologia descrita no item 4.2.9. Os ensaios deste item foram divididos em três séries, cada uma respectiva a um gradiente de velocidade de ruptura (Gr): 75; 150 e 250 s^{-1} . Inicialmente, foi escolhido o gradiente de velocidade de refloculação (Grf) como sendo igual ao de floculação, 25 s^{-1} . Também, foram testados gradientes de velocidade menores que o da floculação, uma vez que, em uma ETA, a refloculação pode se dar nas últimas câmaras de floculação e nos decantadores, onde o gradiente de velocidade é menor. Desta forma, os gradientes de velocidade de refloculação utilizados nos ensaios foram de 25, 20 e 15 s^{-1} . Os tempos de refloculação (Trf) foram variados de 5 a 40 minutos.

A princípio, foram realizados os ensaios para Gr de 150 s^{-1} , Grf de 25 s^{-1} e Trf variando de 5 a 40 minutos, com intervalos de 2,5 em 2,5 min e, depois de 20 min, de 5 em 5 min. Observou-se que o intervalo de 2,5 minutos entre os diferentes tempos de refloculação foi muito pequeno, não apresentando alterações significativas no valores da turbidez dos sobrenadantes coletados. Também notou-se que, após o tempo de 20 min na refloculação, a turbidez remanescente do sobrenadante aumentou significativamente, piorando sua qualidade. Desta forma, para os demais ensaios, os valores de Trf variaram de 5 a 25 min, com intervalos de 5 em 5 min, ou seja, 5, 10, 15, 20 e 25 min. Ainda para o Gr 150 s^{-1} , foram testados os valores de Grf de 20 e 15 s^{-1} . Para o Grf de 20 s^{-1} , diferentemente do que aconteceu na floculação para o mesmo gradiente, não ocorreu deposição de material ao fundo do jarro. Nos ensaios com o Grf de 15 s^{-1} , foi possível visualizar que durante a refloculação, os flocos ficaram distribuídos de forma desigual no jarro, concentrando uma quantidade maior de flocos na parte inferior, mas mantendo-se suspensa pela agitação. Este efeito comprometeu os

resultados de forma que este Grf não foi repetido para os demais valores de Gr (de 75 e 250 s⁻¹).

Nos itens 5.7.1, 5.7.2 e 5.7.3 disponibilizam-se os resultados e a discussão dos ensaios para os Gr de 75, 150 e 250 s⁻¹, respectivamente. Para efeito de comparação, apresentam-se os resultados, inclusive, para as condições sem ruptura (item 5.5) e com ruptura sem refloculação (item 5.6).

5.7.1 Ensaios de Refloculação para Gr 75 s⁻¹

Os resultados dos ensaios de refloculação para o gradiente de velocidade de ruptura (Gr) de 75 s⁻¹ encontram-se no Anexo E, Tabelas E.1 e E.2. As fotos da Figura 5.17 mostram os jarros do equipamento de jarteste durante um ensaio. Foram plotados gráficos dos resultados apresentados na Figura 5.18, para o valor de Grf de 25 s⁻¹ e na Figura 5.19 para o de 20 s⁻¹. Nestas figuras, para ambos os Grf, observa-se que a refloculação, nos primeiros 5 minutos, houve diminuição da turbidez remanescente se comparada com a Etapa 2 (logo após a ruptura). Conforme o tempo de refloculação foi aumentando, até o Trf de 15 min, diminuiu a turbidez remanescente para a maioria das velocidades de sedimentação. Entretanto, para tempos de refloculação maiores que 20 minutos, os valores de turbidez remanescente do sobrenadante aumentaram, aproximando-se dos encontrados na Etapa 2 (após a ruptura).

Ainda para os dois valores de Grf, é possível notar que em alguns casos para as velocidades de sedimentação mais baixas (menores que 2,5 cm/min), e tempos de refloculação entre 5 e 15 min, o valor de turbidez remanescente do sobrenadante foi ligeiramente menor quando comparado ao encontrado nos ensaios da Etapa 1 (sem ruptura). Contudo, a diferença nos valores da turbidez remanescente foi muito pequena, principalmente se comparada à turbidez inicial. Assim, não é possível afirmar que a refloculação é, de fato, mais eficiente que a condição sem ruptura (Etapa 1), para esta água de estudo e este Gr.

Figura 5.17 – Vista frontal dos jarros durante o ensaio para Gr igual a 75 s^{-1} e Grf igual a 25 s^{-1} .

Observa-se o primeiro jarro ao final da sedimentação, o segundo no início da sedimentação e o terceiro ainda refloculando.

Pode-se dizer que a refloculação produziu valores de turbidez remanescente próximo aos da Etapa 1 (sem a ruptura) para o Gr de 75 s^{-1} , Grf de 25 e 20 s^{-1} , tempos de refloculação entre 5 e 20 min e velocidades de sedimentação menores que $2,5 \text{ cm/min}$. Para a velocidade de sedimentação de $3,3 \text{ cm/min}$ só foi possível notar que a refloculação produziu valores de turbidez remanescente similares aos da Etapa 1 (em que não houve ruptura), para Grf de 20 s^{-1} e tempo de refloculação de 10 min. Para os demais tempos de refloculação e velocidades de sedimentação, em geral maiores que $2,5 \text{ cm/min}$, não foi possível observar valores de turbidez remanescente próximos aos encontrados na Etapa 1. Nota-se que para o Grf menor, de 20 s^{-1} , os resultados se mostraram mais próximos aos da Etapa 1.

Nos resultados destes ensaios, para ambos Grf , não foi possível observar valores de turbidez remanescente do sobrenadante próximos aos da Etapa 1 (sem ruptura) para velocidades de sedimentação maiores que 3 cm/min (exceto para o Grf de 20 s^{-1} e Trf de 10 e 15 min). Nestes casos, quanto maior a velocidade de sedimentação, mais distante estão os resultados de turbidez remanescente do sobrenadante dos resultados da Etapa 1, e mais próximos dos resultados da Etapa 2 (após a ruptura).

Figura 5.18 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 75 s^{-1} e gradiente de velocidade de refloculação de 25 s^{-1} .

Fonte: Tabela D.1, Anexo D.

Figura 5.19 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 75 s^{-1} e gradiente de velocidade de refloculação de 20 s^{-1} .

Fonte: Tabela D.2, Anexo D.

5.7.2 Ensaios de Refloculação para Gr 150 s⁻¹

Os ensaios de refloculação para o gradiente de velocidade durante a ruptura de 150 s⁻¹ foram os primeiros ensaios de refloculação realizados. Inicialmente, foram feitos os ensaios para o Grf de 25 s⁻¹ (os resultados estão mostrados na Tabela D.3 e foram plotados no gráfico da Figura 5.20). Nesta série de ensaios, observa-se que o intervalo de 2,5 minutos entre os tempos de refloculação foi muito pequeno. Nota-se, também, que nos resultados a partir do Trf de 25 min aumentou o valor da turbidez remanescente do sobrenadante. A partir deste ensaio optou-se em aumentar o intervalo mínimo do Trf para 5 min e não realizar ensaios com tempos de refloculação maiores que 25 min. Desta forma, o número de resultados é menor, o que não comprometeu, entretanto, a análise dos dados sobre a refloculação. Ainda para o Grf de 25 s⁻¹, os tempos de refloculação que reproduziram os melhores resultados variaram entre 12,5 e 17,5 min. Contudo, estes resultados não se aproximaram do caso inicial, sem a ruptura, fato mais evidente para as velocidades de sedimentação maiores que 2,5 cm/min. Para todos os tempos de refloculação, neste caso, observou-se sensível diminuição dos valores de turbidez do sobrenadante coletado quando comparado aos da Etapa 2 (após a ruptura, sem refloculação).

Figura 5.20 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade de 150 s⁻¹ e gradiente de velocidade refloculação de 25 s⁻¹. Fonte: Tabela D.3, Anexo D.

Em seguida foram feitos os ensaios para o Grf de 20 s^{-1} , cujos resultados estão mostrados na Tabela D.4 do Anexo D e também no gráfico da Figura 5.21. Observa-se, nestes resultados, a melhora na remoção de turbidez logo nos primeiros cinco minutos de refloculação, comparando-se com o caso da ruptura somente. Embora esta melhora fique mais evidente para os valores de Trf entre 10 e 15 minutos, somente para as velocidades de sedimentação menores que $2,5 \text{ cm/min}$ foi possível obter sobrenadante com valores de turbidez remanescente similares os da Etapa 1. Para as velocidades de sedimentação a partir de 3 cm/min , o tempo de refloculação exerceu influência sensível nos valores de turbidez remanescente. Com o aumento do tempo de refloculação, a partir de 20 min, nota-se que piorou a qualidade do sobrenadante coletado.

Figura 5.21 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 150 s^{-1} e gradiente de velocidade de refloculação de 20 s^{-1} .

Fonte: Tabela D.4, Anexo D.

Na Figura 5.22 é possível observar os jarros do equipamento jarteste ao final da refloculação, para o Gr de 150 s^{-1} e Grf de 25 e 20 s^{-1} . Observa-se claramente nesta Figura que não há deposição dos flocos, nem sedimentação dos mesmos durante a agitação.

Figura 5.22 – Vista frontal dos jarros mostrando os flocos durante a refloculação, para o gradiente de velocidade de ruptura de 150 s^{-1}

Durante o ensaio para o gradiente de refloculação de 15 s^{-1} , foi possível observar a diferença de concentração de flocos pela altura do jarro, sendo que os flocos maiores ficaram concentrados na parte inferior do jarro, e os menores, na parte superior. Este fato ocorreu porque a agitação não foi suficiente para suspender os flocos durante o ensaio, ocorrendo, assim, sedimentação durante a refloculação logo aos primeiros cinco minutos do ensaio.

Na Figura 5.24, observa-se que os valores de turbidez remanescente do sobrenadante estão próximos aos da Etapa 1 (sem ruptura) e que para as Vs de 1 e 7 cm/min estes valores chegam a serem menores. Contudo, estes resultados não serão considerados devido a influência da sedimentação dos flocos durante a refloculação nos resultados, como visto anteriormente. Desta forma, não foram realizados os ensaios com este Grf para demais gradientes de ruptura (75 e 250 s^{-1}).

Figura 5.23 – Vista frontal do jarro onde pode-se notar claramente a diferença de concentração dos flocos durante o ensaio para o $\text{Grf} = 15 \text{ s}^{-1}$

Figura 5.24 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 150 s^{-1} e gradiente de velocidade de refloculação de 15 s^{-1} .

Fonte: Tabela D.5, Anexo D.

5.7.3 Ensaios de Refloculação para Gr de 250 s^{-1}

Os ensaios de refloculação para o gradiente de ruptura de 250 s^{-1} foram realizados conforme a metodologia descrita no item 4.2.9. Os gradientes de velocidade de refloculação utilizados foram 25 e 20 s^{-1} . Nesta etapa não foram realizados ensaios para o Gr_f de 15 s^{-1} , pois este gradiente de velocidade mostrou problemas ao ser utilizado para a refloculação, como descrito no item 5.7.2. Os resultados dos ensaios desta série são explicitados no Anexo D, Tabelas D.6 e D.7, referentes aos Gr_f de 25 e 20 s^{-1} respectivamente. Na Figura 5.25, é possível observar os jarros do equipamento jarteste durante um ensaio. Evidencia-se que os dois primeiros jarros já tiveram suas respectivas paletas erguidas ao final da refloculação e, desta maneira, foi dado início à sedimentação. No primeiro jarro ainda não havia sido realizada uma coleta, referente à menor velocidade de sedimentação. O segundo jarro estava entre as primeiras coletas, enquanto no terceiro jarro ainda estava sendo realizada a refloculação.

Figura 5.25 – Vista frontal dos jarros durante um ensaio. Observa-se o primeiro jarro ao final da sedimentação, o segundo no início da sedimentação e o terceiro ainda refloculando.

Na Figura 5.26 e Figura 5.27, referentes aos gradientes de refloculação de 25 e 20 s^{-1} , respectivamente, têm-se os resultados dos ensaios realizados nesta etapa. Enfatiza-se nestas figuras que, para ambos os valores Gr_f , o sobrenadante coletado teve a sua turbidez reduzida aos primeiros 5 minutos de refloculação, comparando-se com o caso logo após a ruptura. Porém, para tempos de refloculação mais longos, de 15 a

25 min, a turbidez remanescente das amostras aumentou, distanciando-se da condição sem ruptura.

Para o valor de G_{rf} de 25 s^{-1} , nota-se que não foi possível obter valores de turbidez remanescente do sobrenadante próximos aos da Etapa 1 (sem ruptura), mesmo considerando-se o tempo de refloculação de 10 minutos, o qual gerou o menores valores de turbidez remanescente. Para as velocidades de sedimentação maiores que 2 cm/min , esta diferença fica ainda mais evidente.

Figura 5.26 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 250 s^{-1} e gradiente de refloculação de 25 s^{-1} .

Fonte: Tabela D.6, Anexo D.

No ensaio com Grf de 20 s^{-1} , os resultados da turbidez remanescente do sobrenadante só se aproximaram dos valores da Etapa 1 para as velocidades de sedimentação mais baixas (menores que 2 cm/min) e tempo de refloculação de 15 min, como mostrado na Figura 5.27. Os demais resultados não se aproximaram dos resultados da Etapa 1 (sem ruptura), ficando mais evidente esta diferença para velocidades de sedimentação maiores que $2,5 \text{ cm/min}$. Também é possível observar que a refloculação melhorou a sedimentação dos flocos, mesmo nos primeiros minutos. Para Trf maiores que 15 min nota-se que a qualidade do sobrenadante coletado piorou consideravelmente.

Figura 5.27 – Fração remanescente de turbidez em função da velocidade de sedimentação, para o gradiente de velocidade na ruptura de 250 s^{-1} e gradiente de refloculação de 20 s^{-1} .

Fonte: Tabela D.7, Anexo D.

5.7.4 Comentários gerais sobre os ensaios de refloculação

Em todos os ensaios foi possível observar que a refloculação, logo nos primeiros minutos, diminuiu o valor de turbidez remanescente do sobrenadante quando comparada com os resultados obtidos logo após a ruptura (Etapa 2). A refloculação foi mais eficiente para tempos entre 10 e 15 min, e após esses tempos, a turbidez remanescente do sobrenadante aumentou consideravelmente. Para o gradiente de refloculação de 20 s^{-1} os resultados aproximaram-se mais dos valores obtidos na Etapa 1 (sem ruptura). Apenas para o gradiente de ruptura de 75 s^{-1} e Grf de 20 s^{-1} , foi possível observar resultados com turbidez remanescente ligeiramente menores quando comparados com os resultados da Etapa 1.

Em todos os ensaios, pode-se notar que os resultados se aproximaram dos obtidos inicialmente na Etapa 1 (sem ruptura), principalmente para as velocidades de sedimentação menores (geralmente menores que $2,5 \text{ cm/min}$). Para velocidades de sedimentação entre $2,5$ e 7 cm/min a ruptura se mostrou irreversível, praticamente para todos os casos. De modo geral, os decantadores de ETAs que são operadas com sobrecarga de vazão, possuem velocidades de sedimentação normalmente maiores que $2,5 \text{ cm/min}$, agravando os efeitos da ruptura dos flocos na remoção de turbidez por sedimentação. Nestas ETAs, também se observa o aumento da velocidade de água nas passagens, desta forma, também o gradiente de velocidade médio, podendo estar suscetíveis aos efeitos negativos da ruptura sobre a sedimentação.

Observa-se o comportamento diferente dos flocos para o gradiente de velocidade de 20 s^{-1} , no caso da floculação e da refloculação. Como visto anteriormente no item 5.4 e também na Figura 5.7, durante a floculação, esta agitação se mostrou com pouca energia para manter os flocos suspensos, permitindo a sedimentação. Já durante a refloculação, este fato não aconteceu para este gradiente de velocidade. Desta forma, fica claro que os flocos formados depois da ruptura têm comportamento diferente daquele em que os flocos foram formados inicialmente. Durante a ruptura, os flocos se rompem em pedaços, com características que não retornam às condições iniciais, como

densidade, tamanho e capacidade de se aglutinar com outros fragmentos de flocos, influenciando, portanto, também a sua sedimentação. Este fato, inclusive, evidencia que a turbidez do sobrenadante aumenta a partir de um certo tempo de floculação para um mesmo gradiente de velocidade. Observa-se este efeito nos gráficos das Figuras C.1, C.2 e C.3, do Anexo C. Para grandes tempos de floculação, deve haver erosão dos flocos, e em seguida a refloculação dos mesmos. Como na refloculação os flocos raramente retomam-se as condições iniciais, para grandes tempos de floculação os mesmos devem estar já previamente rompidos e reagrupados.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base no trabalho realizado, conclui-se que:

- a) nos ensaios em que os flocos foram rompidos e submetidos à refloculação, os valores de turbidez remanescente do sobrenadante raramente resultaram similares aos obtidos inicialmente (sem a ruptura); os casos em que os valores de turbidez remanescente do sobrenadante foram similares ocorreram para velocidades de sedimentação relativamente baixas (menores que 2,5 cm/min);
- b) a refloculação, mesmo com tempo relativamente curto (5 min) causou a diminuição da turbidez remanescente do sobrenadante, quando comparada com as coletas efetuadas logo após a ruptura (sem refloculação);
- c) tempos de refloculação relativamente longos, em geral maiores que 20 min, se mostraram com pior eficiência de remoção de turbidez quando comparados com tempos menores de refloculação. Foi possível observar este mesmo comportamento durante a floculação – para tempos de floculação maiores que 25 minutos a eficiência de remoção de turbidez foi menor quando comparado com tempos menores, entre 15 a 20 min.
- d) quanto maior o valor do gradiente de velocidade durante a ruptura, maiores os valores de turbidez remanescente do sobrenadante após a refloculação (nas mesmas condições), distanciando-se dos valores obtidos inicialmente, sem a ruptura. Desta forma, este gradiente de velocidade tem grande influência na velocidade de sedimentação dos flocos, mesmo após a refloculação.

- e) para os valores menores do gradiente de velocidade, durante a refloculação, os resultados da turbidez remanescente do sobrenadante foram menores. Pode-se notar também que o comportamento dos flocos durante os ensaios de floculação e refloculação, para o gradiente de velocidade de 20 s^{-1} , foi diferente, indicando que os flocos formados durante estes ensaios, para agitação de mesmas características, têm comportamento diferente.

A seguir são apontadas as principais recomendações:

- a) realização de pesquisas sobre a ruptura e refloculação com águas de estudo com outras características, principalmente com cor verdadeira relativamente alta;
- b) realização de ensaios com objetivo de avaliar o comportamento de flocos formados com outros coagulantes, na ruptura e na refloculação;
- c) a realização de ensaios com o objetivo de estudar alternativas para melhorar a eficiência de remoção de impurezas por sedimentação, em casos que ocorrem a ruptura; sugere-se que seja estudado a adição de polímeros sintéticos ou naturais, principalmente após da ruptura, como forma de auxiliar a refloculação;
- d) realização de pesquisas para estudar outras características dos flocos durante a ruptura e refloculação, como o controle do tamanho dos flocos através de métodos fotográficos e contagem de partículas; nestes casos deve-se tomar muito cuidado para o não comprometimento das amostras do sobrenadante coletado, pois pode ocorrer sedimentação se ficarem paradas ou continuar a floculação se forem agitadas, mudando suas características;
- e) realização de pesquisas sobre ruptura e refloculação com o objetivo de relacionar os resultados encontrados em escala de bancada, nos reatores estáticos, com os de escala piloto, de escoamento contínuo;

- f) é importante a realização de ensaios em reatores estáticos para escolher a dosagem de coagulante, pH de coagulação, tempo e gradiente de velocidade de mistura rápida, tempo e gradiente de velocidade de floculação, adequados para a água de estudo em questão, pois podem apresentar diferenças significativas quando comparado com valores encontrados na literatura para água de características parecidas.
- g) a padronização dos procedimentos dos ensaios, como erguer as paletas do equipamento jarteste durante a sedimentação, do momento de leitura do pH das amostras de água coagulada e a agitação do sobrenadante antes da leitura dos parâmetros; de forma a diminuir a interferência destes procedimentos nos resultados;
- h) cuidados devem ser tomados quando forem utilizadas águas provenientes de poços artesianos, pois podem conter gases dissolvidos que quando expostos à atmosfera se dispersam, alterando as características da água de estudo, principalmente o pH da água bruta.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARMITHARAJAH, A. & MILLS, K.M. (1982) Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation. *Journal of the American Water Works Association*, V. 74, n. 4, p. 210-216, Apr.
- BRATBY, J.R. (1981) 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.
- BRATBY, J.R., MILLER, M.W., MARAIS, G.R. (1977) Design of flocculation systems from batch test data. *Water S.A.*, v. 3, n. 4, p. 173-182, Oct.
- BRITO, S.A. (1998). *Influência da velocidade de sedimentação na determinação dos coeficientes de agregação e ruptura durante a floculação*. São Carlos. 189p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DI BERNARDO, A.S. (2004). *Desempenho de sistemas de dupla filtração no tratamento de água com turbidez elevada*. São Carlos. 281p. Dissertação (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DI BERNARDO, L., BRITO, S.A., MOREIRA, A.M.R. (1999) Importância da velocidade de sedimentação dos flocos na otimização do gradiente de velocidade na sedimentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES, 20., 1999, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 1 CD-ROM.

- DI BERNARDO, L. ; DANTAS, A.D.B. (2005) *Métodos e técnicas de tratamento de água*, 2.ed. v.1. São Carlos: RIMA.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P.L. (2002) *Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. 1 ed. São Carlos: RIMA.
- DUAN, J.; GREGORY, J. (2003) Coagulation by hydrolyzing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100-102, p.475-502.
- GREGORY, J. (2004) Monitoring floc formation and breakage. *Water Science and Technology*, v. 50, n. 12, p.163-170.
- HAN M.; KIM, T. ; KIM J. (2006) 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.
- JARVIS, P. ; JEFFERSON, B. ; PARSONS, S.A. (2005a) Breakage, regrowth, and fractal nature of natural organic matter flocs. *Environmental Science & Technology*,. UK, n.7, v.39, p.2307-2314.
- JARVIS, P. ; GREGORY, J. ; JEFFERSON, B. ; PARSONS, S.A (2005b) A review of floc strength and breakage. *Water Research*, n.39, p. 3121-3137.
- LIBÂNIO, M. (1995) Avaliação da floculação em reatores estáticos e de escoamento contínuo com gradientes de velocidade constante e variável. São Carlos. 136p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PÁDUA, V.L.(1994) 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. 74p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- PAVANELLI, G. (2001). *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada*. São Carlos. 205p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- YOON S.Y.; DENG Y. (2004) Flocculation and reflocculation of clay suspension by different polymer systems under turbulent conditions. *Journal of Colloid and Interface Science*, n.278, p. 139-145.
- YUKSELEN, M.A. ; GREGORY, J. (2002) Breakage and re-formation of alum flocs. *Environmental Engineering Science*, n.4, v.19, p.229-236.
- _____. (2004a) The reversibly of floc breakage. *International Journal of Mineral Processing*, v.73, p.251-259.
- _____. (2004b) The effect of rapid mixing on the break-up and re-formation of flocs. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v.79, p.782-788.

ANEXO A

**Resultados dos ensaios para construção dos diagramas
de coagulação para remoção de Turbidez**

Tabela A.1 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	10,0	---	---	7,10	102	103	102
2	20,0	---	---	6,92	72,8	63,0	48,9
3	30,0	---	---	6,70	30,2	18,8	10,0
4	40,0	---	---	6,50	12,0	12,5	5,91
5	50,0	---	---	6,34	12,8	10,7	4,61
6	60,0	---	---	6,15	15,2	7,93	4,79

Tabela A.2 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	25,0	---	---	6,75	48,7	9,62	7,60
2	35,0	---	---	6,60	28,1	9,56	6,45
3	45,0	---	---	6,40	16,0	6,60	4,54
4	55,0	---	---	6,25	20,4	11,2	5,44
5	65,0	---	---	6,04	49,0	23,2	16,5
6	70,0	---	---	6,00	103	99,6	92,9

Tabela A.3 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	25,0	3,0	---	7,17	95,0	62,0	56,0
2	25,0	2,5	---	7,11	82,0	56,0	42,0
3	25,0	1,5	---	6,90	51,0	11,0	17,0
4	25,0	---	7,0	6,48	36,0	8,00	9,00
5	25,0	---	10,0	6,36	32,0	20,0	13,0
6	25,0	---	14,0	6,02	83,0	61,0	47,0

Tabela A.4 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	30,0	3,5	---	7,12	41,0	14,0	13,0
2	30,0	3,0	---	6,98	36,0	14,0	11,0
3	30,0	2,0	---	6,81	35,0	7,00	7,00
4	30,0	---	3,0	6,57	29,0	8,00	7,00
5	30,0	---	7,0	6,43	27,0	10,0	7,00
6	30,0	---	9,0	6,28	33,0	12,0	9,00

Tabela A.5 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	40,0	4,8	---	7,09	40,0	23,0	13,8
2	40,0	4,1	---	7,00	30,0	14,0	6,98
3	40,0	3,0	---	6,85	24,0	9,00	6,45
4	40,0	2,0	---	6,75	17,0	7,00	4,43
5	40,0	---	2,5	6,45	11,0	9,00	6,00
6	40,0	---	7,0	6,26	21,0	10,0	9,00

Tabela A.6 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	50,0	5,5	---	6,97	34,0	11,9	5,91
2	50,0	5,0	---	6,88	24,9	11,0	3,06
3	50,0	3,7	---	6,77	21,3	5,72	3,04
4	50,0	2,0	---	6,61	27,0	8,46	3,96
5	50,0	---	2,0	6,30	13,6	7,80	6,15
6	50,0	---	4,0	6,20	21,7	8,48	6,88

Tabela A.7 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	60,0	8,0	---	6,91	24,6	3,19	5,69
2	60,0	6,0	---	6,71	26,2	2,95	4,64
3	60,0	4,0	---	6,58	22,2	6,66	3,16
4	60,0	2,0	---	6,49	13,6	3,23	3,56
5	60,0	---	2,0	6,10	45,5	15,6	14,2
6	60,0	---	4,0	6,03	108	105	105

Tabela A.8 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	55,0	8,0	---	6,90	30,1	4,04	3,46
2	55,0	6,0	---	6,80	28,7	3,39	2,71
3	55,0	4,0	---	6,65	11,8	3,55	3,30
4	55,0	2,0	---	6,53	25,8	3,94	2,61
5	55,0	---	2,0	6,20	23,7	14,4	6,86
6	55,0	---	5,0	6,04	108	106	97,2

Tabela A.9 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	65,0	12,0	---	7,15	106	91,8	87,8
2	65,0	10,0	---	6,95	31,8	10,7	5,42
3	65,0	8,0	---	6,85	27,1	14,0	2,04
4	65,0	6,0	---	6,70	25,4	5,61	2,35
5	65,0	4,0	---	6,43	20,4	3,33	3,04
6	65,0	2,0	---	6,25	20,1	2,81	3,78

Tabela A.10 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	35,0	---	9,0	6,10	39,2	25,0	17,2
2	35,0	---	7,0	6,24	12,1	8,84	8,23
3	35,0	---	3,0	6,35	19,6	9,12	5,02
4	35,0	2,0	---	6,75	30,0	9,39	6,39
5	35,0	3,0	---	6,88	25,9	9,82	7,11
6	35,0	4,0	---	7,05	32,0	11,7	9,66

Tabela A.11 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	45,0	---	7,0	6,05	38,4	21,8	16,0
2	45,0	---	3,0	6,24	11,9	4,08	4,12
3	45,0	1,0	---	6,45	15,7	5,14	2,82
4	45,0	3,0	---	6,70	15,3	4,09	3,85
5	45,0	5,0	---	6,90	18,4	7,21	4,50
6	45,0	8,0	---	7,30	103	99,0	99,0

Tabela A.12 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	70,0	2,0	---	6,13	13,9	3,64	2,03
2	70,0	4,0	---	6,29	15,9	4,58	1,65
3	70,0	6,0	---	6,47	18,1	5,85	2,14
4	70,0	8,0	---	6,66	17,9	4,51	3,20
5	70,0	11,0	---	6,93	21,5	11,3	7,34
6	70,0	13,0	---	7,29	97,5	98,4	81,4

Tabela A.13 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	75,0	2,0	---	6,16	16,5	4,69	4,47
2	75,0	4,0	---	6,28	21,0	5,39	3,64
3	75,0	6,0	---	6,40	19,4	4,40	2,54
4	75,0	8,0	---	6,57	34,6	4,91	2,10
5	75,0	11,0	---	6,82	29,6	6,76	4,78
6	75,0	13,0	---	7,06	92,7	81,9	63,1

Tabela A.14 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	65,0	1,0	---	6,17	13,8	3,30	2,83
2	65,0	5,0	---	7,05	22,3	6,20	3,55
3	60,0	1,0	---	6,29	17,3	2,41	2,79
4	60,0	9,0	---	6,98	33,1	9,97	8,36
5	60,0	10,0	---	7,14	81,2	54,8	51,3
6	45,0	6,5	---	7,03	46,2	18,7	13,6

Tabela A.15 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	55,0	1,0	---	6,35	12,8	3,53	3,25
2	55,0	7,0	---	6,96	27,0	18,1	4,52
3	55,0	9,0	---	7,05	45,6	14,3	14,0
4	55,0	10,0	---	7,20	102	96,7	95,3
5	50,0	1,0	---	6,38	13,6	2,88	3,94
6	50,0	7,0	---	6,80	11,9	8,02	5,80

Tabela A.16 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	45,0	---	5,0	6,14	15,7	10,2	4,11
2	45,0	2,0	---	6,55	10,9	2,48	2,42
3	45,0	6,5	---	7,09	27,3	7,20	6,45
4	40,0	1,0	---	6,60	9,30	4,66	2,79
5	20,0	---	3,0	6,70	29,2	13,3	10,4
6	20,0	---	7,0	6,51	37,1	10,4	7,51

Tabela A.17 - Resultados dos ensaios para construção do diagrama de coagulação

Jarro	Produtos químicos			pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)	Ácido Clorídrico (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	40,0	1,0	---	6,60	13,0	4,95	4,31
2	40,0	1,0	---	6,60	12,8	5,11	4,23
3	55,0	2,0	---	6,49	16,7	3,51	2,73
4	55,0	2,0	---	6,48	15,2	3,19	2,48
5	70,0	4,0	---	6,32	18,8	5,71	3,94
6	70,0	4,0	---	6,31	20,7	4,31	3,86

ANEXO B

Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de mistura rápida

Tabela B.1 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Mistura Rápida

Jarro	Gradiente de Mistura Rápida, Gmr (s-1)	Tempo de Mistura Rápida, Tmr (s)	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	1200	60	55,0	2,0	6,50	52,3	12,8	4,02
2	1200	45	55,0	2,0	6,50	44,9	8,0	4,22
3	1200	30	55,0	2,0	6,51	28,4	4,8	3,6
4	1200	20	55,0	2,0	6,52	20,3	1,79	1,87
5	1200	10	55,0	2,0	6,50	9,42	2,99	2,17
6	1200	5	55,0	2,0	6,49	13,6	2,37	1,56

Tabela B.2 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Mistura Rápida

Jarro	Gradiente de Mistura Rápida, Gmr (s-1)	Tempo de Mistura Rápida, Tmr (s)	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	1000	60	55,0	2,0	6,50	49,2	19,1	4,5
2	1000	45	55,0	2,0	6,51	49,4	12,9	3
3	1000	30	55,0	2,0	6,50	28,7	3,2	1,6
4	1000	20	55,0	2,0	6,50	17,6	3,13	2,57
5	1000	10	55,0	2,0	6,52	11,1	1,75	1,5
6	1000	5	55,0	2,0	6,49	10,5	4,25	1,51

Tabela B.3 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Mistura Rápida

Jarro	Gradiente de Mistura Rápida, Gmr (s-1)	Tempo de Mistura Rápida, Tmr (s)	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	800	60	55,0	2,0	6,50	36,0	10,5	4,33
2	800	45	55,0	2,0	6,51	37,1	10,1	1,96
3	800	30	55,0	2,0	6,51	27,2	4,67	1,99
4	800	20	55,0	2,0	6,50	13,1	2,23	2,07
5	800	10	55,0	2,0	6,50	13,1	2,55	1,70
6	800	5	55,0	2,0	6,51	10,3	1,41	1,36

Tabela B.4 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Mistura Rápida

Jarro	Gradiente de Mistura Rápida, Gmr (s-1)	Tempo de Mistura Rápida, Tmr (s)	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	600	60	55,0	2,0	6,51	34,6	8,82	2,46
2	600	45	55,0	2,0	6,50	34,4	4,55	2,70
3	600	30	55,0	2,0	6,49	19,0	2,87	2,18
4	600	20	55,0	2,0	6,48	9,80	2,74	1,17
5	600	10	55,0	2,0	6,50	13,9	1,99	1,15
6	600	5	55,0	2,0	6,50	12,2	3,03	1,40

Tabela B.5 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Mistura Rápida

Jarro	Gradiente de Mistura Rápida, Gmr (s-1)	Tempo de Mistura Rápida, Tmr (s)	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	400	60	55,0	2,0	6,50	31,9	2,90	2,11
2	400	45	55,0	2,0	6,50	27,0	3,25	1,36
3	400	30	55,0	2,0	6,51	14,1	2,39	1,42
4	400	20	55,0	2,0	6,49	10,4	3,69	1,17
5	400	10	55,0	2,0	6,50	11,7	2,02	1,74
6	400	5	55,0	2,0	6,50	9,78	3,09	2,29

ANEXO C

Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de floculação

Tabela C.1 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	25	5	55,0	2,0	6,51	49,2	22,9	12,4
2	25	7,5	55,0	2,0	6,50	22,3	6,48	6,31
3	25	10	55,0	2,0	6,49	15,5	5,52	3,06
4	25	12,5	55,0	2,0	6,48	14,2	4,09	2,80
5	25	15	55,0	2,0	6,50	11,5	4,02	1,81
6	25	17,5	55,0	2,0	6,50	10,6	2,19	1,38

Tabela C.2 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	25	20	55,0	2,0	6,50	12,4	1,93	1,55
2	25	22,5	55,0	2,0	6,51	16,5	2,0	1,05
3	25	25	55,0	2,0	6,51	18,0	2,25	1,44
4	25	30	55,0	2,0	6,50	18,5	1,66	1,43
5	25	35	55,0	2,0	6,50	23,2	3,19	1,41
6	25	40	55,0	2,0	6,51	26,5	4,57	1,82

Tabela C.3 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	30	5	55,0	2,0	6,50	39,3	19,7	13,3
2	30	7,5	55,0	2,0	6,50	26,3	9,45	6,79
3	30	10	55,0	2,0	6,51	19,7	4,96	4,75
4	30	12,5	55,0	2,0	6,52	22,1	5,77	4,49
5	30	15	55,0	2,0	6,50	24,6	3,37	2,32
6	30	17,5	55,0	2,0	6,49	18,6	4,10	2,81

Tabela C.4 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	30	20	55,0	2,0	6,51	29,1	4,70	1,61
2	30	22,5	55,0	2,0	6,50	22,6	5,93	2,11
3	30	25	55,0	2,0	6,49	23,3	3,10	2,10
4	30	30	55,0	2,0	6,48	29,1	6,55	1,29
5	30	35	55,0	2,0	6,50	30,4	4,64	2,25
6	30	40	55,0	2,0	6,50	29,7	6,10	1,93

Tabela C.5 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	35	5	55,0	2,0	6,50	49,4	8,29	7,87
2	35	7,5	55,0	2,0	6,50	43,2	14,30	3,92
3	35	10	55,0	2,0	6,51	22,9	4,66	3,02
4	35	12,5	55,0	2,0	6,49	34,1	11	4,29
5	35	15	55,0	2,0	6,50	13,2	5,46	2,34
6	35	17,5	55,0	2,0	6,50	46,1	9,19	3,46

Tabela C.6 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	35	20	55,0	2,0	6,50	28,6	5,15	1,62
2	35	22,5	55,0	2,0	6,51	49,5	7,37	3,11
3	35	25	55,0	2,0	6,51	28,1	3,43	2,63
4	35	30	55,0	2,0	6,50	25,1	11,9	4,23
5	35	35	55,0	2,0	6,50	43,3	8,80	3,86
6	35	40	55,0	2,0	6,51	56,1	15,1	5,25

Tabela C.7 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	40	5	55,0	2,0	6,51	38,8	16,0	9,26
2	40	7,5	55,0	2,0	6,50	31,7	11,40	4,79
3	40	10	55,0	2,0	6,49	34,2	4,54	3,12
4	40	12,5	55,0	2,0	6,48	28,8	5,07	4,56
5	40	15	55,0	2,0	6,50	36,1	7,02	3,47
6	40	17,5	55,0	2,0	6,50	39,3	8,28	3,91

Tabela C.8 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	40	20	55,0	2,0	6,50	32,8	8,87	2,78
2	40	22,5	55,0	2,0	6,51	54,5	6,45	3,31
3	40	25	55,0	2,0	6,50	40,9	6,92	3,03
4	40	30	55,0	2,0	6,50	54,0	12,8	4,82
5	40	35	55,0	2,0	6,52	55,3	9,97	5,66
6	40	40	55,0	2,0	6,49	49,2	12,7	6,78

Tabela C.9 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	45	5	55,0	2,0	6,50	43,2	13,4	6,05
2	45	7,5	55,0	2,0	6,51	27,5	14,9	7,37
3	45	10	55,0	2,0	6,51	36,5	14,1	5,39
4	45	12,5	55,0	2,0	6,50	24,2	8,29	4,87
5	45	15	55,0	2,0	6,50	48,1	14,9	6,25
6	45	17,5	55,0	2,0	6,51	18,6	5,96	3,25

Tabela C.10 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	45	20	55,0	2,0	6,51	60,4	7,29	3,86
2	45	22,5	55,0	2,0	6,50	38,9	4,15	3,22
3	45	25	55,0	2,0	6,49	72,9	18,0	5,08
4	45	30	55,0	2,0	6,48	40,2	13,8	1,43
5	45	35	55,0	2,0	6,50	78,0	13,6	6,80
6	45	40	55,0	2,0	6,50	46,0	18,1	3,3

Tabela C.11 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	60	5	55,0	2,0	6,50	52,4	25,4	14,5
2	60	7,5	55,0	2,0	6,50	44,7	15,9	7,42
3	60	10	55,0	2,0	6,51	37,1	16,3	6,38
4	60	12,5	55,0	2,0	6,49	35,6	13,4	5,03
5	60	15	55,0	2,0	6,50	49,4	15,2	7,23
6	60	17,5	55,0	2,0	6,50	45,9	10,2	4,32

Tabela C.12 - Resultados dos ensaios para seleção dos parâmetros de Floculação

Jarro	Gradiente de Floculação, $Gf (s^{-1})$	Tempo de Floculação, $Tf (s)$	Produtos químicos		pH de Coagulação	Turbidez do sobrenadante coletado (uT)		
			Sulfato de Alumínio (mg/L)	Hidróxido de Sódio (mL)		Ts1= 1,4 min Vs1= 5,0 cm/min	Ts2= 2,8 min Vs2= 2,5 cm/min	Ts3= 7 min Vs3= 1,0 cm/min
1	60	20	55,0	2,0	6,50	65,3	9,07	4,35
2	60	22,5	55,0	2,0	6,51	56,7	8,42	4,25
3	60	25	55,0	2,0	6,51	75,2	18,2	5,54
4	60	30	55,0	2,0	6,50	55,5	14,3	5,95
5	60	35	55,0	2,0	6,50	76,3	15,4	7,78
6	60	40	55,0	2,0	6,51	62,2	19,3	7,86

ANEXO D

Resultados dos ensaios de Refloculação

Tabela D.1 - Turbidez do sobrenadante da Refloculação, Grf 25 s⁻¹, Gruptura = 75 s⁻¹, e variados os tempos de refloculação

Amostra	Tempo de refloculação (min)	Velocidades de sedimentação (cm/min)				
		7	3,3	2,07	1,45	0,9
1	--	67,70	22,90	9,49	6,03	4,64
2	5	45,40	9,29	3,11	2,97	1,49
3	10	40,00	9,24	2,93	2,53	1,05
4	15	44,00	7,80	3,56	1,79	1,20
5	20	43,70	7,30	3,68	2,19	2,12
6	25	54,00	10,40	4,84	4,98	2,80

Tabela D.2 - Turbidez do sobrenadante da Refloculação, Grf 20 s⁻¹, Gruptura = 75 s⁻¹, e variados os tempos de refloculação

Amostra	Tempo de refloculação (min)	Velocidades de sedimentação (cm/min)				
		7	3,3	2,07	1,45	0,9
1	--	67,70	22,90	9,49	6,03	4,64
2	5	41,80	6,67	1,56	3,51	1,91
3	10	36,40	3,47	1,98	3,12	1,24
4	15	25,90	6,37	1,72	2,24	0,95
5	20	39,90	7,63	3,58	2,63	1,74
6	25	45,30	7,41	4,64	4,24	3,01

Tabela D.3 - Turbidez do sobrenadante da Refloculação, Grf 25 s⁻¹, Gruptura = 150 s⁻¹, e variados os tempos de refloculação

Amostra	Tempo de refloculação (min)	Velocidades de sedimentação (cm/min)				
		7	3,3	2,07	1,45	0,9
1	--	79,40	46,10	23,80	18,90	15,30
2	5	50,10	16,00	10,20	9,34	7,16
3	7,5	48,50	15,10	9,82	8,13	5,06
4	10	46,30	13,30	7,62	7,02	4,06
5	12,5	46,20	12,30	6,61	5,10	2,87
6	15	46,00	11,90	5,94	4,66	2,86
7	17,5	45,90	11,60	5,34	3,67	2,78
8	20	48,30	13,50	6,12	4,48	3,59
9	25	50,50	17,40	6,72	5,51	4,34
10	30	53,50	21,10	6,62	6,53	4,61
11	35	63,00	23,90	7,23	6,48	4,34
12	40	61,30	24,40	9,73	7,84	5,54

Tabela D.4 - Turbidez do sobrenadante da Refloculação, Grf 15 s⁻¹, Gruptura = 150 s⁻¹, e variados os tempos de refloculação

Amostra	Tempo de refloculação (min)	Velocidades de sedimentação (cm/min)				
		7	3,3	2,07	1,45	0,9
1	--	79,4	46,1	23,8	18,9	15,3
2	5	24,1	8,35	5,77	3,32	2,75
3	10	15,9	7,28	5,02	2,93	1,26
4	15	13,2	6,13	3,98	2,75	0,60
5	20	12,9	6,07	3,72	2,68	0,60

Tabela D.5 - Turbidez do sobrenadante da Refloculação, Grf 20 s⁻¹, Gruptura = 150 s⁻¹, e variados os tempos de refloculação

Amostra	Tempo de refloculação (min)	Velocidades de sedimentação (cm/min)				
		7	3,3	2,07	1,45	0,9
1	--	79,4	46,1	23,8	18,9	15,3
2	5	43,8	9,10	5,36	4,74	2,21
3	10	46,4	8,45	3,67	3,14	2,43
4	15	48,7	5,96	4,55	3,92	1,95
5	20	53,2	6,82	3,75	1,99	1,99

Tabela D.6 - Turbidez do sobrenadante da Refloculação, Grf 25 s⁻¹, Gruptura = 250 s⁻¹, e variados os tempos de refloculação

Amostra	Tempo de refloculação (min)	Velocidades de sedimentação (cm/min)				
		7	3,3	2,07	1,45	0,9
1	--	94,2	68,1	46,9	31,4	29,0
2	5	61,9	25,4	9,65	11,4	3,94
3	10	65,6	25,7	7,94	5,91	3,07
4	15	67,6	21,1	12,1	9,14	3,37
5	20	68,4	27,7	15,6	6,08	4,72
6	25	71,5	24,1	19,9	14,2	7,00

Tabela D.7 - Turbidez do sobrenadante da Refloculação, Grf 20 s^{-1} , Gruptura = 250 s^{-1} , e variados os tempos de refloculação

Amostra	Tempo de refloculação (min)	Velocidades de sedimentação (cm/min)				
		7	3,3	2,07	1,45	0,9
1	--	94,2	68,1	46,9	31,4	29,0
2	5	66,4	15,7	13,2	8,92	8,23
3	10	57,0	14,4	6,28	7,04	3,46
4	15	60,7	15,9	5,42	5,29	2,44
5	20	77,1	15,6	7,03	3,92	4,41
6	25	59,5	9,85	5,53	3,60	1,27