

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental**  
**Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental**

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA TESTES DE  
FLOCULAÇÃO ATRAVÉS DE FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR  
EXPANDIDO.**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do título  
de Mestre em Engenharia  
Ambiental

**ALEXANDRE JABLONSKI PHILIPPI**

**Orientador: Prof. Maurício Luiz Sens, Dr.**

**FLORIANÓPOLIS**

**SANTA CATARINA**

**DEZEMBRO – 2001**

**TESTES DE FLOCULAÇÃO ATRAVÉS DE EQUIPAMENTO DE  
FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR EXPANDIDO.**

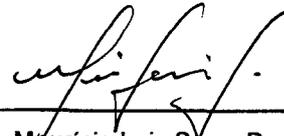
ALEXANDRE JABLONSKI PHILIPPI

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

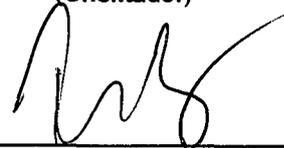
na Área de Tecnologias de Saneamento Ambiental.

Aprovado por:

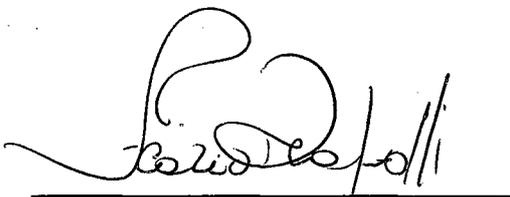


Prof. Maurício Luiz Sens, Dr.

(Orientador)

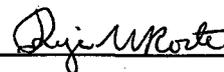


Prof. Paulo Belli Filho, Dr.

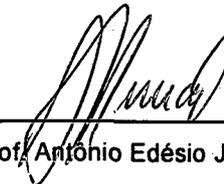


Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.

(Coordenador)



Profª Rejane Helena Ribeiro da Costa, Drª.



Prof. Antônio Edésio Jungles, Dr.

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL

DEZEMBRO/2001

Dedico esta  
dissertação aos meus  
pais Catia e José, que  
me trouxeram ao  
mundo e que de  
maneira incontestável  
sempre incentivaram  
meus estudos.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, à minha família que sempre me incentivou e apoiou este trabalho.

Em especial ao Professor Maurício Luiz Sens, orientador e mais do que tudo um amigo, que, mesmo nos dias menos propícios, esteve pronto a ajudar não poupando esforços para que este trabalho fosse concluído.

Ao LIMA – Laboratório Integrado do Meio Ambiente pelo espaço físico e instrumentação necessária. Aos funcionários Américo Cruz Júnior, Carlos Roberto Vieira e Nilton Sêzar Pereira que sempre estiveram prontos a colaborar nas análises realizadas.

À Biblioteca Setorial de Engenharia Sanitária e Ambiental, de fundamental importância para o enriquecimento bibliográfico desta pesquisa.

À Coordenadoria de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental pelo apoio e compreensão.

Ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e a todos os professores do Curso de Pós-Graduação responsáveis pelo conhecimento adquirido e pelo apoio proporcionados.

Ao engenheiro da CASAN Josué Dagoberto Ferreira, que, desde o início, apoiou e compreendeu as dificuldades de desenvolver este trabalho sem bolsa de estudos, oferecendo condições para que fosse concluído.

**“Morrer ignorante sabendo que tinha  
capacidade de ter sido sábio, isto sim, é uma  
tragédia humana.”**

**(Shakespeare)**

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVO GERAL.....	3
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
3 REVISÃO DE LITERATURA .....	4
3.1 COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.....	5
3.1.1 Aspectos Gerais.....	5
3.1.1.1 Coagulantes e seus Auxiliares.....	6
3.1.1.2 Turbidez.....	7
3.1.1.3 Cor.....	7
3.1.1.4 Alcalinidade, Acidez e pH.....	8
3.1.1.5 Temperatura .....	9
3.1.2 Origem das Cargas das Partículas.....	10
3.1.2.1 Partículas Coloidais .....	10
3.1.3 Sistema Coloidal.....	10
3.1.3.1 Potencial Zeta.....	11
3.1.3.2 Configuração da Dupla Camada Elétrica.....	12
3.1.4 Coagulação.....	14
3.1.4.1 Mistura Rápida.....	17
3.1.4.2 Mecanismos de Desestabilização das Partículas Coloidais .....	18
3.1.5 Floculação.....	19
3.1.5.1 Cinética da Floculação.....	20
3.1.5.2 Número de Camp.....	22
3.1.5.3 Gradiente de Velocidade .....	25
3.1.5.4 Tipos de Floculadores.....	27
3.1.6 Floculação em Meio Granular.....	28
3.1.7 Floculação em Meio Granular Expandido.....	32

3.1.7.1	Perda de Carga em Meio Granular Expandido .....	32
3.1.7.2	Velocidade Mínima de Fluidificação .....	34
3.1.7.3	Velocidade Máxima de Expansão.....	36
3.1.7.4	Gradiente de Velocidade e Número de Camp no Leito Granular Expandido .....	37
3.1.7.5	Porosidade e Altura do Leito.....	38
3.1.8	Ensaio de Coagulação-Floculação.....	40
3.1.8.1	Teste de Jarros.....	40
3.1.8.2	Ensaio de Floculação em Meio Granular .....	47
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1	O PILOTO .....	48
4.1.1	Considerações Gerais.....	48
4.1.2	Água bruta e Reservação.....	51
4.1.3	Hydroejetor.....	52
4.1.4	Coagulante.....	55
4.1.5	Mistura Rápida.....	56
4.1.6	Floculadores.....	58
4.1.7	Meio Granular.....	59
4.1.8	Decantador.....	59
4.1.9	Alimentação do Piloto.....	60
4.2	ENSAIOS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO EM DESCONTÍNUO (TESTE DE JARROS).....	61
4.2.1	Noções Gerais.....	61
4.2.2	Dosagem Ótima de Coagulante.....	62
4.2.3	Melhor Tempo de Floculação.....	63
4.2.4	Melhor Gradiente de Velocidade.....	63
4.3	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS .....	64
4.3.1	Considerações Gerais.....	64
4.3.2	Turbidez.....	65
4.3.3	Cor.....	65
4.3.4	Potencial Hidrogeniônico.....	67
4.3.5	Alcalinidade.....	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	69

5.1 ENSAIOS PRELIMINARES.....	69
5.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA.....	69
5.3 ENSAIOS HIDRÁULICOS.....	70
5.3.1 Expansão do Leito Granular.....	71
5.3.2 Calibração do Hydroejetor.....	72
5.3.3 Perda de Carga.....	74
5.3.4 Gradiente de Velocidade.....	75
5.4 DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO ATRAVÉS DE ENSAIOS EM CONTÍNUO E DESCONTÍNUO.....	75
5.4.1 Velocidades de Sedimentação - Ensaio em Contínuo.....	82
5.4.2 Velocidade de Sedimentação Verificados para o Teste de Jarros e o Piloto ---.....	83
5.4.3 Determinação da Dosagem de Cal.....	94
5.5 PROJETO DO EQUIPAMENTO DE TESTES DE FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR EXPANDIDO.....	100
6 CONCLUSÕES.....	104
7 RECOMENDAÇÕES.....	106
8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	107
9 ANEXOS.....	110
ANEXO 1.....	111
ANEXO 2.....	113
ANEXO 3.....	116
ANEXO 4.....	120

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Valores médios para os parâmetros da água ensaiada.	70
<b>Tabela 2:</b> Relação da vazão com a taxa de escoamento.	70
<b>Tabela 3:</b> Condições de operação do piloto.	76
<b>Tabela 4:</b> Parâmetros de operação do piloto para as figuras 42, 43 e 44.	98
<b>Tabela 5:</b> Parâmetros de turbidez e cor com variação da dosagem de sulfato de alumínio.	111
<b>Tabela 6:</b> Parâmetros de turbidez e cor para determinação da melhor dosagem de S.A.	111
<b>Tabela 7:</b> Valores de turbidez segundo a velocidade de sedimentação (melhores doses).	112
<b>Tabela 8:</b> Valores de cor segundo a velocidade de sedimentação (melhores doses).	112
<b>Tabela 9:</b> Valores referente a melhor dosagem de sulfato de alumínio.	113
<b>Tabela 10:</b> Parâmetros de turbidez e cor com variação da dosagem de sulfato de alumínio. Piloto operando com uma coluna de floculação.	113
<b>Tabela 11:</b> Melhor dosagem de sulfato de alumínio em meio granular - relação entre uma e duas colunas de floculação.	114
<b>Tabela 12:</b> Variação da turbidez com a velocidade de sedimentação.	114
<b>Tabela 13:</b> Variação da cor com a velocidade de sedimentação.	114
<b>Tabela 14:</b> Variação da turbidez com a velocidade de sedimentação (melhores doses).	115
<b>Tabela 15:</b> Variação da cor com a velocidade de sedimentação (melhores doses).	115
<b>Tabela 16:</b> Relação da turbidez e da cor para diferentes dosagens de S.A.	116
<b>Tabela 17:</b> Turbidez de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.	117
<b>Tabela 18:</b> Turbidez de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.	117
<b>Tabela 19:</b> Turbidez de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.	117
<b>Tabela 20:</b> Turbidez de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.	117
<b>Tabela 21:</b> Turbidez de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.	117

<b>Tabela 22:</b> Melhores valores de turbidez para o Teste de Jarros e o piloto de acordo com a velocidade de sedimentação e o tempo de decantação.	117
<b>Tabela 23:</b> Cor de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.	118
<b>Tabela 24:</b> Cor de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.	118
<b>Tabela 25:</b> Cor de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.	119
<b>Tabela 26:</b> Cor de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.	119
<b>Tabela 27:</b> Cor de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.	119
<b>Tabela 28:</b> Melhores valores de cor para o Teste de Jarros e o piloto de acordo com a velocidade de sedim. e o tempo de decantação.	119
<b>Tabela 29:</b> Valores de turbidez e cor com variação da dosagem de cal.	120
<b>Tabela 30:</b> Valores de turbidez e cor com variação da dose de S. A. – dosagem de cal = 4,0 mg/l.	121
<b>Tabela 31:</b> Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto – Q = 180,0 l/h.	121
<b>Tabela 32:</b> Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto – Q = 162,0 l/h.	121
<b>Tabela 33:</b> Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto – Q = 132,0 l/h.	121

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estação de tratamento de água – esquema simplificado.	04
<b>Figura 2:</b> Coagulação-floculação da água com coagulante químico.	07
<b>Figura 3:</b> Configuração esquemática da Dupla Camada Elétrica.	14
<b>Figura 4:</b> Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio para remoção de turbidez.	16
<b>Figura 5:</b> Perfil laminar do Gradiente de Velocidade.	25
<b>Figura 6:</b> Gráfico ilustrativo do comportamento da perda de carga em função da velocidade de aproximação.	34
<b>Figura 7:</b> Desenho de um equipamento de agitação para Testes de Jarros	42
<b>Figura 8:</b> Foto de um Agitador Múltiplo – “Jar Test” da EKIPA.	42
<b>Figura 9:</b> Foto do reator estático “Turb-Floc/2C”.	43
<b>Figura 10:</b> Aparelhos de Teste de Jarros com 3 e 6 jarros.	43
<b>Figura 11:</b> Lay-out do sistema piloto – concepção geral.	50
<b>Figura 12:</b> Foto do reservatório de água bruta – 1000 L.	51
<b>Figura 13:</b> Foto do Hydroejetor em acrílico.	52
<b>Figura 14:</b> Detalhe do Hydroejetor.	54
<b>Figura 15:</b> Detalhes da Mistura Rápida.	58
<b>Figura 16:</b> Fotos das colunas de floculação.	59
<b>Figura 17:</b> Foto do decantador cilíndrico em vidro – 5000 ml.	60
<b>Figura 18:</b> Foto do reator estático utilizado para os ensaios de floculação.	62
<b>Figura 19:</b> Curva do gradiente de velocidade.	64
<b>Figura 20:</b> Foto do Turbidímetro.	65
<b>Figura 21:</b> Foto do colorímetro NESSLER QUANTI-2000.	66
<b>Figura 22:</b> Expansão do leito granular para as duas colunas de floculação.	71
<b>Figura 23:</b> Curva de calibração do Hydroejetor.	72
<b>Figura 24:</b> Perda de carga calculada e medida.	74
<b>Figura 25:</b> Gradiente de velocidade calculado.	75
<b>Figura 26:</b> Melhor dosagem de sulfato de alumínio no Teste de Jarros.	77
<b>Figura 27:</b> Melhor dosagem de sulfato de alumínio para o piloto em meio granular.	77
<b>Figura 28:</b> Resultados de turbidez entre o Teste de Jarros e o piloto granular	78

<b>Figura 29:</b> Resultados de cor entre o Teste de Jarros e o piloto granular.	79
<b>Figura 30:</b> Redução da turbidez e da cor relacionado ao número de reatores em operação e dosagem do coagulante.	81
<b>Figura 31:</b> Variação da turbidez com a velocidade de sedimentação.	82
<b>Figura 32:</b> Variação da cor com a velocidade de sedimentação.	83
<b>Figura 33:</b> Análises de turbidez e cor segundo a velocidade de sedimentação em Teste de Jarros.	85
<b>Figura 34:</b> Análises de turbidez e cor com variação da velocidade de sedimentação realizadas no piloto.	86
<b>Figura 35:</b> Eficiência no abatimento da turbidez em Teste de Jarros e piloto.	87
<b>Figura 36:</b> Redução da turbidez no piloto e no Teste de Jarros para diferentes dosagens de coagulante.	89/90
<b>Figura 37:</b> Turbidez de acordo com a melhor dosagem de coagulante para o piloto e o Teste de Jarros.	91
<b>Figura 38:</b> Redução da cor no piloto e no Teste de Jarros para diferentes dosagens de coagulante.	92/93
<b>Figura 39:</b> Valores de pH; turbidez e cor em relação à variação das dosagens de cal – Teste de Jarros.	95
<b>Figura 40:</b> Turbidez e pH com variação da dosagem de coagulante e dosagem fixa de 4,0 mg/l de cal.	97
<b>Figura 41:</b> Cor e pH com variação da dosagem de coagulante e dosagem fixa de 4,0 mg/l de cal.	97
<b>Figura 42:</b> Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto em meio granular – Q = 180,0 l/h.	99
<b>Figura 43:</b> Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto em meio granular – Q = 162,0 l/h.	99
<b>Figura 44:</b> Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto em meio granular – Q = 132,0 l/h.	100
<b>Figura 45:</b> Projeto básico do Equipamento de Testes de Floculação em Meio Granular Expandido.	102
<b>Figura 46:</b> Concepção geral de automação para o Equipamento de Testes de Floculação em Meio Granular Expandido.	103

## LISTA DE SÍMBOLOS

ETA	- Estação de Tratamento de Água
LIMA	- Laboratório Integrado do Meio Ambiente
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
AWWA	- American Water Works Association
PVC	- Cloreto de Polivinila
pH	- Potencial Hidrogeniônico
S.A.	- Sulfato de Alumínio
Lim	- Limite de uma função
rpm	- Rotações por minuto
Ln	- Logaritmo neperiano
PN	- Potencial Nernst
PZ	- Potencial Zeta
CO <sub>2</sub>	- Molécula do gás carbônico
CaCO <sub>3</sub>	- Molécula de carbonato de cálcio
H <sub>2</sub> O	- Molécula de água
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	- Molécula do bicarbonato de cálcio
m <sup>3</sup>	- Metro cúbico
mm	- Milímetro
µm	- Micrometro
NTU	- Unidade Nefelométrica de Turbidez
u.c.	- Unidade de cor
mg/l	- Miligrama por litro
ml	- Mililitro
cm	- Centímetro
l/min	- Litros por minuto
Mg	- Miligrama
l	- Litro
Cv	- Cavalo de força
mg CaCO <sub>3</sub>	- Miligrama de carbonato de cálcio

min	- Minuto
s	- Segundo
p.	- Página
T	- Tempo
$N_0$	- Concentração inicial de partículas
$N_t$	- Concentração de partículas após um tempo "t"
$N_m$	- Concentração de partículas em relação ao último reator de floculação
$\mu$	- Coeficiente de viscosidade dinâmica
K	- Constante de Boltzmann
T	- Temperatura
J	- Joule
D; d	- Diâmetro do grão
dN	- Número de colisões entre as partículas
dt	- Tempo decorrido entre as colisões das partículas
$N_i$	- Número de partículas "i" por unidade de volume
$N_j$	- Número de partículas "j" por unidade de volume
dv	- Velocidade das colisões
dy	- Distância entre as partículas
$R_{ij}$	- Raio de colisão entre as partículas "i" e "j"
$d_i$	- Diâmetro das partículas "i"
$d_j$	- Diâmetro das partículas "j"
G	- Gradiente de velocidade
T	- Tempo médio de detenção
Ca	- Número de Camp
N	- Concentração de partículas em relação ao tempo "t"
$k_A$	- Constante de agregação
$k_B$	- Constante de ruptura
m	- Número de câmaras de um reator
$\Delta v$	- Diferença de velocidades
$\Delta y$	- Distância entre dois pontos
P	- Potência dissipada na massa líquida

$\nu$	- Coeficiente de viscosidade cinemática
$\rho$	- Massa específica
$V$	- Volume
$\theta$	- Tempo de floculação correspondente a um floclador de compartimento único
$v$	- Velocidade de escoamento intersticial
$\Delta h$	- Perda de carga
$g$	- Aceleração da gravidade
$S$	- Área específica média dos grãos
$\gamma$	- Peso específico da água
$v_0$	- Velocidade de aproximação
$\varepsilon$	- Porosidade
$J$	- Perda de carga unitária
$L$	- Comprimento
$A$	- Área transversal
$M$	- Massa das partículas
$\rho_s$	- Massa específica do sólido
$\rho_a$	- Massa específica da água
$Re$	- Número de Reynolds
$V_{mf}$	- Velocidade mínima de fluidificação
$\varepsilon_0$	- Porosidade do meio granular fixo
$Ga$	- Número de Galileu
$Ne$	- Critério de Newton
$Ex$	- Expansão do meio granular
Índice "e"	- Designação relacionada ao meio expandido
$Q$	- Vazão
$D$	- Diâmetro da coluna de floculação
$\Pi$	- Pi
$\emptyset$	- Diâmetro
$T_d$	- Tempo de decantação
$C$	- Coeficiente de descarga

<i>m</i>	- Relação entre o diâmetro menor e o diâmetro maior ( $d^2/D^2$ )
<i>a</i>	- Área transversal do orifício menor
<i>n</i>	- Coeficiente de Ganguillet-Kutter e Manning
PA	- Padrão Analítico

## RESUMO

O Teste de Jarros é ainda o método mais utilizado nas estações de tratamento de água para a determinação das dosagens ótimas dos coagulantes, além de ser empregado também para a determinação de parâmetros básicos na elaboração de projetos de estações de tratamento de água.

A prática tem comprovado que os ensaios com os Testes de Jarros nas estações devem ocorrer pelo menos duas vezes ao dia, em virtude das constantes alterações das características físico-químicas da água bruta. Entretanto, devido ao tempo necessário para realização dos ensaios, que é no mínimo duas horas, e da necessidade de deslocamentos por parte dos técnicos, essa prática não ocorre.

Este trabalho consiste no desenvolvimento de uma nova técnica para determinação da dosagem de coagulante em água bruta utilizando floculação em meio granular.

O desenvolvimento deste estudo deu-se através de um sistema piloto montado em laboratório dotado de duas colunas de floculação feitas em vidro e preenchidas até a altura de 40,0 cm com pequenas esferas de PVC, com 5,9 mm de diâmetro e densidade igual a 1,0725.

Os ensaios ocorridos durante este trabalho consistiram em determinar o comportamento do piloto com relação ao abatimento de turbidez e cor de uma água bruta, preparada artificialmente com bentonita, comparando-se aos valores obtidos em Teste de Jarros, verificando a eficiência e confiabilidade do sistema proposto.

Os resultados obtidos com o piloto mostraram-se bastante próximos aos do Teste de Jarros. As curvas de abatimento de cor e turbidez, nos ensaios com o piloto, apresentaram um comportamento mais assintótico, não sofrendo oscilações quando da variação de dosagem do sulfato de alumínio.

Devido à simplicidade de operação e por funcionar com escoamento contínuo, torna-se viável também a concepção de um sistema de automação para a estação de tratamento de água (ETA), cujo resultado fornecerá um maior número de dados em intervalos menores de tempo.

## **ABSTRACT**

The Jar test is still the most used method in water treatment plant for determining the excellent dosages of the coagulating elements, besides being used also in the determination of the basic parameters in the elaboration of projects of water treatment plants.

The practice has proved that the assays with the Jar tests in the plants should occur at least twice a day, due to the frequent changes in the physic-chemical characteristics of the crude water. However, because of the necessary time for the assays, which is at least two hours, and the technicians' need of motion, this practice does not happen.

This work consists of the development of a new technique for the coagulating dosage determination in crude water using flocculation in granulating mean.

The development of this study happened through a pilot system built in a lab with two flocculating columns made of glass and filled up to 40,0 cm with small PVC spheres of 5,9mm of diameter and density of 1,0725.

The assays occurred during this work consisted in determining the pilot behavior related to the abatement of turbidness and color of crude water, artificially prepared with bentonite, comparing to the values from the Jar test, verifying the efficiency and reliability of the proposed system.

The obtained results from the pilot were very near to the Jar test. The abatement curbs of color and turbidness, in the assays with the pilot, showed a more asymptotical behavior, not suffering oscillations in the variation of dosages of aluminum sulfate.

Due to the simplicity of the operation and the functioning with continuous drain, the conception of an automation system for a water treatment plant (WTS) became viable; its result will provide a greater number of data in a smaller period of time.

## 1 INTRODUÇÃO

Entra-se no século XXI trazendo grandes e importantes inovações tecnológicas, inovações essas que constituem fatores geradores de transformações no meio ambiente. Muitos foram os avanços ocorridos na área de saneamento básico desde o final do século XIX, ou seja, mais de cem anos de desenvolvimento que proporcionaram o acesso à água tratada de aproximadamente 80% da população da América Latina e Caribe. Parece muito, porém significa que 97 milhões de pessoas ainda não são atendidas pelos sistemas de abastecimento de água tratada (Gleick, 1998).

Em projetos de estações de tratamento de água para o abastecimento público, nenhuma outra parte está tão sujeita a variações de projeto quanto as instalações de mistura e floculação, pois sua eficiência é que determinará a boa qualidade da água ao final do tratamento.

A técnica atual para determinação da dosagem ótima de sulfato de alumínio (coagulante) é baseada em resultados experimentais realizados em reatores estáticos (Jar-Test) ou em instalações piloto.

Sabe-se que as características químicas e físicas da maioria das águas brutas mudam diariamente, tornando-se imprescindível a constante variação da dosagem do coagulante adicionado à água, no entanto, a operação dos ensaios de Jar-Test, hoje em dia, impossibilita a automatização da dosagem do produto químico adicionado à água.

Na América Latina, têm-se realizado esforços para acompanhar o desenvolvimento tecnológico dos países industrializados, adaptando-se as modernas tecnologias às condições sócio-econômicas e a nível industrial local. Isso torna-se bastante verdadeiro no caso do abastecimento de água potável em que a adoção da moderna tecnologia é facilitada pela construção de novos sistemas e ampliação de serviços existentes.

A adaptação de tecnologia às condições locais conduz a projetos simplificados. Isso não significa que tecnologia simplificada seja sinônimo de tecnologia inferior, pelo contrário, pois projetos possíveis de serem construídos com materiais e equipamentos locais idealizados de modo a exigir um mínimo de operadores requerem o emprego de alta tecnologia. Isso tudo resulta em facilidade

de operação e manutenção, não exigindo a importação de equipamentos caros e difíceis de obter e de manter em condições de operação nos países em desenvolvimento (Richter e Azevedo Netto, 1991).

O Jar-Test (Teste de Jarros) é até hoje a técnica mais utilizada para se obter a dosagem ótima de coagulante a ser adicionado à água bruta no processo de tratamento de água.

Para tanto, como proposta de projeto, procurou-se desenvolver e adaptar uma técnica alternativa aos ensaios de Jar-Test ocorridos nas ETA (Estações de Tratamento de Água).

O estudo aqui apresentado propõem a obtenção de resultados da dosagem ótima de coagulante através da floculação da água bruta em reatores cilíndricos dispostos em série e constituídos de leito granular expandido como meio de floculação.

Como linha de partida, aproveitou-se o estudo realizado em meio granular expandido (Sens e Hansen, 1995) e a proposta de estudo de continuação para se obter maior grau de eficiência em compartimentos em série (Cubas, 1999), os dois desenvolvidos no Laboratório Integrado do Meio Ambiente – LIMA, ENS/UFSC.

Para o desenvolvimento desse estudo, foi montado um piloto formado por reatores de floculação granular em série. A água utilizada nos ensaios foi preparada com bentonita.

## **2 OBJETIVO GERAL**

O estudo objetiva desenvolver uma nova técnica de ensaios de floculação para a obtenção da dosagem ótima de coagulante a ser adicionado em água bruta, agregando uma nova opção para os ensaios de floculação adotados em estações de tratamento de água (ETA).

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como objetivo específico tem-se:

- Comparar resultados de cor aparente e turbidez remanescente entre o Teste de Jarros tradicional e o piloto granular;
- Verificar a eficiência da pré-floculação em meio granular;
- Estudo da dosagem ótima de coagulante em sistema em contínuo com a ETA;
- Redução do tempo na realização dos ensaios;
- Possibilitar um projeto de automação do ensaio em contínuo.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Há quase um século, adota-se a floculação no tratamento de água como fase preparatória na remoção de partículas suspensas na água. Apesar de uma estação de tratamento de água ser um sistema integrado de diversos processos unitários, vem-se firmando a opinião de que a floculação é o mais importante de todos (Richter, 1999).

A maioria das estações de tratamento de água bruta utiliza o processo de coagulação-floculação como forma de promover a desestabilização das partículas coloidais em suspensão, possibilitando assim sua remoção pela sedimentação, flotação e/ou filtração. Para se determinar a melhor dosagem do produto químico (coagulante) a ser adicionado à água bruta, são realizados os Testes de Jarros.

O objetivo da clarificação da água consiste em promover a redução na sua turbidez, cor e carga orgânica, através da eliminação de sólidos suspensos por meio de processos físico-químicos.

A figura 1 ilustra, de forma simplificada, os processos que ocorrem em uma estação convencional de tratamento de água.

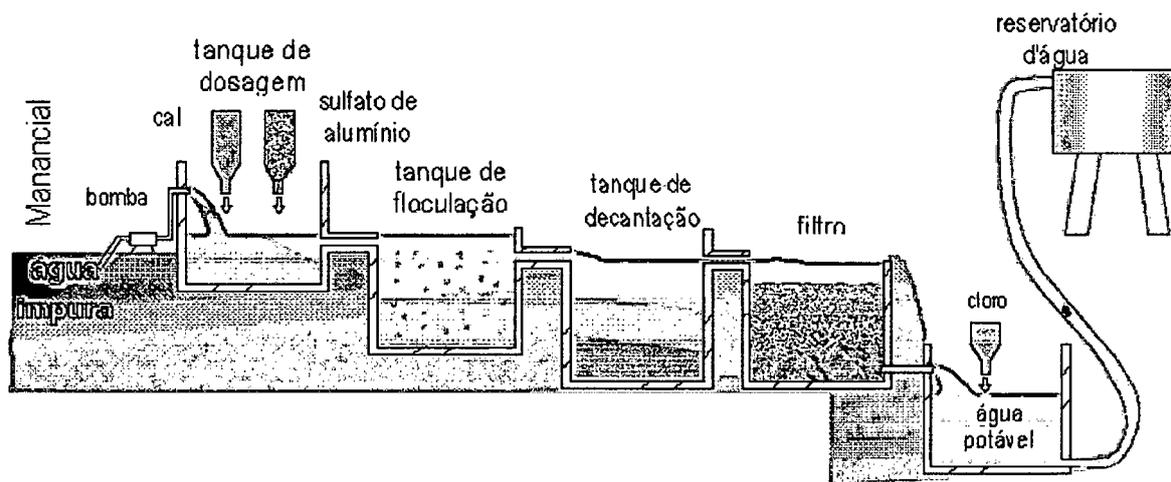


Figura 1: Estação de tratamento de água - esquema simplificado.

Sabe-se que a água bruta muda constantemente suas características físicas, devido principalmente às condições climáticas, o que torna necessário um monitoramento do processo de coagulação-floculação. Em uma estação de

tratamento de água, os ensaios com Testes de Jarros devem ser realizados pelo menos duas vezes ao dia, porém isso acaba não ocorrendo. A razão principal disso é o trabalho empreendido para se realizar um Teste de Jarros.

A utilização da floculação em meio granular expandido é viável em unidades compactas além de possibilitar a passagem total dos flocos através do meio para serem removidos posteriormente pela decantação. Essa nova técnica para determinação da melhor dosagem de coagulante vem ao encontro da necessidade de uma maior frequência na realização desses ensaios. A possibilidade do funcionamento em contínuo com o sistema de tratamento e a automatização do processo são fatores importantes que tornam essa fase do processo de tratamento de água mais eficaz.

### **3.1 COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO**

#### **3.1.1 Aspectos Gerais**

Na etapa de coagulação-floculação do processo de tratamento de água são adicionados produtos químicos (sais) à água, proporcionando a desestabilização e conseqüente aglomeração das partículas em suspensão ou em estado coloidal. É através dessa etapa que se faz possível a separação das partículas sólidas responsáveis pela turbidez e cor presentes na água. À medida que um pequeno volume de coagulante é adicionado à uma grande quantidade de água torna-se importante uma intensa agitação que promova a dispersão rápida e homogênea do sal, caracterizando-se a mistura rápida. O processo de coagulação-floculação depende ainda de algumas características da água como a turbidez, cor, pH, sólidos dissolvidos, alcalinidade, temperatura, tamanho das partículas dissolvidas ou em estado coloidal, força iônica e presença de metais.

O processo de desestabilização química das partículas efetuado em unidades de mistura rápida denomina-se coagulação. A aproximação e aglutinação das partículas decorrentes da desestabilização de suas cargas elétricas efetuadas em unidades de mistura lenta denomina-se floculação (Vianna, 1997).

### 3.1.1.1 Coagulantes e seus Auxiliares

Para que ocorra a desestabilização das cargas dos colóides e conseqüente união das partículas, é necessário a adição de coagulantes à água, objetivando assim uma purificação conveniente (Azevedo Netto et. al., 1977).

Os coagulantes metálicos mais comumente usados são os sais de alumínio e ferro. Álcalis também são adicionados à água para aumentar ou manter a alcalinidade. Os coagulantes férricos mais utilizados são o sulfato férrico –  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)$ , e o cloreto férrico –  $\text{Fe Cl}_3$ .

Os coagulantes orgânicos (polímeros) são utilizados como auxiliares na coagulação. Os polímeros são formados por uma cadeia de unidades químicas repetidas, unidas entre si por interconexões covalentes. De um modo geral, os polímeros classificam-se em polieletrólitos catiônicos (carga positiva), aniônicos (carga negativa) e não-iônicos.

A utilização de polímeros na coagulação proporciona uma redução na quantidade de lodo produzida no processo de coagulação-floculação-decantação (Richter, 1999).

O coagulante, para ser empregado, deve apresentar algumas propriedades essenciais para sua eficácia, entre elas:

- reagir com álcali, produzindo precipitados floculentos;
- formar flocos de grande superfície, para que ocorra a adsorção de partículas dissolvidas, coloidais e em suspensão;
- produzir, em solução, íons metálicos fortes o suficiente para reduzir o potencial zeta;
- não causar problemas à saúde dos consumidores de água tratada.

A figura 2 mostra o processo de aglutinação das partículas após a adição e mistura do coagulante à água.

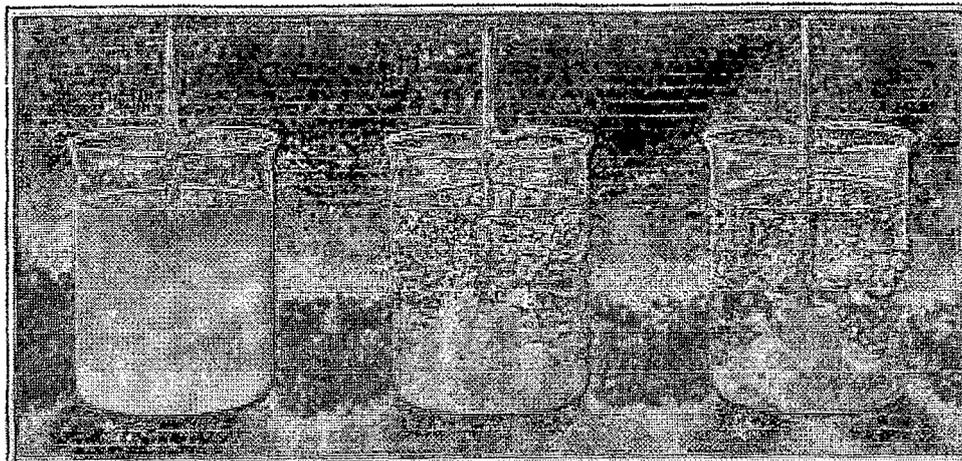


Figura 2: Coagulação-floculação da água com coagulante químico.

Devido ao baixo custo, facilidade de transporte e manejo e por ser produzido em várias regiões do Brasil, o sulfato de alumínio -  $Al_2(SO_4)$  é o coagulante mais utilizado no tratamento de água (Azevedo Netto et. al., 1977).

### 3.1.1.2 Turbidez

A turbidez é uma característica física da água causada principalmente por partículas em suspensão, como argila ou organismos patogênicos capazes de interferir na passagem da luz. Por si só, a turbidez não apresenta um inconveniente sanitário, no entanto, organismos patogênicos podem estar associados à matéria em suspensão, a qual geralmente atua como escudo protetor desses, protegendo-os de agentes desinfectantes (Vianna, 1997).

Quanto menor a turbidez da água, maior será a eficiência de atuação dos agentes desinfectantes. Atualmente, está-se exigindo água filtrada com turbidez menor que 1,0 NTU, preferencialmente menor que 0,2 NTU, daí a importância desse parâmetro no controle de uma estação de tratamento de água bruta (Richter e Azevedo Netto, 1991).

### 3.1.1.3 Cor

A característica colorida das águas é devida às substâncias coloidais em solução, provenientes da decomposição de matéria orgânica predominantemente vegetal, como também por corpos vivos presentes, como algas (cor aparente). A denominada cor verdadeira das águas depende, exclusivamente, das partículas dissolvidas na água, o que torna necessário para sua determinação que as amostras de água sejam centrifugadas. Desta forma, sabe-se que, se determinada amostra possuir cor aparente inferior ao limite estabelecido, a cor real também atenderá a esse padrão. É por isso que nas análises em laboratórios de tratamento de água determina-se a cor aparente, ao invés da cor real (Vianna, 1997).

A remoção da cor pode ser facilmente conseguida através da coagulação química. No caso de uma água apresentar cor extremamente elevada, a remoção pode ser efetuada por meio de oxidação química, com o cuidado de se evitar o uso de cloro elementar, pois o mesmo pode reagir com a matéria orgânica, resultando em compostos suspeitos de serem cancerígenos (trihalometanos) (Richter e Azevedo Netto, 1991).

A cor é uma característica de ordem estética e sua presença causa repugnância, podendo causar alguns problemas para o usuário mal informado que, impressionado pela alta cor, irá procurar água incolor que pode conter contaminantes que não causam cor (Azevedo Netto e Campos Botelho, 1991).

#### **3.1.1.4 Alcalinidade, Acidez e pH**

Com relação à potabilização da água, a alcalinidade representa a capacidade de certa água em neutralizar ácidos. Quanto maior a alcalinidade de uma água, maior será a dificuldade em variar seu pH quando lhe aplicam um ácido. Portanto, a alcalinidade está relacionada à presença de íons básicos como bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, especialmente os bicarbonatos que representam a maior parte da alcalinidade das águas naturais devido à presença de gás carbônico dissolvido presente em águas sobre rochas calcárias.



A acidez é expressa em termos de  $\text{CaCO}_3$  e representa a capacidade da água em neutralizar bases.

O pH representa a intensidade de uma condição ácida ou alcalina de uma solução através da concentração do íon hidrogeniônico ou de sua atividade, sendo referido, principalmente, na coagulação, floculação, desinfecção e no controle de corrosão. Para cada água, existe uma faixa ideal de pH em que ocorre uma melhor coagulação-floculação, aumentando a eficiência no abatimento da turbidez e cor. Essa faixa pode variar bastante, pois depende das características de impurezas da água e das propriedades químicas do coagulante.

Segundo Di Bernardo (1993), o hidróxido de alumínio possui uma faixa de pH (entre 7 e 9), chamado ponto isoelétrico, no qual a carga do colóide, dependendo dos íons presentes na água, torna-se nula.

### **3.1.1.5 Temperatura**

A temperatura assume relevada importância na influência sobre outras propriedades: acelera reações químicas, reduz a solubilidade dos gases e acentua a sensação de sabor e odor (Richter e Azevedo Netto, 1991).

De acordo com Morris e Knocke, 1984 (apud Dalsasso, 1999), a temperatura influencia na remoção de turbidez quando se utiliza coagulantes com íons metálicos. Em temperaturas baixas ( $0^\circ$  a  $4^\circ\text{C}$ ) a eficiência na remoção da turbidez diminui. A variação de temperatura influi sensivelmente na formação de flocos, cujo aumento acelera o processo até certos limites.

Leituras de temperaturas são importantes em vários processos de tratamento e determinações em laboratório. Ela é um fator em certas florescências de algas, no grau de saturação de oxigênio dissolvido e na concentração de dióxido de carbono.

Em processos de tratamento de esgotos a influência da temperatura se dá, praticamente, nas operações de natureza biológica onde a velocidade de decomposição do esgoto é maior com o aumento da temperatura. O aumento da

temperatura da água faz diminuir sua viscosidade melhorando as condições de sedimentação.

### **3.1.2 Origem das Cargas das Partículas**

#### **3.1.2.1 Partículas Coloidais**

O surgimento de impurezas nas águas naturais está ligado à presença de partículas coloidais, cuja superfície está carregada eletricamente. Uma teoria de natureza química afirma que os colóides adquirem cargas elétricas em sua superfície através da ionização de grupos químicos presentes na água e que a coagulação ou desestabilização é ocasionada pelas interações químicas entre as partículas coloidais e o coagulante. A teoria física diz que fatores físicos como a compressão da dupla camada e a adsorção-neutralização ocasionam a desestabilização através da redução de forças, tais como o Potencial Zeta. Ambas as teorias são importantes para explicar o processo de coagulação em sistemas de tratamento de água que se faz necessário quando existe uma mistura heterogênea de sistemas coloidais (Baumann, 1971).

#### **3.1.3 Sistema Coloidal**

Colóide é uma dispersão de partículas de um material em outro e se classifica como:

*sol* ⇒ quando uma partícula em fase sólida está dispersa em uma fase líquida, ou uma dispersão de um sólido em um líquido;

*emulsão* ⇒ dispersão de um líquido em um líquido;

*aerosol* ⇒ dispersão de um líquido ou um sólido em um gás.

Quando se tem a água como solvente, um sólido pode ser hidrófobo ou hidrófilo. Colóides hidrófobos são os que repelem a água, tendo como fase dispersa material insolúvel em água e ocorrem com maior frequência nas águas para abastecimento. Colóides hidrófilos são solúveis em água, atraindo para perto de si moléculas do meio dispersivo, formando uma película protetora e tornando o colóide bastante estável (dificulta a coagulação e a floculação). Alguns exemplos desse grupo são os detergentes, sabões, óleos e graxas, quando dispersos em água (Azevedo Netto et. al., 1977).

O tamanho das partículas coloidais situa-se entre  $10^{-6}$  e  $10^{-3}$  mm. As partículas coloidais de argila apresentam grande superfície específica, pois apresentam forma laminar com espessuras de apenas  $0,01 \mu\text{m}$  a  $0,02 \mu\text{m}$ .

As partículas coloidais apresentam cargas elétricas que produzem forças de repulsão suficientemente grandes, ao ponto de mantê-las separadas em suspensão. Ao desestabilizar as cargas, as partículas coloidais se aglomeram progressivamente, possibilitando sua sedimentação. As forças de atração molecular entre as partículas, conhecidas como "Forças de Van der Waals", são causadas pela interação de partículas dipolares permanentes ou induzidas, enquanto as forças de repulsão ocorrem devido ao *Potencial Zeta*.

Os colóides presentes em águas naturais geralmente possuem carga elétrica negativa que atrai íons de carga positiva, formando uma capa de íons aderidos em torno da superfície do colóide e circundada por uma camada externa difusa, mantendo-se próxima à superfície da partícula pelas forças eletrostáticas. As partículas coloidais mantêm-se em suspensão devido à repulsão entre si, causada pelos íons de mesma carga.

Colóides de origem mineral geralmente não oferecem perigo algum ao ser humano, influenciando apenas nas condições estéticas devido à turbidez causada pela sua presença (Richter, 1999).

### **3.1.3.1 Potencial Zeta**

Quando se cria uma diferença de potencial numa dispersão coloidal, ocorre o movimento de partículas que levam consigo parte das cargas do líquido, fenômeno esse conhecido como *eletroforese*.

A medida do potencial elétrico entre a superfície externa da camada compacta e o meio líquido no qual se desenvolve é chamada de Potencial Zeta. O Potencial Zeta mede o potencial de uma partícula em movimento livre num líquido.

As forças eletrostáticas atraem os íons de carga contrária ao colóide, enquanto que a agitação térmica e o Movimento Browniano são responsáveis pela distribuição homogênea na massa líquida. Esse sistema composto de cargas, superfície do colóide e camada de sinal contrário, é chamado de dupla camada.

O Potencial Zeta é uma função da carga da camada difusa e de sua extensão e proporcional à velocidade, ou seja, quanto maior a densidade e extensão da camada difusa, maior será a velocidade da partícula dispersa sob a ação de um campo elétrico, ao passo que o atrito entre as partículas e o líquido que contém a camada difusa será menor (Azevedo Netto et. al., 1977).

O Potencial Zeta é positivo quando as partículas migram do pólo positivo para o pólo negativo e negativo quando ocorre o contrário. As águas naturais possuem geralmente colóides de Potencial Zeta negativo.

As forças de Van der Waals, mais representativas que as forças gravitacionais, diminuem à medida que aumenta a distância entre as partículas, não tendo efeito significativo, a não ser quando as partículas estão muito próximas.

Quando estão muito próximas, a força de Van der Waals provoca a aderência entre as partículas, formando aglomerados possíveis de serem removidos. Para que isso ocorra, é necessário reduzir a força de repulsão eletrostática, ou seja, o Potencial Zeta (Richter, 1999).

### **3.1.3.2 Configuração da Dupla Camada Elétrica**

Na água, a maior parte das partículas e das moléculas de substâncias húmicas possuem superfície carregada com íons de cargas usualmente negativas. A superfície da partícula coloidal negativa atrai íons positivos na região de interface

(sólido-líquido). Essa aglomeração de íons negativos e positivos resulta na formação da Dupla Camada Elétrica ou Camada Compacta. Em torno dessa camada, devido à repulsão eletrostática de íons negativos e à atração de íons positivos, origina-se a Camada Difusa (Di Bernardo, 1993).

A dupla camada elétrica é formada por duas superfícies de cargas elétricas opostas mantidas por forças eletrostáticas. A concentração das cargas contrárias diminui exponencialmente entre as fronteiras da camada compacta e da camada difusa até igualar a concentração de cargas da solução, intervalo esse em que o potencial elétrico formado é conhecido como Potencial Zeta. A dupla camada elétrica exerce uma significativa importância, pois é responsável pela estabilidade do sistema coloidal, tornando impossível sua separação do líquido por meio da decantação (Richter, 1999).

A desestabilização das partículas coloidais ocorre pelas forças de gravidade, Van der Waals e pelo Movimento Browniano. O trabalho necessário para manter afastadas duas partículas coloidais, partindo-se de uma distância infinita, chama-se potencial de repulsão e, tanto maior será essa força quanto menor for a distância entre as partículas.

À medida que aumenta a concentração iônica da camada difusa, diminui o Potencial Zeta. Com isso, ocorre uma redução das forças de repulsão, possibilitando a aglomeração das partículas mediante aumento da concentração eletrolítica da solução ou através da neutralização das cargas com adição de íons com cargas opostas, por meio de coagulantes químicos e/ou polieletrólitos. A figura 3, a seguir, representa o comportamento da configuração da Dupla Camada Elétrica.

Segundo Di Bernardo (1993), a estabilização estérica ocorre devido à adsorção de polímeros na superfície das partículas coloidais. Essa reação pode tanto estabilizar quanto desestabilizar, dependendo, principalmente, da quantidade de polímero e de partículas, da afinidade entre o polímero as partículas e a água e do tipo e concentração de eletrólitos presentes na solução.

As interações repulsivas entre partículas coloidais com polímeros adsorvidos podem ocorrer de duas maneiras, através da compressão ou pela interpenetração.

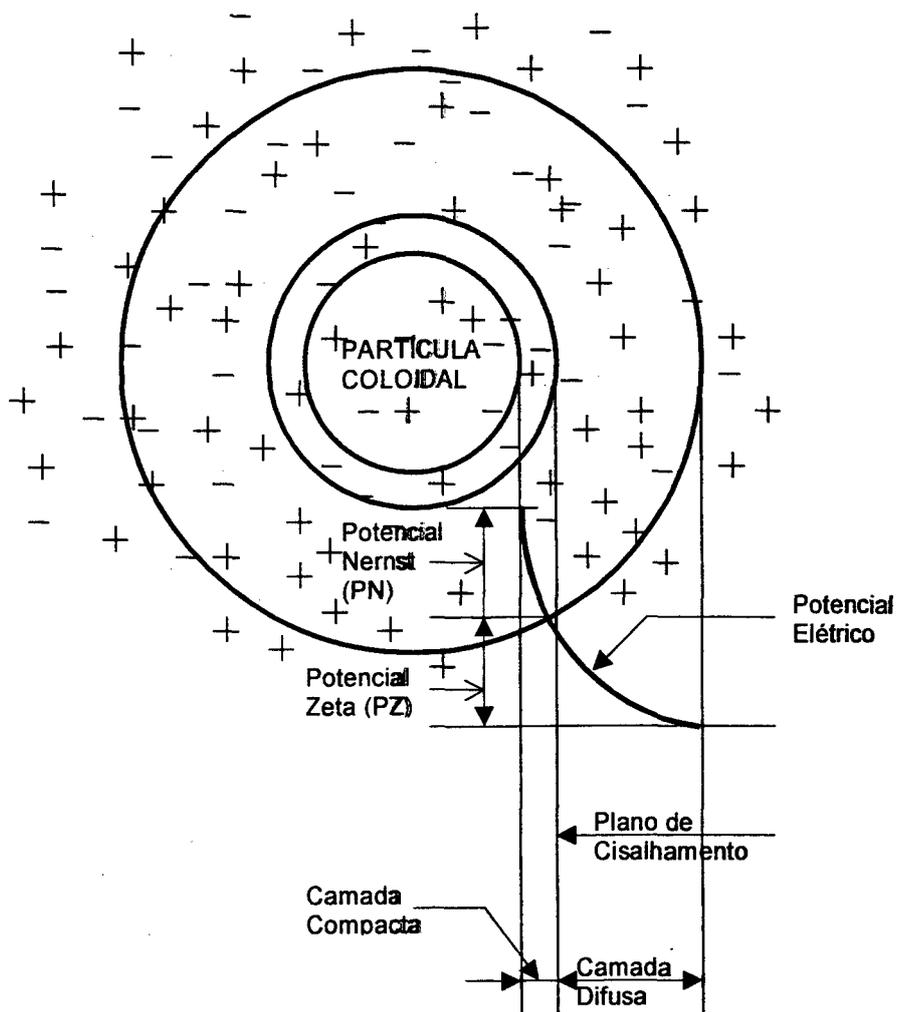


Figura 3: Configuração esquemática da Dupla Camada Elétrica.

### 3.1.4 Coagulação

O termo “coagulação” é originado do Latim *coagulare*, que significa “manter-se junto.” Esse processo descreve o efeito produzido pela adição de um produto químico sobre uma dispersão coloidal, resultando na desestabilização das partículas através da redução das forças que tendem a manter as mesmas afastadas (Baumann, 1971).

As partículas coloidais que conferem turbidez e cor, principalmente em águas naturais, são carregadas com íons negativos. A desestabilização por meio da adição de produtos químicos adequados na água provoca a aglomeração das partículas para posterior remoção por meio da sedimentação, flotação ou filtração.

Estudos sobre a cinética das reações, estabilidade das partículas e química da coagulação são de fundamental importância para a otimização desse processo. A compreensão da coagulação melhorou muito com os trabalhos realizados sobre o Potencial Zeta, a desestabilização das partículas e o tempo de formação dos flocos, bem como a otimização da intensidade da mistura, determinando os gradientes de velocidades mais adequados ao processo de coagulação (Di Bernardo, 1993).

Segundo Azevedo Netto et. al. (1977), "coagular significa reduzir o *Potencial Zeta* a tal ponto que se consiga a união de partículas coloidais produzindo flocos."

Alguns passos são necessários para se obter a coagulação-floculação, tais como:

- redução do Potencial Zeta;
- fornecimento de energia para provocar agitação que acarrete maior número de choques;
- adição de produtos químicos que auxiliem na formação de aglomerados de partículas.

As reações de adsorção-desestabilização são extremamente rápidas, ocorrendo em frações de segundos, aproximadamente 1 segundo (Hahn e Stumm apud Richter, 1999).

A coagulação por arraste é mais lenta, concluindo-se entre 1 e 7 segundos. A coagulação por adsorção é mais indicada para filtração direta ou filtração por contato, enquanto que a coagulação por arraste é mais indicada para o processo de sedimentação, que necessita de flocos maiores.

Na adsorção-desestabilização, é importante que os coagulantes se dispersem de forma instantânea (menos que 0,1 s) na água, de tal maneira que os produtos de hidrólise desestabilizem o colóide. Hudson (apud Richter, 1999) recomenda uma mistura rápida, com gradientes de velocidade na ordem de  $1000 \text{ s}^{-1}$  e tempos de mistura iguais ou inferior a 1 segundo.

Amirtharaj e Mills (apud Richter, 1999) desenvolveram um diagrama de coagulação (mostrado na figura 4) para o sulfato de alumínio que indica as regiões mais adequadas para os diferentes tipos de coagulação através da melhor dosagem e pH de coagulação. Esse diagrama é diferente para cada caso específico.

As condições ótimas para a coagulação por arraste se dá com pH entre 6 e 8 e com doses de sulfato entre 20 e 60 mg/l.

A coagulação com sais de alumínio e ferro ocorre, predominantemente, por arraste. Devido à presença de produtos de baixa solubilidade, o hidróxido de alumínio e de ferro precipitam rapidamente, produzindo um precipitado gelatinoso que carrega consigo outras partículas, caracterizando com isso a coagulação por arraste (Richter, 1999).

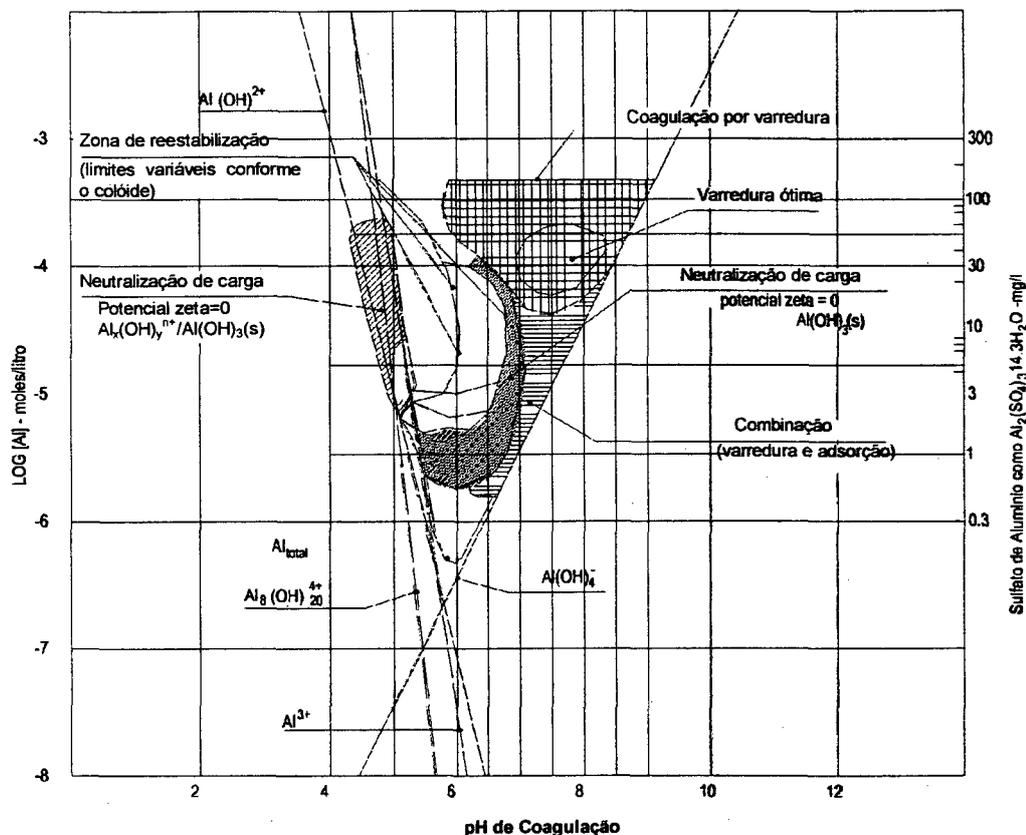


Figura 4: Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio para remoção de turbidez (Fonte: Richter, 1999).

A partir do diagrama de coagulação do sulfato de alumínio, desenvolvido por Amirtharajah e Mills (1982), verifica-se que ocorre em uma primeira região a neutralização de carga das partículas coloidais, de carga negativa, pelas espécies hidrolisadas do alumínio, de carga positiva. Dessa interação, resulta uma curva onde o ponto isoelétrico se aproxima de zero, para um valor de pH da ordem de 4,8.

Em uma segunda região, determinada dosagem de sulfato de alumínio para um valor de pH maior que 4,8, o ponto isoelétrico e os colóides tornam-se positivos, caracterizando o fenômeno da reestabilização.

Ainda, de acordo com o diagrama, ocorre, em uma terceira região, a interação entre as espécies hidrolisadas positivas de alumínio e as partículas coloidais, resultando uma curva onde o ponto isoelétrico alcança o valor máximo (reestabilização) e diminui com o aumento do pH, até que o ponto isoelétrico seja novamente atingido, a um pH em torno de 6,8.

Na quarta região, geralmente, para valores de pH de 6 a 8, com dosagens de coagulante superiores a 30 mg/l, tende a ocorrer formação excessiva dos precipitados de hidróxido de alumínio, de forma que as partículas coloidais são aprisionadas nos mesmos, caracterizando o mecanismo da varredura.

#### **3.1.4.1 Mistura Rápida**

A mistura rápida é de suma importância para o processo de coagulação-floculação, pois tem a finalidade de promover a dispersão do coagulante à água. Essa mistura deve ser homogênea, a ponto de conferir uma distribuição equitativa e uniforme do coagulante à água e da maneira mais rápida possível. Esses fatores se encontram entre os principais problemas no tratamento de água, haja vista que a quantidade de coagulante utilizada para a desestabilização das partículas é muito pequena comparada ao grande volume de água tratada.

A eficiência da coagulação e, portanto, das fases subsequentes do sistema de tratamento, depende da formação dos primeiros complexos de cátions metálicos hidrolisados, cuja composição será determinada pelas condições da água no momento e no ponto em que entram em contato.

A reação de hidrólise é muito rápida e, portanto, para que ocorra a desestabilização dos colóides, torna-se indispensável que uma pequena dose de coagulante seja dispersa em toda a massa líquida no menor intervalo de tempo possível (Richter e Azevedo Netto, 1991).

Na prática, a mistura rápida ocorre por meio de uma intensa turbulência interna ou uma turbulência externa provocada por dispositivos mecânicos ou

hidráulicos, ou ainda uma combinação dos dois. A intensidade de turbulência é determinada pelo gradiente de velocidade e o tempo de mistura é, atualmente, definido como o tempo necessário para que as reações de hidrólise se completem.

Segundo Amirtharaj (apud Richter, 1999), tempos de dispersão muito curtos e grande intensidade de mistura não são decisivos para uma boa coagulação. Ao contrário, gradientes de velocidade entre 1500 a 3500 s<sup>-1</sup> devem ser evitados, pois comprovações teóricas demonstram um mínimo de desestabilização para condições extremas. Pode-se, portanto, adotar valores para o tempo de mistura menores que 7 segundos e gradientes de velocidade entre 300 a 1200 s<sup>-1</sup>.

#### **3.1.4.2 Mecanismos de Desestabilização das Partículas Coloidais**

Segundo Di Bernardo (1993), o processo de desestabilização na coagulação deve-se a: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização de cargas, varredura e adsorção e formação de ponte.

A eficiência desses mecanismos é função do tipo e dosagem de coagulante utilizado, do pH ótimo de coagulação e das características iniciais da água bruta.

Na coagulação por compressão da camada difusa, a desestabilização das partículas ocorre devido a interações eletrostáticas resultantes da adição de sais de cálcio, sódio ou alumínio, considerados como um eletrólito indiferente. O eletrólito, ao entrar em contato com o sistema coloidal, causa um aumento da densidade dos íons na camada difusa, que para manter-se eletricamente neutro reduzirá sua espessura, resultando na predominância das forças de Van der Waals sobre o Potencial Zeta.

Na adsorção e neutralização de cargas, a desestabilização das partículas ocorre pela adsorção do coagulante em suas superfícies e pelo fenômeno da reversão de cargas causado pelo excesso de íons de carga positiva na superfície coloidal, possibilitando assim a aproximação das partículas de modo a floculá-las.

De acordo com a quantidade de coagulante adicionado à água, valores de pH e a concentração de alguns tipos de íons presentes na água, poderá ocorrer a formação de precipitados, sob forma de gel, capazes de arrastar consigo as

partículas coloidais. Como não ocorre a neutralização de cargas, a dosagem ótima de coagulante pode não corresponder àquela em que é mínimo o Potencial Zeta.

Compostos orgânicos sintéticos e naturais caracterizados por grandes cadeias moleculares, que apresentam grandes sítios ionizáveis, quando adsorvidos pelas camadas superficiais do colóide caracterizam a formação de pontes.

Esses polímeros de grandes cadeias moleculares podem ser classificados como: *catiônico* (apresenta sítios ionizáveis positivos); *aniônico* (apresenta sítios ionizáveis negativos); *não-iônico* (não apresenta sítios ionizáveis) e *anfótilico* (apresenta sítios ionizáveis negativos e positivos) (Di Bernardo, 1993).

### 3.1.5 Floculação

Considerada como um segundo estágio na formação de partículas sedimentáveis, a floculação, termo também originário do Latim *flocculare* que significa “formar flocos”, define-se como o processo de aglomeração das partículas coaguladas e desestabilizadas, formando flocos pesados o suficiente para sua separação por unidades de sedimentação, flotação ou filtração. (Richter, 1999).

Ocorrida a coagulação, faz-se a agitação relativamente lenta com objetivo de aumentar o número de colisões entre as partículas desestabilizadas, formando aglomerados (flocos). A taxa de aglomeração depende da probabilidade e da eficiência dos contatos, já que a agregação e a ruptura ocorrem simultaneamente (Di Bernardo, 1993).

Segundo Sens (1997), a floculação tem a finalidade de aumentar a probabilidade dos encontros entre as partículas. Os movimentos do líquido que provocam os encontros podem ser devidos ao:

- Movimento Browniano das partículas (floculação pericinética);
- deslocamento provocado em uma parte do líquido (floculação ortocinética).

A energia aplicada para a floculação tem a mesma origem da coagulação, diferenciando-se pela característica de intensidade do gradiente de velocidade, que no caso da floculação é bem menor.

### 3.1.5.1 Cinética da Floculação

Os choques entre as partículas coaguladas para promover a agregação devem-se, principalmente, ao Movimento Browniano e às colisões causadas pelo movimento da água.

No Movimento Browniano, denominado como *floculação pericinética*, do Grego *peri* (*próximo*), as moléculas de água, devido à energia térmica, proporcionam movimentos erráticos das partículas, favorecendo a colisão entre as mesmas.

As colisões entre partículas causadas pelo movimento da água, devido ao gradiente de velocidade, tanto em regime laminar quanto no turbulento, classificam-se como *floculação ortocinética*, do Grego *ortho* (*reto, exato*).

Na floculação pericinética, o tempo "t" para reduzir a concentração inicial de partículas de igual tamanho  $N_0$  para uma concentração final  $N_t$  é dado pela seguinte equação:

$$t = \frac{3\mu}{4KT} \left( \frac{1}{N_t} - \frac{1}{N_0} \right) \quad (1)$$

onde,

$\mu$  = coeficiente de viscosidade dinâmica;

K = constante de Boltzmann ( =  $1,385 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>);

T = temperatura absoluta em graus Kelvin (K);

J = Joule (N.m);

$N_0, N_t$  = número inicial e final de partículas por mililitro.

$N_0/\text{ml} = N_0/\text{ml} \cdot 10^6 \cdot \text{ml}/\text{m}^3$

ou seja:  $N_0, N_t = 10^6 \text{ m}^{-3}$ .

Portanto, o processo é independente de fatores externos, exceto a temperatura. O tempo  $t_{1/2}$  em segundos, necessário para reduzir à metade da concentração inicial de partículas  $N = 0,5 \cdot N_0$  varia normalmente entre 2 segundos a 2 minutos em experiências práticas e, teoricamente, estaria em torno de  $1,6 \times 10^{11}/N_0$  a 25° C.

Para partículas de diferentes tamanhos, D e "d", Kruit (apud Richter, 1999) apresentou uma correção para a relação de tempo dada pela equação (1):

$$\frac{T}{t} = \frac{1}{4} \left[ 4 + \left( \sqrt{\frac{D}{d}} - \sqrt{\frac{d}{D}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Para uma relação  $D/d$  da ordem de 100 entre os primeiros núcleos de hidróxidos formados na coagulação e das partículas coloidais desestabilizadas, o tempo para uma redução de 50% no número de partículas seria cerca de 25 vezes menor, o que indica um tempo compatível com a fase inicial da coagulação. Dessa maneira, o processo de coagulação-floculação pode ser sensivelmente melhorado, acrescentando-se, no momento da adição do coagulante, ou ainda, anterior ao processo, partículas de maior tamanho, como flocos pré-formados.

As experiências comprovam que é necessário promover uma mistura de grande intensidade, de maneira que o coagulante seja distribuído de forma homogênea em toda a massa líquida, obtendo uma floculação eficiente. Essa mistura intensa não perturba o Movimento Browniano, sendo esse superado pela floculação ortocinética, caracterizada pela maior probabilidade de colisões entre as partículas, o que facilita a agregação (Richter, 1999).

Von Smoluchowski (apud Sens, 1997), desenvolveu a seguinte expressão que explica o fenômeno responsável pela floculação através do cálculo do número de colisões por unidade de volume e por unidade de tempo:

$$\frac{dN_{ij}}{dt} = -\frac{4}{3} \left( \frac{dv}{dy} \right) n_i n_j R_{ij}^3 \quad (3)$$

onde,

$dN/dt$  = taxa de colisões entre as partículas;

$n_i$  = número de partículas  $i$  por unidade de volume;

$n_j$  = número de partículas  $j$  por unidade de volume;

$dv/dy$  = gradiente de velocidade  $G$  ( $s^{-1}$ );

$R_{ij} = 1/2 (d_i + d_j)$ , raio de colisão entre as partículas  $i$  e  $j$ .

Portanto, substituindo o raio de colisão entre as partículas na equação (3), tem-se:

$$\frac{dN_{ij}}{dt} = \frac{1}{6} n_i n_j (d_i + d_j)^3 \cdot G \quad (4)$$

onde,

$d_i$  = diâmetro das partículas  $i$ ;

$d_j$  = diâmetro das partículas  $j$ ;

$G$  = gradiente de velocidade ( $s^{-1}$ ).

De acordo com Hudson (apud Richter, 1999), quando  $d_j \gg d_i$ , então  $R_{ij} \cong R_j$ .

As partículas do tipo "i" podem ser partículas responsáveis pela cor ou turbidez e as partículas do tipo "j" podem ser os flocos.

Conclui-se, desta maneira, que a velocidade de floculação, em igualdade de condições de gradiente de velocidade e tempo de floculação, depende somente da concentração e do volume de flocos e não do número e do tamanho das partículas (Richter, 1999).

### 3.1.5.2 Número de Camp

Fair, Geyer e Okun propuseram que o produto do gradiente de velocidade pelo tempo de detenção ( $G.T=Ca$ ) constitui um parâmetro auxiliar no desenvolvimento de unidades de dispersão de coagulantes e de floculação. Denominado Número de Camp, seu valor é adimensional e representa a probabilidade do número de colisões entre as partículas floculentas. O valor de  $G$  está associado ao consumo de energia e o de  $T$  à dimensão do floclador ou câmara de floculação. Esses são dois parâmetros econômicos muito importantes (Sens, 1997).

Desta forma, ao se projetar flocladores com várias câmaras de floculação com gradientes de velocidade decrescentes e tempos de detenção crescentes de montante para jusante, pode-se fazê-lo de tal forma que se obtenha valores iguais aos de  $G.T$  (Vianna, 1997).

Na teoria, para valores iguais ao Número de Camp  $Ca$  em diferentes instalações, a probabilidade de que ocorram choques entre as partículas é a mesma, portanto, para valores elevados de  $G$  e baixos de  $T$  ou vice-versa o desempenho das unidade seria similar.

A experiência mostra que nem sempre isso ocorre, sendo necessário realizar ensaios em cada caso para se determinar os valores mais adequados de  $G$  e  $T$  (Richter, 1999).

Argaman (apud Richter, 1999) definiu o modelo teórico que representa a velocidade de agregação ou taxa de crescimento dos flocos como:

$$\frac{dN_A}{dt} = -k_A \cdot N \cdot G \quad (5)$$

e o modelo para a ruptura (Kaufman apud Richter, 1999):

$$\frac{dN_B}{dt} = k_B \cdot N_0 \cdot G^2 \quad (6)$$

Combinando os efeitos de agregação e quebra dos flocos, Argaman e Kaufman (apud Sens, 1997), propuseram calcular a variação do número de partículas por unidade de volume conforme:

$$\frac{dN}{dt} = -k_A \cdot N \cdot G + k_B \cdot N_0 \cdot G^2 \quad (7)$$

onde,

$N_0$  = concentração inicial de partículas primárias ao entrar no floculador ( $m^3$ );

$N$  = concentração de partículas primárias em relação ao tempo  $t$  ( $m^3$ );

$k_A$  = constante de agregação (adimensional);

$k_B$  = constante de ruptura (s).

Integrando-se a equação (7) entre ( $t = 0$ ;  $N = N_0$ ) e ( $t = T$ ;  $N = N$ ), tem-se a equação a seguir, válida para apenas um reator:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1 + k_B \cdot G^2 \cdot T}{1 + k_A \cdot G \cdot T} \quad (8)$$

Admitindo que as constantes  $k_A$  e  $k_B$  mantenham-se constantes em um floculador com "m" câmaras em série completamente misturadas, em um tempo de detenção total  $T$  e aplicando a teoria de reatores em série, tem-se:

$$\frac{N_m}{N_0} = \frac{1 + k_B \cdot G^2 \cdot \frac{T}{m} \left[ \sum_{i=0}^{m-1} \left( 1 + k_A \cdot G \cdot \frac{T}{m} \right)^i \right]}{\left( 1 + k_A \cdot G \cdot \frac{T}{m} \right)^m} \quad (9)$$

onde,

$m$  = número de câmaras em série que integram o floculador;

$N_m$  = concentração de partículas saindo do último reator de floculação;

$T$  = tempo médio total de floculação.

Os valores de gradientes de velocidade normalmente aplicados ao tratamento de água estão entre 75 e 30  $s^{-1}$ . Nessa faixa de valores verifica-se que a constante de ruptura dos flocos é pequena, da ordem de 1000 vezes menor que a de agregação, podendo-se simplificar a equação (9) para:

$$\frac{N_m}{N_0} = \left( 1 + k_A \cdot G \cdot \frac{T}{m} \right)^{-m} \quad (10)$$

A equação (10) demonstra que quanto maior o número de unidades de floculação em série, melhor será a eficiência da floculação, combinando com gradientes decrescentes de montante para jusante.

Argaman e Kaufman observaram que é possível diminuir o tempo de detenção utilizando várias câmaras "m" dispostas em série (Richter, 1999).

### 3.1.5.3 Gradiente de Velocidade

O agente físico para a realização tanto da coagulação como da floculação é a agitação da água, através da operação de mistura. Essa operação quando aplicada, numa primeira fase, para a coagulação, denomina-se mistura rápida e mistura lenta quando aplicada em uma segunda fase ou floculação propriamente dita. A essa segunda fase não se adota normalmente o termo mistura lenta, mas simplesmente o termo floculação. O grau de agitação ou a intensidade da mistura é, em ambos os casos, usualmente avaliado pelo parâmetro gradiente de velocidade.

Conceitualmente, o gradiente de velocidade em um ponto de uma massa líquida é o limite da relação entre a diferença de velocidade  $\Delta v$  entre dois pontos do líquido em relação à distância  $\Delta y$  entre eles e perpendicular à direção do escoamento (Richter, 1999).

$$G = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{dv}{dy}, \text{ com } \Delta y \rightarrow 0 \quad (11)$$

A figura 5 abaixo mostra o perfil de velocidade para o caso de um escoamento laminar inteiramente desenvolvido, em que se vê a distribuição das velocidades em um plano normal ao eixo do tubo. O fluido nesse tipo de escoamento move-se em lâminas paralelas e em velocidade relativamente baixa.

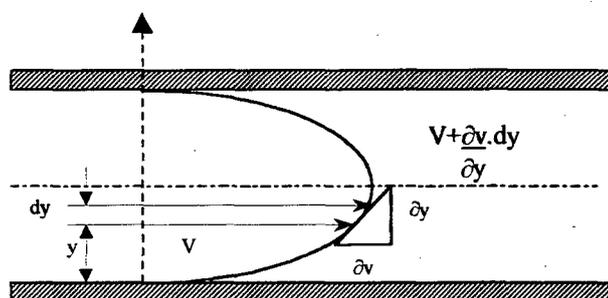


Figura 5: Gráfico ilustrativo do perfil de velocidade em um escoamento laminar.

As colisões entre as partículas são induzidas pelo gradiente de velocidade que, com valores mais elevados, aumenta a frequência de choques por unidade de volume.

Pela equação (4) de Smoluchowski, a velocidade de aglomeração das partículas depende do gradiente de velocidade, da concentração de partículas e do raio de colisão. Com o aumento do gradiente de velocidade, a floculação é mais rápida, respeitando um limite até onde os flocos formados suportam as forças de cisalhamento hidromecânico sem que se quebrem. É sabido também que águas com baixa turbidez tornam-se mais difíceis de flocular em relação àquelas com turbidez mais elevada. Para tanto, em águas de pouca turbidez, torna-se freqüente a prática de se aumentar artificialmente o número de partículas agregando um auxiliar de coagulação. Com a presença de flocos preexistentes, torna-se maior o volume das partículas, o que aumenta o raio de colisões entre elas.

A partir do conceito de gradiente de velocidade em um ponto e levando-se em conta a viscosidade do fluido, definiu-se um parâmetro para a dissipação de energia na massa do fluido, medindo indiretamente o gradiente médio de velocidade no reator, chamando-o de gradiente de velocidade (Camp e Stein apud Richter, 1999):

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (12)$$

sendo:

$$\frac{1}{\nu} = \frac{\rho}{\mu} \quad (13)$$

onde,

$P$  = potência dissipada na massa líquida [ $m^2 \cdot kg/s^3$  ou  $W = N \cdot m \cdot s^{-1}$ ];

$V$  = volume de água na câmara de mistura [ $m^3$ ];

$\mu$  = coeficiente de viscosidade dinâmica [ $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$  ou  $Pa \cdot s = N \cdot s \cdot m^{-2}$ ];

$\rho$  = massa específica da água [ $kg/m^3$ ];

$\nu$  = coeficiente de viscosidade cinemática [ $m^2/s$ ].

Argaman e Kaufman (apud Sens, 1997) observaram que o diâmetro de um floco cresce até um certo limite. Quanto maior o gradiente de velocidade  $G$ , menor é o diâmetro do floco e maior será sua densidade.

É muito importante a determinação correta do gradiente de velocidade a ser aplicado no processo de coagulação e floculação, pois sua incidência, nesses processos, é de vital importância para a eficiência do sistema de tratamento projetado (Richter, 1999).

#### 3.1.5.4 Tipos de Floculadores

Geralmente, os sistemas de floculação são classificados em mecânicos e hidráulicos. Porém, em um estudo mais amplo, os floculadores podem classificar-se em floculadores de potência ou de dissipação (hidráulico, mecânico ou pneumático) e floculadores de contato em mantas de lodo.

Dentre os floculadores que utilizam a potência hidráulica, encontram-se:

- floculadores de chicanas com escoamento horizontal ou vertical;
- floculadores de escoamento helicoidal;
- floculadores tipo “Cox” e tipo “Alabama”;
- floculadores em meio granular ou poroso.

Os estudos e aplicações desses últimos se deram inicialmente na Índia e no Brasil, tendo sido aperfeiçoados, mais recentemente, na França e nos Estados Unidos.

Os sistemas de floculação mecanizada se distinguem basicamente pelo tipo de movimento: giratório e alternativos (ou oscilantes):

- floculadores giratórios: de eixo vertical ou horizontal com paletas que operam a baixas velocidades de rotação ou com turbinas que operam a velocidades relativamente altas;
- floculadores alternativos: apresentam dois tipos básicos conhecidos por “Walking Beam” (velocidade angular constante) e “Ribbon Flocculator” (velocidade angular de uma função senoidal).

Os floculadores pneumáticos utilizam a injeção de ar difuso através de compressores ou sopradores de ar para produzir pequenas bolhas a fim de provocar a flotação das partículas floculentas.

Os flocladores de contato de sólidos ou em mantas de lodo têm como princípio a precipitação das partículas em suspensão por meio do lodo recém-coagulado, sendo controlados pela concentração de sólidos presentes no meio líquido (Richter, 1999).

### 3.1.6 Floclação em Meio Granular

Richter foi um dos primeiros a pesquisar sobre a floclação em meio granular. Richter e Moreira (1980 e 1981) estudaram a redução da turbidez da água bruta em flocladores construídos com leito de pedregulhos. Os resultados obtidos foram satisfatórios, no entanto, encontraram problemas quanto à colmatação do meio granular e dificuldades de limpeza do mesmo (Sens, 1997).

A floclação em meio granular desperta bastante interesse por suas possibilidades de aplicação, principalmente em estações de tratamento de água de pequeno porte, devido à sua eficiência e baixo custo. A operação consiste em passar água, logo após ter recebido o coagulante, através de um meio granular contido em um reator de fluxo ascendente. O fluxo laminar e a ótima eficiência possibilitam que a água floclule satisfatoriamente em alguns minutos. Um meio poroso ou granular bastante longo pode ser considerado como um floclador hidráulico com um número muito grande de câmaras, ou seja, um reator a "m" elevado (Richter e Azevedo Netto, 1991).

A equação de Harris e Kaufman (10) mostra que a eficiência de um reator de floclação é tanto mais elevada quanto maior for o número de câmaras dispostas em série. Segundo Richter (1981), isolando-se  $T$  na equação (10) tem-se o tempo de detenção  $T$  requerido para reduzir  $N_0$  a  $N_m$ .

$$T = \left( \frac{1}{k_A \cdot G} \right) \cdot \ln \left( \frac{N_0}{N_m} \right) \quad (14)$$

$$\theta = \left( \frac{1}{k_A \cdot G} \right) \left( \frac{N_0}{N_m} \right) - 1 \quad (15)$$

Dividindo a equação (14) e (15), tem-se:

$$\frac{T}{\theta} = \frac{\ln \frac{N_0}{N_m}}{\frac{N_0}{N_m} - 1} \quad (16)$$

A equação (16) demonstra que o tempo necessário para flocular em um meio granular será sempre uma fração do tempo de floculação fixado nos ensaios de coagulação. Portanto, sendo  $N_0/N_m > 1$  resulta sempre  $\ln(N_0/N_m) < (N_0/N_m) - 1$  (Richter e Azevedo Netto, 1991).

A potência para um sistema hidráulico de floculação pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$P = \rho \cdot v \cdot \Delta h \cdot g \cdot S \quad (17)$$

onde,

$\rho$  = massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>];

$v$  = velocidade de escoamento intersticial [m/s] ( $v = v_0/\varepsilon$ );

$\Delta h$  = perda de carga [m];

$g$  = aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>];

$S$  = seção da coluna [m<sup>2</sup>].

O gradiente de velocidade está associado à potência dissipada  $P$ , a qual é função da perda de carga  $\Delta h$ . Pela equação de Ergun para perda de carga, obtém-se o gradiente de velocidade para um floculador hidráulico granular combinando-se as equações (12) e (17) (Sens, 1991):

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot v \cdot \Delta h \cdot g \cdot S}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot v \cdot J}{\mu}} \quad (18)$$

Para um reator granular, onde  $v = v_0/\varepsilon$  e  $\gamma = \rho \cdot g$

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot v_0 \cdot J}{\varepsilon \cdot \mu}} \quad (19)$$

$\gamma$  = peso específico da água [N/m<sup>3</sup>];

$\mu$  = viscosidade absoluta [N.s/m<sup>2</sup>];

$v_0$  = velocidade de aproximação [m/s];

$\varepsilon$  = porosidade do meio granular limpo;

$J$  = perda de carga unitária [m/m];

O tempo de detenção para um floculador granular pode ser apresentado como:

$$T = \frac{L}{v} \quad \text{e} \quad v = \frac{v_0}{\varepsilon} \quad (20)$$

tem-se

$$T = \frac{L \cdot \varepsilon}{v_0} \quad (21)$$

onde,

$L$  = comprimento do meio granular [m];

$T$  = tempo de mistura [s].

Resultando na equação (22) para o número de Camp  $Ca$ :

$$Ca = \left( \frac{\gamma \cdot v_0 \cdot J}{\varepsilon \cdot \mu} \right)^{1/2} \cdot \frac{L \cdot \varepsilon}{v_0} \quad \text{onde,} \quad Ca = \sqrt{\frac{g}{\nu} \cdot \frac{\varepsilon}{v_0} \cdot \Delta h \cdot L}$$

ou

$$Ca = \sqrt{\frac{g \cdot J \cdot \varepsilon}{\nu \cdot v_0}} \cdot L \quad (22)$$

A perda de carga unitária, em um meio granular, determinada pela expressão de Ergun (1952) é válida para qualquer regime de escoamento, desde que não ocorra fluidificação (Di Bernardo, 1993).

$$J = 150 \cdot \frac{\mu}{\gamma} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \left(\frac{S}{6}\right)^2 \cdot v_0 + 1,75 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left(\frac{S}{6}\right) \cdot \frac{v_0^2}{g} \quad (23)$$

onde,

S = área específica média dos grãos [m<sup>-1</sup>]. Para grãos esféricos, S=6/d;

d = diâmetro do grão [m].

Sens e Martin (1992) em seus estudos, combinaram as equações de Ergun (1952) para a perda de carga, da potência hidráulica  $P=\rho \cdot v \cdot \Delta \cdot h \cdot g \cdot S$  e do gradiente de velocidade G de Camp e Stein (1943), resultando nas equações (24) e (25) para o cálculo de G e Ca de um reator granular, respectivamente:

$$G = \left[ 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^4} \left(\frac{S}{6}\right)^2 \cdot v_0^2 + 1,75 \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^4} \left(\frac{S}{6}\right) \cdot v_0^3 \right]^{1/2} \quad (24)$$

$$Ca = \left[ 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \left(\frac{S}{6}\right) + \frac{1,75}{v} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^2} \left(\frac{S}{6}\right) \cdot v_0 \right]^{1/2} \cdot L \quad (25)$$

Para um reator de floculação hidráulica constituído de leito granular fixo, o diâmetro dos grãos que formam o leito e a velocidade de escoamento influenciam na porosidade  $\varepsilon$  durante o tratamento de água. Quanto menor forem os grãos, para uma mesma velocidade de escoamento, menor será a porosidade  $\varepsilon$  em função do volume de água tratada. Com isso, para um determinado volume V de água tratada tem-se um valor de porosidade  $\varepsilon_v$  do meio, uma velocidade  $v_v$  de aproximação real, uma perda de carga unitária  $J_v$ , um tempo de detenção  $T_v$ , um gradiente de velocidade  $G_v$  e um valor para o número de Camp  $Ca_v$ . No instante  $t = 0$ , os valores dos parâmetros citados acima serão iguais a  $v_0$ ;  $J_0$ ;  $T_0$ ;  $G_0$  e  $Ca_0$  (Sens, 1997).

### 3.1.7 Floculação em Meio Granular Expandido

Dados experimentais de um sistema de autofloculação (sem utilização de coagulante) têm sido estudados durante os últimos anos. A floculação da água em meio granular expandido, apesar das condições energéticas menos favoráveis, obtém bons resultados de sedimentação, comparável à performance de unidades primárias de decantação, ou seja, valores que se encontram entre 55 e 60% de eliminação de matéria em suspensão representado pelo decaimento da turbidez, para um tempo de detenção global abaixo dos 15 minutos. Valores que, em instalações clássicas de tratamento de água, requerem pelo menos 2 horas. O consumo quase duas vezes menor de coagulante químico é uma outra vantagem, reduzindo com isso a quantidade de lodo gerado (Coma et. al. apud Sens, 1997).

#### 3.1.7.1 Perda de Carga em Meio Granular Expandido

A perda de carga em um leito granular expandido pode ser representada segundo a equação de Wilhem e Kwauk (apud Sens, 1997):

$$\Delta h_{eA} = \frac{M}{\rho_s} (\rho_s - \rho) g \quad (26)$$

onde,

$\Delta h_e$  = perda de carga no meio expandido;

A = área transversal do reator;

M = massa das partículas do leito;

$\rho_s$  = massa específica do sólido;

$\rho$  = massa específica da água;

g = aceleração da gravidade.

A curva de crescimento da perda de carga evolui até atingir a condição de equilíbrio, quando o leito encontra-se totalmente fluidificado. A partir daí a perda de carga passa a ser constante podendo ser expressa por:

$$\Delta h_e = L_0 \cdot \frac{(\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_0)}{\rho} \quad (27)$$

onde,

$L_0$  = altura do leito fixo;

$\varepsilon_0$  = porosidade do leito fixo.

A intensidade da velocidade ascensional é que determina se o escoamento da água através de um meio granular é laminar, de transição ou turbulento. Velocidades ascensionais inferiores a 300 m/dia, e grãos com tamanho entre 0,5 e 1,0 mm, resultará em um regime de escoamento laminar ( $Re < 3$ ). Esse regime possibilita o uso da equação de Carman-Kozeny ( $Re_{v(i)} = (\rho \cdot v_0) / (\mu \cdot (1 - \varepsilon_{v(i)}) \cdot S)$ ) ou de Fair-Hatch ( $H_f/L_f = (150 \cdot \mu \cdot v_0 \cdot (1 - \varepsilon_0)^2 / g \cdot \rho \cdot \varepsilon_0^3 \cdot C_e^2) \cdot \sum (X_i / (D_{gi})^2)$ ), onde,  $X_i$  é a fração correspondente à subcamada "i",  $D_{gi}$  a média geométrica entre os tamanhos das aberturas de duas peneiras consecutivas da série granulométrica e  $C_e$  o coeficiente de esfericidade, embora Camp tenha observado a ocorrência de escoamento laminar em meios granulares com número de Reynolds ( $Re = (1/\mu) \cdot \rho \cdot v \cdot d$ ) da ordem de 6.

Para grãos com tamanho superior a 1 mm e velocidades ascensionais maiores (superiores a 0,20 m/min), como as utilizadas na lavagem de filtros, o regime de escoamento pode resultar de transição ou turbulento, invalidando assim a aplicação da equação de Carman-Kozeny. Adota-se então a equação de Ergun que pode ser aplicada para qualquer regime de escoamento, desde que o número de Reynolds esteja compreendido entre 1 e 2000 (Di Bernardo, 1993).

O cálculo da perda de carga através da equação de Ergun é aplicável para leito fixo (até o momento da expansão) e para leito expandido:

$$J = 150 \cdot \frac{\mu}{\gamma} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \cdot \left(\frac{S}{6}\right)^2 \cdot v_0 + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3} \cdot \left(\frac{S}{6}\right) \cdot \frac{v_0^2}{g} \quad (28)$$

$S$  = área específica média para grãos esféricos ( $S = 6/d$ ), onde  $d$  = diâmetro do grão [m].

A figura 6 mostra o comportamento do crescimento da perda de carga. Para materiais granulares de baixa densidade, como no caso de esferas de PVC, quando ocorre a expansão da camada de material granular, a intensidade de crescimento da perda de carga diminui até um ligeiro decréscimo para em seguida permanecer constante. Quanto menor a densidade do grão, mais acentuada e mais longa será a curvatura que representa a perda de carga. Para grãos muito densos, como é o caso da areia, a perda de carga cresce proporcionalmente à velocidade de aproximação até a expansão do leito para então decrescer quase que instantaneamente, mantendo-se constante na seqüência.

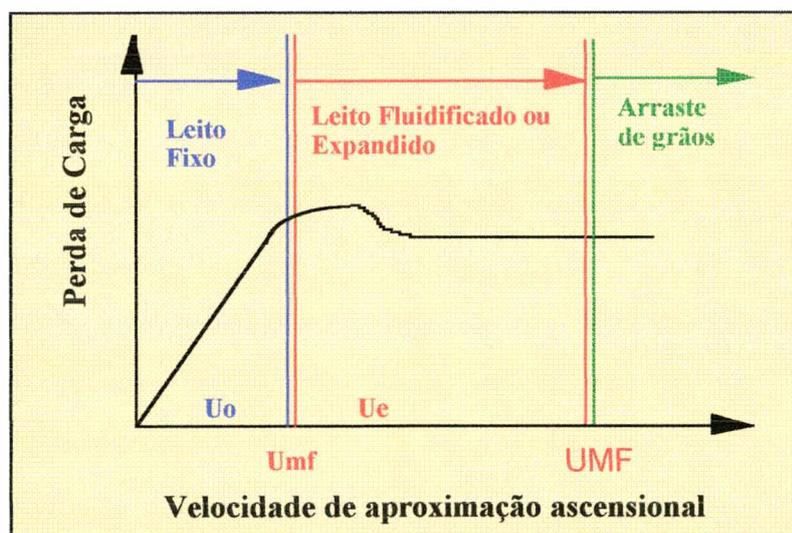


Figura 6: Gráfico ilustrativo do comportamento da perda de carga em função da velocidade de aproximação (Fonte: Sens, 1997).

### 3.1.7.2 Velocidade Mínima de Fluidificação

A mudança do estado fixo para o fluidificado corresponde a uma velocidade mínima de fluidização  $v_0$  assim como a porosidade  $\epsilon_0$ . Para promover o processo de fluidificação, normalmente, utiliza-se a água com fluxo no sentido ascensional, acarretando numa expansão adequada do meio granular.

Grande parte das equações utilizadas para o cálculo da velocidade mínima apresentam correlações relativas ao estado fixo ou ao estado fluidizado, principalmente entre a porosidade e a velocidade de escoamento do líquido.

A relação mais utilizada é a relação de Narsimman, que se refere ao estado fixo do meio, fornecendo a perda de carga por unidade de comprimento (altura da camada) com a ajuda da equação de Ergun (Sens, 1997):

$$J = \frac{\Delta h}{L} = h_k \mu \cdot \frac{36}{d^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \cdot v_0 + h_{BP} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3} \cdot \left(\frac{6}{d}\right) \cdot v_0^2 \quad (29)$$

Combinando as equações (27) e (28) pode-se obter a velocidade mínima de fluidização em regime laminar:

$$g(\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_0) = h_k \mu \cdot \frac{36}{d^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \cdot v_0 \quad (30)$$

Tem-se então a equação da velocidade mínima de fluidificação:

$$v_0 = v_{mf} = \frac{g(\rho_s - \rho)d^2 \cdot \varepsilon_0^3}{180 \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_0)} \quad (31)$$

onde,

d = diâmetro do grão [m];

$\mu$  = viscosidade da água [Kg/m.s].

As equações apresentadas para o desenvolvimento do cálculo da velocidade mínima de fluidificação necessitam do conhecimento da porosidade do meio granular antes da fluidificação ou expansão. Como o material utilizado para o leito granular é homogêneo, formado por esferas quase idênticas, a porosidade, nesse caso, é conhecida ( $\varepsilon_0 = 0,38$ ) (Sens, 1997).

Wen e Yon (apud Richter, 1981 e Di Bernardo, 1993) propuseram também uma relação para o cálculo da velocidade mínima de fluidificação sem a necessidade de se conhecer a porosidade do meio ( $\varepsilon_0$ ).

$$Ga = \frac{g(\rho_s - \rho)\rho.d^3}{\mu^2} \quad (\text{número de Galileu}) \quad (32)$$

$$Re_{mf} = \frac{\rho.d.v_{mf}}{\mu} \quad (\text{número de Reynolds}) \quad (33)$$

$$v_{mf} = \frac{\mu}{\rho.d} \left[ \sqrt{(33,7)^2 + 0.0408.Ga} - 33,7 \right] \quad (34)$$

### 3.1.7.3 Velocidade Máxima de Expansão

A velocidade máxima de fluidificação representa o limite de queda-livre dos grãos. Sua determinação é importante para se conhecer a velocidade de aproximação ascensional de arraste dos grãos ou partículas. Torna-se possível aplicar o critério de Newton pela resultante das forças sobre um grão ou partícula, expressando a força de arraste em função da energia cinética específica do líquido (Jabbouri, 1988).

$$Ne = \frac{4}{3} \cdot \frac{d(\rho_s - \rho)}{\rho.v^2} \cdot g \quad (35)$$

Por ser uma análise adimensional, a relação entre os diferentes parâmetros que caracterizam o sistema deve ser colocada sob a forma de uma relação geral entre dois critérios adimensionais, Ne e Re:

onde,

$$Ne = \frac{a}{Re^n} \quad (36)$$

e

$$Re = \frac{\rho.d.v}{\mu} \quad (37)$$

Amirtharajah e Cleasby (apud Richter, 1991) construíram gráficos que permitem estimar a porosidade  $\varepsilon_0$  de cada subcamada e do meio granular expandido  $\varepsilon_e$ . A expansão ocorrida em um meio granular é dada por:

$$Ex(\%) = \frac{(L_e - L_0)}{L_0} \cdot 100 \quad (38)$$

ou

$$Ex(\%) = \frac{\varepsilon_e - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_e} \cdot 100 \quad (39)$$

onde,

Ex = expansão do meio granular [%];

$L_0$  = altura do leito granular fixo [m];

$L_e$  = altura do leito granular expandido [m].

Segundo Lemes (apud Sens, 1997) o volume de grãos no leito fixo é exatamente o mesmo no leito expandido. Então, de acordo com a equação de conservação tem-se:

$$L_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) A = L_e (1 - \varepsilon_e) A \quad (40)$$

$$L_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) = L_e (1 - \varepsilon_e)$$

#### 3.1.7.4 Gradiente de Velocidade e Número de Camp no Leito Granular Expandido

Sens (1997) baseou os cálculos do gradiente de velocidade  $G$  e do número de Camp  $Ca$  na equação de Ergun, como proposto nos estudos em leito fixo para perda de carga, alterando apenas a porosidade do leito fixo  $\varepsilon_0$  pela porosidade do leito expandido  $\varepsilon_e$ :

$$G = \left[ 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_e)^2}{\varepsilon_e^4} \cdot \left(\frac{S}{6}\right)^2 \cdot v_0^2 + 1,75 \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_e)}{\varepsilon_e^4} \cdot \left(\frac{S}{6}\right) \cdot v_0^3 \right]^{1/2} \quad (41)$$

$$Ca = \left[ 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_e)^2}{\varepsilon_e^2} \cdot \left(\frac{S}{6}\right)^2 + 1,75 \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_e)}{\varepsilon_e^2} \cdot \left(\frac{S}{6}\right) \cdot v_0 \right]^{1/2} \cdot L_e \quad (42)$$

Sendo "v" a velocidade real da água entre os grãos, o tempo de detenção no leito expandido é:

$$T_e = \frac{L_e \cdot \varepsilon_e}{v_0} \quad (43)$$

Conhecendo-se o valor da perda de carga e, para um determinado tempo de detenção no leito expandido, determina-se o número de Camp de acordo com a seguinte equação:

$$Ca_e = G_e \cdot T_e \quad (44)$$

ou

$$Ca_e = \sqrt{\frac{g \cdot J_e \cdot \varepsilon_e}{v \cdot v_0}} \cdot L_e \quad (45)$$

### 3.1.7.5 Porosidade e Altura do Leito

Na segunda parte do gráfico da figura 6, a velocidade de aproximação atinge um valor no qual o leito passa do estado fixo para o fluidificado ou expandido. A partir desse ponto, em que os grãos encontram-se fluidificados, pode-se calcular a porosidade do meio pela equação:

$$\varepsilon_e = \frac{Ex - 1 + \varepsilon_0}{Ex} \quad (46)$$

onde,

$\varepsilon_e$  = porosidade no meio expandido;

$\varepsilon_0$  = porosidade no meio fixo (antes da expansão);

Ex = expansão (expansão de 30% então, Ex=1,30).

Da equação (41), obtém-se a altura do leito expandido:

$$L_e = \left( \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_e} \right) L_0 \quad (47)$$

Para determinar o volume útil do floculador:

$$V = \frac{Q \cdot T_e}{1 - \varepsilon_e} \quad (48)$$

onde,

V = volume do reator de floculação [m<sup>3</sup>];

Q = vazão afluyente ao reator [m<sup>3</sup>/s];

T<sub>e</sub> = tempo de detenção no meio expandido [min].

O diâmetro de um reator cilíndrico é:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q \cdot \varepsilon_e}{\pi \cdot V_0}} \quad (49)$$

E a altura dos grãos no meio expandido:

$$L_e = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad (50)$$

onde,

D = diâmetro da coluna ou reator [m].

### **3.1.8 Ensaios de Coagulação-Floculação**

Preferencialmente, os parâmetros obtidos para o dimensionamento de projetos e operações de unidades de floculação em estações de tratamento de água (ETA) devem ser determinados em ensaios realizados em estações piloto. No entanto, esse é um método ainda muito dispendioso e demorado, fazendo com que os ensaios de coagulação-floculação sejam realizados em reatores estáticos.

Em estações de tratamento de água com ciclo completo, quando uma unidade não apresenta bons resultados, todas as unidades subsequentes são afetadas. Com isso, problemas de projeto ou de operação de unidades de floculação influem no desempenho dos filtros e decantadores das ETA (Di Bernardo et. al., 1998).

#### **3.1.8.1 Teste de Jarros**

A dosagem de coagulante necessária para o tratamento de uma água é bastante difícil de se determinar de forma analítica, pois existem complexas interrelações entre o coagulante químico e os diversos componentes presentes nas águas a serem tratadas, entre eles fatores como o pH, a temperatura, intensidade e duração da mistura. Para tanto, equipamentos conhecidos como Jar-Test são utilizados para obter a dosagem mais eficiente e econômica de coagulante para uma determinada intensidade e duração da mistura (Schulz, 1984).

Em estações de tratamento de água, o processo de clarificação está intimamente ligado aos processos de coagulação e floculação. Esta fase é caracterizada, principalmente, pela adição de produtos químicos à água em dosagens ótimas pré-estabelecidas.

O Teste de Jarros é um método ainda bastante empregado nas estações de tratamento de água para a determinação das dosagens ótimas de coagulantes.

A escolha do coagulante deve ser feita em condições de laboratório, enquanto que, a escolha final será influenciada pelas características econômicas.

Esse ensaio também é bastante utilizado em laboratório para determinar parâmetros básicos fundamentais na elaboração de projetos de estações de tratamento de água. É através dos testes de jarros em laboratórios que se obtém o tempo e a agitação necessária à condição ótima de floculação de uma água. Uma vez determinada a dosagem ótima dos coagulantes, verifica-se o tempo e o gradiente de velocidade ótimo para se flocular a água em estudo. A floculação obtida deve apresentar uma boa porcentagem de decaimento da turbidez após a decantação (Azevedo Netto et. al., 1977).

Segundo Mendes (1989), para cada tempo de floculação existe um gradiente de velocidade ótimo, com o qual se obtém a maior eficiência de remoção de flocos por sedimentação (Di Bernardo et. al., 1998).

Os aparelhos de Teste de Jarros funcionam, normalmente, por meio de motores elétricos que possibilitam a variação da velocidade de rotação dos agitadores, que possuem entre si sempre o mesmo número de rotações. A agitação se processa geralmente de forma mecânica através de hastes e palhetas ou por meio magnético. Possuem também tacógrafos que possibilitam a leitura do número de rotações. A água para os ensaios é armazenada em jarros de até 2000 ml e que podem ou não possuir estatores.

Os estatores têm por função inibir a formação do vortex que se forma devido à alta velocidade dos agitadores. Esses são responsáveis pela transferência da potência à água, pois, como visto anteriormente, o gradiente de velocidade pode ser expresso por:  $G = ((P/(\mu.V))^{1/2}$ . A transmissão da potência depende da forma do agitador, das suas dimensões e do número de rotações por unidade de tempo (Azevedo Netto et. al., 1977).

A figura 7, abaixo, ilustra um aparelho de Teste de Jarros adaptado de Cox (1968).

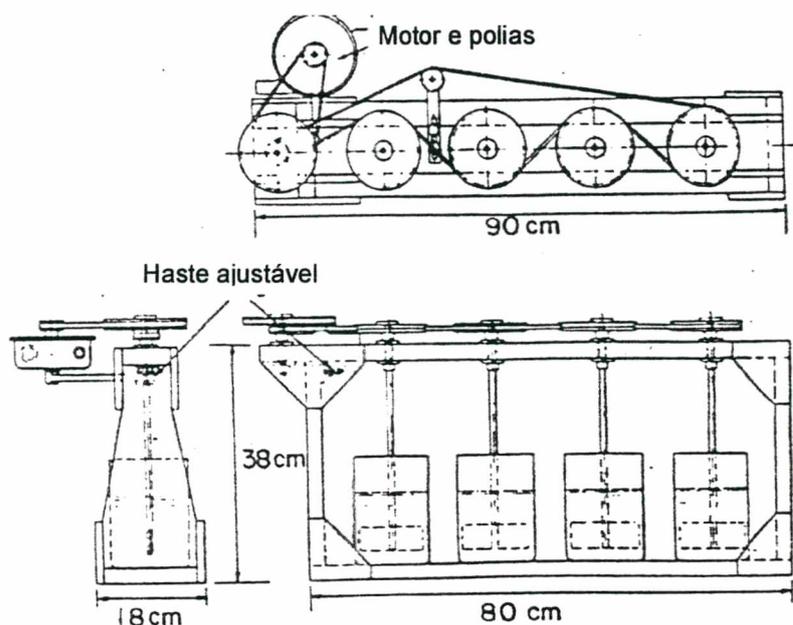


Figura 7: Desenho de um equipamento de agitação para o Teste de Jarros.

O que pode-se notar é que os aparelhos de Teste de Jarros existentes, na forma como se tem hoje, é a única forma de procedimento para se determinar os parâmetros necessários à boa eficiência do tratamento de água, bem como para a elaboração de projetos de estações de tratamento de água.

Os aparelhos de Teste de Jarros comercializados, de maneira geral, não diferem muito um dos outros, caracterizando-se principalmente por serem equipamentos de bancada e que necessitam de uma fonte externa, elétrica geralmente, para funcionarem.

A seguir, apresentam-se alguns modelos de Teste de Jarros existentes:

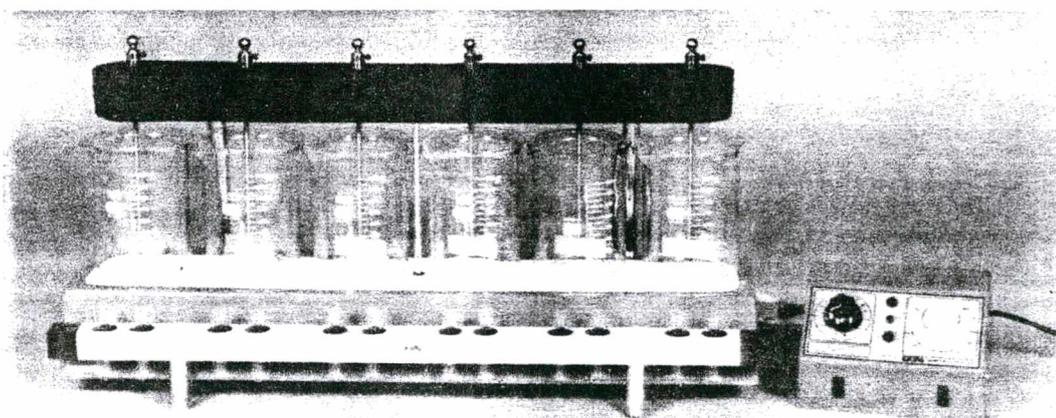


Figura 8: Foto de um Agitador Múltiplo – “Jar Test” da EKIPA

O aparelho da figura 8 possui sistema de controle de rotações e um temporizador elétrico, com alarme sonoro, que desliga todo o sistema de agitação automaticamente no tempo pré-determinado pelo operador. O sistema de agitação se dá por hastes e palhetas de aço inox acionado por um sistema integrado de transmissão que utiliza engrenagens de fibra e nylon.



Figura 9: Foto do reator estático "Turb-Floc/2C"

O equipamento da figura 9 promove o ensaio de floculação por meio de agitação magnética, não havendo portanto, a necessidade de transmissão da agitação por meio de polias ou engrenagens. A mistura ocorre através de pás localizadas no fundo dos jarros. Possui seis jarros prismáticos em acrílico com capacidade para 2000 ml cada um, controlador de rotações e iluminação.

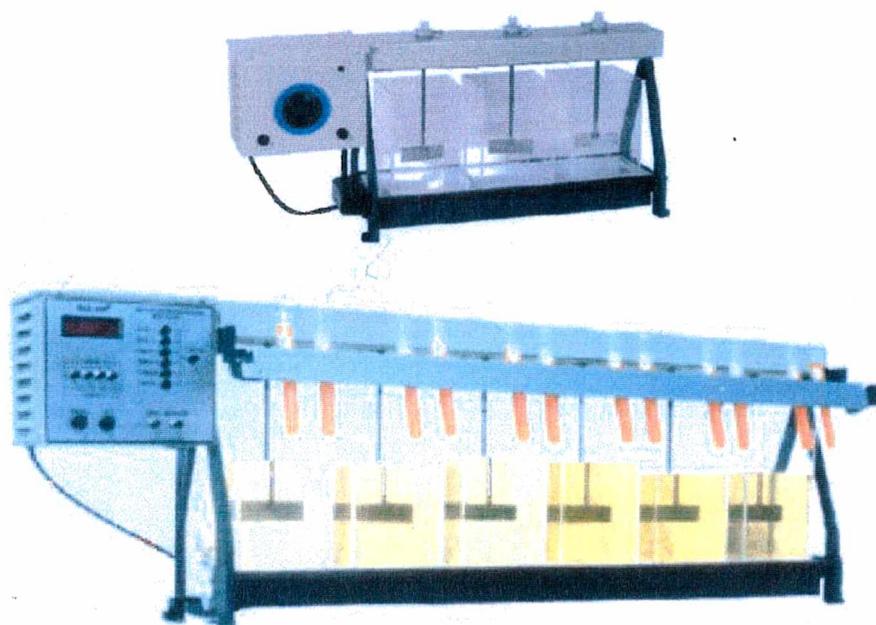


Figura 10: Aparelhos de Teste de Jarros com 3 e 6 jarros

Os aparelhos da figura 10 possuem três ou seis jarros com capacidade de até dois litros. Controlador de velocidade de até 150 rpm com palhetas de movimentação reguláveis e dosadores simultâneos de reagentes.

O aparelho utilizado durante o desenvolvimento deste estudo possui seis jarros prismáticos em acrílico, tacômetro digital de quatro dígitos com precisão de leitura de +/- 2%, capacidade de rotação de até 600 rpm com transmissão de agitação mecânica através de hastes e pás em aço inox. É dotado de suportes independentes com dois frascos que possibilitam a aplicação simultânea de coagulante e polímeros e coleta simultânea de água decantada para diferentes velocidades de sedimentação. As hastes podem ser suspensas durante a agitação, permitindo variar o tempo de floculação para um mesmo gradiente de velocidade.

Estes aparelhos de bancada mostrados acima podem ser utilizados apenas para ensaios em descontínuo, o que, segundo alguns autores, é um dos principais fatores que contribuem para a dificuldade de obter-se parâmetros mais próximos aos que ocorrem em uma estação real de tratamento de água.

Sabe-se que a água bruta muda constantemente suas características ao longo do dia, necessitando para isso um mínimo de dois ensaios de jarros por dia, sendo que, cada ensaio deverá determinar o pH ótimo de coagulação e a dosagem ótima de coagulante. Esses ensaios, mesmo quando realizados por técnicos experientes, duram pelo menos duas horas e são de difícil automação, pois não operam em contínuo com a ETA.

Desta maneira, o desenvolvimento de uma nova técnica para determinação da dosagem ótima de coagulante que facilite os ensaios e possibilite a automação do processo pode trazer grandes benefícios à eficiência do tratamento de água.

#### 3.1.8.1.1 Operação dos Ensaios de Jarros

A realização dos ensaios de jarros não segue um padrão rígido, havendo uma infinidade de variações na maneira de operação, no entanto, para obtenção de bons resultados, deve-se seguir algumas linhas principais bastante difundidas até o momento.

A adição do coagulante deve ocorrer a 100 rpm em média. É conveniente que a agitação prossiga por 2 a 3 minutos, quando então a rotação é diminuída para uma faixa de 30 a 50 rpm, durante 10 a 30 minutos. Em seguida, deve ocorrer a decantação por um tempo de 10 a 30 minutos.

Procura-se também oferecer condições de agitação e tempo de agitação semelhantes às condições da estação de tratamento para a qual se está querendo determinar as dosagens ótimas.

Após determinada a turbidez e cor da água bruta os procedimentos de operação do Teste de Jarros, de um modo geral, são os seguintes:

- preenche-se os jarros com água bruta, respeitando sua capacidade (geralmente 2 litros);
- com ajuda de uma pipeta as dosagens destinadas para cada jarro são separadas em um pequeno recipiente. Anotam-se as dosagens pipetadas;
- corrige-se a alcalinidade da água, se necessário, dosando em cada jarro uma solução de cal;
- despeja-se as doses de coagulante dos pequenos recipientes nos jarros e inicia-se a mistura rápida a 300 rpm;
- após 10 segundos do início da mistura reduz-se a intensidade de mistura para 100 rpm, mantendo por 2 minutos. Em seguida, reduz-se novamente a intensidade da velocidade para 60 rpm, mantendo por mais 3 minutos. Passados 5 minutos a velocidade de mistura é reduzida para 20 rpm, continuando assim por mais 15 minutos. Tempo total de floculação: 20 minutos;
- deve-se, antes de terminar os 20 minutos de floculação, drenar a solução até o nível de preenchimento indicado pelos jarros, compensando o acréscimo de volume ocasionado pela adição do coagulante;
- após 20 minutos de floculação a mistura é interrompida, iniciando o processo de sedimentação. Sugere-se dar início à contagem do tempo de decantação 30 segundos após interrompida a mistura. Este é um tempo aproximado necessário para que o movimento de mistura, devido à intensidade de rotação, se acalme;

- inicia-se então a contagem do tempo de sedimentação, obtendo-se a curva da velocidade de sedimentação. Antes da coleta de amostras, faz-se uma pequena drenagem no sifão, aproximadamente 5 ml de líquido. As amostras, nos respectivos tempos, são coletadas simultaneamente e em pequena quantidade, a fim de que o nível de água nos jarros não abaixe significativamente;
- cada amostra será submetida aos testes de turbidez e cor;
- pode-se agitar cuidadosamente as amostras antes de serem inseridas no turbidímetro;
- após essa bateria o processo é repetido, escolhendo-se as dosagens em torno daquelas que, em um primeiro ensaio, obtiveram a melhor clarificação (menor turbidez e cor);
- a turbidez após 5 minutos de decantação, para a dosagem ótima de coagulante, deverá ficar entre 2,0 e 5,0 NTU. Quando a dosagem ótima de coagulante é determinada essa quantidade é utilizada para os trabalhos subseqüentes.

Esses procedimentos podem ser repetidos para determinação das dosagens ótimas de diversos coagulantes.

Os polímeros também podem ser utilizados como auxiliares na coagulação. A adição de pequena quantidade de polímeros catiônicos, durante o início da mistura, favorece a redução da dosagem de coagulante.

Polímeros não-iônicos também auxiliam na formação de flocos. Esses devem ser aplicados depois dos flocos formados. Se aplicado muito antes, seu efeito poderá ser reduzido. Adicionado muito depois, não contribuirá para a formação de um bom floco. Experiências indicam que o melhor tempo de aplicação dos polímeros não-iônicos está em torno de 5 minutos após o início da floculação.

A determinação do pH de coagulação através do Teste de Jarros obedece a mesma linha de operação para a determinação da melhor dosagem de coagulante, com algumas características, que seguem:

- inicialmente em cada jarro são fixados diferentes valores de pH;
- em seguida, adiciona-se a mesma dosagem de coagulante para todos os jarros, a fim de escolher o melhor pH de coagulação;

- através dos resultados de turbidez e cor, determina-se o pH de coagulação;
- faz-se então um novo ensaio com a variação da dosagem de coagulante para cada jarro, que agora possuem todos o mesmo pH.

O resultado obtido pode não ser absoluto, mas representa um bom meio para determinação das dosagens de coagulante, pois estações de tratamento preocupadas com essa etapa do processo economizam no consumo de coagulantes e aumentam a eficiência dos decantadores e filtros (Azevedo Netto et. al., 1977).

O ensaio de jarros em estações de tratamento de água deve ser realizado pelo menos uma vez ao dia, pois experiências demonstram que a característica da água bruta que chega à estação muda ao longo do dia.

#### **3.1.8.2 Ensaio de Flocação em Meio Granular**

A simulação dos processos de mistura rápida, coagulação e flocação em ensaios de jarros é realizada ainda de forma manual, requerendo algum tempo até a determinação da dosagem de coagulante ideal para a boa eficiência do tratamento.

Os estudos que visam desenvolver uma tecnologia que seja de baixa mecanização e pouco onerosa têm levado a adotar, entre os flocladores que utilizam a energia hidráulica, a flocação hidráulica.

A flocação em meio granular expandido, estudada no Brasil (Sens, 1993) e nos Estados Unidos (Schulz, 1994), mostrou-se eficaz como forma de evitar problemas com a limpeza do meio. A flocação em meio granular expandido ocorre em poucos minutos, significando um tempo global de detenção bastante curto.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, foi montado um piloto formado por um par de cilindros de vidro montados em série (floculadores em meio granular), dispostos em ordem crescente de diâmetro com um (1,0) metro de altura cada a fim de obter maior tempo de detenção e o decréscimo do gradiente de velocidade. Foram realizados ensaios de otimização dos parâmetros de floculação em paralelo aos Testes de Jarros. A operação do piloto simula um escoamento de fluxo contínuo com a ETA.

### 4.1 O PILOTO

#### 4.1.1 Considerações Gerais

Procurou-se facilitar a determinação da dosagem ótima através de um sistema em contínuo com a ETA a fim de obter uma operação em um tempo bem menor do que o usual em relação à atual operação, tornando os ensaios mais constantes, propiciando também, desta maneira, melhor possibilidade de automação do sistema, implicando grandes benefícios na eficiência do tratamento da água.

A instalação do piloto utilizado para o estudo é formado por dois reatores de floculação feitos em vidro, com altura de 1,0 metro cada e diâmetros diferentes (5,0 e 6,0 cm, respectivamente). As colunas de floculação são interligadas entre si por mangueiras transparentes de 1/2" de diâmetro e alimentadas com água bruta através de uma bomba elétrica do tipo centrífuga de eixo horizontal.

Com a variação da vazão de alimentação, variava-se também a velocidade de aproximação provocando a expansão do leito granular. A altura do leito granular fixo era de 40 cm.

A água bruta utilizada para a realização dos ensaios com o piloto e com o aparelho de Teste de Jarros era preparada artificialmente com bentonita. Para obter-se essa solução pré-estabeleceu-se uma mistura na proporção que

correspondia a 100 gramas de bentonita para cada 1000 litros de água. O preparo da água bruta ocorria com pelo menos um dia de antecedência ao início dos ensaios. Antes de iniciar a operação do piloto, a água bruta era homogeneizada, mantendo-se a mistura através da tubulação de retorno, e determinados os parâmetros de turbidez, cor, pH, temperatura e alcalinidade.

A montagem, bastante simples, do piloto para a realização dos ensaios em meio granular expandido tem por objetivo demonstrar a facilidade de operação e a rapidez de resposta com relação à determinação da dosagem de coagulante. Essas características são importantes para demonstrar que o piloto pode ser facilmente montado junto a uma estação de tratamento de água e operar em contínuo com a mesma, produzindo respostas quase que instantâneas quanto às características da água bruta que inicia o processo de tratamento.

Ainda como melhoria no desenvolvimento do piloto, pode-se prever a sua automação, o que diminuiria ainda mais o tempo de resposta dos dados requeridos, além de diminuir os custos com operadores a longo prazo.

O piloto foi montado junto a um andaime de ferro no Laboratório Integrado do Meio Ambiente – LIMA, ENS/UFSC. A figura 11 mostra o esquema geral de instalação do piloto.



#### 4.1.2 Água bruta e Reservação

A água bruta utilizada nos ensaios era preparada artificialmente através da mistura de água e argila. A argila utilizada na mistura era a bentonita e a preparação ocorria com no mínimo um dia de antecedência.

O reservatório de água bruta utilizado foi uma caixa d'água em PVC dotada de tampa com capacidade de armazenamento de 1000 L. A caixa d'água foi instalada na parte externa do laboratório, sobre estrado de madeira conforme mostra a figura 12. Na sua parte inferior, foram instaladas duas saídas, uma para esgotar o reservatório e outra para alimentar o piloto. Essa última, feita em tubos de PVC rígido de 1/2" de diâmetro até a bomba centrífuga e daí em mangueira transparente com diâmetro de 3/4" até o registro de gaveta. A homogeneidade no interior do reservatório era garantida pelo retorno de água bruta entre a bomba e o reservatório.



Figura 12: Foto do reservatório de água bruta – 1000 L.

### 4.1.3 Hydroejetor

O hydroejetor, adquirido junto à empresa Guarujá Equipamentos para Tratamento de Água é feito em acrílico e possui uma escala de variação de vazão entre 0 e 16 l/h. O aparelho foi instalado antes das colunas de floculação para promover a adição do coagulante à água bruta. Primeiramente, preparava-se a solução de sulfato de alumínio em um recipiente onde era succionada pelo hydroejetor. A água não coagulada passava por um tubo venturi ocasionando uma queda de pressão devido ao aumento de velocidade. Essa baixa pressão proporcionava a sucção do coagulante através de uma tubulação. No tubo venturi ocorria a dosagem e também a mistura rápida do coagulante com a água bruta para em seguida entrar nos floculadores no sentido ascendente. A figura 13 mostra os detalhes do aparelho.

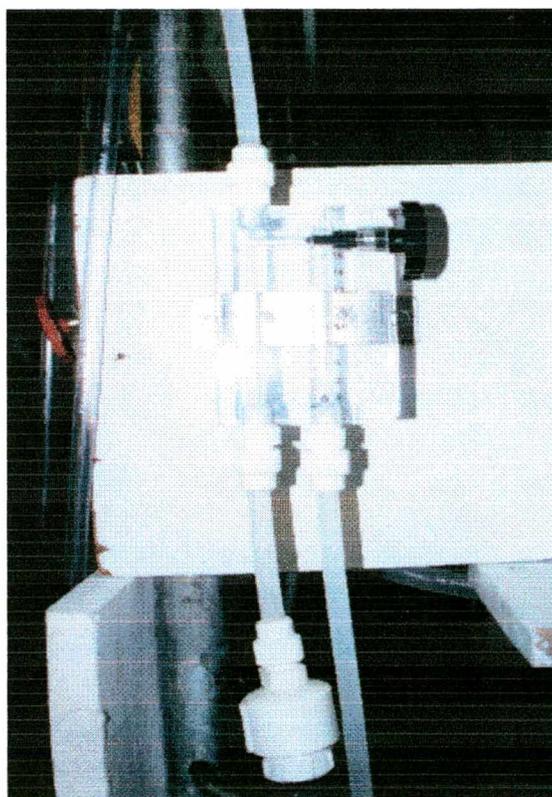


Figura 13: Foto do hydroejetor em acrílico: misturador rápido e dosador

Como a escala de medição de vazão do hydroejetor não oferecia precisão a pequenas vazões, trabalhou-se com uma concentração de solução

de sulfato de alumínio a 0,1%, possibilitando que a leitura de vazão durante a dosagem do coagulante se realizasse com maior precisão.

A solução de sulfato de alumínio era preparada em pequenas quantidades e sempre no momento das experiências.

Antes de dar início aos ensaios, verificou-se a calibração do hydroejetor, aferindo a vazão medida pelo mesmo. Para se determinar a curva de calibração, operou-se o piloto apenas com água tratada, observando-se o volume de água succionada pelo hydroejetor para tempos determinados.

Na figura 14 a seguir, é mostrado um desenho esquemático dos detalhes do hydroejetor, indicando os componentes que fazem parte do aparelho.

LISTA DE PEÇAS

ÍTEM	DESCRIÇÃO
1	PARAFUSO C/ FENDA - 3/16"
2	SUPORTE
3	PORCA DO ADAPTADOR
4	ADAPTADOR DE MANGUEIRA
5	ANEL DE VEDAÇÃO
6	REDUTOR
7	CORPO
8	VÁLVULA DE AJUSTE
9	ESCALA (l/h)
10	ESFERA
11	MANGUEIRA 3/8"
12	RETENTOR
13	FILTRO
14	ADAPTADOR 3/4" X 3/8"

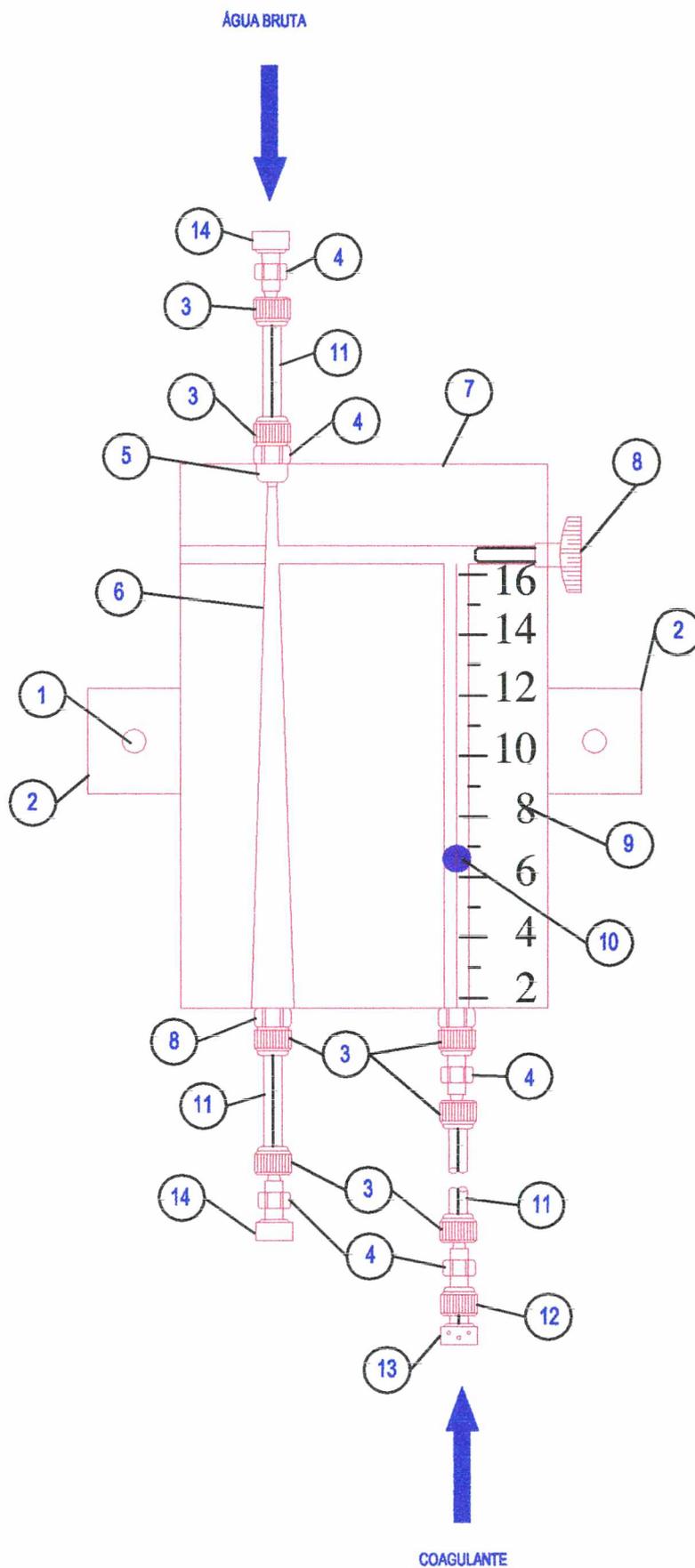


Figura 14: Detalhe do Hydroejetor (s/ esc.)

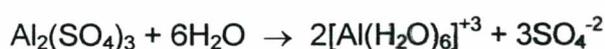
#### 4.1.4 Coagulante

O coagulante utilizado para os ensaios foi o Sulfato de Alumínio em pó PA (*padrão analítico*).

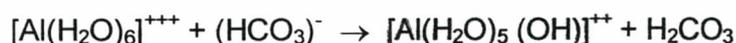
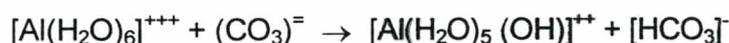
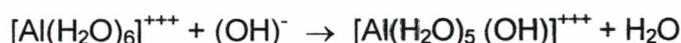
O sulfato de alumínio em solução é um ácido corrosivo, devendo ser armazenado em recipientes adequados. Pode ser conseguido na forma granular, seco, em barras ou líquido (solução).

Ao ser adicionado à água o sulfato de alumínio apresenta as seguintes reações químicas:

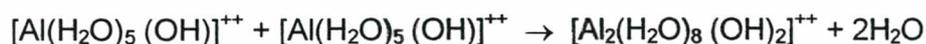
⇒ quando em solução encontra-se hidrolizado.



⇒ em reações com a alcalinidade da água.



⇒ em reações de polimerização.



Quando a alcalinidade da água bruta é baixa, adiciona-se cal viva ou hidratada para melhorar as condições de coagulação:



De acordo com as equações acima, pode-se afirmar que 1,0 mg/l de sulfato de alumínio comercial ( $\text{Al}_2\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ), destrói 0,5 mg/l de alcalinidade e produz cerca de 0,44 mg/l de gás carbônico, ambos em termos de  $\text{CaCO}_3$ . Portanto, a alcalinidade da água deve ser suficiente para reagir com o sulfato de alumínio, de modo a propiciar uma boa coagulação, além de manter um residual na água tratada.

A faixa de pH para melhor solubilidade do sulfato de alumínio está entre 5 e 7. Para valores de pH fora desses limites, a coagulação com sulfato de alumínio torna-se quase impossível (Richter, 1999).

A concentração da solução de sulfato de alumínio utilizada durante os ensaios foi de 0,1%. Embora não recomendável, essa concentração se fez necessária em virtude da utilização do hydroejetor como dosador do coagulante, o qual apresentava uma escala de vazão com poucos valores intermediários, dificultando a leitura a pequenas vazões (a literatura recomenda uma concentração mínima > 0,25%). Ensaios com concentrações maiores de sulfato de alumínio, na ordem de 1,0%, foram realizados, demonstrando pequena melhora nos resultados de abatimento de cor e turbidez.

É importante salientar que a solução de sulfato de alumínio a 0,1% era sempre preparada no início de cada experiência e em quantidade suficiente para cada ensaio.

#### 4.1.5 Mistura Rápida

A agitação necessária para possibilitar a mistura rápida ocorre em dois pontos. No próprio hydroejetor, através do tubo venturi, onde a pressão interna na veia líquida é menor que a pressão atmosférica, proporcionando uma certa agitação devido ao aumento de velocidade do meio líquido e no encontro das tubulações do hydroejetor e da água bruta.

Nesses pontos, indicados na figura 15, os valores dos gradientes de velocidades G1 e G2, para uma vazão de 180 l/h, têm os seguintes valores:

- $G1 = 1166 \text{ s}^{-1}$ ;
- $G2 = 485 \text{ s}^{-1}$ .

As fórmulas utilizadas para o cálculo de G1 e G2 são demonstradas em seguida. A vazão do medidor *Venturi* é dada pela seguinte fórmula:

$$Q = c \cdot \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{p_1 - p_2}{\gamma}} \quad (51)$$

sendo,

Q = vazão [m³/s];

c = coeficiente de descarga do aparelho (c = 0,97 para pequenos aparelhos);

m = relação d²/D²;

a = área do orifício de estrangulamento [m²].

Conhecendo-se a vazão que passa pelo tubo Venturi é possível determinar a perda de carga, podendo-se então calcular o gradiente de velocidade através da seguinte equação:

$$G1 = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \Delta h}{\mu \cdot T}} \quad (52)$$

onde,

G1 = gradiente de velocidade no ponto 1 [s⁻¹];

T = tempo de detenção [s];

Δh = perda de carga [m].

Em seguida ao tubo Venturi, há o encontro de duas tubulações proporcionando um outro ponto de mistura rápida (ver figura 15).

O gradiente de velocidade nesse ponto é determinado pela seguinte fórmula:

$$G2 = 2,52 \cdot n \cdot \sqrt{\left(\frac{\gamma}{\mu}\right)} \cdot v^{1,5} \cdot D^{-2/3} \quad (53)$$

onde:

G2 = gradiente de velocidade no ponto 2 [s⁻¹];

n = coeficiente de Ganguillet-Kutter e Manning (n = 0,011);

v = velocidade na tubulação [m/s];

D = diâmetro da tubulação maior [m].

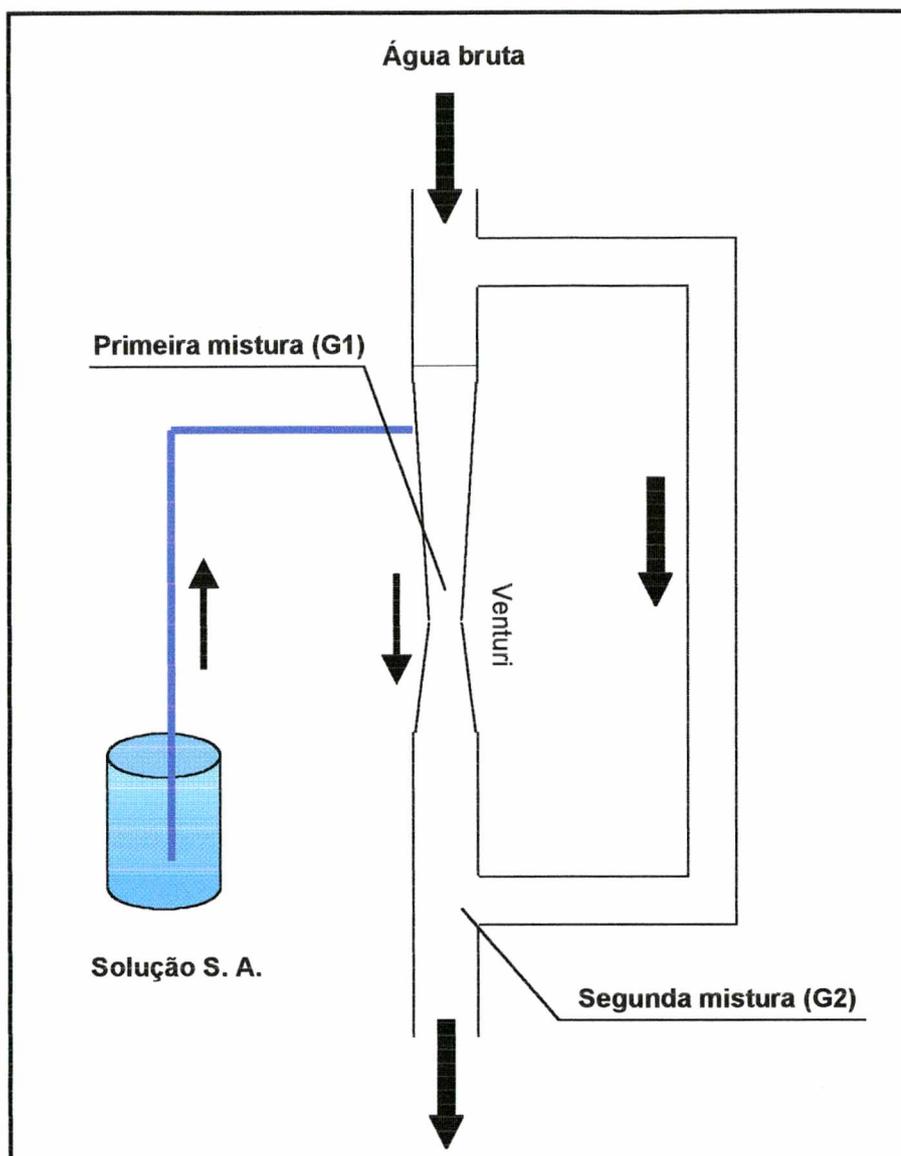


Figura 15: Detalhes da Mistura Rápida.

#### 4.1.6 Floculadores

As duas colunas de floculação de um metro de altura utilizadas para o estudo foram dispostas em série, em ordem crescente de diâmetro, como mostra a figura 16, diminuindo assim o gradiente de velocidade e aumentando o tempo de detenção. Cada coluna foi preenchida com pequenas esferas de polietileno. O fluxo da água coagulada no interior das colunas deu-se de forma ascendente, provocando a expansão do leito granular. Na parte superior da segunda coluna, foi montado um decantador para provocar a sedimentação. As

amostras eram coletadas por uma saída localizada a 7 cm abaixo do nível de saída do efluente decantado.



Figura 16: Foto das colunas de floculação.

#### 4.1.7 Meio Granular

A floculação deu-se em meio granular expandido, que confere certa agitação à água, além de permitir a total passagem dos flocos que se formam no interior das colunas. O meio granular foi formado por pequenas esferas de PVC de diâmetro igual a 5,9 mm e densidade um pouco maior que a água ( $\cong 1,0725$ ), formando um leito de 40,0 cm de altura (sem expansão).

#### 4.1.8 Decantador

Sobre a coluna de floculação de 6 cm de diâmetro foi instalado um decantador, também feito em vidro, com diâmetro interno de 17 cm, altura de 20 cm, com capacidade para 5000 ml e duas saídas. Uma mais acima para a saída do efluente e outra logo abaixo para coleta de amostras. A distância entre a superfície do líquido e o ponto de coleta era de 7 cm. Antes da entrada do decantador, foi instalado um registro para possibilitar o desvio do fluxo da água floculada, possibilitando assim o funcionamento em contínuo do piloto quando da coleta de amostras. A figura 17 mostra parte do piloto com o decantador sobre a segunda coluna de floculação.

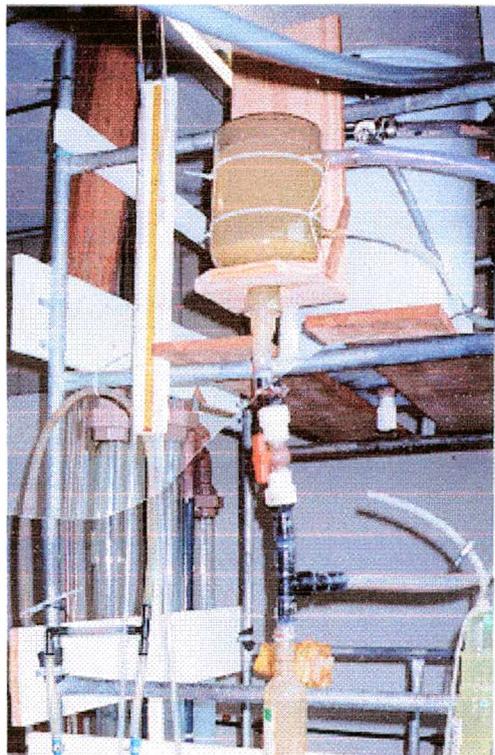


Figura 17: Foto do decantador cilíndrico em vidro – 5.000 ml.

#### **4.1.9 Alimentação do Piloto**

A alimentação do piloto com água bruta era proporcionada por uma bomba centrífuga de acionamento elétrico, com eixo horizontal e 1/2 CV de potência, instalada sobre uma plataforma de madeira no interior do laboratório. A água bruta bombeada passava primeiramente por um medidor de vazão. Em seguida, recebia o coagulante através do hydroejetor, que também promovia a

mistura rápida. Saindo do hydroejetor, a solução seguia para os floculadores cilíndricos, dispostos em série, formando os flocos que seriam decantados no recipiente de vidro instalado logo acima da segunda coluna de floculação. No decantador, as amostras eram coletadas para as análises de turbidez e cor.

A tubulação de alimentação de água bruta entre o reservatório e a bomba era em PVC rígido de 1/2" de diâmetro e entre a bomba e as colunas de floculação, em mangueira transparente de diâmetro igual a 3/4". Na tubulação de saída da bomba centrífuga, foi instalado um registro para possibilitar o retorno da água bruta excedente ao reservatório.

## **4.2 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO EM DESCONTÍNUO (TESTE DE JARROS)**

### **4.2.1 Noções Gerais**

O trabalho com Teste de Jarros ocorreu paralelo aos ensaios com o piloto. Para a realização dos ensaios em descontínuo, utilizou-se um aparelho da *Nova Ética* composto de seis reatores tronco-prismáticos de seção quadrada com capacidade para 2 litros. A agitação necessária para a mistura rápida do coagulante à água dava-se através de agitadores mecânicos movidos por um motor elétrico. O número de rotações lido através de um tacômetro digital junto ao aparelho possibilitava variações até 600 rpm ( $G = 2200 \text{ s}^{-1}$ ) e o controle de tempo da mistura era determinado por um cronômetro de mão. O aparelho de Teste de Jarros descrito acima é mostrado na figura 18 a seguir.

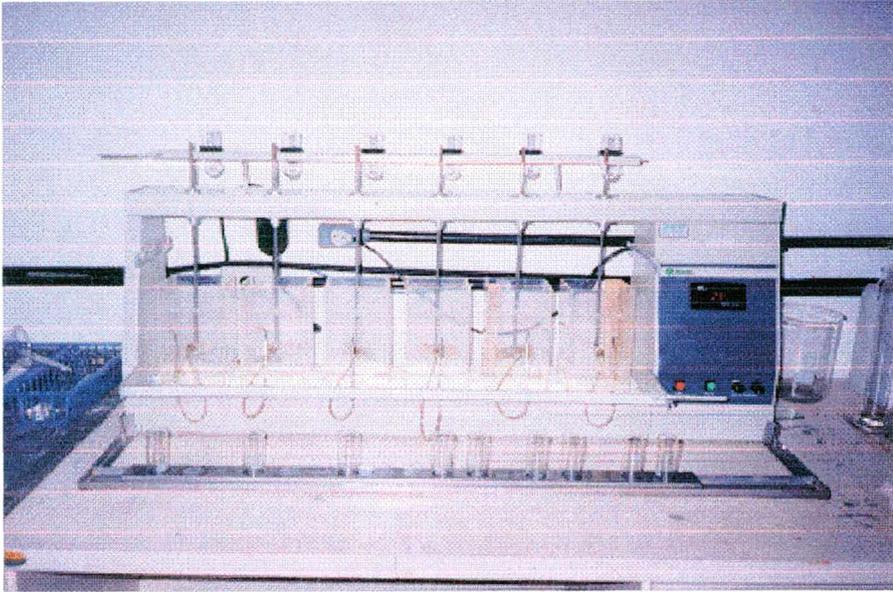


Figura 18: Foto do reator estático utilizado para os ensaios de floculação.

#### 4.2.2 Dosagem Ótima de Coagulante

Para determinação da melhor dosagem de coagulante foram realizados Testes de Jarros. Esses ensaios eram realizados da seguinte maneira:

- Primeiramente, os seis copos graduados eram preenchidos com dois litros de água bruta;
- determinada a faixa de dosagem a ser utilizada, separava-se, com uma pipeta, a quantidade de coagulante em frascos menores, variando-se a dosagem de 10 a 5 mg/l de um jarro para o outro;
- Com as hastes posicionadas, dava-se início a agitação, adicionando-se simultaneamente as diferentes dosagens de coagulante. A mistura rápida ocorria a uma rotação de 400 rpm ( $G=1000 \text{ s}^{-1}$ ) durante dois minutos;
- Em seguida, reduzia-se a velocidade para um grau de agitação em torno de 40 rpm ( $G=28 \text{ s}^{-1}$ ), durante 20 minutos. Durante este tempo já observa-se a formação dos flocos;
- Após este período, os agitadores eram desligados e as seis amostras permaneciam em repouso durante 20 minutos;

- Após os dez primeiros minutos de decantação, coletava-se uma amostra de cada jarro para as leituras de turbidez e cor;
- Após outros dez minutos de decantação (20 min. ao todo), a segunda amostra era coletada para as leituras de turbidez e cor;
- Comparando-se os resultados entre cada jarro, escolhe-se a melhor dosagem de coagulante de acordo com aquele que obtiver menor valor de turbidez e cor.

Para a determinação do pH de coagulação, adiciona-se a mesma dose de coagulante em cada um dos jarros. Ajusta-se o pH em cada recipiente e, aquele que apresentar melhor decaimento de turbidez e cor, será o de pH ótimo.

#### **4.2.3 Melhor Tempo de Floculação**

Para determinar o melhor tempo de floculação, todos os frascos receberam a mesma dosagem de coagulante (dosagem ótima). A mistura rápida ocorreu nos mesmos 2 minutos a uma rotação de 400 rpm. Na mistura lenta, a rotação de 40 rpm permaneceu a mesma, variando-se o tempo de floculação para cada frasco entre 2; 5; 10; 20; 30 e 60 minutos.

Em seguida, coletou-se as amostras nos tempos de 10 e 20 minutos para determinação dos valores de turbidez e cor.

O jarro que apresenta menor leitura de turbidez e cor é o que possui o melhor tempo de floculação.

#### **4.2.4 Melhor Gradiente de Velocidade**

Determina-se o melhor gradiente de velocidade, variando-se as rotações por minuto do aparelho de Teste de Jarros e mantendo fixos as dosagens de coagulante e o tempo de floculação. Desta forma, obtém-se diferentes valores para o gradiente de velocidade, conforme o gráfico da figura 19.

Os ensaios para determinação do melhor gradiente de velocidade são realizados apenas com um reator do aparelho de Teste de Jarros pois os agitadores mecânicos não possuem comando independente de rotação.

As amostras coletadas após 10 e 20 minutos, com os melhores resultados de turbidez e cor, determinam o gradiente de velocidade mais favorável à floculação.

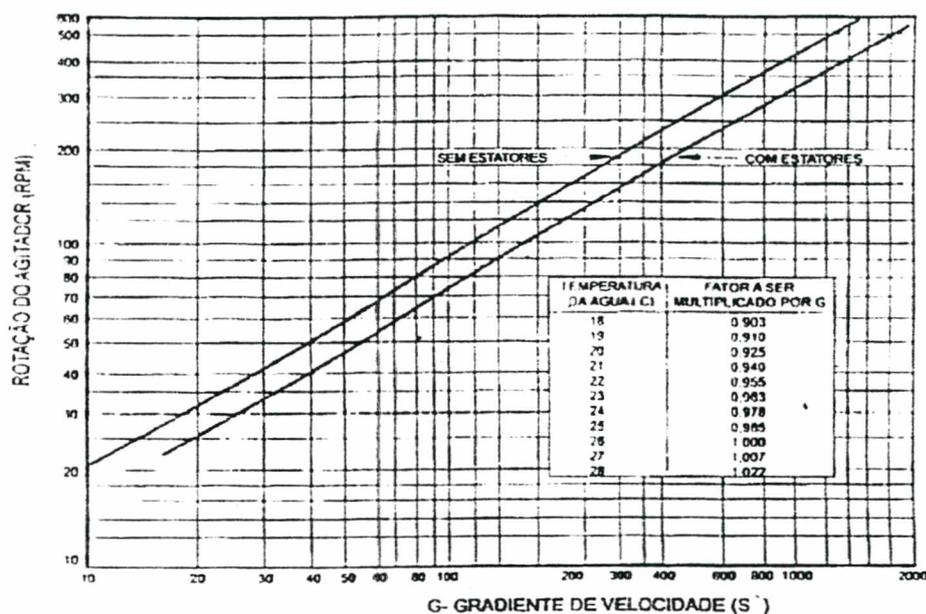


Figura 19: Curva do gradiente de velocidade.

### 4.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

#### 4.3.1 Considerações Gerais

Todas as análises deste trabalho foram realizadas no Laboratório Integrado do Meio Ambiente – LIMA, pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

As principais análises da água floculada e decantada para determinação da eficiência do piloto foram turbidez e cor. Como análises auxiliares foram determinados o pH e alcalinidade das amostras. Todos esses parâmetros também foram determinados para caracterizar a água bruta.

### 4.3.2 Turbidez

A turbidez é causada por material em suspensão no meio líquido. Essas partículas de tamanho variável, conforme o grau de turbulência, são capazes de interferir na passagem de luz, conferindo um aspecto nebuloso à água.

Para se determinar os valores de turbidez, são utilizados, usualmente, os aparelhos que utilizam o método nefelométrico de leitura que, através de uma célula fotoelétrica, mede a intensidade da luz dispersa em uma amostra de água, a 90° da luz incidente, calibrada com uma solução padrão conhecida.

O aparelho utilizado para os ensaios foi um turbidímetro de bancada HACH modelo 2100 N, conforme figura 20, em que a amostra agitada para dispersão dos sólidos é inserida num tubo de vidro até a marca indicada. Esse é então colocado em local apropriado do aparelho e coberto por um aparador. A leitura de turbidez dá-se de forma direta.

A turbidez é expressa em NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez).



Figura 20: Foto do turbidímetro.

### 4.3.3 Cor

Causada pela presença de substâncias dissolvidas ou em suspensão, a cor depende da quantidade e natureza desses materiais.

O método utilizado neste estudo para a determinação da cor é a comparação direta com uma escala arbitrária de cor.

O aparelho colorímetro NESSLER QUANTI 2000 da Policontrol determina a cor das amostras por comparação visual com discos colorimétricos em padrões conhecidos. Esse método tem a desvantagem de apresentar valores de cor com intervalos grandes entre si, da ordem de dez unidades de cor. A figura 21 apresenta o aparelho.

Preenche-se um dos tubos com água destilada e o outro com amostra agitada e com o aparelho ligado faz-se a leitura girando-se o disco até a coincidência de cores. Caso necessário, a amostra é diluída até que a cor fique compreendida entre os valores médios fornecidos pelo disco.

Em virtude disso a cor é calculada por:

$Cor = C \times F$  onde,

C = cor da amostra diluída lida no comparador;

F = fator de diluição.

A cor é expressa em u.c.(unidade de cor).



Figura 21: Foto do colorímetro NESSLER QUANTI 2000.

#### 4.3.4 Potencial Hidrogeniônico

O pH é universalmente usado para expressar a condição alcalina ou ácida de uma solução, medindo a concentração de íon hidrogeniônico.

A determinação do pH deu-se através da leitura instrumental de um peagâmetro digital ORION, modelo 20A, com eletrodo de vidro. O eletrodo de vidro possui uma membrana que separa dois líquidos com concentrações diferente de íons  $H^+$ , desenvolvendo um potencial proporcional à diferença de pH entre os dois líquidos e que é medido em relação a um potencial de referência. Em um béquer com aproximadamente 50 ml de amostra, é imerso o eletrodo de vidro, fornecendo diretamente o resultado através do mostrador digital.

#### 4.3.5 Alcalinidade

De modo geral, a alcalinidade está ligada à presença de bicarbonatos ( $HCO_3^-$ ), carbonatos ( $CO_3^{=}$ ) e hidróxidos ( $OH^-$ ) e traduz a capacidade de certa água em neutralizar ácidos.

A alcalinidade é obtida através da titulação de um ácido forte em 100 ml de amostra. O volume de amostra colocado em um erlenmeyer recebe três gotas do indicador metil orange e sob constante agitação recebe a titulação de ácido sulfúrico a 0,02 N até a mudança de cor do indicador.

O volume de ácido titulado é então aplicado na seguinte fórmula:

$$\text{mg/l de CaCO}_3 = \frac{V \cdot N \cdot 50000}{V_{am}}$$

onde,

V = volume de ácido gasto na titulação até a mudança de cor do indicador [ml];

N = normalidade do ácido = 0,02;

V<sub>am</sub> = volume da amostra [ml].

A alcalinidade medida representa a alcalinidade devida a bicarbonatos em mg/l de  $\text{CaCO}_3$ .

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 ENSAIOS PRELIMINARES**

Os estudos práticos realizados com o piloto foram efetivamente iniciados em agosto de 2000. Anteriormente a esse período, foram feitos alguns testes hidráulicos relacionando alguns parâmetros como perda de carga, taxa de escoamento, altura do leito e número de colunas de floculação.

Verificou-se, logo de início, que a utilização de três colunas em série com diâmetros de 4; 5 e 6 cm, respectivamente, e com a mesma altura de leito, dificultava a operação, influenciando os resultados, haja vista que, a última coluna de floculação ( $\varnothing=6$  cm) não expandia o leito devido à baixa taxa de escoamento, ao passo que na primeira coluna ocorria mais de 100% de expansão, apresentando problemas de carreamento das pequenas esferas que constituíam o leito granular.

Após esses primeiros testes, decidiu-se realizar os ensaios com duas colunas em série nos diâmetros de 5 e 6 cm, respectivamente. O piloto também operou com apenas uma coluna de floculação ( $\varnothing=6$  cm), no entanto, não obteve bons resultados. A altura do leito fixo nas duas colunas era de 40 cm e cada coluna possuía uma altura útil de 1 metro.

Os ensaios de floculação em contínuo e a comparação com os ensaios de jarros tiveram início em 03/11/2000.

### **5.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA**

A água utilizada em todo o período dos ensaios foi preparada com bentonita em um reservatório de 1000 litros de capacidade que alimentava o piloto por meio de uma bomba centrífuga. A turbidez média da água bruta ficava em torno de 55 NTU.

A tabela 1 mostra os valores médios das características físico-químicas da água bruta utilizada para o estudo.

Tabela 1

Valores médios para os parâmetros da água ensaiada

Parâmetros	Valores médios	
	Água bruta (s/ cal)	Água bruta (c/ cal)
Turbidez reman. (NTU)	50,0 - 60,0	60,0 – 80,0
Cor aparente (u.c.)	80,0	80,0
Alcalinidade total (mg/l de CaCO <sub>3</sub> )	17,0 – 18,0	18,5 – 21,5
pH	7,0 – 7,5	7,5 – 8,5

### 5.3 ENSAIOS HIDRÁULICOS

Primeiramente, foram realizados alguns testes com o piloto a fim de se conhecer melhor o seu comportamento hidráulico, principalmente com relação ao intervalo da taxa de escoamento utilizada para operação do piloto, à expansão do leito e à perda de carga, obtendo assim valores para a determinação do gradiente de velocidade.

A tabela 2 relaciona a vazão com taxa de escoamento para cada coluna.

Tabela 2

Relação da vazão com a taxa de escoamento

Vazão (Q) (l/h)	Taxa de escoamento (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> xdia)	
	Coluna – 50mm	Coluna – 60mm
36,0	440	306
120,0	1467	1019
180,0	2200	1528
222,0	2714	1884

Nessa primeira fase, também foi estudado o funcionamento do hydroejetor com o objetivo de verificar a calibração da escala de vazão adotada pelo mesmo.

Nos gráficos apresentados a seguir pode-se visualizar o comportamento do piloto em cada coluna disposta em série.

### 5.3.1 Expansão do Leito Granular

Antes de dar início à operação com água bruta, foram verificadas algumas condições hidráulicas do piloto como a expansão do meio granular em relação à velocidade de aproximação e à vazão, conforme mostrado na figura 22.

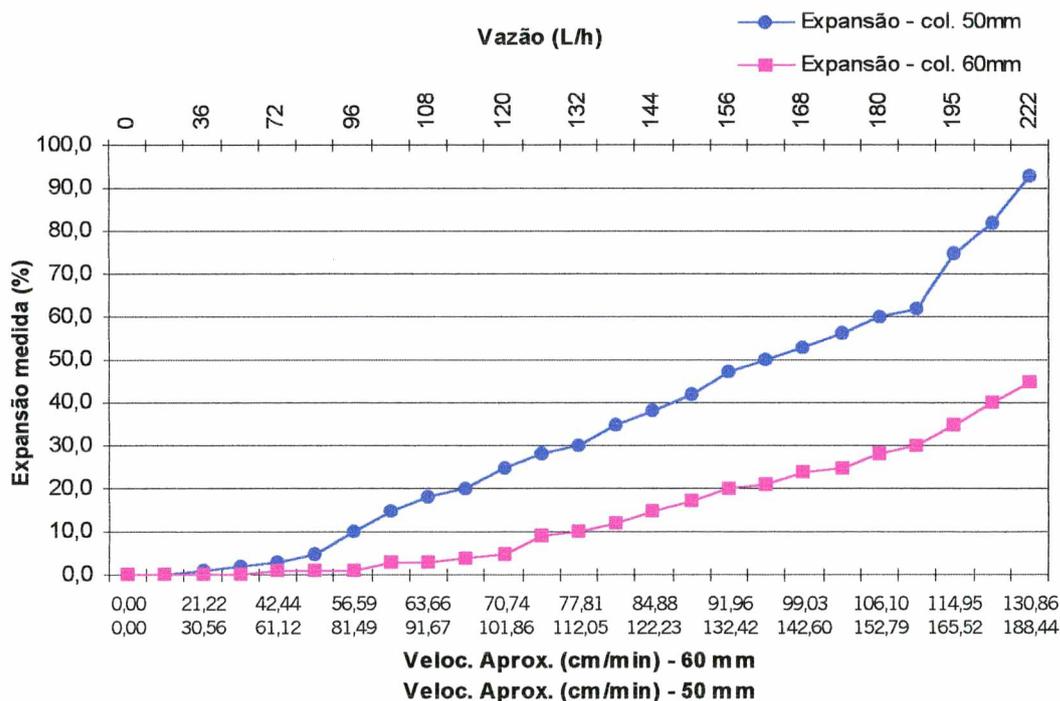


Figura 22: Expansão do leito granular para as duas colunas de floculação.

Observa-se na figura 22 a evolução da expansão do meio granular com o aumento da velocidade de aproximação e verifica-se que, para uma mesma velocidade de aproximação a expansão é a mesma nas duas colunas de floculação. Com esse gráfico pode-se determinar também a vazão máxima de trabalho desse piloto correspondente a expansão de 100% na coluna de floculação de 50 mm de diâmetro.

### 5.3.2 Calibração do Hydroejetor

A figura 23 mostra a curva de calibração do hydroejetor utilizada para todos os ensaios subsequentes.

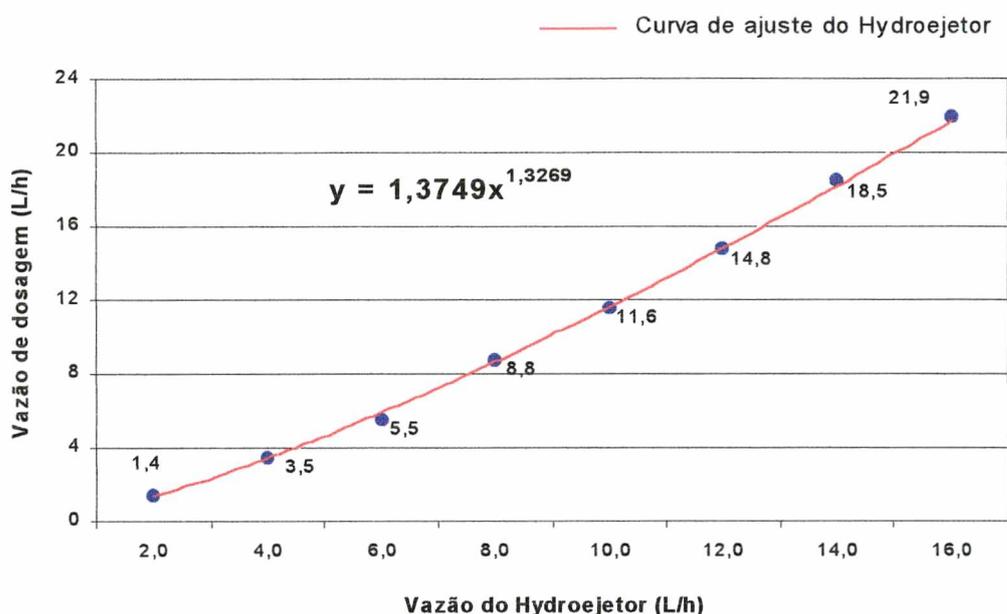


Figura 23: Curva de calibração do Hydroejetor.

Para construção dessa curva realizaram-se alguns ensaios com o aparelho hydroejetor no qual pode-se comparar as leituras de vazões lidas na escala do hydroejetor com as vazões efetivas de dosagem do coagulante. Essa relação gerou a curva mostrada na figura 23.

O aparelho hydroejetor utilizado nas determinações das dosagens de sulfato de alumínio mede a vazão da solução de coagulante através de um medidor *Venturi*, que funciona pelo princípio de Bernoulli.

O medidor *Venturi* é um aparelho bastante utilizado para medir vazões em tubulações sob pressão, consistindo, essencialmente, em dois troncos de cone ligados por uma base menor, no qual há uma queda de pressão devido ao aumento de velocidade (Neves, 1979).

O medidor *Venturi* do aparelho hydroejetor também neste caso propiciou a mistura rápida da solução de sulfato de alumínio com a água bruta.

A vazão do medidor *Venturi* é dada pela fórmula nº 51 apresentada anteriormente e que segue:

$$Q = c \cdot \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{p_1 - p_2}{\gamma}}$$

sendo,

Q = vazão [m³/s];

c = coeficiente de descarga do aparelho (c = 0,97 para pequenos aparelhos);

m = relação  $d^2/D^2$ ;

a = área do orifício de estrangulamento [m²].

Conhecendo-se a vazão que passa pelo tubo Venturi é possível determinar a perda de carga, podendo-se então calcular o gradiente de velocidade através da fórmula nº 52, também apresentada anteriormente:

$$G1 = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \Delta h}{\mu \cdot T}}$$

onde,

G1 = gradiente de velocidade no ponto 1 [s<sup>-1</sup>];

T = tempo de detenção [s];

$\Delta h$  = perda de carga [m].

O gradiente de velocidade proporcionado pelo tubo Venturi do hydroejetor, para uma vazão de 180 l/h, é da ordem de 1166 s<sup>-1</sup>.

Em seguida ao tubo Venturi, há o encontro de duas tubulações proporcionando um outro ponto de mistura rápida (ver figura 16).

O gradiente de velocidade nesse ponto é determinado então pela fórmula nº 53 já anteriormente apresentada:

$$G2 = 2,52 \cdot n \cdot \sqrt{\left(\frac{\gamma}{\mu}\right)} \cdot v^{1,5} \cdot D^{-2/3}$$

onde:

G2 = gradiente de velocidade no ponto 2 [s<sup>-1</sup>];

n = coeficiente de Ganguillet-Kutter e Manning (n = 0,011);

$v$  = velocidade na tubulação [m/s];  
 $D$  = diâmetro da tubulação maior [m].

O gradiente de velocidade, no encontro das tubulações que ocorre logo em seguida ao tubo Venturi, para uma vazão de 180 l/h, é da ordem de  $485 \text{ s}^{-1}$ .

### 5.3.3 Perda de Carga

Na figura 24, estão os valores da perda de carga calculada e medida de acordo com as velocidades de aproximação utilizadas na operação do piloto.

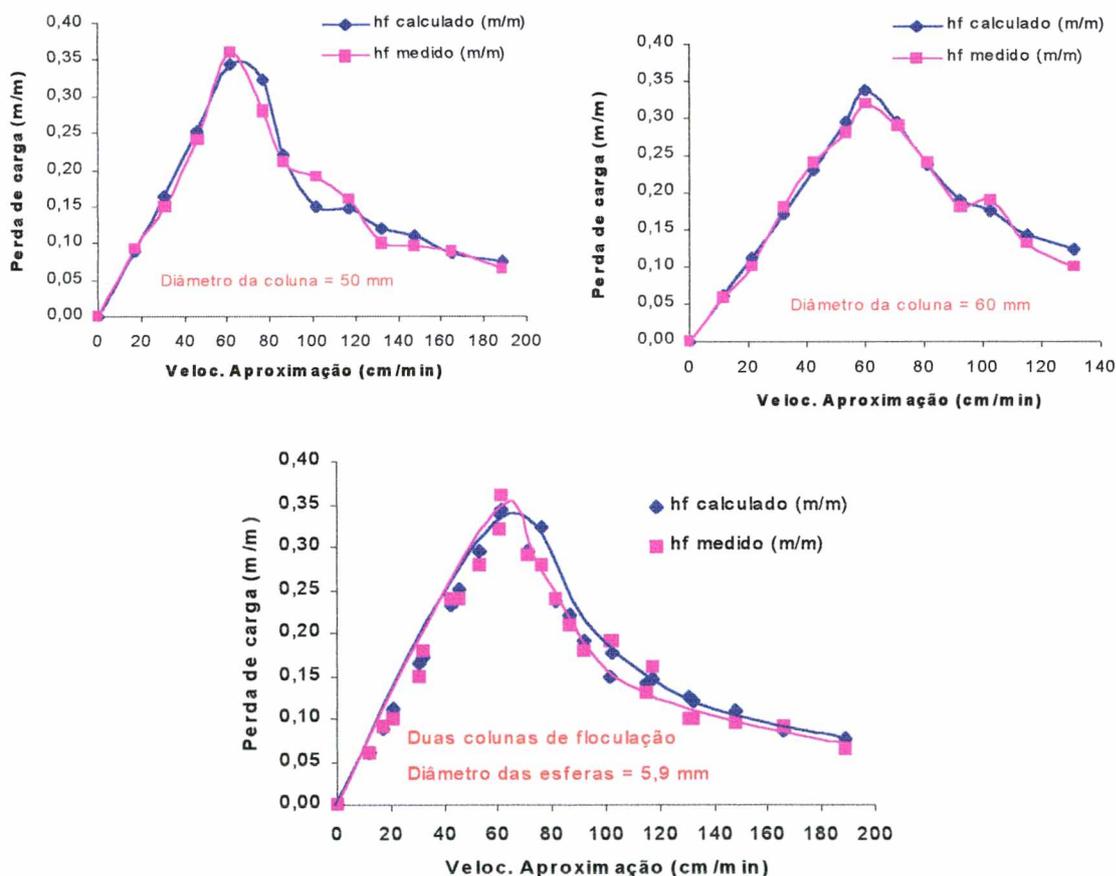


Figura 24: Perda de carga calculada e medida.

A perda de carga nas duas colunas de floculação, para a mesma velocidade de aproximação, deverá ser a mesma. Entretanto, essa pequena

diferenciação deve-se à forma de acomodação das pequenas esferas em cada uma das colunas. Observa-se ainda que para o material granular estudado e para as velocidades empregadas não houve um equilíbrio da perda de carga, isto é, não houve expansão a partir do qual a perda de carga permanecesse constante.

### 5.3.4 Gradiente de Velocidade

O gradiente de velocidade mostrado na figura 25, para as colunas de 50 e 60 mm, foi calculado através da equação 41, apresentada anteriormente, no ítem 3.1.7.4, de acordo com a velocidade de aproximação e da porosidade do meio expandido.

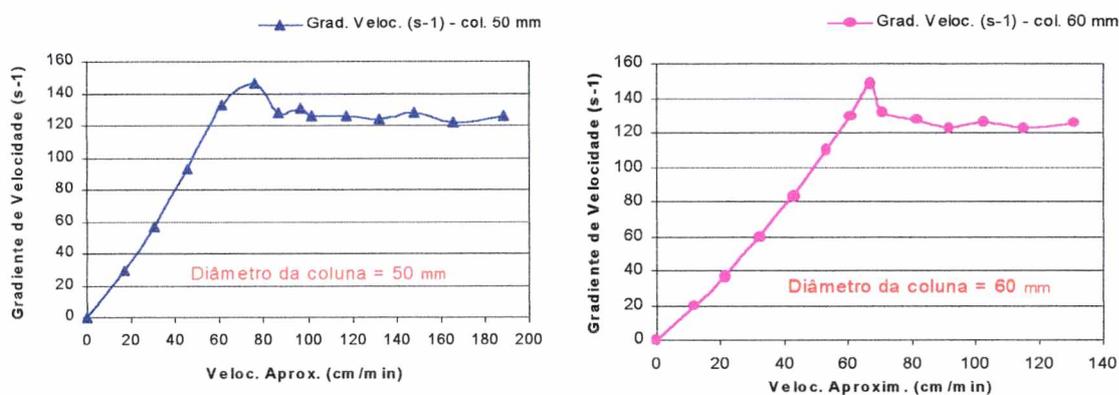


Figura 25: Gradiente de velocidade calculado.

Observa-se que as duas curvas do gradiente de velocidade serão correspondentes, havendo pequenas diferenciações devido ao efeito de parede que comporta-se diferentemente entre uma e outra coluna.

## 5.4 DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO ATRAVÉS DE ENSAIOS EM CONTÍNUO E DESCONTÍNUO

No decorrer dessa pesquisa, os ensaios foram realizados em paralelo entre o Teste de Jarros e o piloto, a fim de obter resultados comparativos entre esses.

Os ensaios com o piloto para determinação da turbidez e cor foram realizados com duas colunas de floculação.

As figuras 26 e 27 mostram os resultados da melhor dose de sulfato de alumínio obtidos para o Teste de Jarros e o piloto, utilizando-se a mesma água bruta. Na tabela 6 do anexo 1 constam os dados da figura 26 e na tabela 9 do anexo 2 constam os dados da figura 27.

Os tempos de decantação ( $T_d$ ) adotados nesse ensaio inicial foram de 3 e 5 minutos e a concentração da solução de sulfato de alumínio foi de 0,1%. A tabela 3 indica as condições de operação do piloto.

Tabela 3  
Condições de operação do piloto

Condições de operação	Diâmetro das colunas de floculação	
	50 mm	60mm
Taxa de escoamento ( $m^3/m^2 \times dia$ )	2200	1528
Expansão (%)	60	28
Gradiente de velocidade ( $s^{-1}$ )	126,69	123,70
Veloc. de aproximação (cm/min)	152,79	106,10

Características da água bruta:

- a) Turbidez = 56,70 NTU;
- b) Cor = 80,0 u.c.;
- c) Alcalinidade = 17,10 mg/l de  $CaCO_3$ ;
- d) pH = 7,16.

Condições de operação do teste de jarros:

- a) tempo de mistura rápida a 425 rpm = 2 min ( $G_{MR} = 1000 s^{-1}$ );
- b) tempo de mistura lenta a 40 rpm = 20 min ( $G_{ML} = 28 s^{-1}$ );
- c) tempo de decantação ( $T_d$ ) = 3 e 5 min.

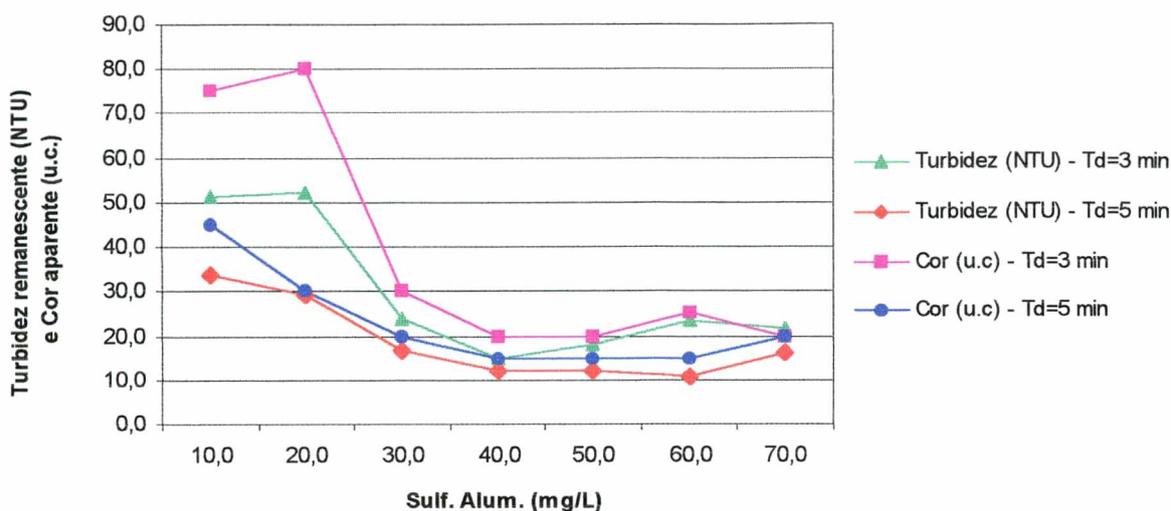


Figura 26: Melhor dosagem de sulfato de alumínio no Teste de Jarros.

Analisando o gráfico da figura 26 pode-se notar que as melhores dosagens de sulfato de alumínio encontram-se entre 40 e 60 mg/l e piorando com a dosagem de 70 mg/l.

Verifica-se, além disso, que há um decaimento acentuado nos valores de turbidez e cor entre as doses de 10 e 40 mg/l de sulfato de alumínio. A partir da dose de 40 mg/l até 60 mg/l os valores tornam-se mais constantes.

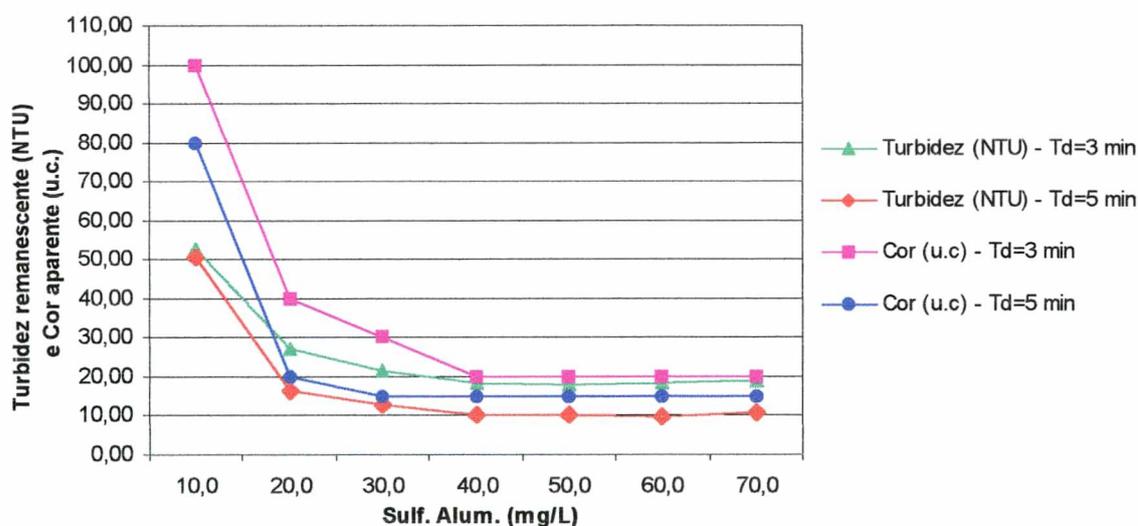


Figura 27: Melhor dosagem de sulfato de alumínio para o piloto em meio granular.

De acordo com a figura 27, pode-se verificar também que os melhores resultados durante a operação do piloto ficaram entre 40 e 60 mg/l, como já evidenciado no gráfico da figura 26 referente ao ensaio com o Teste de Jarros.

Verifica-se ainda que o decaimento da turbidez e cor é mais rápido, em função da dose de sulfato de alumínio, para a floculação granular do que para o Teste de Jarros.

Cubas (1999), obteve resultados semelhantes quanto à dose de sulfato de alumínio em ensaios de jarros com água preparada com bentonita. Com o objetivo de obter maior rapidez nos trabalhos, adotou-se tempos de decantação curtos para esses ensaios.

Os gráficos das figuras 28 e 29, a seguir, apresentam a comparação entre os resultados obtidos no Teste de Jarros e com o piloto, demonstrados separadamente nos gráficos anteriores.

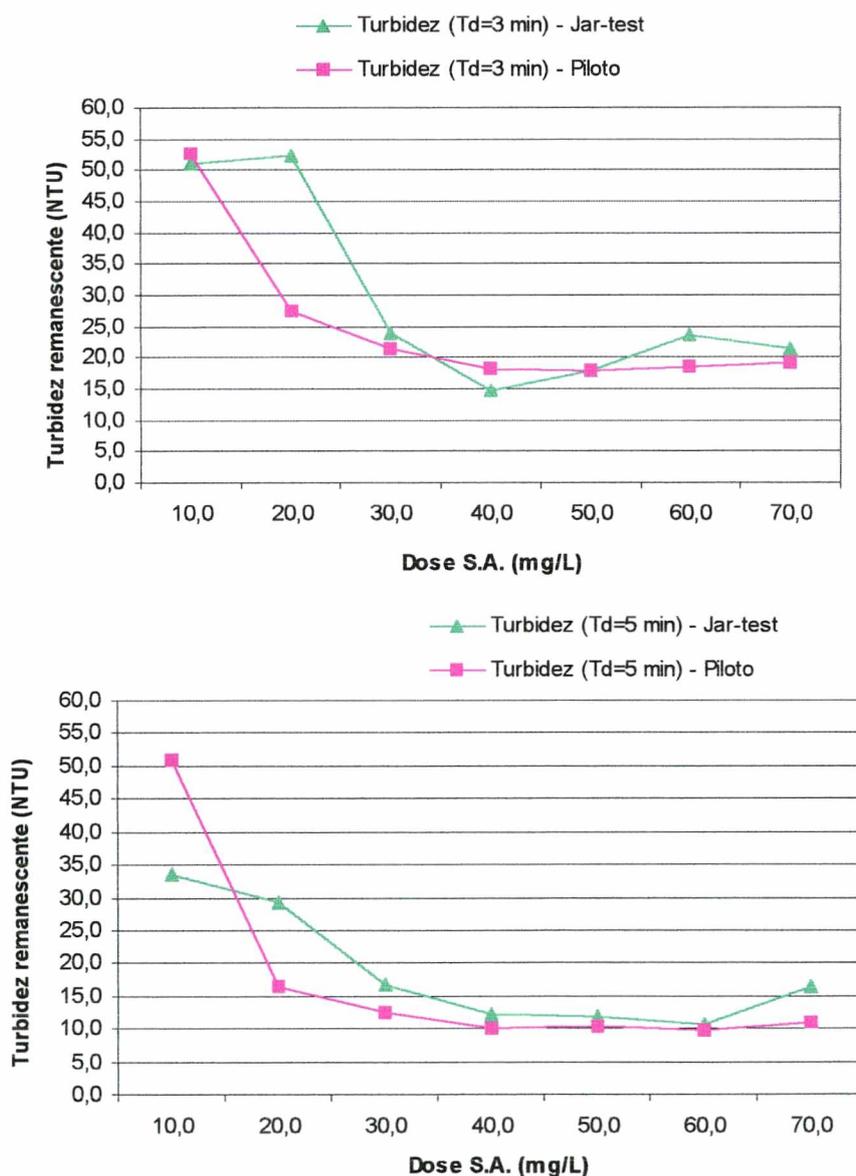


Figura 28: Resultados de turbidez entre o Teste de Jarros e o piloto em meio granular (Td = 3 e 5 min).

Pode-se observar nos gráficos acima que a curva de turbidez do piloto apresenta um comportamento constante, não sofrendo oscilações com a diferença de dosagem do coagulante.

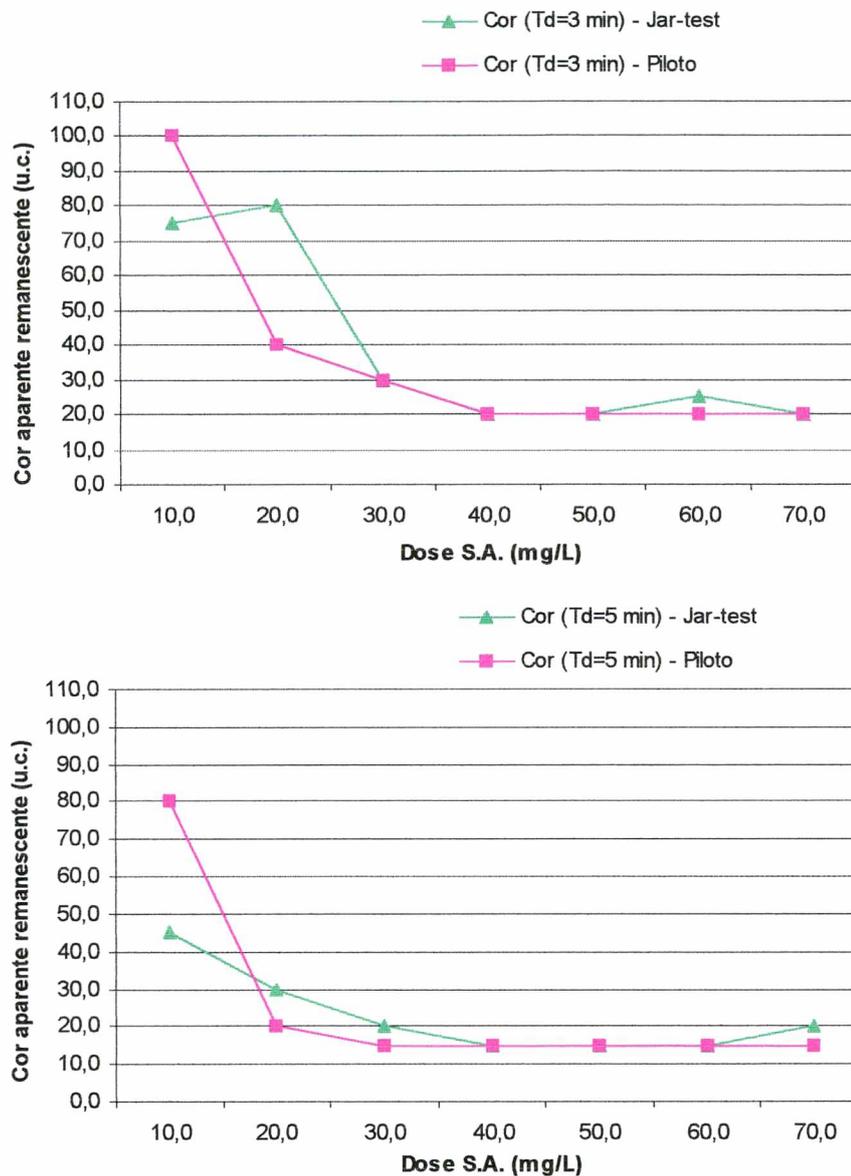


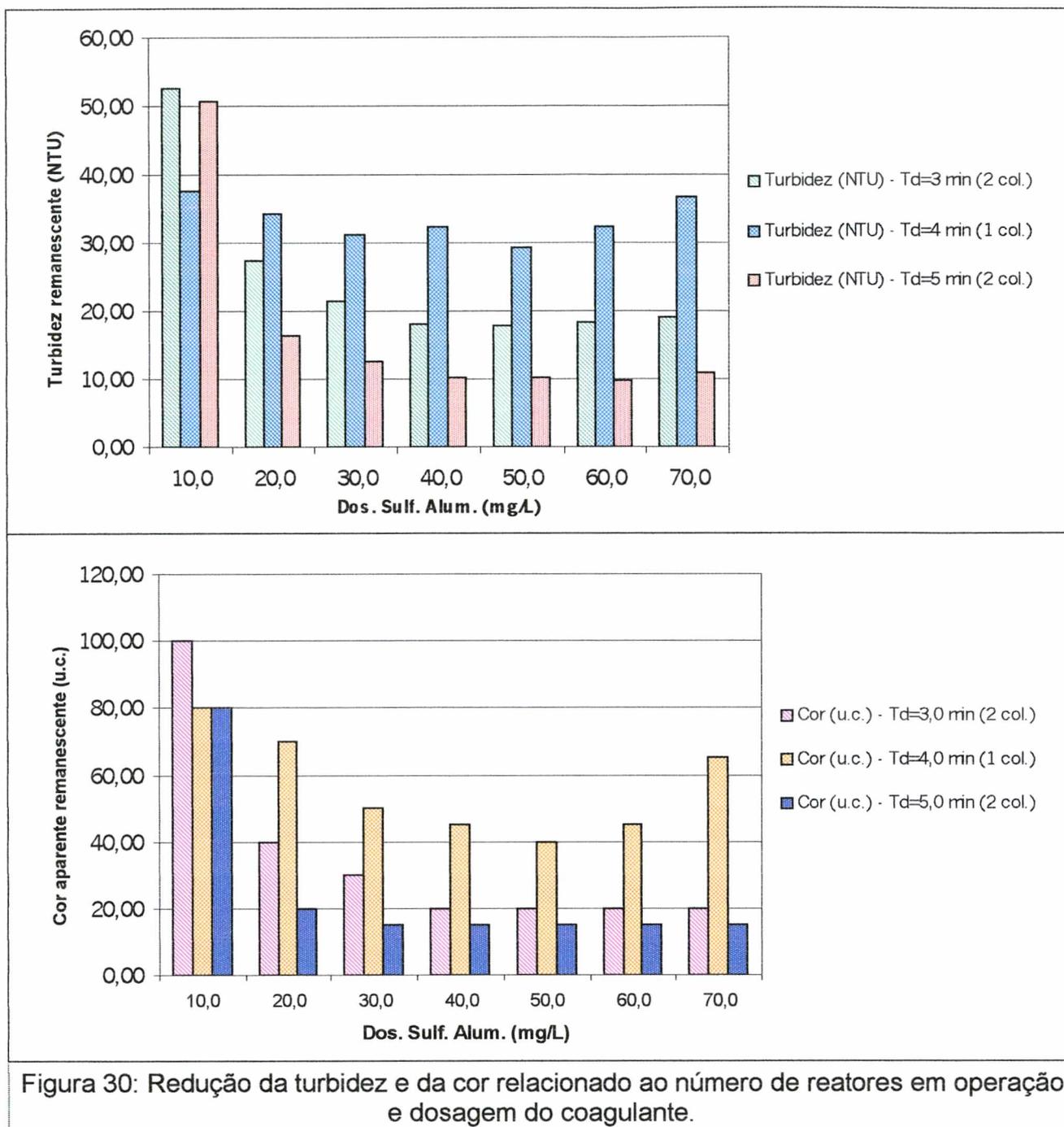
Figura 29: Resultados de cor entre o Teste de Jarros e o piloto em meio granular (Td = 3 e 5 min).

Verifica-se também que a curva dos valores de cor aparente, referente ao piloto, não sofre grandes oscilações às mudanças de dosagem do sulfato de alumínio.

Observa-se ainda que os valores de turbidez e cor obtidos com o Teste de Jarros e o piloto, para as melhores doses de coagulante, permaneceram bem próximos.

Também operou-se o piloto com apenas uma coluna de floculação e com a mesma altura de leito fixo (40 cm). No entanto, verificou-se que os flocos que se formavam eram muito pequenos, prejudicando a sedimentação.

A figura 30 mostra o abatimento de turbidez e da cor relacionado ao número de reatores do piloto. O tempo de decantação quando o piloto operou com apenas uma coluna de floculação foi  $T_d = 4$  min. Nesses ensaios, o piloto trabalhou com taxas de escoamento de 2200 e 1528  $m^3/m^2 \times dia$ , referentes, respectivamente, às colunas de 50 e 60 mm de diâmetro, com a água floculada nos reatores em contínuo. Na tabela 11 do anexo 2 encontram-se os valores de turbidez e cor que foram utilizados para a construção do gráfico da figura 30.



Conforme mostram os gráficos da figura 30, o acréscimo do tempo de contato proporcionado pela utilização de duas colunas de floculação dispostas em série, resultou em uma melhora considerável, entre 30% e 48%, no abatimento da turbidez e de 40% a 69% na redução da cor.

De acordo com os ensaios acima, a operação do piloto se dará então com duas colunas de floculação dispostas em série nos diâmetros de 50 mm e 60 mm, respectivamente, propiciando assim um tempo de contato em torno de 1 minuto.

### 5.4.1 Velocidades de Sedimentação - Ensaio em Contínuo

A água bruta após receber o coagulante segue para os reatores de leito granular expandido. Ao final da segunda coluna de floculação ( $\varnothing$  60 mm), a água floculada segue para o decantador de funcionamento em descontínuo, de onde são coletadas as amostras da água sedimentada para as análises. A distância entre a superfície d'água no decantador e a saída utilizada para coleta é de 7 cm. No momento da coleta, o efluente floculado era desviado por um *by-pass*.

Nesses ensaios o piloto operou nas mesmas condições já descritas na tabela 3.

O afluente utilizado para os ensaios realizados nessa etapa possuíam as seguintes características:

- a) Turbidez = 56,70 NTU;
- b) Cor = 80,0 u.c.;
- c) Alcalinidade = 17,10 mg/l  $\text{CaCO}_3$ ;
- d) pH = 7,16.

A figura 31 mostra o abatimento da turbidez relacionado ao tempo de decantação e à velocidade de sedimentação, para diferentes dosagens de sulfato de alumínio. A tabela 12 do anexo 2 apresenta os valores que geraram o gráfico da figura 31.

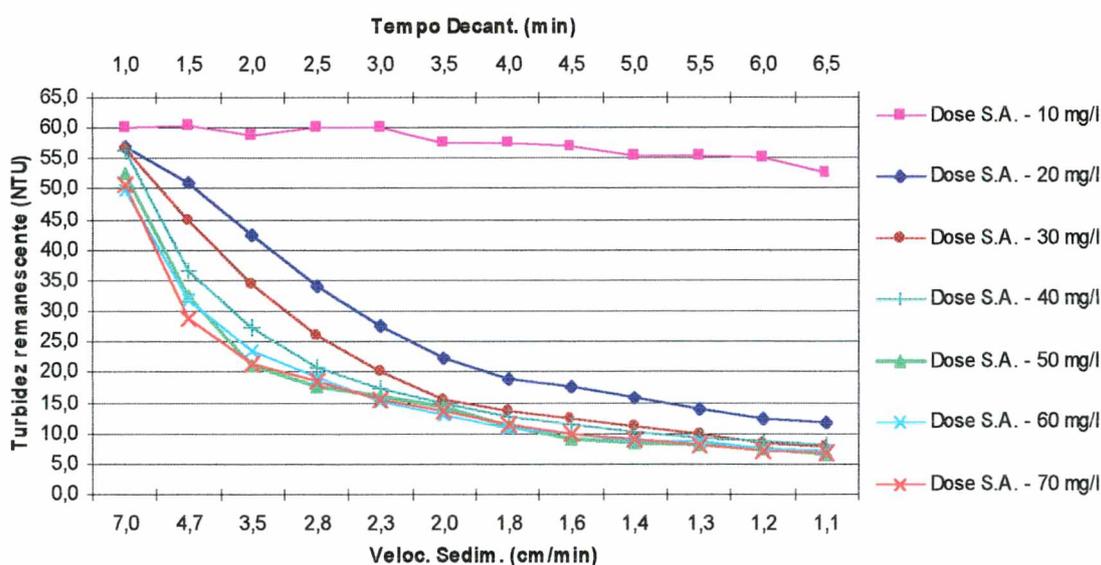


Figura 31: Variação da turbidez com a velocidade de sedimentação.

Na figura 31, observou-se que os melhores resultados de remoção de turbidez ocorrem a pequenas velocidades de sedimentação. O gráfico mostra ainda que, para dosagens entre 50 e 70 mg/l de sulfato de alumínio, os valores de turbidez são muito próximos, evidenciando que a dosagem ótima de sulfato de alumínio está em torno de 50 mg/l.

A figura 32 faz a mesma relação, mas para a remoção de cor. A tabela 13 do anexo 2 apresenta os valores utilizados no gráfico da figura 32.

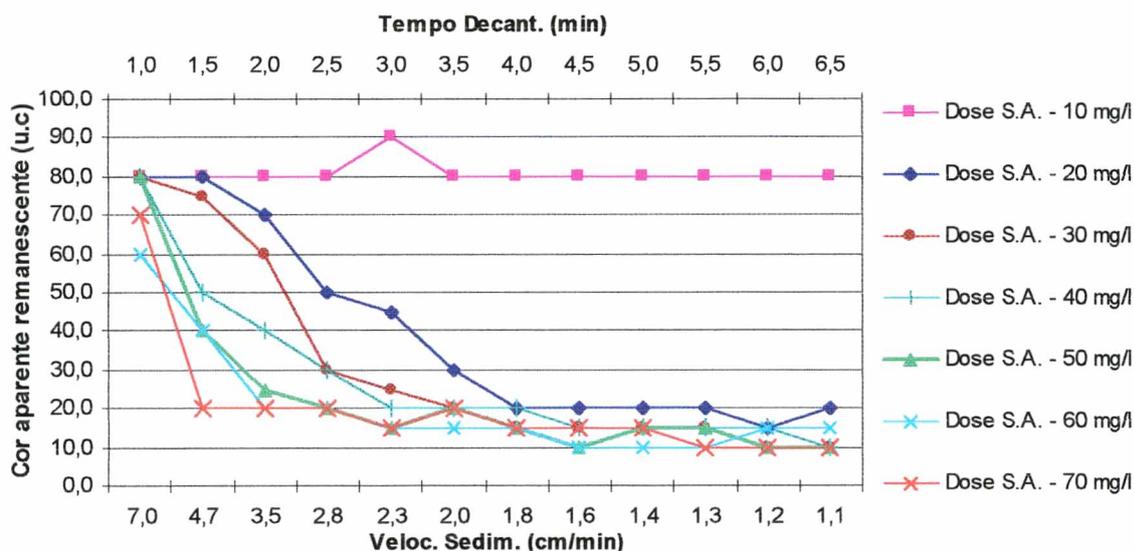


Figura 32: Variação da cor com a velocidade de sedimentação.

Observa-se também no gráfico da figura 32 o mesmo comportamento na redução de cor com relação à velocidade de sedimentação. A faixa de dosagem de sulfato de alumínio em que ocorre a melhor eficiência na redução da cor encontra-se entre 50 e 70 mg/l, a mesma verificada para os ensaios de turbidez.

#### 5.4.2 Velocidade de Sedimentação Verificados para o Teste de Jarros e o Piloto

De acordo com as análises dos gráficos anteriores, estabeleceu-se uma faixa de dosagem ótima de coagulante, em que ocorrem os melhores resultados de redução de turbidez e cor. Com isso, os novos ensaios

aconteceram com menor variação da dosagem de coagulante, dentro da faixa ótima de dosagem estabelecida.

Nesses ensaios, ampliou-se ainda o tempo de decantação, com o objetivo de se conhecer melhor o comportamento nos valores finais de turbidez e cor, com a diminuição da velocidade de sedimentação.

As análises em Teste de Jarros e com o piloto foram realizadas com a mesma água bruta nas seguintes características:

- a) Turbidez = 40,30 NTU;
- b) Cor = 60,0 u.c.;
- c) Alcalinidade = 16,7 mg/l  $\text{CaCO}_3$ ;
- d) pH = 7,0.

As condições de funcionamento do piloto para esses ensaios são as mesmas da tabela 3.

As condições de operação para a realização dos Testes de Jarros continuam as mesmas do já descrito no início desta seção, porém, repetidas aqui para melhor compreensão do leitor:

- a) tempo de mistura rápida a 425 rpm = 2 min ( $G_{MR} = 1000 \text{ s}^{-1}$ );
- b) tempo de mistura lenta a 40 rpm = 20 min ( $G_{ML} = 28 \text{ s}^{-1}$ ).

A figura 33 mostra os resultados das análises de turbidez e cor realizados no Teste de Jarros, com um menor intervalo de variação da dosagem de coagulante e nas velocidades de sedimentação de 3,5; 2,3; 1,4; 0,7; 0,4; 0,2 e 0,1 cm/min. Nas tabelas 7 e 8 do anexo 1 estão os resultados que foram utilizados para a construção do gráfico da figura 33.

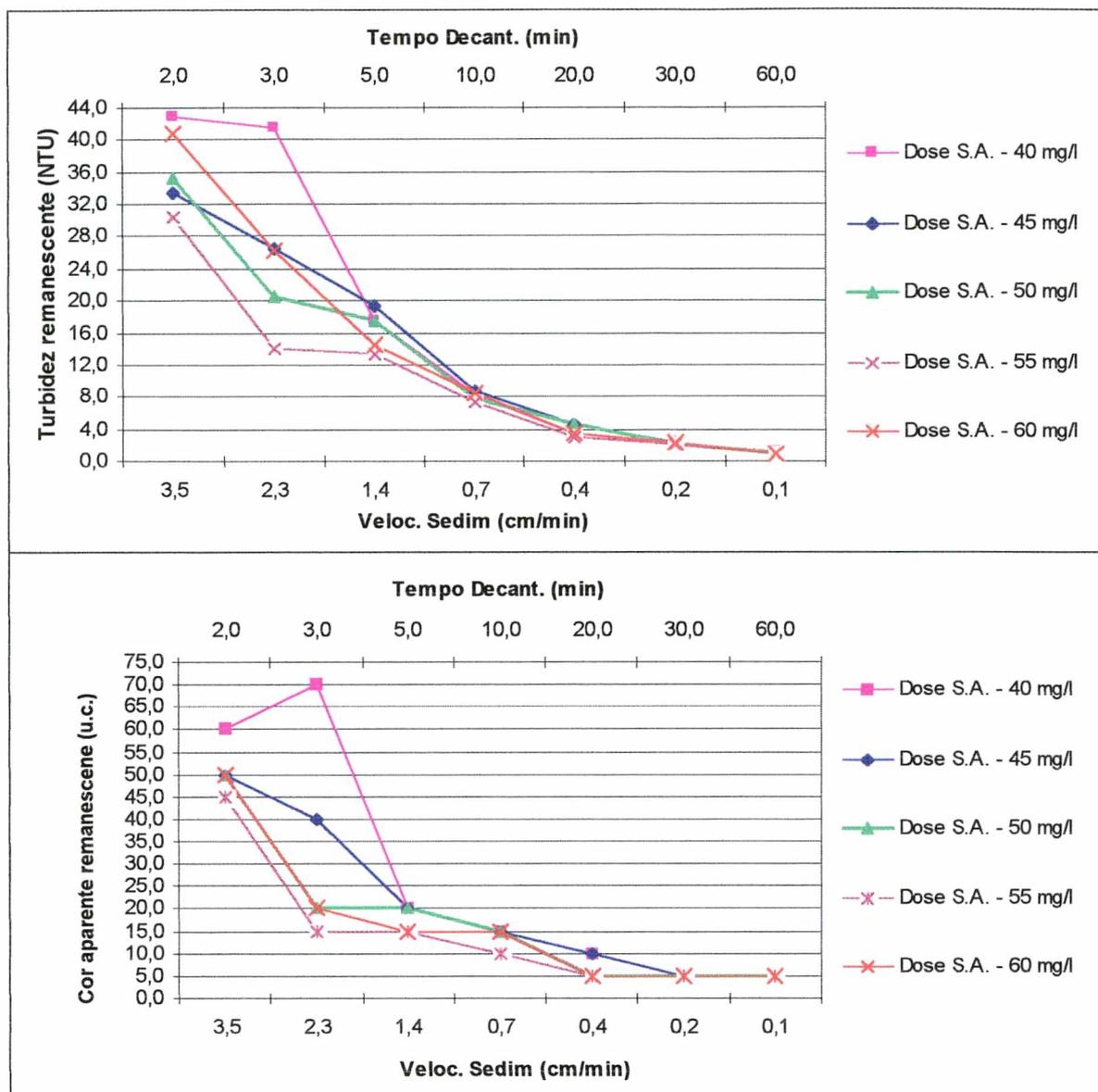


Figura 33: Análises de turbidez e cor segundo a velocidade de sedimentação em Teste de Jarros.

O que se pode verificar é que tanto nos ensaios de turbidez como no da cor houve uma tendência de convergência dos resultados para valores muito pequenos da velocidade de sedimentação. Nota-se ainda que, os resultados de turbidez e cor tenderam a um mesmo valor para diferentes dosagens de coagulante, o que mostra que a eficiência na redução desses parâmetros já não sofre tanta influência com relação à variação das dosagens de coagulante quando a velocidade de sedimentação é muito pequena.

Os ensaios realizados no piloto para verificar a redução de turbidez e cor com variação na velocidade de sedimentação são mostrados na figura 34.

A vazão de trabalho do piloto foi de 180 l/h, com funcionamento ininterrupto durante a execução dos ensaios. A cada intervalo de tempo, para decantação e coleta de amostras, o fluxo era desviado do decantador por meio de um *by-pass*. No anexo 2 estão os valores da figura 34 – tabelas 14 e 15.

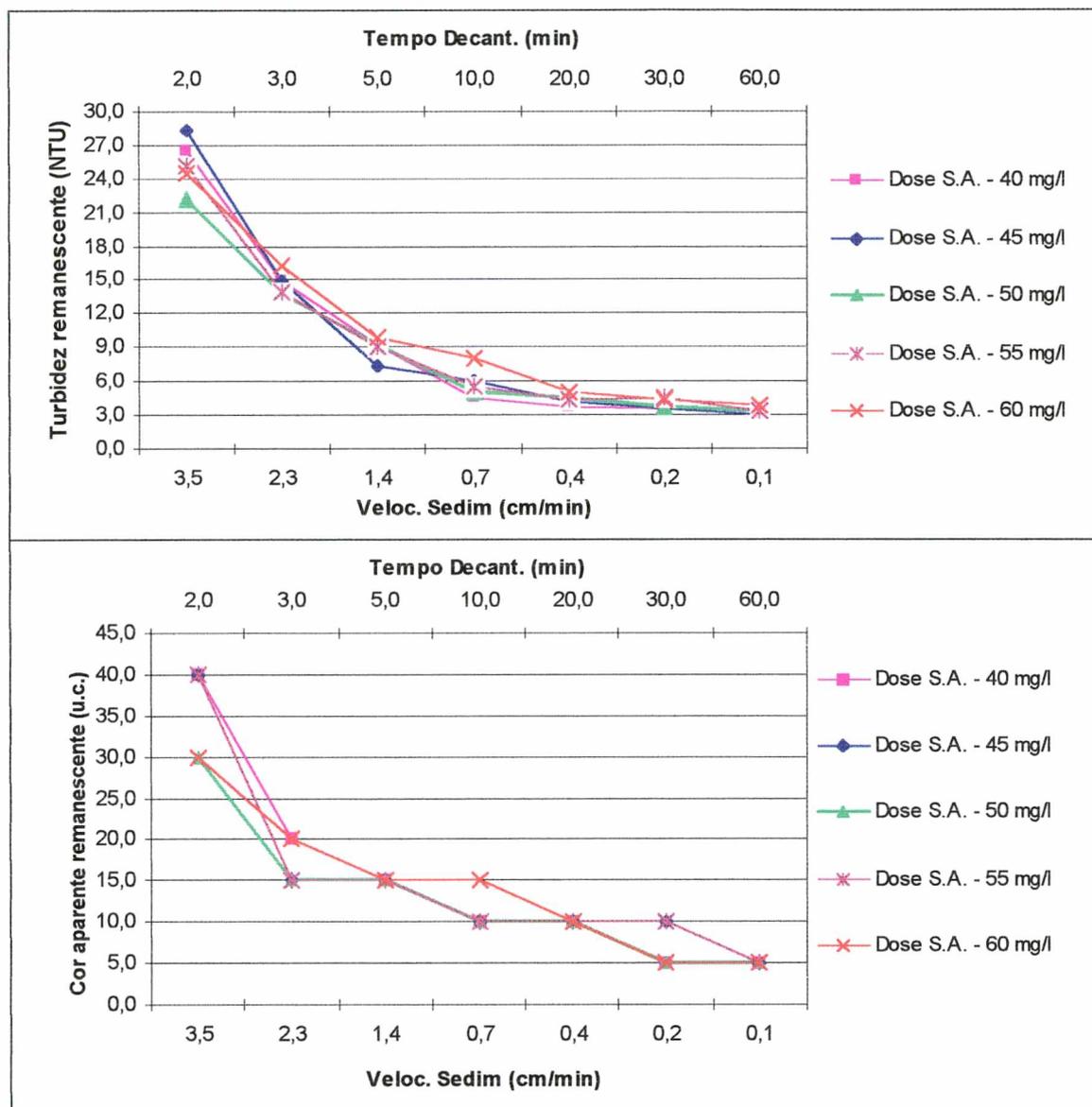


Figura 34: Análises de turbidez e cor com a variação da velocidade de sedimentação realizadas no piloto.

Os valores obtidos para o abatimento da turbidez e a redução de cor em Testes de Jarros e com o piloto podem ser comparados nos gráficos das figuras 33 e 34, mostradas anteriormente.

O comportamento das curvas tanto no Teste de Jarros como no piloto foram bastante semelhantes. Os resultados obtidos com o piloto quanto ao

abatimento da turbidez nos primeiros 20 min foram melhores, o que demonstra também maior rapidez nas respostas. Já os valores de turbidez obtidos com o Teste de Jarros, para tempos de decantação entre 20 e 60 min, alcançaram valores menores em comparação aos resultados obtidos com o piloto.

Verificou-se assim que os ensaios com o piloto proporcionam rapidez de resposta quando se quer saber a dosagem de coagulante necessária para àquela característica de água bruta.

A figura 35 apresenta a eficiência no decaimento da turbidez em relação à turbidez inicial da água bruta, fazendo um comparativo entre o tratamento em Teste de Jarros e o piloto com meio granular. Os valores de eficiência utilizados no gráfico da figura 35 encontram-se no anexo 3 - tabela 16.

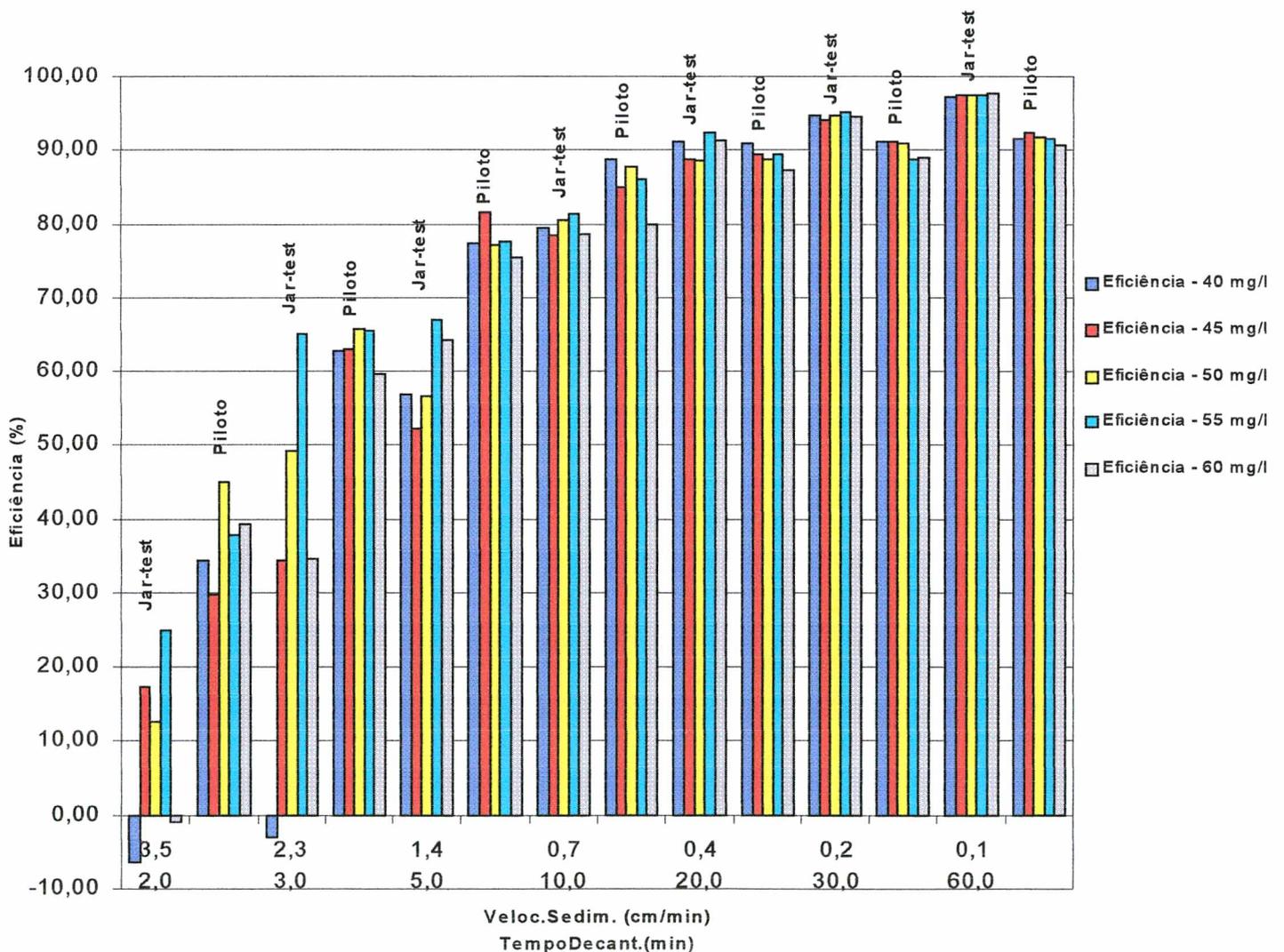


Figura 35: Eficiência no abatimento da turbidez em Teste de Jarros e o piloto granular

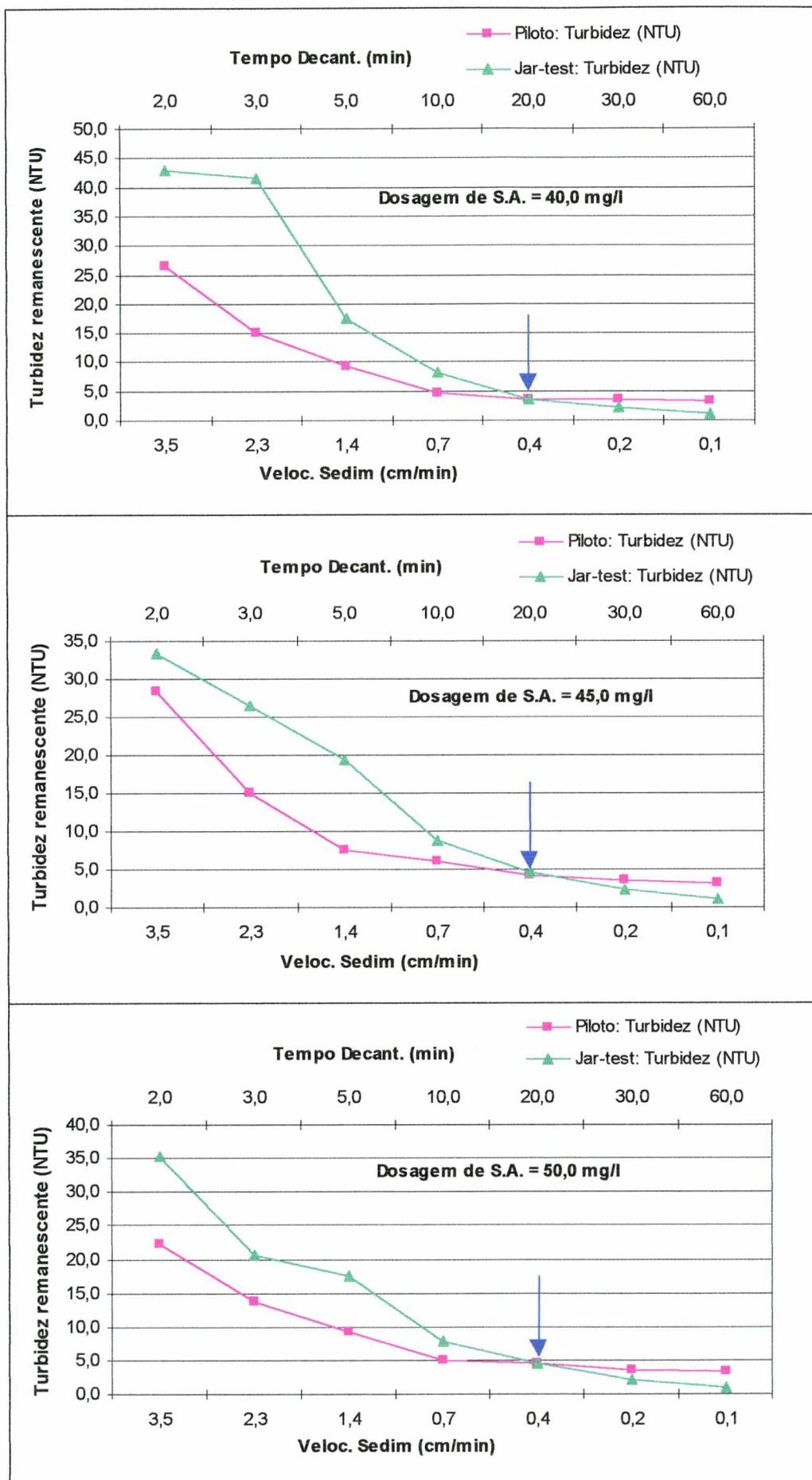
O gráfico da figura 35, mostra a porcentagem de redução da turbidez entre o Teste de Jarros e o piloto, ficando mais visível o comportamento entre os dois ensaios. Analisando-se as figuras 33 e 34, torna-se mais evidente que a redução da turbidez, até aproximadamente 20 min de decantação, é mais significativa nos ensaios com o piloto, enquanto que o Teste de Jarros possui melhor eficiência na redução de turbidez entre os tempos de decantação de 20 a 60 min.

Verifica-se ainda que os melhores resultados ocorrem com as dosagens de 50 e 55 mg/l de sulfato de alumínio para o piloto e o Teste de Jarros, respectivamente.

A fim de se analisar melhor o comportamento das curvas de turbidez e cor no Teste de Jarros e no piloto, plotou-se em um mesmo gráfico as duas curvas de turbidez ocorridas para esses dois testes, conforme a variação da dosagem de sulfato de alumínio. O mesmo procedimento foi realizado para as curvas de cor.

Os parâmetros referentes à água bruta são aqueles já citados no início do item 5.4.2.

A figura 36 reúne em um mesmo gráfico o abatimento da turbidez para o Teste de Jarros e o piloto nas dosagens de 40; 45; 50; 55 e 60 mg/l de sulfato de alumínio, já demonstrado nas figuras 33 e 34, mas de forma isolada. Os valores de turbidez comparativos entre o Teste de Jarros e piloto demonstrados nos gráficos da figura 36 encontram-se respectivamente nas tabelas 17; 18; 19; 20 e 21 do anexo 3.



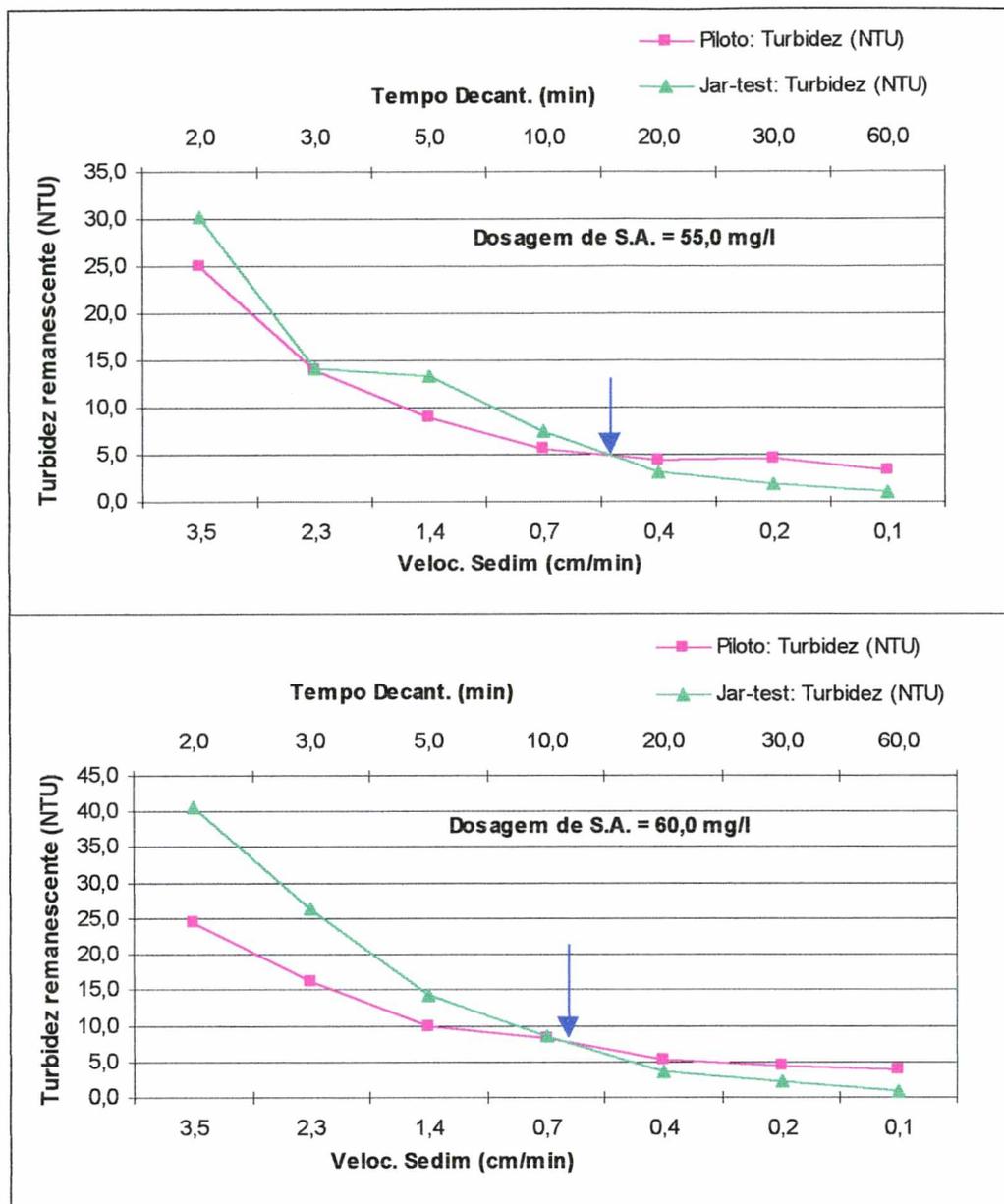


Figura 36: Redução da turbidez no piloto e no Teste de Jarros para diferentes dosagens de coagulante.

O gráficos da figura 36 demonstram o que está evidenciado na figura 35, ou seja, a turbidez reduz-se mais rapidamente nos ensaios com o piloto nos primeiros 20 min de decantação, e daí em diante há uma inversão de eficiência em favor do Teste de Jarros.

Esse comportamento pode ter explicação na formação dos flocos em cada um dos ensaios. No caso da floculação em meio granular, os flocos que se formam por entre as pequenas esferas acabam por possuir também uma conformação mais esférica, o que não ocorre no caso dos ensaios de jarros.

Essa geometria diferenciada entre os flocos influencia no momento da decantação, em que a cinética dos encontros propicia a agregação entre as partículas sedimentáveis. Flocos mais irregulares têm maior probabilidade de agregação quando entram em contato, ficando mais densos e mais fáceis de sedimentar.

Tempos de decantação maiores possibilitam um maior número de colisões entre as partículas, que, ao se agregarem, sedimentam melhor.

Os flocos gerados pelo sulfato de alumínio sedimentam, em geral, a uma velocidade entre 1,2 e 4,8 cm/min (Richter e Azevedo Netto, 1991).

As velocidades usuais de sedimentação para decantadores convencionais é da ordem de 1,2 a 4,2 cm/min e para decantadores acelerados (com placas) esse valor pode chegar a 16,8 cm/min.

A figura 37 mostra a curva de redução da turbidez relacionado à melhor dosagem de sulfato de alumínio referente ao piloto e ao Teste de Jarros (ver valores na tabela 22 do anexo 3).

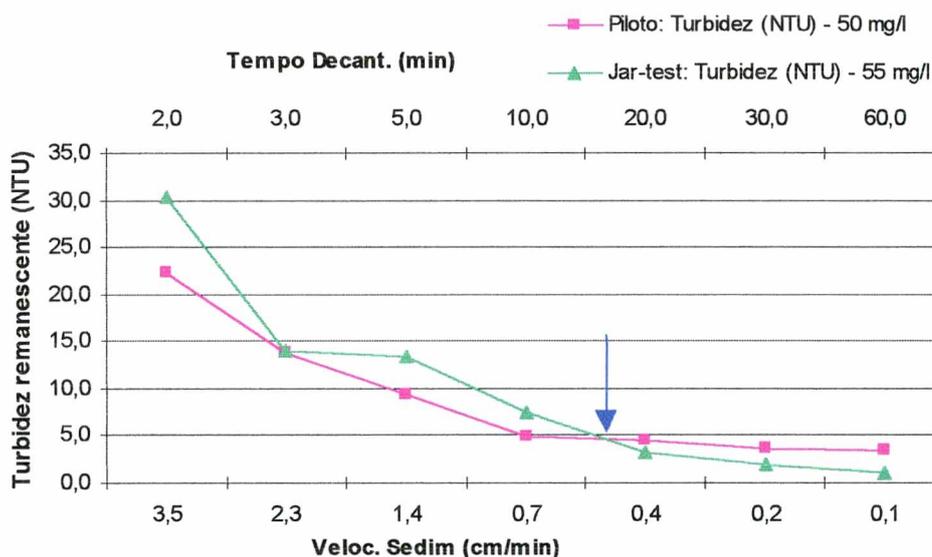
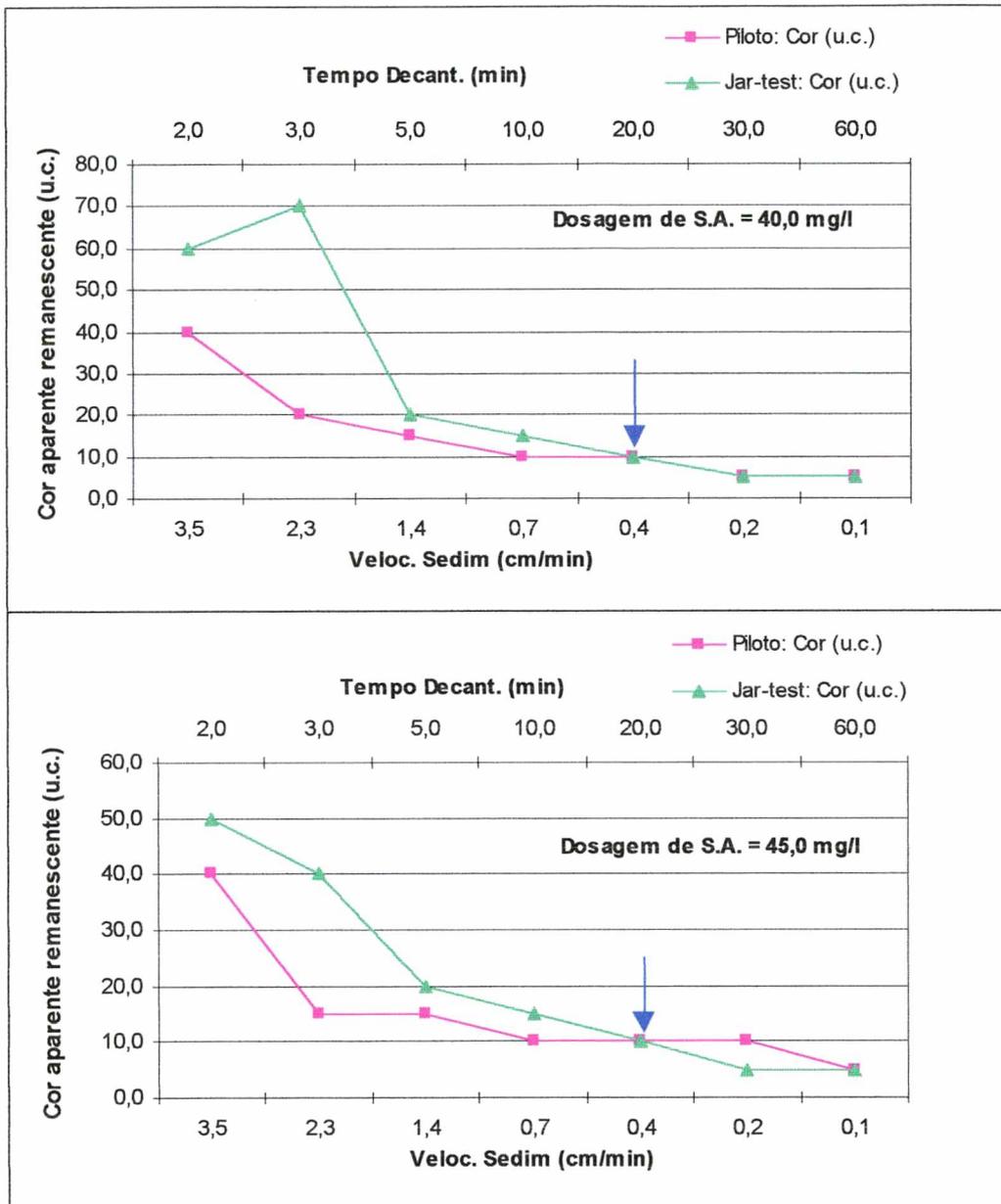


Figura 37: Turbidez de acordo com a melhor dosagem de coagulante para o piloto e o Teste de Jarros.

Essa figura evidencia o que já fora identificado nos gráficos da figura 36 com relação à turbidez em função da velocidade de sedimentação, ratificando que a dosagem de coagulante que proporciona maior eficiência na redução da turbidez é de 50 mg/l para o piloto e 55 mg/l no caso do Teste de

Jarros. A figura 38 reúne também num mesmo gráfico os resultados de redução de cor para os ensaios de jarros e o piloto (tabelas 23; 24; 25; 26 e 27 do anexo 3).



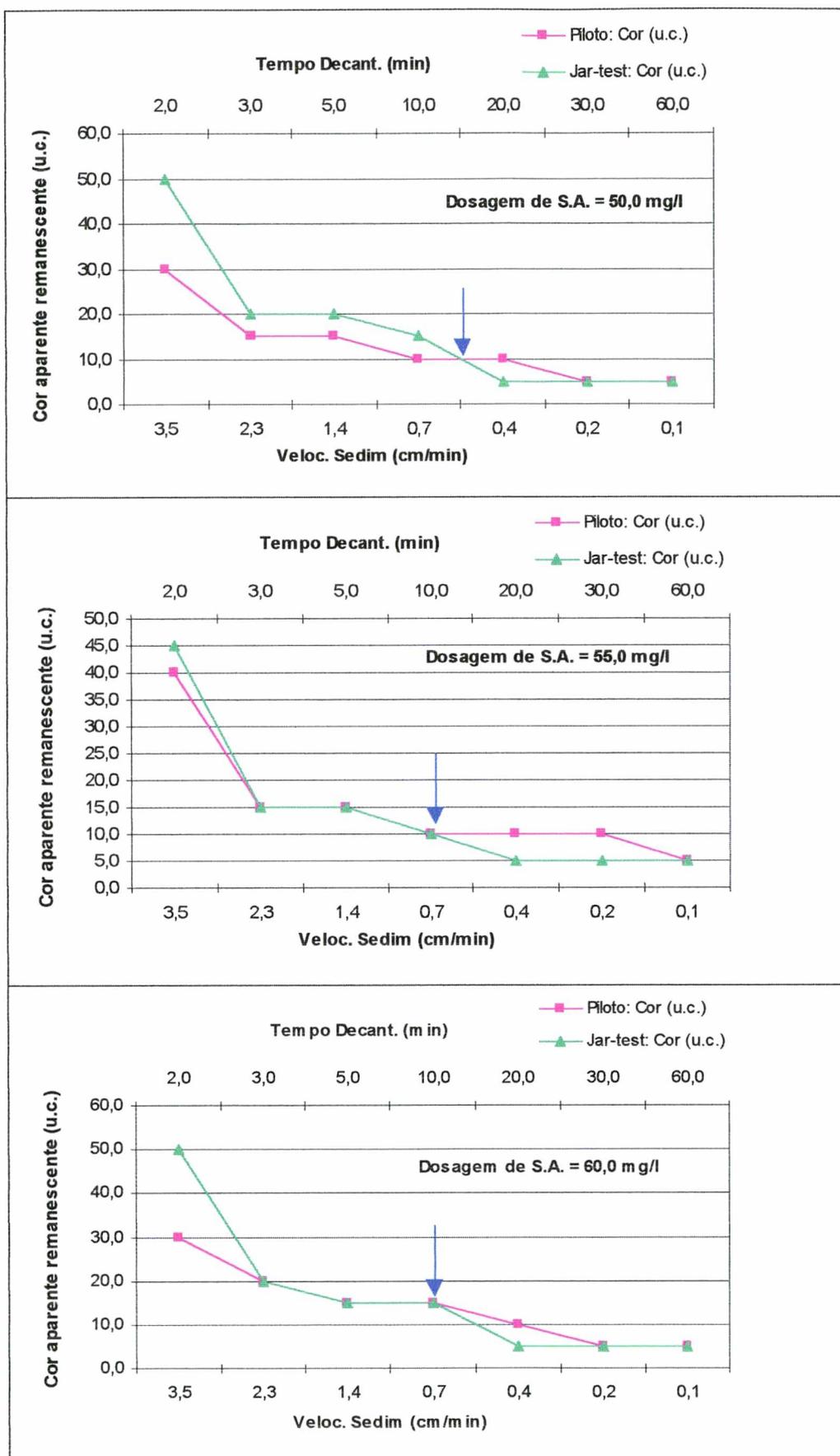


Figura 38: Redução da cor no piloto e no Teste de Jarros para diferentes dosagens de coagulante.

O desenvolvimento das curvas de abatimento da cor demonstrada na figura 38 segue o mesmo comportamento dos gráficos de turbidez.

Os flocos formados no reator granular do piloto sedimentam mais rapidamente nos primeiros minutos. A partir dos 20 min de decantação, os flocos dos ensaios de jarros foram mais significativos na redução de turbidez e cor do que os do piloto.

#### 5.4.3 Determinação da Dosagem de Cal

Em função da existência de uma faixa ideal de pH no qual ocorrem as reações de coagulação, é que foram realizados ensaios de floculação em Teste de Jarros com variação na dosagem de cal, com objetivo de verificar a faixa de pH ótimo relacionado aos melhores valores de decaimento dos parâmetros de cor e turbidez.

A figura 39 apresenta os valores de turbidez, cor e variação do pH de acordo com a variação das dosagens de cal, para uma água bruta com as seguintes características:

- a) Turbidez = 51,3 NTU;
- b) Cor = 80,0 u.c.;
- c) Alcalinidade = 18,70 mg/l  $\text{CaCO}_3$ ;
- d) pH = 7,45.

A operação do Teste de Jarros ocorreu nas seguintes condições:

- a) tempo da mistura rápida (425 rpm) = 2 min ( $G_{MR} = 1000 \text{ s}^{-1}$ );
- b) tempo da mistura lenta (40 rpm) = 20 min ( $G_{ML} = 28 \text{ s}^{-1}$ ).

Para o ensaio, adotou-se a dosagem fixa de 30 mg/l de sulfato de alumínio a uma concentração de 0,10%. A variação nas doses de cal foram feitas com solução de cal a 0,50% de concentração (tabela 29 do anexo 4).

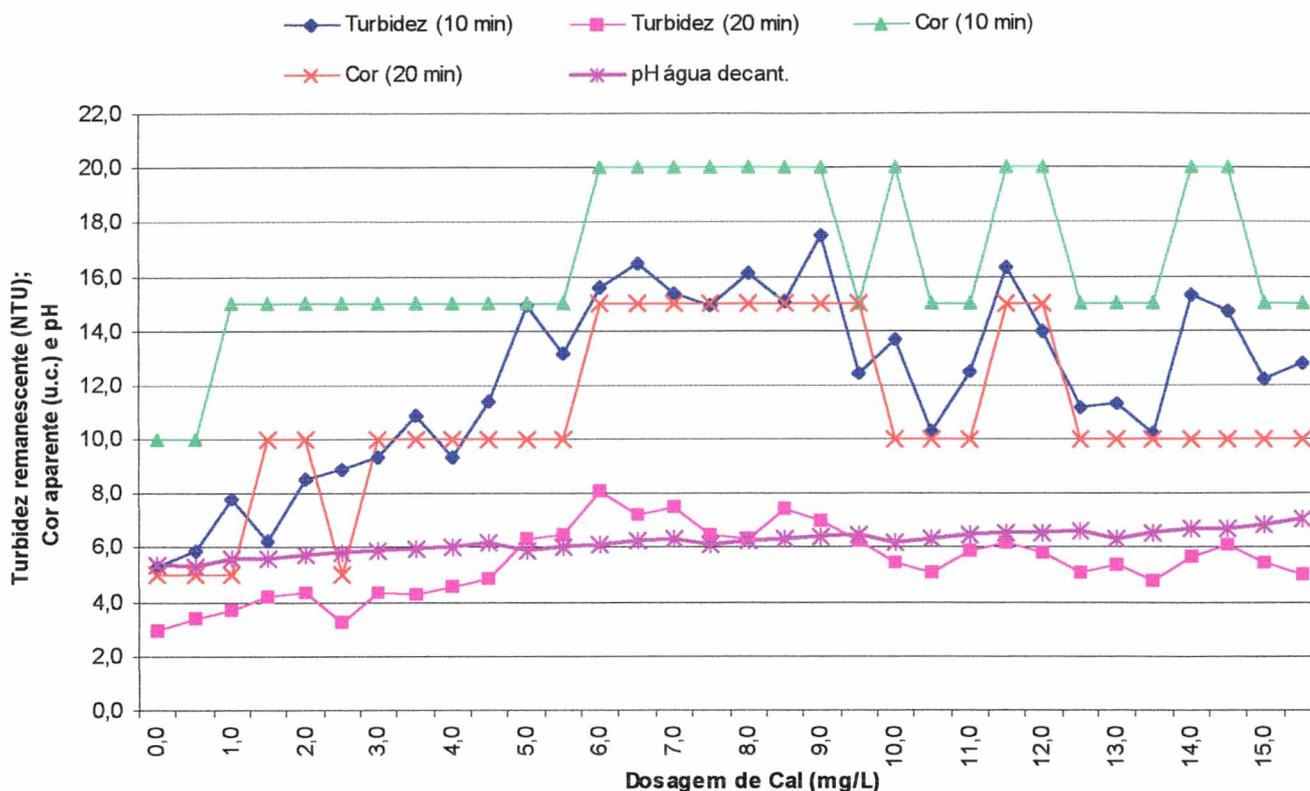


Figura 39: Valores de pH; turbidez e cor em relação à variação das dosagens de cal – Teste de Jarros.

De acordo com a figura 39, verifica-se que os resultados de turbidez e cor são melhores nas menores dosagens de cal, em que o pH da água decantada encontra-se entre 5 e 6, caracterizando o mecanismo da coagulação e reestabilização das partículas coloidais que ocorrem na primeira região do diagrama de Amirtharajah e Mills (apud Richter, 1999).

No decorrer das variações das dosagens de cal, ocorre um aumento nos valores de pH da água decantada e também dos resultados de cor e turbidez. Nessa faixa de variação, para uma dosagem fixa de 30,0 mg/l de sulfato de alumínio, os valores de pH da água decantada encontram-se entre 6 e 6,5. Com o aumento do valor de pH até 7, ocorre uma melhora nos resultados de cor e turbidez.

Segundo Di Bernardo (1993), para valores de pH entre 6 e 8 e dosagens de coagulante próximo a 30 mg/l, ocorre a formação excessiva de precipitados de hidróxido de alumínio, caracterizando o fenômeno da varredura. A coagulação realizada nesse mecanismo é a ideal quando se tem

um tratamento completo com coagulação, floculação e decantação, antes da filtração, pois os flocos formados são facilmente removidos no decantador.

Como pôde-se ver, o aumento da dosagem de cal não influenciou significativamente a eficiência do abatimento dos valores de cor e turbidez. Os melhores resultados ocorreram para valores de pH entre 5 e 6, nos quais a dosagem de cal era pequena.

Nos gráficos das figuras 40 e 41 a seguir, são realizados ensaios de Jarros com a variação do coagulante, fixando-se a dosagem de cal em 4 mg/l, analisando-se novamente a eficiência na redução dos parâmetros de cor e turbidez. Foram obtidos também valores de pH da água coagulada e decantada.

Os ensaios foram realizados com água bruta nas seguintes características:

- a) turbidez = 52,8 NTU;
- b) cor = 80,0 u.c.;
- c) alcalinidade = 18,80 mg/l  $\text{CaCO}_3$ ;
- d) pH = 7,17.

O Teste de Jarros operou nas seguintes condições:

- a) tempo de mistura rápida (425 rpm) = 2 min ( $G_{MR} = 1000 \text{ s}^{-1}$ );
- b) tempo de mistura lenta (40 rpm) = 20 min ( $G_{ML} = 28 \text{ s}^{-1}$ ).

A concentração da solução de sulfato de alumínio foi preparada à 0,10% e a concentração da solução de cal à 0,50%. Ver valores utilizados para a construção dos gráficos 40 e 41 na tabela 30 do anexo 4.

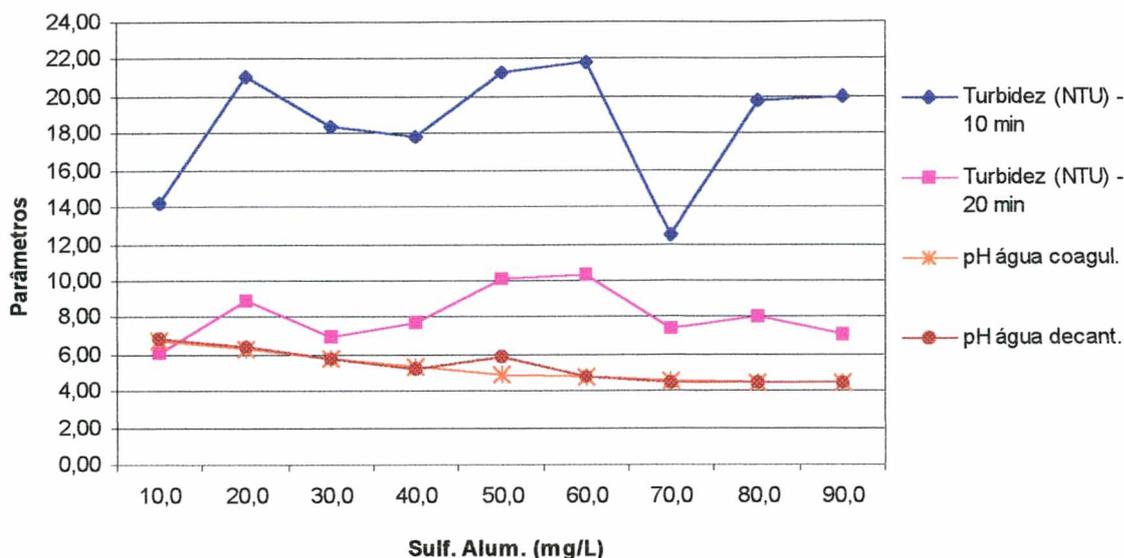


Figura 40: Turbidez e pH com variação da dosagem de coagulante e dosagem fixa de 4 mg/l de cal.

Conforme mostra a figura 40, os resultados de turbidez não melhoraram com o aumento da dosagem de coagulante, o que demonstra a baixa eficiência desse ensaio, mesmo propiciando o aumento do pH da água coagulada com a adição de solução de cal.

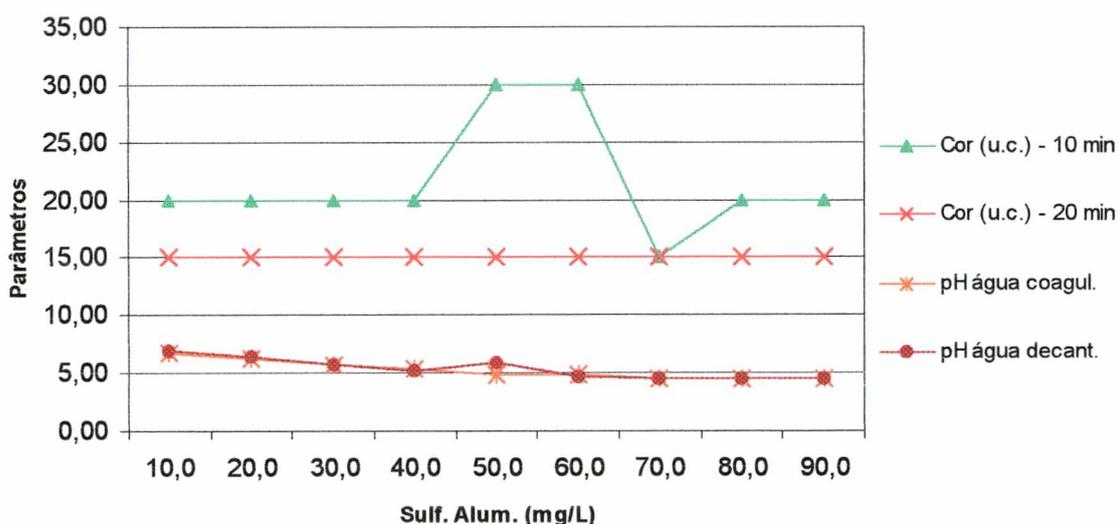


Figura 41: Cor e pH com variação da dosagem de coagulante e dosagem fixa de 4 mg/l de cal.

Quanto aos resultados de cor, mostrados na figura 41, verifica-se que não há alteração dos valores determinados para o tempo de 20 min,

evidenciando a pouca influência causada pela correção do pH da água bruta pela adição de solução de cal.

Como não foi possível aplicar diferentes dosagens de cal durante os ensaios em contínuo (floculação granular), realizou-se alguns ensaios com o piloto verificando-se a turbidez e cor de acordo com o tempo de operação desse. Adotou-se as mesmas doses fixas de cal (4,0 mg/l) e de sulfato de alumínio (30,0 mg/l), utilizadas anteriormente, no item 5.4.3, para os Testes de Jarros.

A tabela 4 mostra as condições de operação do piloto de acordo com cada figura.

Tabela 4

Parâmetros de operação do piloto para as figuras 42, 43 e 44

Parâmetros	Figura 42		Figura 43		Figura 44	
	50mm	60mm	50mm	60mm	50mm	60mm
Diâmetro das Colunas	50mm	60mm	50mm	60mm	50mm	60mm
T. esc. (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> xdia)	2200	1528	1980	1375	1613	1120
Expansão (%)	60	28	50	21	30	10
Grad. Veloc. (s <sup>-1</sup> )	126,69	123,70	123,78	124,44	128,18	126,33
Veloc. aprox. (cm/min)	152,79	106,10	137,51	95,49	112,05	77,81

As características da água bruta para esses ensaios foram as seguintes:

- a) turbidez = 57,8 NTU;
- b) cor = 80,0 u.c.;
- c) alcalinidade (s/cal) = 17,70 mg/l CaCO<sub>3</sub>;
- d) pH (s/cal) = 7,18;
- e) pH (c/cal) = 8,13.

Os valores utilizados para a construção dos gráficos das figuras 42, 43 e 44 constam das tabelas 31; 32 e 33 respectivamente, referente ao anexo 4.

evidenciando a pouca influência causada pela correção do pH da água bruta pela adição de solução de cal.

Como não foi possível aplicar diferentes dosagens de cal durante os ensaios em contínuo (floculação granular), realizou-se alguns ensaios com o piloto verificando-se a turbidez e cor de acordo com o tempo de operação desse. Adotou-se as mesmas doses fixas de cal (4,0 mg/l) e de sulfato de alumínio (30,0 mg/l), utilizadas anteriormente, no item 5.4.3, para os Testes de Jarros.

A tabela 4 mostra as condições de operação do piloto de acordo com cada figura.

Tabela 4

Parâmetros de operação do piloto para as figuras 42, 43 e 44

Parâmetros	Figura 42		Figura 43		Figura 44	
	50mm	60mm	50mm	60mm	50mm	60mm
Diâmetro das Colunas	50mm	60mm	50mm	60mm	50mm	60mm
T. esc. (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> xdia)	2200	1528	1980	1375	1613	1120
Expansão (%)	60	28	50	21	30	10
Grad. Veloc. (s <sup>-1</sup> )	126,69	123,70	123,78	124,44	128,18	126,33
Veloc. aprox. (cm/min)	152,79	106,10	137,51	95,49	112,05	77,81

As características da água bruta para esses ensaios foram as seguintes:

- a) turbidez = 57,8 NTU;
- b) cor = 80,0 u.c.;
- c) alcalinidade (s/cal) = 17,70 mg/l CaCO<sub>3</sub>;
- d) pH (s/cal) = 7,18;
- e) pH (c/cal) = 8,13.

Os valores utilizados para a construção dos gráficos das figuras 42, 43 e 44 constam das tabelas 31; 32 e 33 respectivamente, referente ao anexo 4.

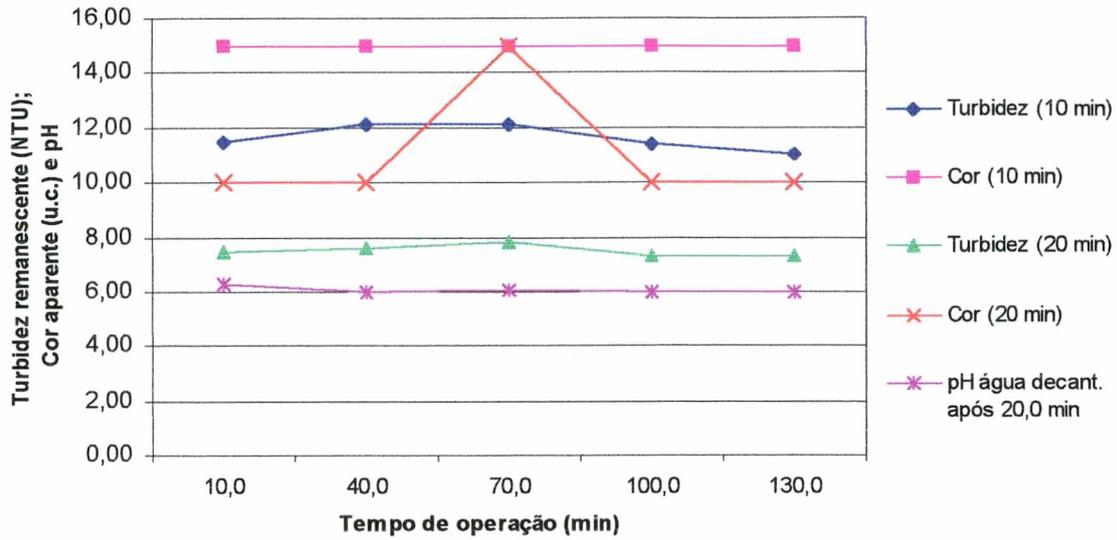


Figura 42: Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto em meio granular -  $Q = 180,0$  l/h.

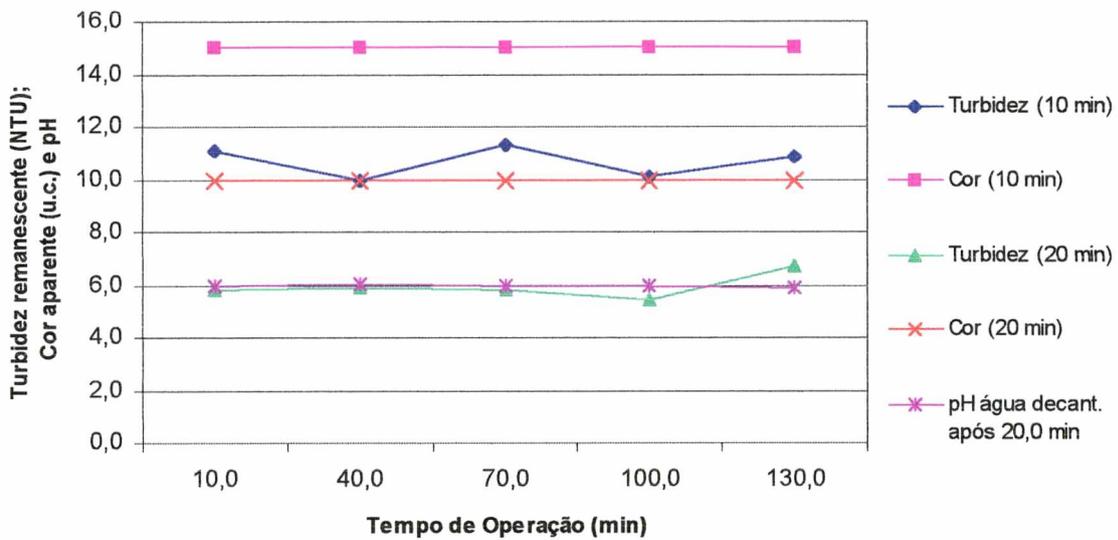


Figura 43: Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto em meio granular -  $Q = 162,0$  l/h.

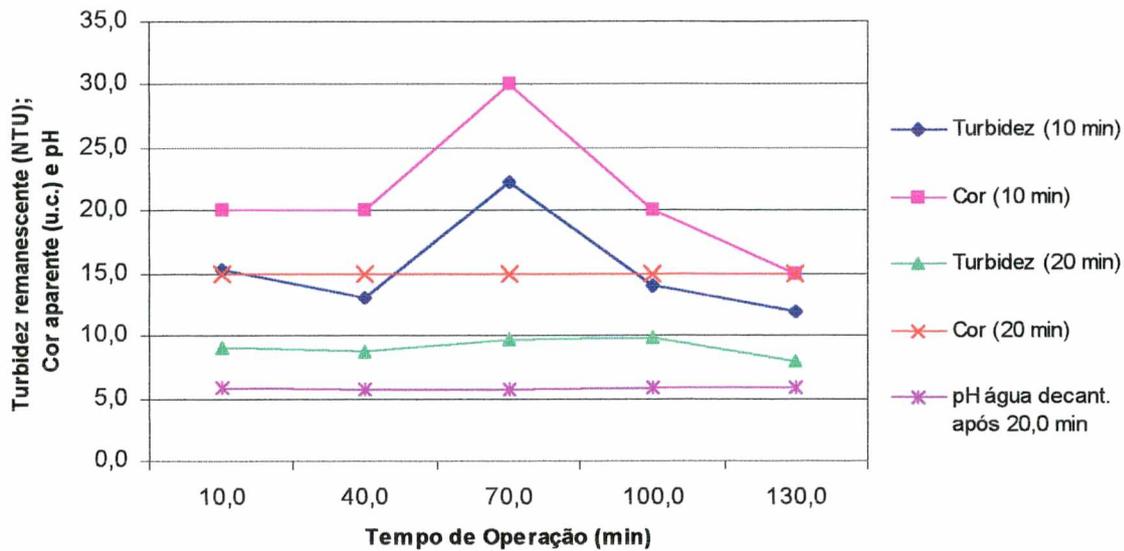


Figura 44: Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto em meio granular -  $Q = 132,0$  l/h.

As figuras 42; 43 e 44 mostram os resultados de turbidez e cor para nos tempos de decantação de 10 e 20 minutos de acordo com o tempo de operação do piloto. Nesses ensaios o piloto trabalhou em diferentes condições de taxa de escoamento, gradiente de velocidade e expansão.

Observa-se que os valores resultantes desse ensaio, mesmo com o pH mais elevado devido à dosagem da cal, ficaram acima de 5,0 NTU para a turbidez e acima de 10 u.c. para a cor, não havendo, portanto, uma influência significativa da dosagem da cal durante o decaimento desses parâmetros.

O mesmo pode-se observar para os Testes de Jarros realizados anteriormente, ratificando a pouca influência da cal em favor da melhoria no abatimento dos parâmetros de turbidez e cor.

## 5.5 PROJETO DO EQUIPAMENTO DE TESTES DE FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR EXPANDIDO

Com os resultados obtidos nesse estudo, a partir da comparação entre equipamentos de floculação, apresenta-se a seguir, alguns dados e parâmetros

importantes para a concepção de projeto do equipamento de testes de floculação em meio granular expandido.

Como proposta de elaboração desse equipamento, sugere-se a utilização por uma ou duas colunas de floculação apenas como forma de diminuir a altura do equipamento, podendo o mesmo ser instalado em locais com pé-direito mais baixo:

Dimensões do equipamento com uma coluna de floculação:

- altura da coluna = 1,5 m (mínimo);
- diâmetro da coluna = 60 – 100 mm;
- altura do leito granular fixo = 60 – 80 cm.
- diâmetro dos grãos de PVC = 5,9 mm ou menor.

Dimensões do equipamento com duas colunas em série:

- altura da coluna = 1,0 m (cada);
- diâmetro da coluna = 60 – 80 mm (col. 1) e 60 – 100 mm (col. 2);
- altura do leito granular fixo = 40 – 50 cm;
- diâmetro dos grãos de PVC = 5,9 mm ou menor

Parâmetros de projeto:

- vazão de funcionamento: 40 – 400 l/h;
- velocidade de aproximação: 34,0 – 236,0 cm/min;
- taxa de escoamento: 489 – 3395 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>xdia.

A figura 45 apresenta um lay-out para o projeto básico do equipamento de testes de floculação em meio granular expandido. A utilização de uma ou duas colunas de floculação tem como única função a opção de alteração na dimensão da altura do equipamento, facilitando sua instalação em locais de pouca altura. Todos os parâmetros de projeto permanecem os mesmos.

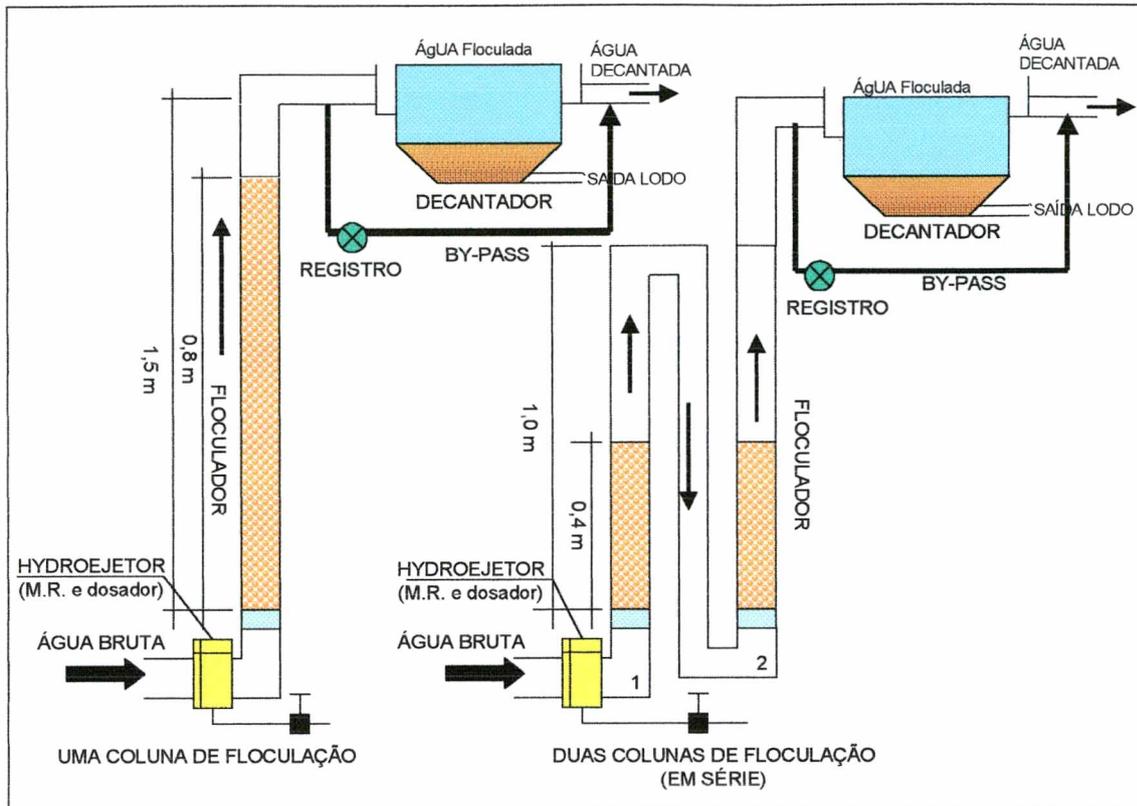


Figura 45: Projeto básico do Equipamento de Testes de Floculação em Meio Granular Expandido.

Nesse estudo fez-se um comparativo entre o Teste de Jarros e o piloto de floculação em meio granular, mostrando a possibilidade desse equipamento operar em contínuo com a ETA. Desse modo, torna-se viável a concepção de um sistema de automação que propicie maior agilidade e rapidez na realização dos ensaios. O by-pass apresentado na figura 45 propicia a simulação em contínuo de diferentes tempos de decantação para uma mesma vazão.

A figura 46 se propõe a dar uma idéia da concepção de um sistema de automação para o equipamento de testes de floculação em meio granular expandido e que funcione em contínuo com a estação de tratamento de água bruta.

Cabe ressaltar que a escolha pela utilização de uma ou duas colunas de floculação tem por objetivo único e exclusivo a diminuição da altura do equipamento de teste de floculação.

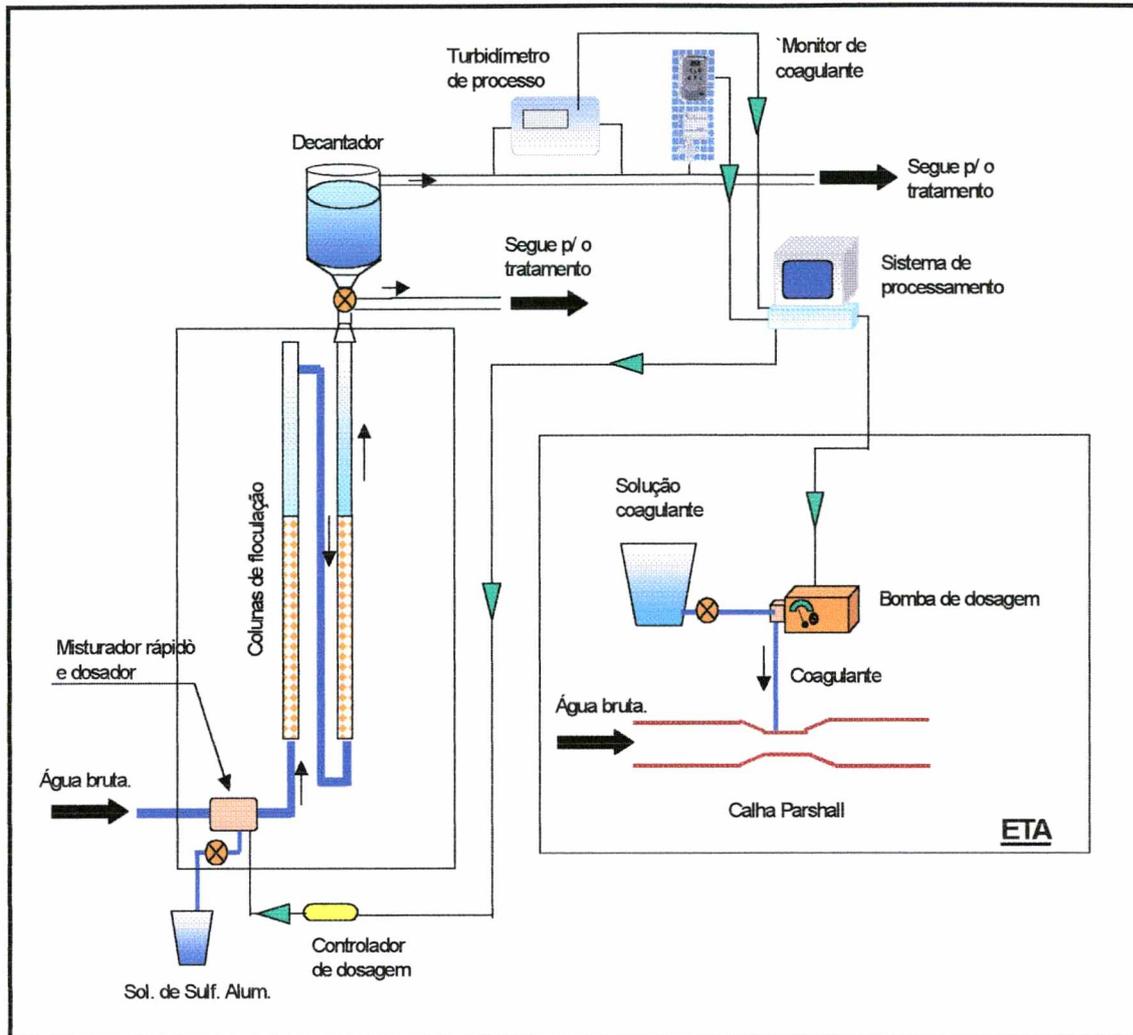


Figura 46: Concepção geral de automação para o Equipamento de Testes de Floculação em Meio Granular Expandido.

O que se propõe na figura 46 é dar uma idéia da possibilidade de montagem de um projeto que propicie melhor controle na dosagem de coagulante na fase inicial do tratamento de água. Com a possibilidade da operação em contínuo por parte das colunas de floculação torna-se viável a utilização de equipamentos de automação que além de possibilitar o controle à distância nessa fase do tratamento aumentará a eficiência e a qualidade do produto final de uma estação de tratamento de água.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram a grande possibilidade de se determinar a dosagem ótima de coagulante através de uma nova técnica de floculação em meio granular expandido. Essa fase é de suma importância no processo de coagulação-floculação em uma estação de tratamento de água.

No desenvolvimento dos trabalhos, obteve-se um comparativo dos resultados de floculação entre o método atual de determinação, conhecido como Jar-Test, e a floculação em meio granular expandido, através de um piloto montado em laboratório.

Constatou-se que os valores dos parâmetros colhidos nos ensaios comparativos entre o Teste de Jarros e o piloto foram bastante próximos, atestando a confiabilidade dos resultados obtidos.

A rapidez de resposta dos resultados, possibilitados pelo curto tempo de floculação ao longo dos reatores, em torno de 1 minuto ao todo, torna esse tipo de teste vantajoso, o que, aliado à facilidade de operação, possibilita um maior número de dados colhidos ao longo do dia.

A operação do piloto em contínuo com a ETA possibilita a automação de um sistema de dosagem de coagulante.

Embora com valores um pouco acima do desejado, a dosagem ótima de coagulante determinada com o piloto (50 mg/l) e o Teste de Jarros (55 mg/l) ficaram bem próximos, para a mesma água bruta ensaiada, demonstrando a confiabilidade do processo.

Apesar dos valores finais de turbidez após floculação e decantação, determinados pelo piloto, ficarem acima dos obtidos com Teste de Jarros, o tempo de floculação nos reatores granulares é bastante reduzido, da ordem de 1 minuto (considerando-se as duas colunas de floculação), enquanto no Teste de Jarros é de 20 a 40 minutos, simulando o tempo usual em estações de tratamento de água.

Ainda que com resultados finais altos, as curvas de abatimento dos parâmetros de turbidez e cor comportaram-se de maneira uniforme, não apresentando oscilações ao longo das variações das doses de sulfato de alumínio.

Observou-se, além disso, que o piloto apresenta um abatimento de turbidez e cor maior nos primeiros instantes de decantação, até aproximadamente à velocidade de sedimentação de 0,4 cm/min, a partir do qual permanece quase que constante. Nesse ponto, correspondente aos 20 minutos de decantação, ocorre o cruzamento das curvas geradas pelo piloto e pelo Teste de Jarros, quando, então, os valores de turbidez e cor obtidos nos ensaios de jarros passam a ser menores até velocidades de sedimentação muito pequenas.

Nos testes realizados, não foi levado em conta outros parâmetros importantes para uma boa coagulação e floculação como, melhor gradiente de velocidade - G na mistura rápida, melhor gradiente de velocidade - G na floculação, assim como detalhes do decantador em contínuo. Esses parâmetros, sem dúvida, influenciaram para que os resultados dos residuais de turbidez e cor não fossem tão baixos quanto o esperado, mas, o suficiente para comprovar a possibilidade de substituição do equipamento de Teste de Jarros pelo equipamento de Teste de Floculação em Meio Granular Expandido.

A montagem do piloto, devido à simplicidade dos equipamentos, é extremamente simples. A elaboração das colunas de vidro e a obtenção do material granular, como também o restante das peças e conexões necessárias à montagem do piloto foram adquiridas em Florianópolis. Para a elaboração e construção desse equipamento para testes de floculação em meio granular expandido o custo estimado é de R\$ 1.500,00.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Com base nos estudos realizados, recomenda-se:

1. Melhorar a entrada e saída do efluente nos reatores granulares, diminuindo assim a perda de carga localizada nesse locais.
2. Adaptar um novo suporte para as pequenas esferas que formam o leito granular, visto que, o utilizado neste trabalho possuía orifícios muito pequenos para a passagem do efluente coagulado, aumentando a perda de carga e propiciando a quebra dos flocos formados durante a floculação, principalmente na entrada da segunda coluna ( $d=60$  mm).
3. Aumentar o tempo de floculação para resultar na formação de flocos de maior diâmetro, obtendo melhores resultados de turbidez e cor a velocidades de sedimentação maiores.
4. Utilizar diferentes tipos de água bruta na operação do piloto para verificar seu comportamento.
5. O hidrojetor utilizado como dosador da solução de sulfato de alumínio teve boa eficiência, no entanto, sua escala de vazão não era propícia para pequenas vazões, dificultando a leitura das dosagens. Uma escala de vazão com valores intermediários da ordem de 0,25 l/h aumentaria a precisão nas dosagens de coagulante.
6. Esse estudo procurou diminuir a altura do equipamento utilizando-se duas colunas, apenas para facilitar sua instalação em locais com pouca altura de pé-direito, porém, recomendamos utilizar apenas uma coluna com o dobro da altura do meio granular fixo, evitando a quebra de flocos na passagem de uma coluna à outra.

## 8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB-592**: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1989.

AYOUB, G. M. A model for flocculation in a gravel reactor: development and assessment. **Aqua**, v. 45, n. 2, p. 76-83, 1996.

AZEVEDO NETTO, J. M. et. al. **Manual de hidráulica**. 8 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1998.

AZEVEDO NETTO, J. M. et. al. **Técnica de abastecimento e tratamento de água**. 2 ed. São Paulo: CETESB, 1977. v.2.

AZEVEDO NETTO, J. M.; CAMPOS BOTELHO, M. H. **Manual de saneamento de cidades e edificações**. São Paulo: PINI, 1991.

BACHE, D. H. et. al. Floc character: measurement and role in optimum dosing. **Aqua**, v. 44, n. 2, p. 83-92, 1995.

BAUMANN, E. R. et. al. **Water quality and treatment – A handbook of Public Water Supplies**. 3 ed. USA: The American Water Works Association, Inc., Editora McGraw-Hill, 1971.

CUBAS, A. L. V. **Floculação em meio granular expandido**. Florianópolis, 1999. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

DALSASSO, R. L. **Pré-ozonização de águas contendo agrotóxico, seguida de filtração direta**. Florianópolis, 1999. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

DENTEL, S. K.; GOSSETT, J. M. Mechanisms of coagulation with aluminum salts. **Journal of the American Water Works Association**, v. 80, n. 4, p. 187-198, abril 1988.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993. v. 1 e 2.

DI BERNARDO, L.; MOREIRA, A. M. R.; PÁDUA, V. L. **Metodologia para realização de ensaios de floculação em reatores estáticos**. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26., 1998, Peru.

FAIR, G. M.; GEYER, J. C.; OKUN, D. A. **Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales**. México: Ed. Limusa S.A., 1973. v. 2.

- FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário básico da língua portuguesa – Folha/Aurélio**. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira S/A, 1995. Fascículos semanais encartados na Folha de S. Paulo.
- GLEICK, P. H. *The world's water 1998-1999*. **Island Press**, Washington, DC. Disponível em: <<http://www.worldwater.org>> Acesso em: 16 outubro 2001.
- IVES, K. J.; HOYER, O. Flow-through tests for the design of a new flocculation system. **Aqua**, v. 44, n. 4, p. 189-195, 1995.
- JABBOURI, A. et. al. Flocculation en lit fluidise. **Water Research**, v. 24, n. 3, 361-366, 1990.
- JABBOURI, A. Energetique de la flocculation et flocculateurs fluidises. **Thèse, Univ. des Sciences et Tech. du Languedoc**, 1988, Montpellier.
- JANSSENS, J. G.; BUEKENS, A. Theoretical analysis and practical application of kinetic model of flocculation in the interpretation of jar-tests. **Aqua**, n. 2, p. 91-97, 1987.
- KAWAMURA, S. Optimisation of basic water-treatment processes – design and operation: coagulation and flocculation. **Aqua**, v. 45, n. 1, p. 35-47, 1996.
- KONDER, R. W. **Longman english dictionary for portuguese speakers**. 1 ed. São Paulo: Ed. Ao Livro Técnico, 1995.
- KRASNER, S. W ; AMY, G. Jar-test evaluations of enhanced coagulation. **Journal of the American Water Works Association**, v. 87, n 10, p. 93-107, outubro, 1995.
- LEME, F. P. **Engenharia do saneamento ambiental**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1984.
- LIMA, A. F. **Problemas de engenharia sanitária**. 2 ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 1996.
- NEVES, E. T. **Curso de hidráulica**. 6 ed. Porto Alegre: Editora Globo S. A., 1979.
- NORMALIZAÇÃO TÉCNICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL. **NT-07**: análises físico-químicas de água. CETESB, 1978.
- O'NEIL, W. K. **Otimização do tratamento de água utilizando estações piloto: estudos de caso em São Paulo – Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 20., [1999], p. 1198-1207.
- OPERAÇÃO e Manutenção de E.T.A. São Paulo: Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas - CETESB, 1973. v. 1.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Física 1**. 4ª ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos S.A., 1983.

RICHTER, C. A. **Coagulación y floculación**. 1999, Peru: HYTSA Estudios y Proyectos S.A. – ENE-I Ingeniería S.R.L.

RICHTER, C.A. **Fundamentos Teóricos da Floculação em Meio Granular**. São Paulo, 1981.

RICHTER, C.A. e AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água. Tecnologia atualizada**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1991.

SCHULZ, C. R. **Surface water treatment for communities in developing countries**. USA, 1984.

SENS, M. L. **Filière de potabilisation d'eau – Cas d'une station compacte mobile**. França, 1991. Tese da Universidade de Rennes I.

SENS, M. L. **Floculação em meio granular fixo e expandido**. Florianópolis, 1997. 67 f. (Concurso para professor titular em tratamento de água) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

SENS, M.L.; MARTIN, G. Flocculation en lit garni de billes sphériques 10 mm de diamètre. **Aqua**, v 41, n. 6, p. 340-344, 1992.

SOBRINHO, J. A. H.; THIEM, L. T.; ALKHATIB, E. A. Optimizing submerged jet flocculator performance. **Journal of the American Water Works Association**, v. 88, p. 81-92, agosto, 1996.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 3 ed. Belo Horizonte: Imprimatur, 1997.

## 9 ANEXOS

## ANEXO 1: TABELAS DE DADOS DE TURBIDEZ E COR DOS TESTES DE JARROS

### 1.1- Parâmetros: turbidez e cor X dose de sulf. alum.

Sol. de Sulf. de Alum.:	0,1%	Turb.água bruta:	44,0 NTU
Mistura rápida =	425 rpm (1000 s <sup>-1</sup> )	Alcalinidade =	8,7 mg/l de CaCO <sub>3</sub>
Mistura lenta =	40 rpm (28 s <sup>-1</sup> )	pH =	7,4
Tempo mist. rápida =	2,0 min	Cor =	80,0 u.c.
Tempo mist. lenta =	20,0 min		
Tempo de decant. =	4,0 min		

Tabela 5

Parâmetros de turbidez e cor com variação da dosagem de sulfato de alumínio.

Jar-test	Tempo de decantação Td = 4,0 min									
	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	
S.A. (mg/l) - 0,1%										
Turbidez (NTU)	44,9	36,0	25,0	19,4	14,0	18,5	20,5	15,0	20,0	
Cor (u.c)	100,0	60,0	40,0	20,0	10,0	20,0	20,0	10,0	20,0	

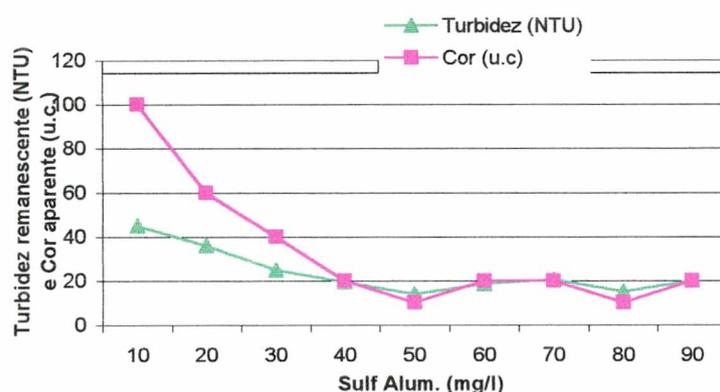


Figura 47: Turbidez e cor para o Teste de Jarros (Td = 4 min).

### 1.2- Parâmetros: turbidez e cor X dose de sulf. Alum.

Sol. de Sulf. de Alum.:	0,1%	Turb.água bruta:	56,7 NTU
Mistura rápida =	425 rpm 1000s <sup>-1</sup>	Alcalinidade =	17,1 mg/l de CaCO <sub>3</sub>
Mistura lenta =	40 rpm 28s <sup>-1</sup>	pH =	7,16
Tempo mist. rápida =	2,0 min	Cor =	80,0 u.c.
Tempo mist. lenta =	20,0 min		
Tempo de decant. =	3,0 e 5,0 min		

Tabela 6

Parâmetros de turbidez e cor para determinação da melhor dosagem de S.A.

Jar-test	Tempo de decantação Td = 3,0 e 5,0 min.							
	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	
S.A. (mg/l) - 0,1%								
Turb. (NTU) - Td=3 min	51,2	52,2	23,8	14,8	18,0	23,5	21,4	
Turb. (NTU) - Td=5 min	33,6	29,1	16,8	12,1	12,0	10,6	16,4	
Cor (u.c) - Td=3 min	75,0	80,0	30,0	20,0	20,0	25,0	20,0	
Cor (u.c) - Td=5 min	45,0	30,0	20,0	15,0	15,0	15,0	20,0	

### 1.3- Parâmetros: turbidez e cor X dose de sulf. Alum.

Sol. de Sulf. de Alum.:	0,1%	Turb.água brut:	40,3	NTU
Mistura rápida =	25 rpm = 1000s <sup>-1</sup>	Alcalinidade =	16,7	mg/l de CaCO <sub>3</sub>
Mistura lenta =	40 rpm = 28s <sup>-1</sup>	pH =	7,0	
Tempo mist. rápida =	2,0 min	Cor =	60,0	u.c.
Tempo mist. lenta =	20,0 min			
Dist. da superf.d'água ao pto de coleta no jar-test =			7,0	cm

Tabela 7

Valores de turbidez segundo a velocidade de sedimentação (melhores doses).

T. decantação (min)	2,0	3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	60,0
Veloc. Sed. (cm/min)	3,5	2,3	1,4	0,7	0,4	0,2	0,1
Dose S.A. - 40 mg/l	42,90	41,50	17,40	8,24	3,55	2,14	1,08
Dose S.A. - 45 mg/l	33,30	26,40	19,30	8,66	4,52	2,38	1,03
Dose S.A. - 50 mg/l	35,20	20,50	17,50	7,88	4,59	2,15	0,99
Dose S.A. - 55 mg/l	30,30	14,10	13,30	7,47	3,10	1,97	1,01
Dose S.A. - 60 mg/l	40,70	26,30	14,40	8,60	3,51	2,23	0,95

Tabela 8

Valores de cor segundo a velocidade de sedimentação (melhores doses).

T. decantação (min)	2,0	3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	60,0
Veloc. Sed. (cm/min)	3,5	2,3	1,4	0,7	0,4	0,2	0,1
Dose S.A. - 40 mg/l	60,00	70,00	20,00	15,00	10,00	5,00	5,00
Dose S.A. - 45 mg/l	50,00	40,00	20,00	15,00	10,00	5,00	5,00
Dose S.A. - 50 mg/l	50,00	20,00	20,00	15,00	5,00	5,00	5,00
Dose S.A. - 55 mg/l	45,00	15,00	15,00	10,00	5,00	5,00	5,00
Dose S.A. - 60 mg/l	50,00	20,00	15,00	15,00	5,00	5,00	5,00

## ANEXO 2: TABELAS DE DADOS DE TURBIDEZ E COR DOS ENSAIOS COM O PILOTO

### 2.1- Parâmetros: turbidez e cor X dose sulf. Alum.

Qtrab. =	3,0	l/min	Turb.água bruta =	45,0	NTU
Exp. col. 50mm =	62	%	Cor =	80	u.c.
Exp. col. 60mm =	30	%	pH =	6,96	
Taxa =	1528	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> xdia			

Tabela 9

Valores referente a melhor dosagem de sulfato de alumínio.

PILOTO	Tempo de decantação Td = 3,0 e 5,0 min.						
	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
S.A. (mg/l) - 0,1%							
Turb. (NTU)-Td=3 min	52,70	27,30	21,40	18,20	17,90	18,40	19,10
Turb. (NTU)-Td=5 min	50,80	16,50	12,60	10,20	10,30	9,65	11,00
Cor (u.c) - Td=3 min	100,00	40,00	30,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Cor (u.c) - Td=5 min	80,00	20,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00

Tabela 10

Parâmetros de turbidez e cor com variação da dosagem de sulfato de alumínio.

Piloto operando com uma coluna de floculação.

PILOTO	Tempo de decantação Td = 4,0 min									
	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	
S.A. (mg/l) - 0,1%										
Turbidez (NTU)	37,60	34,40	31,20	32,50	29,20	32,50	36,70	34,50	33,00	
Cor (u.c)	80,00	70,00	50,00	45,00	40,00	45,00	65,00	50,00	40,00	

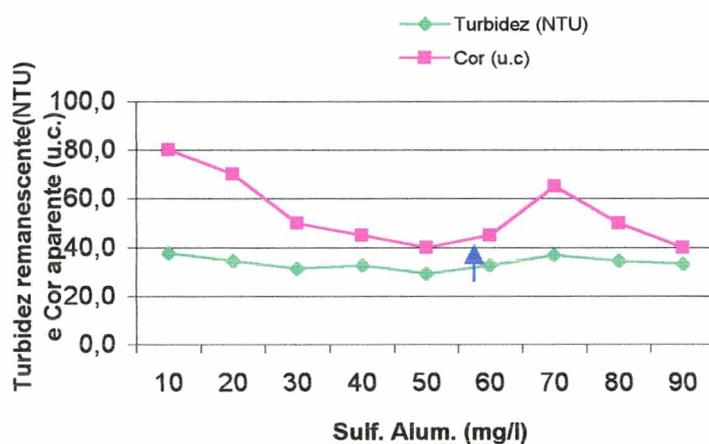


Figura 48: Curva de turbidez e cor para o piloto com uma coluna de floculação.

### 2.2- Parâmetros: turbidez e cor X dose sulf. Alum.

Sol. de Sulf. de Alum.:	0,1%	Turb.água	56,7	NTU
Mistura rápida =	425 rpm 1000s-1	Alcalinic	17,1	mg/l de CaCO <sub>3</sub>
Mistura lenta =	40 rpm 28s-1	pH =	7,16	
Tempo mist. rápida =	2,0 min	Cor =	80,0	u.c.
Tempo mist. lenta =	20,0 min			
Tempo de decant. =	3,0 e 5,0 min			

Tabela 11

melhor dosagem de sulfato de alumínio em meio granular - relação entre uma e duas colunas de floculação.

Tempos de decantação de 3; 4 e 5 minutos							
PILOTO	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
Turb.(NTU)-Td=3 min	52,70	27,30	21,40	18,20	17,90	18,40	19,10
Turb.(NTU)-Td=4 min	37,60	34,40	31,20	32,50	29,20	32,50	36,70
Turb.(NTU)-Td=5 min	50,80	16,50	12,60	10,20	10,30	9,65	11,00
Cor (u.c.)-Td=3,0 min	100,00	40,00	30,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Cor (u.c.)-Td=4,0 min	80,00	70,00	50,00	45,00	40,00	45,00	65,00
Cor (u.c.)-Td=5,0 min	80,00	20,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00

### 2.3- Parâmetros: turbidez e cor X veloc. sedim. (cm/min)

Q <sub>trab.</sub> =	3,0	l/min	Turb.água bruta :	56,7	NTU
Exp. col. 50mm =	62	%	Cor =	80	u.c.
Exp. col. 60mm =	30	%	pH =	7,16	
Taxa =	1528	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> xdia	Alcalinidade =	17,1	mg/l de CaCO <sub>3</sub>
			Solução de S.A. =	0,1	%

Dist. entre superf. da água e o pto de coleta = 7,0 cm

Tabela 12

Varição da turbidez com a velocidade de sedimentação.

TURBIDEZ												
T. decantação (min)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Veloc. Sediment. (cm/min)	7,0	4,7	3,5	2,8	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1
Dose S.A. - 10 mg/l	60,00	60,40	58,90	59,90	60,00	57,70	57,50	56,90	55,50	55,50	55,20	52,60
Dose S.A. - 20 mg/l	57,00	51,20	42,30	34,10	27,50	22,30	18,90	17,60	15,90	13,80	12,50	11,90
Dose S.A. - 30 mg/l	56,70	44,80	34,40	26,10	20,20	15,50	13,60	12,50	11,20	9,90	8,45	7,60
Dose S.A. - 40 mg/l	56,20	36,50	27,20	20,80	17,20	14,80	12,80	11,30	10,10	9,40	8,55	7,97
Dose S.A. - 50 mg/l	52,70	32,50	21,00	17,60	16,00	14,30	11,20	9,00	8,50	8,04	7,55	6,51
Dose S.A. - 60 mg/l	49,80	31,80	23,40	19,20	15,10	13,10	10,90	9,80	8,76	8,61	7,35	7,17
Dose S.A. - 70 mg/l	50,80	28,90	21,30	18,70	15,40	13,50	11,30	9,78	8,93	8,10	7,25	6,80

Tabela 13

Varição da cor com a velocidade de sedimentação.

COR												
T. decantação (min)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Veloc. Sediment. (cm/min)	7,0	4,7	3,5	2,8	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1
Dose S.A. - 10 mg/l	80,00	80,00	80,00	80,00	90,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Dose S.A. - 20 mg/l	80,00	80,00	70,00	50,00	45,00	30,00	20,00	20,00	20,00	20,00	15,00	20,00
Dose S.A. - 30 mg/l	80,00	75,00	60,00	30,00	25,00	20,00	15,00	15,00	15,00	15,00	10,00	10,00
Dose S.A. - 40 mg/l	80,00	50,00	40,00	30,00	20,00	20,00	20,00	15,00	15,00	15,00	15,00	10,00
Dose S.A. - 50 mg/l	80,00	40,00	25,00	20,00	15,00	20,00	15,00	10,00	15,00	15,00	10,00	10,00
Dose S.A. - 60 mg/l	60,00	40,00	20,00	20,00	15,00	15,00	15,00	10,00	10,00	10,00	15,00	15,00
Dose S.A. - 70 mg/l	70,00	20,00	20,00	20,00	15,00	20,00	15,00	15,00	15,00	10,00	10,00	10,00

### 2.4- Parâmetros: turbidez e cor X veloc. sedim. (cm/min)

Q <sub>trab.</sub> =	3,0	l/min	Turb. água bruta :	40,3	NTU
Exp. col. 50mm =	62	%	Cor =	60	u.c.
Exp. col. 60mm =	30	%	pH =	7	
Taxa =	1528	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> xdia	Alcalinidade =	16,7	mg/l de CaCO <sub>3</sub>
			Solução de S.A. =	0,1	%

Tabela 14

Variação da turbidez com a velocidade de sedimentação (melhores doses).

TURBIDEZ							
Tempo de decantação (min)	2,0	3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	60,0
Veloc. Sediment. (cm/min)	3,5	2,3	1,4	0,7	0,4	0,2	0,1
Dose S.A. - 40 mg/l	26,40	15,00	9,16	4,55	3,63	3,58	3,40
Dose S.A. - 45 mg/l	28,30	14,90	7,45	6,02	4,22	3,60	3,05
Dose S.A. - 50 mg/l	22,20	13,80	9,24	4,95	4,53	3,66	3,30
Dose S.A. - 55 mg/l	25,10	13,90	9,06	5,60	4,28	4,52	3,40
Dose S.A. - 60 mg/l	24,50	16,30	9,93	8,10	5,10	4,41	3,79

Tabela 15

Variação da cor com a velocidade de sedimentação (melhores doses).

COR							
Tempo de decantação (min)	2,0	3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	60,0
Veloc. Sediment. (cm/min)	3,5	2,3	1,4	0,7	0,4	0,2	0,1
Dose S.A. - 40 mg/l	40,00	20,00	15,00	10,00	10,00	5,00	5,00
Dose S.A. - 45 mg/l	40,00	15,00	15,00	10,00	10,00	10,00	5,00
Dose S.A. - 50 mg/l	30,00	15,00	15,00	10,00	10,00	5,00	5,00
Dose S.A. - 55 mg/l	40,00	15,00	15,00	10,00	10,00	10,00	5,00
Dose S.A. - 60 mg/l	30,00	20,00	15,00	15,00	10,00	5,00	5,00

## ANEXO 3: TABELAS DE DADOS DE TURBIDEZ E COR COM TESTE DE JARROS E O PILOTO

## 3.1- Parâmetros: eficiência da turbidez entre o Teste de Jarros e o piloto

Qtrab. =	3,0	l/min	Turb. água bruta =	40,3	NTU
Exp. col. 50mm =	60	%	Cor =	60	u.c.
Exp. col. 60mm =	28	%	pH =	7	
Taxa =	1528	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> xdia	Alcalinidade =	16,7	mg/l de CaCO <sub>3</sub>
			Solução de S.A. =	0,1	%

Tabela 16

Relação da turbidez e da cor para diferentes dosagens de S.A.

	Jar-test	Piloto	Jar-test	Piloto	Jar-test	Piloto	Jar-test	Piloto
T. decantação (min)	2,0		3,0		5,0		10,0	
Veloc. Sediment. (cm/min)	3,5		2,3		1,4		0,7	
Dose S.A. - 40 mg/l	42,90	26,40	41,50	15,00	17,40	9,16	8,24	4,55
Dose S.A. - 45 mg/l	33,30	28,30	26,40	14,90	19,30	7,45	8,66	6,02
Dose S.A. - 50 mg/l	35,20	22,20	20,50	13,80	17,50	9,24	7,88	4,95
Dose S.A. - 55 mg/l	30,30	25,10	14,10	13,90	13,30	9,06	7,47	5,60
Dose S.A. - 60 mg/l	40,70	24,50	26,30	16,30	14,40	9,93	8,60	8,10
Eficiência - 40 mg/l	-6,45	34,49	-2,98	62,78	56,82	77,27	79,55	88,71
Eficiência - 45 mg/l	17,37	29,78	34,49	63,03	52,11	81,51	78,51	85,06
Eficiência - 50 mg/l	12,66	44,91	49,13	65,76	56,58	77,07	80,45	87,72
Eficiência - 55 mg/l	24,81	37,72	65,01	65,51	67,00	77,52	81,46	86,10
Eficiência - 60 mg/l	-0,99	39,21	34,74	59,55	64,27	75,36	78,66	79,90

	Jar-test	Piloto	Jar-test	Piloto	Jar-test	Piloto
T. decantação (min)	20,0		30,0		60,0	
Veloc. Sediment. (cm/min)	0,4		0,2		0,1	
Dose S.A. - 40 mg/l	3,55	3,63	2,14	3,58	1,08	3,40
Dose S.A. - 45 mg/l	4,52	4,22	2,38	3,60	1,03	3,05
Dose S.A. - 50 mg/l	4,59	4,53	2,15	3,66	0,99	3,30
Dose S.A. - 55 mg/l	3,10	4,28	1,97	4,52	1,01	3,40
Dose S.A. - 60 mg/l	3,51	5,10	2,23	4,41	0,95	3,79
Eficiência - 40 mg/l	91,19	90,99	94,69	91,12	97,32	91,56
Eficiência - 45 mg/l	88,78	89,53	94,09	91,07	97,44	92,43
Eficiência - 50 mg/l	88,61	88,76	94,67	90,92	97,55	91,81
Eficiência - 55 mg/l	92,31	89,38	95,11	88,78	97,49	91,56
Eficiência - 60 mg/l	91,29	87,34	94,47	89,06	97,64	90,60

## 3.2- Parâmetros: turbidez remanescente X veloc. sedim. (cm/min)

Turbidez da água bruta =	40,3	NTU
Cor =	60	u.c.
pH =	7	
Alcalinidade =	16,7	mg/l de CaCO <sub>3</sub>
Solução de S.A. =	0,1	%
Dosagem de S.A. =	40,0	mg/l

Tabela 17

Turbidez de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.

<b>Dosagem de 40,0mg/l S.A</b>							
<b>T. decantação (min)</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>60,0</b>
<b>Veloc. Sediment. (cm/min)</b>	<b>3,5</b>	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>Piloto: Turbidez (NTU)</b>	26,40	15,00	9,16	4,55	3,63	3,58	3,40
<b>Jar-test: Turbidez (NTU)</b>	42,90	41,50	17,40	8,24	3,55	2,14	1,08

Tabela 18

Turbidez de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.

<b>Dosagem de 45,0mg/l S.A</b>							
<b>T. decantação (min)</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>60,0</b>
<b>Veloc. Sediment. (cm/min)</b>	<b>3,5</b>	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>Piloto: Turbidez (NTU)</b>	28,30	14,90	7,45	6,02	4,22	3,60	3,05
<b>Jar-test: Turbidez (NTU)</b>	33,30	26,40	19,30	8,66	4,52	2,38	1,03

Tabela 19

Turbidez de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.

<b>Dosagem de 50,0mg/l S.A</b>							
<b>T. decantação (min)</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>60,0</b>
<b>Veloc. Sediment. (cm/min)</b>	<b>3,5</b>	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>Piloto: Turbidez (NTU)</b>	22,20	13,80	9,24	4,95	4,53	3,66	3,30
<b>Jar-test: Turbidez (NTU)</b>	35,20	20,50	17,50	7,88	4,59	2,15	0,99

Tabela 20

Turbidez de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.

<b>Dosagem de 55,0mg/l S.A</b>							
<b>T. decantação (min)</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>60,0</b>
<b>Veloc. Sediment. (cm/min)</b>	<b>3,5</b>	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>Piloto: Turbidez (NTU)</b>	25,10	13,90	9,06	5,60	4,28	4,52	3,40
<b>Jar-test: Turbidez (NTU)</b>	30,30	14,10	13,30	7,47	3,10	1,97	1,01

Tabela 21

Turbidez de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.

<b>Dosagem de 60,0mg/l S.A</b>							
<b>T. decantação (min)</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>60,0</b>
<b>Veloc. Sediment. (cm/min)</b>	<b>3,5</b>	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>Piloto: Turbidez (NTU)</b>	24,50	16,30	9,93	8,10	5,10	4,41	3,79
<b>Jar-test: Turbidez (NTU)</b>	40,70	26,30	14,40	8,60	3,51	2,23	0,95

Tabela 22

Melhores valores de turbidez para o Teste de Jarros e o piloto de acordo com a velocidade de sedimentação e o tempo de decantação.

<b>Melhor curva</b>							
<b>T. decantação (min)</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>60,0</b>
<b>Veloc. Sediment. (cm/min)</b>	<b>3,5</b>	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>Piloto: Turbidez (NTU) - 50 mg</b>	22,20	13,80	9,24	4,95	4,53	3,66	3,30
<b>Jar-test: Turbidez (NTU) - 55 m</b>	30,30	14,10	13,30	7,47	3,10	1,97	1,01

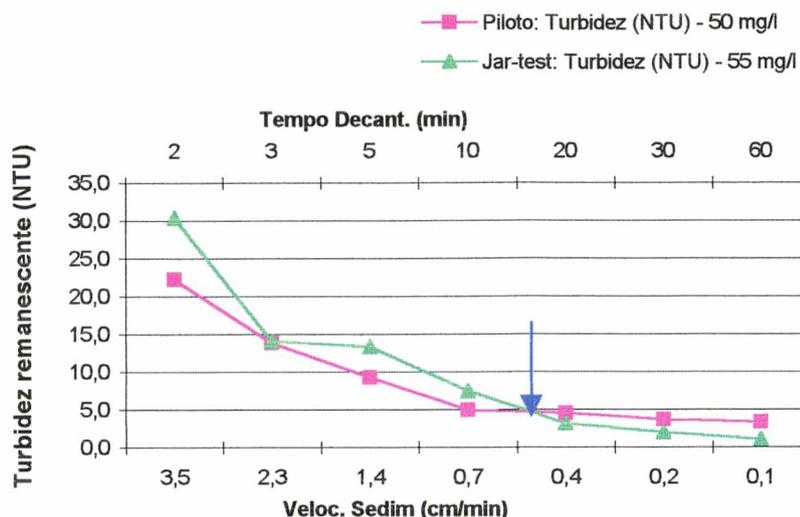


Figura 49: Melhor curva de turbidez entre o Teste de Jarros e o piloto.

### 3.3- PARÂMETROS: COR APARENTE X VELOC. SEDIM. (cm/min)

Turbidez da água bruta = 40,3 NTU  
 Cor = 60 u.c.  
 pH = 7  
 Alcalinidade = 16,7 mg/l de CaCO<sub>3</sub>  
 Solução de S.A. = 0,1 %  
 Dosagem de S.A. = 40,0 mg/l

Tabela 23

Cor de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.

Dosagem de 40,0mg/l S.A							
T. decantação (min)	2,0	3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	60,0
Veloc. Sediment. (cm/min)	3,5	2,3	1,4	0,7	0,4	0,2	0,1
Piloto: Cor (u.c.)	40,00	20,00	15,00	10,00	10,00	5,00	5,00
Jar-test: Cor (u.c.)	60,00	70,00	20,00	15,00	10,00	5,00	5,00

Tabela 24

Cor de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.

Dosagem de 45,0mg/l S.A							
T. decantação (min)	2,0	3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	60,0
Veloc. Sediment. (cm/min)	3,5	2,3	1,4	0,7	0,4	0,2	0,1
Piloto: Cor (u.c.)	40,00	15,00	15,00	10,00	10,00	10,00	5,00
Jar-test: Cor (u.c.)	50,00	40,00	20,00	15,00	10,00	5,00	5,00

Tabela 25

Cor de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.

Dosagem de 50,0mg/l S.A

<b>T. decantação (min)</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>60,0</b>
<b>Veloc. Sediment. (cm/min)</b>	<b>3,5</b>	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>Piloto: Cor (u.c.)</b>	30,00	15,00	15,00	10,00	10,00	5,00	5,00
<b>Jar-test: Cor (u.c.)</b>	50,00	20,00	20,00	15,00	5,00	5,00	5,00

Tabela 26

Cor de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.

<b>Dosagem de 55,0mg/l S.A</b>							
<b>T. decantação (min)</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>60,0</b>
<b>Veloc. Sediment. (cm/min)</b>	<b>3,5</b>	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>Piloto: Cor (u.c.)</b>	40,00	15,00	15,00	10,00	10,00	10,00	5,00
<b>Jar-test: Cor (u.c.)</b>	45,00	15,00	15,00	10,00	5,00	5,00	5,00

Tabela 27

Cor de acordo com a veloc. sedim. e tempo de decantação para diferentes doses de S.A.

<b>Dosagem de 60,0mg/l S.A</b>							
<b>T. decantação (min)</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>60,0</b>
<b>Veloc. Sediment. (cm/min)</b>	<b>3,5</b>	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>Piloto: Cor (u.c.)</b>	30,00	20,00	15,00	15,00	10,00	5,00	5,00
<b>Jar-test: Cor (u.c.)</b>	50,00	20,00	15,00	15,00	5,00	5,00	5,00

Tabela 28

Melhores valores de cor para o Teste de Jarros e o piloto de acordo com a velocidade de sedim. e o tempo de decantação.

<b>Melhor curva</b>							
<b>T. decantação (min)</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>60,0</b>
<b>Veloc. Sediment. (cm/min)</b>	<b>3,5</b>	<b>2,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>Piloto: Cor (u.c.) - 50 mg/l</b>	30,00	15,00	15,00	10,00	10,00	5,00	5,00
<b>Jar-test: Cor (u.c.) - 55 mg/l</b>	45,00	15,00	15,00	10,00	5,00	5,00	5,00

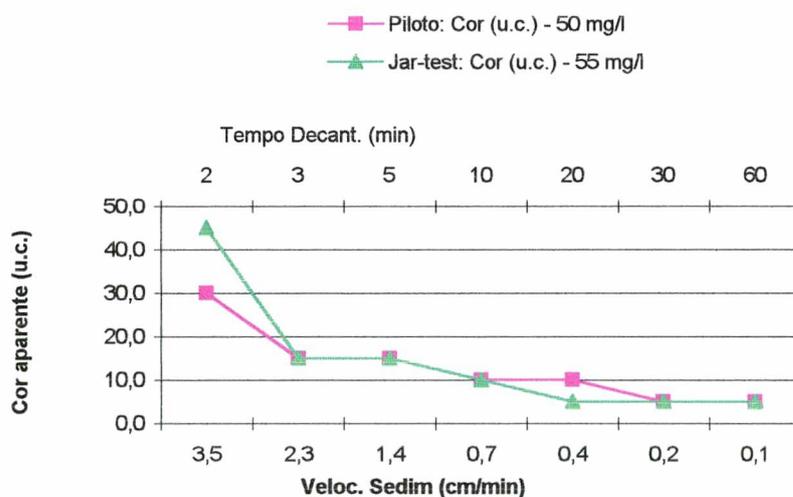


Figura 50: Melhor curva de cor entre o Teste de Jarros e o piloto.

#### ANEXO 4: TABELAS DE DADOS DO TESTE DE JARROS COM RELAÇÃO À VARIAÇÃO DA DOSAGEM DE CAL

##### 4.1- Parâmetros:

Sol. S. A.:	0,10%	Turbidez:	51,3	NTU
Sol. Cal:	0,50%	Cor:	80	u.c.
Dosagem S.A:	30,0 mg/l	Alcal.:	18,7	mg/l de CaCO <sub>3</sub>
Mist. rápida:	425,0 rpm (2 min)	(1000 s <sup>-1</sup> )	pH (água	bruta): 7,45
Mist. lenta:	40,0 rpm (20 min)	(28 s <sup>-1</sup> )		

Tabela 29

Valores de turbidez e cor com variação da dosagem de cal.

Dos. Cal (mg/l)	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Turb. (NTU) - 10 min	5,33	5,92	7,78	6,29	8,57	8,87	9,34	10,90
Turb. (NTU) - 20 min	2,97	3,39	3,70	4,22	4,36	3,24	4,31	4,27
Cor (u.c.) -10 min	10,00	10,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Cor (u.c.) - 20 min	5,00	5,00	5,00	10,00	10,00	5,00	10,00	10,00
pH água decant.	5,37	5,33	5,58	5,61	5,74	5,79	5,91	5,95

Dos. Cal (mg/l)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
Turb. (NTU) - 10 min	9,33	11,40	14,90	13,20	15,60	16,50	15,40	14,90
Turb. (NTU) - 20 min	4,55	4,88	6,35	6,50	8,06	7,22	7,54	6,44
Cor (u.c.) -10 min	15,00	15,00	15,00	15,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Cor (u.c.) - 20 min	10,00	10,00	10,00	10,00	15,00	15,00	15,00	15,00
pH água decant.	6,03	6,15	5,86	6,05	6,14	6,23	6,30	6,11

Dos. Cal (mg/l)	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5
Turb. (NTU) - 10 min	16,10	15,10	17,50	12,40	13,70	10,30	12,50	16,30
Turb. (NTU) - 20 min	6,30	7,44	6,96	6,22	5,42	5,08	5,90	6,19
Cor (u.c.) -10 min	20,00	20,00	20,00	15,00	20,00	15,00	15,00	20,00
Cor (u.c.) - 20 min	15,00	15,00	15,00	15,00	10,00	10,00	10,00	15,00
pH água decant.	6,26	6,36	6,43	6,51	6,21	6,35	6,45	6,52

Dos. Cal (mg/l)	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5
Turb. (NTU) - 10 min	14,00	11,20	11,30	10,20	15,30	14,70	12,20	12,80
Turb. (NTU) - 20 min	5,79	5,10	5,39	4,75	5,63	6,08	5,47	5,04
Cor (u.c.) -10 min	20,00	15,00	15,00	15,00	20,00	20,00	15,00	15,00
Cor (u.c.) - 20 min	15,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
pH água decant.	6,57	6,64	6,32	6,53	6,66	6,72	6,81	7,04

##### 4.2- Parâmetros:

Ensaio c/ variação de dosagem de sulfato de alumínio, fixando a dosagem de cal em 4,0 mg/l.

Sol. S. A.:	0,10%	Turbidez:	52,8	NTU
Sol. Cal:	0,50%	Cor:	80	u.c.
Dosagem Cal:	4,0 mg/l	Alcal.:	18,8	mg/l de CaCO <sub>3</sub>
Mist. rápida:	425,0 rpm (2,0 min)	(1000 s <sup>-1</sup> )		
Mist. lenta:	40,0 rpm (20,0 min)	(28 s <sup>-1</sup> )		
pH (água bruta):	7,17			

Tabela 30

Valores de turbidez e cor e pH com variação da dose de S. A. - dosagem de cal = 4,0 mg/l.

S. A. (mg/l)	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0
Turb. (NTU) - 10 min	14,20	21,10	18,30	17,80	21,30	21,80	12,50	19,80	20,00
Turb. (NTU) - 20 min	6,03	8,89	6,92	7,69	10,10	10,30	7,40	8,03	7,02
Cor (u.c.) -10 min	20,00	20,00	20,00	20,00	30,00	30,00	15,00	20,00	20,00
Cor (u.c.) - 20 min	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
pH água coagul.	6,76	6,25	5,76	5,30	4,92	4,78	4,55	4,48	4,48
pH água decant.	6,89	6,37	5,76	5,19	5,85	4,73	4,47	4,46	4,43

Tabela 31

Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto - Q = 180,0 l/h

T. de Operação (min)	10	40	70	100	130
Turbidez (10 min)	11,5	12,1	12,1	11,4	11
Cor (10 min)	15	15	15	15	15
Turbidez (20 min)	7,46	7,58	7,82	7,31	7,29
Cor (20 min)	10	10	15	10	10
pH água decant. após 20,0 min	6,26	6,02	6,03	5,97	6,02

Tabela 32

Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto - Q = 162,0 l/h

T. de Operação (min)	10,00	40,00	70,00	100,00	130,00
Turbidez (10 min)	11,10	9,96	11,30	10,10	10,90
Cor (10 min)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Turbidez (20 min)	5,84	5,86	5,81	5,41	6,7
Cor (20 min)	10	10	10	10	10
pH água decant. após 20,0 min	5,98	6,03	5,94	5,97	5,89

Tabela 33

Turbidez, cor e pH em relação ao tempo de operação do piloto - Q = 132,0 l/h

T. de Operação (min)	10	40	70	100	130
Turbidez (10 min)	15,3	13,1	22,2	14	11,9
Cor (10 min)	20	20	30	20	15
Turbidez (20 min)	9,1	8,8	9,65	9,93	8
Cor (20 min)	15	15	15	15	15
pH água decant. após 20,0 min	5,87	5,69	5,77	5,84	5,93