

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP  
EXEMPLAR REVISADO  
Data de entrada no Serviço: 17/6/2000  
Ass.: [Assinatura]

# INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DE POLÍMEROS CATIONICOS NA EFICIÊNCIA DA FLOCULAÇÃO

Angela Silva Di Bernardo



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

· ORIENTADOR: Prof. Titular Luiz Di Bernardo

São Carlos  
2000

**FOLHA DE APROVAÇÃO**


Candidata: Engenheira **ANGELA SILVA DI BERNARDO**

Dissertação defendida e aprovada em 14-04-2000  
pela Comissão Julgadora:



---

Prof. Titular **JURANDYR POVINELLI (Substituto)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)




---

Profa. Doutora **ELIZABETE FROLLINI**  
(Instituto de Química de São Carlos - Universidade de São Paulo)




---

Prof. Doutor **RUBEN BRESAOLA JUNIOR**  
(UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas)



---

Prof. Associado **EDUARDO CLETO PIRES**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Hidráulica e Saneamento



---

**JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*Aos meus pais,*

*Luiz Di Bernardo e Costancia Silva Di Bernardo,  
que nunca mediram esforços para que eu pudesse  
realizar todos os meus sonhos.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Ao meu pai, professor e orientador, Luiz, pelo amor, conhecimento e apoio dados todos esses anos.*

*À minha mãe, Costancia, pela paciência, carinho e dedicação.*

*Aos meus irmãos, Bruno, Mario e Laura, pela amizade.*

*À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, processo 97/14444-3, pela concessão da bolsa de mestrado.*

*Aos técnicos do laboratório de saneamento, Júlio, Paulo e Cidinha, que me ajudaram na realização da parte experimental.*

*Aos funcionários do departamento de Hidráulica e Saneamento, pelo serviços prestados.*

*À professora Elisabete Frollini, do Instituto de Química de São Carlos (USP), pelas informações e sugestões dadas .*

*À todos os meus amigos, que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.*

***Apelo à inspiração divina***

*Que Deus me conceda falar com inteligência  
e um pensar semelhante a este dom, pois Ele não  
só mostra o caminho da Sabedoria, mas também  
dirige os sábios; nas Suas mãos estamos nós, nossas  
palavras, toda a inteligência e a perícia do agir.*

*Sabedoria 7, 15-16*

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xxvi
RESUMO .....	xxviii
<i>ABSTRACT</i> .....	xxix
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS</b> .....	5
<b>CAPÍTULO 3 – REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	6
3.1 – QUALIDADE DAS ÁGUAS .....	6
3.1.1 – Características Biológicas das Águas .....	6
3.1.2 – Características Físicas das Águas .....	7
3.1.3 – Características Químicas das Águas .....	12
3.2 – COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO .....	13
3.2.1 – Propriedades das Partículas Coloidais e Substâncias Húmicas .....	13
3.2.1.1 – Introdução .....	13
3.2.1.2 – Origem das Cargas nas Partículas Coloidais e nas Moléculas de Substâncias Húmicas .	14
3.2.1.2.1 – Estabilização Eletrostática .....	14
3.2.1.2.2 – Estabilização Estérica .....	18
3.2.2 – Coagulação .....	20
3.2.2.1 – Mecanismos de Coagulação .....	20
3.2.2.2 – Diagrama de Coagulação do Sulfato de Alumínio .....	24
3.2.2.2.1 – Aplicabilidade do diagrama de coagulação do Sulfato de Alumínio para remoção de turbidez ....	24
3.2.2.2.2 – Considerações sobre a Coagulação na varredura com o Sulfato de Alumínio .....	28
3.2.2.3 – Uso de polímeros como auxiliares de floculação com base no diagrama de coagulação	32
3.2.2.4 – Considerações sobre o tempo de aplicação do polímero .....	40
3.2.2.5 – Fatores intervenientes no desempenho da Mistura Rápida .....	41
3.2.3 – Floculação .....	46
3.2.3.1 – Introdução .....	46
3.2.3.2 - Gradiente de Velocidade e Tempo de Floculação .....	48

3.2.3.3 - Otimização de Gradientes de Velocidade em Unidades de Flocculação .....	51
<b>3.3 – PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS SINTÉTICOS E NATURAIS .....</b>	<b>58</b>
3.3.1 – Considerações sobre Polímeros Sintéticos Orgânicos .....	58
3.3.2 – Tipos de Amido, Propriedades Químicas e Físicas .....	62
3.3.2.1 – Generalidades .....	62
3.3.2.2 - Composição Química e Estrutura .....	64
3.3.2.2.1 - Composição Química dos Grânulos de Amido .....	64
3.3.2.2.2 – Estrutura Química da Amilose e Amilopectina .....	66
3.3.2.3 – Propriedades Físicas .....	68
3.3.2.3.1 – Estrutura e Organização dos Grânulos de Amido .....	68
3.3.2.2.2 – Intumescimento e Gelatinização .....	69
3.3.2.4 - Modificação do Amido .....	72
3.3.2.4.1 – Considerações Iniciais .....	72
3.3.2.4.2 - Caracterização do amido modificado .....	75
3.3.2.4.3 – Amido Catiônico .....	76
3.3.2.5 – Uso dos Amidos .....	77
3.3.2.6 – Estudo de Caso: Caracterização dos Amidos de Milho Catiônicos Comum e Híbrido .....	78
<b>3.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>82</b>
<b>CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>84</b>
4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	84
4.2 – EQUIPAMENTOS E PRODUTOS QUÍMICOS .....	85
4.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	87
4.3.1 – Fluxograma da Metodologia .....	87
4.3.2 - Preparação e Caracterização da água de estudo .....	88
4.3.3 – Série I: Construção dos Diagramas de Coagulação .....	90
4.3.4 – Série II: Otimização da Mistura Rápida .....	95
4.3.5 – Série III: Otimização da Flocculação .....	96
4.3.6 – Série IV: Verificação da Influência do Escalonamento do Gradiente de Velocidade da Flocculação na Eficiência de Remoção de Turbidez e Cor Aparente .....	99
4.3.7 – Série V: Otimização das Dosagens dos Polímeros .....	101

4.3.8 – Série VI: Otimização do Tempo de Agitação na Flocculação com Polímero (Gradientes de Velocidade na Flocculação Escalonados) .....	104
4.3.9 – Série VII: Otimização do Tempo de Agitação na Flocculação com Polímero (Gradiente de Velocidade na Flocculação Constante ) .....	107
<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	110
5.1 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	110
5.2 – DISCUSSÃO .....	112
5.2.1 – Série I: Construção dos Diagramas de Coagulação .....	112
5.2.2 – Série II: Otimização da Mistura Rápida .....	114
5.2.3 – Série III: Otimização da Flocculação .....	115
5.2.4 – Série IV: Verificação da Influência do Escalonamento dos Gradientes de Velocidade na Flocculação na remoção de turbidez e cor aparente .....	118
5.2.5 – Série V: Otimização das Dosagens de Polímeros .....	119
5.2.6 – Séries VI e VII: Otimização do Tempo de Agitação na Flocculação com Polímero – Gradientes Escalonados e Gradiente Constante na Flocculação .....	122
<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	131
<b>ANEXOS</b> .....	134
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	202



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – NMP de coliformes totais em função da turbidez da água decantada e filtrada .....	7
<i>Fonte: DI BERNARDO (1993)</i>	
Figura 3.2 – Distribuição de tamanhos de partículas na água .....	8
<i>Fonte: DI BERNARDO (1993)</i>	
Figura 3.3 – Representação esquemática de uma partícula de argila .....	9
<i>Fonte: OLPHEN (1977)</i>	
Figura 3.4 – Partícula de argila em forma de placa com suas cargas negativas e cátions adsorvidos .....	9
<i>Fonte: OLPHEN (1977)</i>	
Figura 3.5 - Uma das estruturas moleculares do ácido fúlvico .....	10
<i>Fonte: DI BERNARDO (1993)</i>	
Figura 3.6 – Variação da cor verdadeira em função da absorvância e pH .....	11
<i>Fonte: DI BERNARDO (1993)</i>	
Figura 3.7 – Constituintes do sistema ácido carbônico em função do pH .....	13
<i>Fonte: DI BERNARDO (1993)</i>	
Figura 3.8 - Representação esquemática da dupla camada elétrica nas vizinhanças de uma interface sólido-líquido .....	15
<i>Fonte: WILLIAMS (1994) apud MARINELLI (1999)</i>	
Figura 3.9 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica .....	16
<i>Fonte: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (1990)</i>	
Figura 3.10 – Interação entre duas partículas coloidais semelhantes .....	17
<i>Fonte: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (1990)</i>	
Figura 3.11 - Modelo de dispersante polimérico adsorvido, mostrando alças, segmentos e caudas	19
<i>Fonte: LYKLEMA (1978)</i>	
Figura 3.12 – Possibilidades de interações repulsivas devido a polímeros adsorvidos nas superfícies de partículas coloidais .....	19
<i>Fonte: GREGORY (1978)</i>	

Figura 3.13 – Curvas de turbidez residual em função da concentração molar de quatro tipos de coagulantes. Ensaio de coagulação, floculação e sedimentação .....	24
<i>Fonte: DI BERNARDO (1993)</i>	
Figura 3.14 – Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio e sua relação com o potencial zeta .....	26
<i>Fonte: ARMITHARAJAH &amp; MILLS (1982)</i>	
Figura 3.15 – Influência do pH de coagulação no desempenho da filtração direta descendente ....	27
<i>Fonte: ARMITHARAJAH (1989)</i>	
Figura 3.16- Eficiência da sedimentação para diferentes condições de coagulação e mistura rápida .....	29
<i>Fonte: ARMITHARAJAH &amp; MILLS (1982)</i>	
Figura 3.17 – Modelo conceitual de uma matriz do floco .....	30
<i>Fonte: BANCHE et al (1999)</i>	
Figura 3.18 - Esquema das pontes eletrostáticas baseado nas cargas pontuais .....	30
<i>Fonte: BANCHE et al (1999)</i>	
Figura 3.19 – Recobrimento dos grânulos de amido de arroz no estado de subdosagem (3 mg Al/L) .....	31
<i>Fonte: BANCHE et al</i>	
Figura 3.20 – Recobrimento dos grânulos de amido de arroz no estado de superdosagem (9 mg Al/L) .....	32
<i>Fonte: BANCHE et al</i>	
Figura 3.21 - Diagrama de coagulação construído para a água de estudo, contendo curvas de mesma turbidez remanescente, $V_s = 2$ cm/min) .....	33
<i>Fonte: PAIXÃO (1996)</i>	
Figura 3.22 – Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio, contendo curvas de mesma turbidez remanescente, $V_s = 3,5$ cm/min .....	34
<i>Fonte: DI BERNARDO (1997)</i>	
Figura 3.23 - Turbidez remanescente em função da dosagem de amido de mandioca catiônico preparado a quente para diferentes velocidades de sedimentação – PONTO C (DSA = 18 mg/L) .....	36
<i>Fonte: DI BERNARDO (1997)</i>	

- Figura 3.24- Turbidez remanescente em função da dosagem de amido de mandioca preparado a quente para diferentes velocidades de sedimentação – PONTO C (DSA = 18 mg/L) ..... 37  
*Fonte: DI BERNARDO (1997)*
- Figura 3.25 – Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio, contendo curvas de mesma turbidez remanescente,  $V_s = 3,5$  cm/min ..... 39  
*Fonte: MARINELLI (1999)*
- Figura 3.26 – Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio, contendo curvas de mesma turbidez remanescente,  $V_s = 2,0$  cm/min ..... 39  
*Fonte: MARINELLI (1999)*
- Figura 3.27 – Comparação da eficiência dos amidos catiônicos não purificados na remoção de turbidez,  $V_s = 5,0$  cm/min (Ponto C) ..... 40  
*Fonte: MARINELLI (1999)*
- Figura 3.28 – Variações nas tecnologias de tratamento com coagulação química ..... 42  
*Fonte: DI BERNARDO (1993)*
- Figura 3.29 – Otimização da Mistura Rápida (Dosagem de Sulfato de Alumínio = 20 mg/L; pH de coagulação = 6,32; Floculação :  $T_f = 20$  min;  $G_f = 25$  s<sup>-1</sup>; Sedimentação :  $V_s = 5,0$  cm/min) ..... 45  
*Fonte: BRITO (1998)*
- Figura 3.30 – Otimização da mistura rápida (Dosagem de Sulfato de Alumínio = 20 mg/L; pH de coagulação = 6,32; Floculação :  $T_f = 20$  min;  $G_f = 25$  s<sup>-1</sup>; Sedimentação :  $V_s = 2,5$  cm/min) ..... 45  
*Fonte: BRITO (1998)*
- Figura 3.31 – Otimização da mistura rápida (Dosagem de Sulfato de Alumínio = 20 mg/L; pH de coagulação = 6,32; Floculação :  $T_f = 20$  min; \*  $G_f = 25$  s<sup>-1</sup>; Sedimentação :  $V_s = 0,5$  cm/min) ..... 46  
*Fonte: BRITO (1998)*
- Figura 3.32 – Turbidez remanescente em função do gradiente de velocidade para diferentes tempos de floculação, Água Tipo I ..... 47  
*Fonte: MENDES (1989)*
- Figura 3.33 – Cor aparente remanescente em função do gradiente de velocidade para diferentes tempos de floculação, Água Tipo II ..... 48  
*Fonte: MENDES (1989)*

Figura 3.34 - Variação da cor aparente remanescente mínima em função do tempo de floculação	50
<i>Fonte: MENDES (1989)</i>	
Figura 3.35 - Representação gráfica da interpolação para determinar o gradiente de velocidade médio na segunda câmara de floculação	56
<i>Fonte: PÁDUA et al (1998)</i>	
Figura 3.36 - Representação gráfica da interpolação para determinar o gradiente de velocidade médio na terceira câmara de floculação	57
<i>Fonte: PÁDUA et al (1998)</i>	
Figura 3.37 - Representação gráfica da interpolação para determinar o gradiente de velocidade médio na quarta câmara de floculação	57
<i>Fonte: PÁDUA et al (1998)</i>	
Figura 3.38 – Meros de polímeros sintéticos	59
<i>Fonte: WEBER (1972)</i>	
Figura 3.39 - Representação esquemática da desestabilização de colóides por polímeros	61
<i>Fonte: SINGLEY (1972)</i>	
Figura 3.40 - Aparência microscópica de alguns amidos	63
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	
Figura 3.41 – Estrutura da molécula de glucose	64
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	
Figura 3.42 - Cadeia linear – estrutura da molécula amilose	66
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	
Figura 3.43 - Cadeia ramificada – estrutura da amilopectina	67
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	
Figura 3.44 – Esquema da organização miscelar dentro de um grânulo de amido	68
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	
Figura 3.45 – Esquema da organização miscelar dentro de um grânulo de amido intumescido	70
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	
Figura 3.46 – Propriedades de intumescimento de amidos comuns	70
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	

Figura 3.47 - Representação esquemática do mecanismo de retrogradação .....	72
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	
Figura 3.48 – Reação para produção do amido catiônico seguido da recuperação na forma granular .....	77
<i>Fonte: RUTEMBERG &amp; SOLAREK (1984)</i>	
Figura 3.49 - Viscosidade relativa em função da concentração, para a solução aquosa de amido catiônico de milho híbrido purificado .....	79
<i>Fonte: MARINELLI (1999)</i>	
Figura 3.50 - Viscosidade reduzida em função da concentração, para a solução aquosa de amido catiônico de milho híbrido purificado .....	80
<i>Fonte: MARINELLI (1999)</i>	
Figura 3.51 - Viscosidade relativa em função da concentração, para a solução aquosa de amido catiônico de milho comum purificado .....	80
<i>Fonte: MARINELLI (1999)</i>	
Figura 3.52 - Viscosidade reduzida em função da concentração, para a solução aquosa de amido catiônico de milho comum purificado .....	81
<i>Fonte: MARINELLI (1999)</i>	
Figura 4.1 – Equipamento de reatores estáticos .....	86
Figura 4.2 – Gradiente de velocidade em função da rotação do agitador .....	87
Figura 4.3 - Estrutura molecular do amido de mandioca catiônico waxy .....	87
Figura 4.4 – Fluxograma da parte experimental .....	88
Figura 4.5 – Caixas d'água de 500 L para armazenamento e preparação da água de estudo e acessórios para homogeneizá-la antes de cada ensaio .....	90
Figura 4.6 - Mistura rápida realizada no Jar Test ( $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ) .....	93
Figura 4.7 – Início da floculação ( $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ ) .....	93
Figura 4.8 – Primeira coleta de amostras ( $V_s = 4,0 \text{ cm/min}$ ) .....	94

Figura 5.1 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação, $V_s = 4,0$ cm/min .....	116
Figura 5.2 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação, $V_s = 2,0$ cm/min .....	116
Figura 5.3 – Exemplo da Figura Tipo I: Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico na floculação, $V_{s1} = 8,40$ cm/min .....	123
Figura 5.4 – Exemplo da Figura Tipo II - Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação, $V_{s1} = 8,40$ cm/min .....	123
Figura 5.5 - Turbidez remanescente em função velocidade de sedimentação para diferentes condições de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163 da BetzDeraborn): Dosagem Polímero: 0,75 mg/L .....	125
Figura 5.6 - Turbidez remanescente em função velocidade de sedimentação para diferentes condições de aplicação do amido de milho catiônico (da Corn Products). Dosagem Polímero: 2,0 mg/L .....	126
Figura 5.7 - Turbidez remanescente em função velocidade de sedimentação para diferentes condições de aplicação do amido de mandioca catiônico waxy. Dosagem Polímero: 1,0 mg/L .....	127
Figura 5.8 - Foto ilustrativa do ensaio com polímeros. Oito minutos após a introdução dos polímeros no início da terceira câmara hipotética de floculação. Ensaio variando o tempo de aplicação dos polímeros com o gradiente na floculação escalonado. Jarros 4 e 5: 2,0 mg/L de Amido de Milho Catiônico e 1,0 mg/L de Amido de Mandioca Catiônico .....	128
Figura 5.9 - Foto ilustrativa do ensaio com polímeros. Dois minutos após a introdução do Amido de Mandioca Catiônico no início da Segunda câmara hipotética de floculação. Ensaio de reprodução dos melhores resultados com o gradiente de velocidade escalonado na floculação. Jarros 5 e 6: 1,0 mg/L de Amido de Mandioca Catiônico .....	129
Figura 5.10 – Foto ilustrativa do ensaio com polímeros . Dois minutos após a introdução do Amido de Milho Catiônico no início da Segunda câmara hipotética de floculação. Ensaio de reprodução dos melhores resultados com o gradiente de velocidade escalonado na floculação. Jarros 3 e 4: 2,0 mg/L de Amido de Milho Catiônico ...	129

- Figura 5.11 – Foto ilustrativa do ensaio com polímeros. Dois minutos após a introdução do Polímero Sintético Catiónico no início da segunda câmara hipotética de floculação. Ensaio de reprodução dos melhores resultados com o gradiente de velocidade escalonado na floculação. Jarros 1 e 2: 0,75 mg/L de Polyfloc CE1163 130
- Figura A1 – Curvas de turbidez remanescente em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Velocidade de sedimentação = 4,0 cm/min. (Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>) ..... 139
- Figura A2 – Curvas de turbidez remanescente em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Velocidade de sedimentação = 2,0 cm/min. (Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>) ..... 140
- Figura A3 – Curvas de cor aparente remanescente em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Velocidade de sedimentação = 4,0 cm/min. (Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>) ..... 141
- Figura A4 – Curvas de cor aparente remanescente em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Velocidade de sedimentação = 2,0 cm/min. (Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>) ..... 142
- Figura A5 – Dosagem de Sulfato de Alumínio em função do pH de Coagulação e a variação do Potencial Zeta. (Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) ..... 143
- Figura B1 – Turbidez remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida. ( Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr e Gmr variáveis; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min) ..... 146
- Figura B2 – Turbidez remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida. ( Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr e Gmr variáveis; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) ..... 146
- Figura B3 – Cor aparente remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida. ( Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr e Gmr variáveis; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min) ..... 147
- Figura B4 – Cor aparente remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida. ( Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr e Gmr variáveis; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) ..... 147

- Figura B5 – Turbidez remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr e Gmr variáveis; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min) ... 148
- Figura B6 – Turbidez remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr e Gmr variáveis; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>1</sup>, Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) ... 148
- Figura B7 – Cor aparente remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr e Gmr variáveis; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min) ... 149
- Figura B8 – Cor aparente remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr e Gmr variáveis; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>1</sup>, Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) ... 149
- Figura C1 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf e Gf variáveis; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min) ..... 153
- Figura C2 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf e Gf variáveis; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) ..... 153
- Figura C3 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf e Gf variáveis; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na primeira câmara de floculação ..... 154
- Figura C4 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 50 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação ..... 155
- Figura C5 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 40 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação ..... 155



Figura C6 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 35 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação .....	156
Figura C7 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 30 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação .....	156
Figura C8 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 25 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação .....	157
Figura C9 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 25 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na terceira câmara de floculação .....	158
Figura C10 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 25 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na quarta câmara de floculação .....	159
Figura C11 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf e Gf variáveis; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na primeira câmara de floculação .....	160
Figura C12 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 50 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação .....	161
Figura C13 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 40 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação .....	161

- Figura C14 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 35 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação ..... 162
- Figura C15 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 30 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação ..... 162
- Figura C16 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação ..... 163
- Figura C17 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na terceira câmara de floculação ..... 164
- Figura C18 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min). Determinação do gradiente de velocidade na quarta câmara de floculação ..... 165
- Figura D1 – Turbidez remanescente em função do velocidade de sedimentação para diferentes condições de floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf variável) ..... 166
- Figura D2 – Cor aparente remanescente em função do velocidade de sedimentação para diferentes condições de floculação . ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf variável) ..... 167
- Figura E1 – Turbidez remanescente em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163) para diferentes velocidades de sedimentação. ( Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>) ..... 171

- Figura E2 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163) para diferentes velocidades de sedimentação. ( Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>) ..... 171
- Figura E3 – Turbidez remanescente em função da dosagem de polímeros catiônicos para diferentes velocidades de sedimentação. ( Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>) .. 172
- Figura E4 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de polímeros catiônicos para diferentes velocidades de sedimentação. ( Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>) .. 172
- Figura E5 – Turbidez remanescente em função da dosagem de polímeros catiônicos para diferentes velocidades de sedimentação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>) . 173
- Figura E6 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de polímeros catiônicos para diferentes velocidades de sedimentação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>) . 173
- Figura E7 – Turbidez remanescente em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163) para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>) ..... 174
- Figura E8 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163) para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>) ..... 174
- Figura E9 – Turbidez remanescente em função da dosagem de amido de milho catiônico para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>) ..... 175
- Figura E10 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de amido de milho catiônico para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>) ..... 175

- Figura E11 – Turbidez remanescente em função da dosagem de amido de batata para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>) ..... 176
- Figura E12 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de amido de batata para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>) ..... 176
- Figura E13 – Turbidez remanescente em função da dosagem de amido de mandioca catiônico para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>) ..... 177
- Figura E14 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de amido de mandioca catiônico para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>) ..... 177
- Figura H1 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163). ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min) . 182
- Figura H2 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163). ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min) . 182
- Figura H3 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163). ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min) . 183
- Figura H4 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163). ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min) . 183
- Figura H5 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163). ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min) . 184

- Figura H6 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163). ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min) . 184
- Figura H7 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163). ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min) . 185
- Figura H8 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163). ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min) . 185
- Figura H9 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min) ..... 186
- Figura H10 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min) ..... 186
- Figura H11 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min) ..... 187
- Figura H12 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min) ..... 187
- Figura H13 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min) ..... 188
- Figura H14 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min) ..... 188
- Figura H15 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min) ..... 189
- Figura H16 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min) ..... 189

- Figura H17 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min) ..... 190
- Figura H18 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min) ..... 190
- Figura H19 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min) ..... 191
- Figura H20 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min) ..... 191
- Figura H21 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min) ..... 192
- Figura H22 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>3</sub> = 2,01cm/min) ..... 192
- Figura H23 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min) ..... 193
- Figura H24 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf variável; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min) ..... 193
- Figura I1 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min) ..... 194
- Figura I2 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min) ..... 194
- Figura I3 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min) ..... 195

- Figura I4 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min) ..... 195
- Figura I5 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min) ..... 196
- Figura I6 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min) ..... 196
- Figura I7 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min) ..... 197
- Figura I8 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min) ..... 197
- Figura I9 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf\* = 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min) ..... 198
- Figura I10 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf\* = 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min) ..... 198
- Figura I11 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf\* = 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min) ..... 199
- Figura I12 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf\* = 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min) ..... 199
- Figura I13 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf\* = 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min) ..... 200
- Figura I14 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf\* = 25 s<sup>-1</sup> ; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min) ..... 200

- Figura I15 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10$  s;  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24$  min;  $G_f^* = 25$  s<sup>-1</sup> ;  $V_{s_4} = 1,08$  cm/min) ..... 201
- Figura I16 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação. ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10$  s;  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24$  min;  $G_f^* = 25$  s<sup>-1</sup> ;  $V_{s_4} = 1,08$  cm/min) ..... 201



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Fração mínima da turbidez inicial e respectiva dosagem de polímero não iônico em função da velocidade de sedimentação para os pontos selecionados no diagrama de coagulação .....	35
<i>Fonte: PAIXÃO (1996)</i>	
Tabela 3.2 - Fração mínima da turbidez inicial e respectiva dosagem de polímero catiônico em função da velocidade de sedimentação para os pontos selecionados no diagrama de coagulação .....	35
<i>Fonte: PAIXÃO (1996)</i>	
Tabela 3.3 - Parâmetros usuais de projeto de unidades de mistura rápida .....	44
<i>Fonte: DI BERNARDO et al (1998)</i>	
Tabela 3.4 - Previsão do desempenho da unidade de floculação com escoamento contínuo em função da combinação de gradientes de velocidade médios nas câmaras em série ..	53
<i>Fonte: BRATBY (1981)</i>	
Tabela 3.5 - Previsão do desempenho da unidade de floculação com escoamento contínuo em função da combinação de gradientes de velocidade médios nas câmaras em série, (Simulações feitas a partir dos dados apresentados por BRATBY, 1981) .....	54
<i>Fonte: BRATBY (1981)</i>	
Tabela 3.6 - Turbidez remanescente em função do gradiente de velocidade médio e do tempo de floculação após ensaio de coagulação-floculação-sedimentação em reator estático ...	55
<i>Fonte: PÁDUA et al (1998)</i>	
Tabela 3.07 - Propriedades dos grânulos de amido .....	65
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	
Tabela 3.08 - Composição química média de grânulos de amido .....	65
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	
Tabela 3.09 - Conteúdo de amilose e amilopectina e grau de polimerização de vários amidos .....	67
<i>Fonte: SWINKELS (1985)</i>	
Tabela 3.10 - Resultados da porcentagem de nitrogênio e grau de substituição (GS) para os amidos de milho catiônicos .....	79
<i>Fonte: MARINELLI (1999)</i>	

Tabela 4.1 – Características da água de estudo .....	89
Tabela 5.1 – Quadro geral das séries de ensaios .....	111
Tabela 5.2 - Características dos pontos escolhidos nos diagramas de coagulação .....	113
Tabela 5.3 – Turbidez remanescente após 24 min de floculação com $Gf = 25 \text{ s}^{-1}$ e na saída da quarta câmara hipotética de floculação a partir da metodologia proposta por PÁDUA et al (1998) .....	117
Tabela A1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 01 para construção dos diagramas de coagulação: $Tmr = 20 \text{ s}$ ; $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ; $Tf = 20 \text{ min}$ ; $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ , $Vs_1 = 4,0 \text{ cm/min}$ ; $Vs_2 = 2,0 \text{ cm/min}$ .....	134
Tabela A2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 02 para construção dos diagramas de coagulação: $Tmr = 20 \text{ s}$ ; $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ; $Tf = 20 \text{ min}$ ; $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ , $Vs_1 = 4,0 \text{ cm/min}$ ; $Vs_2 = 2,0 \text{ cm/min}$ .....	134
Tabela A3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 03 para construção dos diagramas de coagulação: $Tmr = 20 \text{ s}$ ; $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ; $Tf = 20 \text{ min}$ ; $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ , $Vs_1 = 4,0 \text{ cm/min}$ ; $Vs_2 = 2,0 \text{ cm/min}$ .....	134
Tabela A4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 04 para construção dos diagramas de coagulação: $Tmr = 20 \text{ s}$ ; $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ; $Tf = 20 \text{ min}$ ; $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ , $Vs_1 = 4,0 \text{ cm/min}$ ; $Vs_2 = 2,0 \text{ cm/min}$ .....	134
Tabela A5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 05 para construção dos diagramas de coagulação: $Tmr = 20 \text{ s}$ ; $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ; $Tf = 20 \text{ min}$ ; $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ , $Vs_1 = 4,0 \text{ cm/min}$ ; $Vs_2 = 2,0 \text{ cm/min}$ .....	135
Tabela A6 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 06 para construção dos diagramas de coagulação: $Tmr = 20 \text{ s}$ ; $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ; $Tf = 20 \text{ min}$ ; $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ , $Vs_1 = 4,0 \text{ cm/min}$ ; $Vs_2 = 2,0 \text{ cm/min}$ .....	135

- Tabela A7 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 07 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$   $s^{-1}$ ;  $T_f = 20$  min;  $G_f = 20$   $s^{-1}$ ,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min ..... 135
- Tabela A8 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 08 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$   $s^{-1}$ ;  $T_f = 20$  min;  $G_f = 20$   $s^{-1}$ ,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min ..... 135
- Tabela A9 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 09 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$   $s^{-1}$ ;  $T_f = 20$  min;  $G_f = 20$   $s^{-1}$ ,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min ..... 135
- Tabela A10 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 10 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$   $s^{-1}$ ;  $T_f = 20$  min;  $G_f = 20$   $s^{-1}$ ,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min ..... 136
- Tabela A11 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 11 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$   $s^{-1}$ ;  $T_f = 20$  min;  $G_f = 20$   $s^{-1}$ ,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min ..... 136
- Tabela A12 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 12 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$   $s^{-1}$ ;  $T_f = 20$  min;  $G_f = 20$   $s^{-1}$ ,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min ..... 136
- Tabela A13 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 13 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$   $s^{-1}$ ;  $T_f = 20$  min;  $G_f = 20$   $s^{-1}$ ,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min ..... 136
- Tabela A14 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 14 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$   $s^{-1}$ ;  $T_f = 20$  min;  $G_f = 20$   $s^{-1}$ ,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min ..... 136

Tabela A15 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 15 para construção dos diagramas de coagulação: $T_{mr} = 20$ s; $G_{mr} = 1000$ s <sup>-1</sup> ; $T_f = 20$ min; $G_f = 20$ s <sup>1</sup> , $V_{s1} = 4,0$ cm/min; $V_{s2} = 2,0$ cm/min .....	137
Tabela A16 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 16 para construção dos diagramas de coagulação: $T_{mr} = 20$ s; $G_{mr} = 1000$ s <sup>-1</sup> ; $T_f = 20$ min; $G_f = 20$ s <sup>1</sup> , $V_{s1} = 4,0$ cm/min; $V_{s2} = 2,0$ cm/min .....	137
Tabela A17 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 17 para construção dos diagramas de coagulação: $T_{mr} = 20$ s; $G_{mr} = 1000$ s <sup>-1</sup> ; $T_f = 20$ min; $G_f = 20$ s <sup>1</sup> , $V_{s1} = 4,0$ cm/min; $V_{s2} = 2,0$ cm/min .....	137
Tabela A18 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 18 para construção dos diagramas de coagulação: $T_{mr} = 20$ s; $G_{mr} = 1000$ s <sup>-1</sup> ; $T_f = 20$ min; $G_f = 20$ s <sup>1</sup> , $V_{s1} = 4,0$ cm/min; $V_{s2} = 2,0$ cm/min .....	137
Tabela A19 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 19 para construção dos diagramas de coagulação: $T_{mr} = 20$ s; $G_{mr} = 1000$ s <sup>-1</sup> ; $T_f = 20$ min; $G_f = 20$ s <sup>1</sup> , $V_{s1} = 4,0$ cm/min; $V_{s2} = 2,0$ cm/min .....	137
Tabela A20 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação. Ensaio 20 para construção dos diagramas de coagulação: $T_{mr} = 20$ s; $G_{mr} = 1000$ s <sup>-1</sup> ; $T_f = 20$ min; $G_f = 20$ s <sup>1</sup> , $V_{s1} = 4,0$ cm/min; $V_{s2} = 2,0$ cm/min .....	138
Tabela B1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida. Ensaio 01 para otimização da mistura rápida : Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); $T_{mr}$ variável; $G_{mr} = 600$ s <sup>-1</sup> ; $T_f = 20$ min; $G_f = 20$ s <sup>1</sup> , $V_{s1} = 4,0$ cm/min; $V_{s2} = 2,0$ cm/min .....	144
Tabela B2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida. Ensaio 02 para otimização da mistura rápida : Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); $T_{mr}$ variável; $G_{mr} = 400$ s <sup>-1</sup> ; $T_f = 20$ min; $G_f = 20$ s <sup>1</sup> , $V_{s1} = 4,0$ cm/min; $V_{s2} = 2,0$ cm/min .....	144

Tabela B3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida. Ensaio 03 para otimização da mistura rápida : Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf = 20 min; Gf = 20 s <sup>1</sup> , Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	144
Tabela B4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida. Ensaio 04 para otimização da mistura rápida : Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 1200 s <sup>-1</sup> ; Tf = 20 min; Gf = 20 s <sup>1</sup> , Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	144
Tabela B5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida. Ensaio 05 para otimização da mistura rápida : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf = 20 min; Gf = 20 s <sup>1</sup> , Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	145
Tabela B6 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida. Ensaio 06 para otimização da mistura rápida : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 1200 s <sup>-1</sup> ; Tf = 20 min; Gf = 20 s <sup>1</sup> , Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	145
Tabela B7 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida. Ensaio 07 para otimização da mistura rápida : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 800 s <sup>-1</sup> ; Tf = 20 min; Gf = 20 s <sup>1</sup> , Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	145
Tabela C1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 01 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 20 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	150
Tabela C2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 02 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 20 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	150
Tabela C3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 03 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 25 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	150
Tabela C4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 04 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 25 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	150

Tabela C5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 05 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 30 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	151
Tabela C6 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 06 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 30 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	151
Tabela C7 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 03 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 35 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	151
Tabela C8 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 04 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 40 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	151
Tabela C9 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 09 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 40 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	152
Tabela C10 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 10 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 50 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	152
Tabela C11 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação. Ensaio 11 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tf variável; Gf = 50 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min .....	152
Tabela D1 – Verificação da influência do escalonamento do gradiente de velocidade – Gf* = cte = 25 s <sup>-1</sup> .....	166
Tabela D2 – Verificação da influência do escalonamento do gradiente de velocidade – Combinação de Gradientes: 50, 25, 25 e 25 s <sup>-1</sup> .....	166
Tabela E1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163). Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s <sup>-1</sup> ; Tp = 1 min; Gp = 300 s <sup>-1</sup> ; Tf = 20 min; Gf = 20 s <sup>-1</sup> ; Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min .....	168

- Tabela E2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de diferentes polímeros catiônicos. Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 168
- Tabela E3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de diferentes polímeros catiônicos. Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 169
- Tabela E4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163). Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 169
- Tabela E5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de amido de milho catiônico. Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ... 170
- Tabela E6 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de amido de batata. Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ... 170
- Tabela E7 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de amido de mandioca catiônico. Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ... 170
- Tabela F1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos imediatamente após a mistura rápida. Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf escalonado: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 178
- Tabela F2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 6 min após o início da floculação (início da segunda câmara hipotética de floculação). Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf escalonado: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 178

- Tabela F3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 12 min após o início da floculação (início da terceira câmara hipotética de floculação). Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf escalonado: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 179
- Tabela F4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 18 min após o início da floculação (início da quarta câmara hipotética de floculação). Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf escalonado: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 179
- Tabela F5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes na condição ótima de aplicação de cada polímero catiônico estudado. Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf escalonado: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 179
- Tabela G1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos imediatamente após a mistura rápida. Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 180
- Tabela G2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 6 min após o início da floculação (início da segunda câmara hipotética de floculação). Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 180
- Tabela G3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 12 min após o início da floculação (início da terceira câmara hipotética de floculação). Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min ..... 181



Tabela G4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 18 min após o início da floculação (início da quarta câmara hipotética de floculação). Ponto B (DSA = 16,0 mg/L);  $T_{mr} = 10$  s;  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24$  min;  $G_f = 25$  s<sup>-1</sup>;  $V_{s1} = 8,40$  cm/min;  $V_{s2} = 4,60$  cm/min;  $V_{s3} = 2,01$  cm/min;  $V_{s4} = 1,08$  cm/min ..... 181

Tabela G5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes na condição ótima de aplicação de cada polímero catiônico estudado. Ponto B (DSA = 16,0 mg/L);  $T_{mr} = 10$  s;  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24$  min;  $G_f = 25$  s<sup>-1</sup>;  $V_{s1} = 8,40$  cm/min;  $V_{s2} = 4,60$  cm/min;  $V_{s3} = 2,01$  cm/min;  $V_{s4} = 1,08$  cm/min ..... 181

## LISTA DE SÍMBOLOS

C	- Concentração da Solução (g/L)
C <sub>f</sub>	- Cor Aparente (uC) ou Turbidez (uT) da água decantada, segundo MENDES (1989)
C <sub>i</sub>	- Cor Aparente (uC) ou Turbidez (uT) da água bruta, segundo MENDES (1989)
DSA	- Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/L)
DP	- Dosagem de Polímero (mg/L)
G <sub>f</sub>	- Gradiente de Velocidade Médio na Floculação (s <sup>-1</sup> )
G <sub>f</sub> <sup>*</sup>	- Gradiente de Velocidade Ótimo na Floculação (s <sup>-1</sup> )
G <sub>fc</sub>	- Gradiente de Velocidade Ótimo quando o tempo tende ao infinito (s <sup>-1</sup> )
G <sub>fi</sub>	- Gradiente de Velocidade Ótimo na i-ésima Câmara de Floculação (s <sup>-1</sup> )
G <sub>mr</sub>	- Gradiente de Velocidade Médio na Mistura Rápida (s <sup>-1</sup> )
G <sub>p</sub>	- Gradiente de Velocidade Médio de Aplicação do Polímero (s <sup>-1</sup> )
GS	- Grau de Substituição
K	- Constante determinada experimentalmente
K <sub>A</sub>	- Constante de Agregação
K <sub>B</sub>	- Constante de Ruptura
K <sup>*</sup>	- Constante determinada experimentalmente
k <sub>1</sub>	- Constante determinada experimentalmente
k <sub>2</sub>	- Constante determinada experimentalmente (m <sup>2</sup> /s)
η	- Viscosidade da Solução
η <sub>SP</sub>	- Viscosidade Específica
η <sub>0</sub>	- Viscosidade do Solvente
η <sub>r</sub>	- Viscosidade Reduzida (L/g)
η <sub>rel</sub>	- Viscosidade Relativa
n	- Constante determinada experimentalmente, segundo MENDES (1989)
n <sub>0</sub>	- Número de Partículas Primárias por unidade de volume no tempo t = 0 (m <sup>-3</sup> )
n <sub>t</sub>	- Número de Partículas Primárias por unidade de volume num tempo t (m <sup>-3</sup> )
n <sub>1</sub> <sup>o</sup>	- Número de Partículas Primárias por unidade de volume na Água Bruta (m <sup>-3</sup> )
n <sub>1</sub> <sup>m</sup>	- Número de Partículas Primárias por unidade de volume na m-ésima câmara (m <sup>-3</sup> )
% N	- Porcentagem de Nitrogênio
N	- Turbidez do sobrenadante após floculação (uT)
N <sub>i</sub>	- Turbidez na saída da i-ésima Câmara de Floculação (uT)

$N_0$	- Turbidez inicial do sobrenadante após desestabilização e sedimentação sem floculação (uT)
$m$	- Número de Câmaras de Mistura Completa em série
$m$	- Constante determinada experimentalmente, segundo MENDES (1989)
PZ	- Potencial Zeta (mV)
$T_d$	- Tempo Teórico de Detenção em cada Câmara de Floculação em série (s)
$T_f$	- Tempo de Floculação (s)
$T_{mr}$	- Tempo de Mistura Rápida (s)
$V_s$	- Velocidade de Sedimentação (cm/min)

## RESUMO

DI BERNARDO, A. S. (2000). *Influência das condições de aplicação de polímeros catiônicos na eficiência da floculação*. São Carlos, 2000. 207 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Tendo em vista que os amidos (catiônicos ou não) não são nocivos a saúde do ser humano, uma vez que são utilizados na indústria de alimentos, e observando-se a potencialidade do seu uso como auxiliares de floculação, foi proposto o presente trabalho. Consiste na realização de ensaios de coagulação (com sulfato alumínio), floculação e sedimentação em equipamento de reatores estáticos, objetivando verificar a influência do gradiente de velocidade e do tempo de agitação na floculação com polímero sintético catiônico e amidos de milho e mandioca catiônicos. Concluiu-se que as condições de aplicação exercem influência na eficiência de remoção de turbidez e cor aparente, sendo que cada polímero estudado apresentou uma condição ótima específica. Em todos os ensaios realizados, o amido de mandioca catiônico foi o mais eficiente, indicando que os amidos catiônicos podem ser substitutos em potencial dos polímeros sintéticos no tratamento de águas de abastecimento, quando utilizados como auxiliares de floculação.

Palavras-chave: polímero sintético catiônico; amido catiônico; gradiente de velocidade; tempo de agitação; auxiliar de floculação.

## ABSTRACT

DI BERNARDO, A. S. (2000). *Influence of the conditions under which cationics polymers are applied on the efficiency of flocculation*. São Carlos, 2000. 207 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This present work was based on the fact that native and cationic starches are not harmful to man's health, since they have been largely used in food processing industries, and that they may be potentially used as flocculation aids in water treatment.

Jar Test assays were performed, including coagulation with Aluminum Sulphate, flocculation and sedimentation, aiming to study the influence of the velocity gradient and mixing time on flocculation, using a cationic synthetic polymer and cationic corn and manioc starches as aids.

In the main, it was concluded that the conditions under which the polymers were applied, affect the efficiency of turbidity and color removals and that each polymer studied presented an specific optimum condition. It was also observed that manioc cationic starch resulted more effective than the others polymers studied, when used as flocculation aids.

Key-words: flocculation aid, cationic synthetic polymer, cationic starch, velocity gradient, mixing time.

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A partir da década de setenta houve um avanço considerável no uso de polímeros sintéticos no tratamento de águas de abastecimento e residuárias.

Segundo CAMPOS (1980), dentre as principais vantagens diretas e indiretas da utilização de polieletrólitos como auxiliares de floculação em uma estação de tratamento de água convencional, podem ser citadas:

- melhoria da qualidade da água decantada e filtrada;
- redução no consumo de coagulante primário;
- redução dos gastos totais com produtos químicos;
- redução no volume de lodo sedimentado no decantador;
- aumento do período médio entre lavagens consecutivas dos filtros, reduzindo, portanto, a perda de água;
- aumento da eficiência da desinfecção, como consequência da redução da concentração de sólidos suspensos da água filtrada;
- diminuição da ocorrência de deposição de lodo na rede e nos reservatórios do sistema de distribuição;
- redução dos problemas advindos da sobrecarga de decantadores e filtros. A utilização de polieletrólito permite, geralmente, a adoção de taxas de escoamento superficial maiores que aquelas permitidas quando do uso somente do sulfato de alumínio;
- aumento da flexibilidade da operação da estação de tratamento de água;
- uso como solução de emergência, quando alguma unidade de decantação, floculação ou filtração tiver que ser retirada de operação, e as outras unidades tenham que trabalhar sobrecarregada.

Apesar dos benefícios obtidos com o uso dos polímeros, duas perguntas devem ser consideradas: São conhecidas todas as relações entre a utilização de polímeros sintéticos e a saúde da população? A utilização de polímeros naturais pode ser competitiva, técnica e economicamente, em comparação com os polímeros sintéticos?

A primeira pergunta tem sido motivo de preocupação, há algum tempo, para a Organização Mundial da Saúde (OMS), pelo eventuais problemas de saúde resultantes da

presença de meros ou de produtos intermediários existentes na água tratada. A aparição dessas impurezas pode ser provocada por qualquer falta no controle das condições com as quais se efetua a polimerização. É evidente que isto só é prejudicial quando os produtos indesejáveis oferecem perigo para o consumidor.

Nos Estados Unidos, antes de um produto ser empregado em larga escala no tratamento de águas de abastecimento, é necessário submetê-lo à aprovação da entidade responsável pela saúde pública, depois de ter sido comprovado cientificamente a impossibilidade de ocorrência de efeitos fisiológicos adversos nos consumidores. A primeira regulamentação oficial para aprovação legal destes produtos surgiu do trabalho de uma comissão da “United States Public Health Service” (USPHS), convocada pela “American Water Works Association” (AWWA), no ano de 1957. Esta comissão estabeleceu uma série de requisitos que deveriam ser cumpridos para conseguir a aprovação de um determinado produto. Entre outras, o fabricante deveria fornecer as seguintes informações: propriedade químicas do produto, condições de uso, evidência de não toxicidade, estudos sobre a presença de compostos cancerígenos e mutagênicos, etc.

Na Alemanha, o rigor das leis tem dificultado o uso de algumas substâncias como algicidas, sais de flúor e polieletrólitos, que já são usados em outros países. Para verificar, por exemplo, se o emprego das poliacrilamidas poderia causar danos à saúde, foi utilizada uma instalação piloto, a qual funcionou durante mais de dois anos em Leipheim, tratando água do Rio Danúbio, com uma dosagem média de 0,25 mg/L. Com base nos resultados desse trabalho, foi autorizada a utilização de dosagens inferiores a 0,50 mg/L de poliacrilamidas que continham no máximo 0,1 % de meros (acrilamida e ácido acrílico). Na França, o único produto que pode ser empregado sem restrições como auxiliar no tratamento de águas para abastecimento, é o alginato (CAMPOS & DI BERNARDO, 1991).

Segundo CAMPOS & DI BERNARDO (1991), a introdução de um novo produto, sintético ou natural, no tratamento de água, sempre exige grande responsabilidade por parte das autoridades sanitárias, pois, por melhor que seja o controle das operações e dos processos envolvidos, o certo é que, geralmente, a água tratada contém resíduos que serão ingeridos pelos consumidores. Desta maneira, o emprego de polímeros naturais deve ser investigado e estimulado de forma que os produtos potencialmente perigosos possam ser substituídos com vantagens, levando em conta, principalmente, o aspecto da saúde pública. Além disso, como os polímeros naturais, na maioria dos casos, são obtidos facilmente sem a utilização de processos

químicos complexos, seu emprego pode resultar mais atrativo que o de polímeros sintéticos, considerando, também, o aspecto econômico.

No Brasil, a partir do trabalho realizado por CAMPOS (1972) no início da década de setenta, foram observadas tentativas do uso de polímeros sintéticos em algumas estações de tratamento de água. No início da década de oitenta, CAMPOS (1980) estudou o emprego de amido de batata como auxiliar de floculação para águas com diferentes qualidades, concluindo que esse polímero poderia ser empregado com muitas vantagens sob determinadas condições. Entretanto, não havia nos trabalhos de Campos uma metodologia racional para estudar a redução da dosagem de coagulante primário, a qual foi desenvolvida somente após o desenvolvimento do diagrama de coagulação por AMIRTHARAJAH e MILLS (1982), obtido a partir do diagrama de solubilidade do alumínio, no qual os autores indicaram diversas regiões de coagulação efetiva.

CAMPOS E DI BERNARDO (1991) difundiram, em nível de América Latina, o uso dos diagramas de coagulação e de polímeros naturais e sintéticos como auxiliares de floculação. Somente na década de noventa, com os trabalhos de COSTA (1992) e de PAIXÃO (1996), é que foi comprovada a metodologia racional do uso de polímeros sintéticos e naturais como auxiliares de floculação, com base no diagrama de coagulação, proposta por DI BERNARDO (1993). Os autores chegaram, em alguns casos, à redução da dosagem do sulfato de alumínio de 40 para cerca de 11 mg/L, utilizando-se dosagens da ordem de 0,1 mg/L de polímero sintético catiônico ou de 1,0 mg/L de polímero natural.

DI BERNARDO (1997) estudou a influência do método de preparação das soluções de amido de mandioca e de milho, nas formas natural e catiônica, na eficiência da floculação quando utilizados como auxiliares. Resultados excelentes foram obtidos principalmente com o amido de mandioca catiônico preparado a frio e a quente, indicando que os polímeros naturais catiônicos podem ser substitutos em potencial dos polímeros sintéticos.

Estudos sobre a aplicação de amidos de milho catiônicos como auxiliares de floculação, realizados por MARINELLI (1999), também mostraram que é viável a substituição de polímeros sintéticos por derivados de polímeros naturais, como os amidos catiônicos, e que uma maior proporção de amilose no amido parece favorecer a floculação.

Tem sido observado por profissionais da área de tratamento de água, que há polímeros que são mais eficientes quando aplicados logo após a mistura rápida do coagulante primário enquanto outros, após um certo tempo de floculação. Com certeza, o tamanho e a distribuição



de tamanhos das partículas, o tamanho da cadeia molecular do polímero e o gradiente de velocidade devem exercer grande influência na eficiência da floculação.

Tendo em vista que os amidos naturais e catiônicos têm sido objeto de estudos recentes no laboratório de Saneamento da Escola de Engenharia da São Carlos - USP, e observando-se a potencialidade do uso destes como auxiliares de floculação, foi proposto o presente trabalho, que consiste na realização de ensaios de coagulação, floculação e sedimentação em equipamento de reatores estáticos, objetivando verificar a influência do gradiente de velocidade e do tempo de agitação na floculação com polímero sintético catiônico e amidos catiônicos, quando utilizados como auxiliares. É evidente que a comparação destes é importantíssima, pois os amidos (catiônicos ou não) não são nocivos a saúde do ser humano, uma vez que são utilizados na indústria de alimentos.

## CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS

Os objetivos principais do presente trabalho foram:

- verificação da influência do gradiente de velocidade e do tempo de agitação na floculação com polímero sintético catiônico e amidos catiônicos (milho e mandioca), na eficiência da floculação/sedimentação, quando utilizados como auxiliares;
- comparação dos resultados obtidos com o polímero sintético catiônico e os amidos catiônicos, na remoção de cor aparente e turbidez;

## CAPÍTULO 3 – REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 – QUALIDADE DAS ÁGUAS

#### 3.1.1 – Características Biológicas das Águas

A água desempenha papel importante na transmissão de doenças, tais como cólera, febre tifóide, febres paratífóides, disenteria bacilar, amebíase, giardíase e esquistossomose. Outras doenças em que a água tem importância são: cáries dentárias (falta de flúor), fluorose (excesso de flúor), saturnismo (excesso de chumbo) e metahemoglobinemia (teor elevado de nitratos).

Os coliformes têm sido utilizados como indicadores de poluição recente de fezes e, eventualmente, de contaminação. Entretanto, segundo BRANCO (1989), a relação dos coliformes com organismos patogênicos pode não existir, pois, a presença destes, supõe a necessidade de um portador na população contribuinte, enquanto o número de coliformes totais ou fecais depende da existência de um despejo orgânico, não estéril, estranho ao corpo receptor. Porém, existe uma certa correlação com base na probabilidade de que quanto maior o número de coliformes, maior a probabilidade de presença de salmonelas, vírus, etc.

De acordo com DI BERNARDO (1993), por haver relação íntima entre turbidez e número de coliformes totais e fecais nos efluentes de filtros rápidos, cuidados especiais devem ser tomados para a escolha da tecnologia de tratamento quando há presença destes nas águas destinadas ao consumo humano. Em geral, quanto menor a turbidez da água filtrada, menor o número de coliformes e de outros organismos.

Na Figura 3.1 tem-se número de coliformes totais em função da turbidez da água decantada e da água filtrada. Nota-se que para turbidez menor que 0,2 uT, o NMP de coliformes totais é significativamente reduzido, concorrendo para que a desinfecção possa ser efetivamente realizada.

As algas podem causar sérios problemas operacionais nas estações de tratamento de água, podendo flotar nos decantadores e serem carreadas para os filtros, obstruindo-os em poucas horas de funcionamento. Quando presentes em quantidades expressivas, algumas

espécies podem passar pelos filtros causando odor na água tratada, além de possibilitar a formação de compostos organo-clorados.

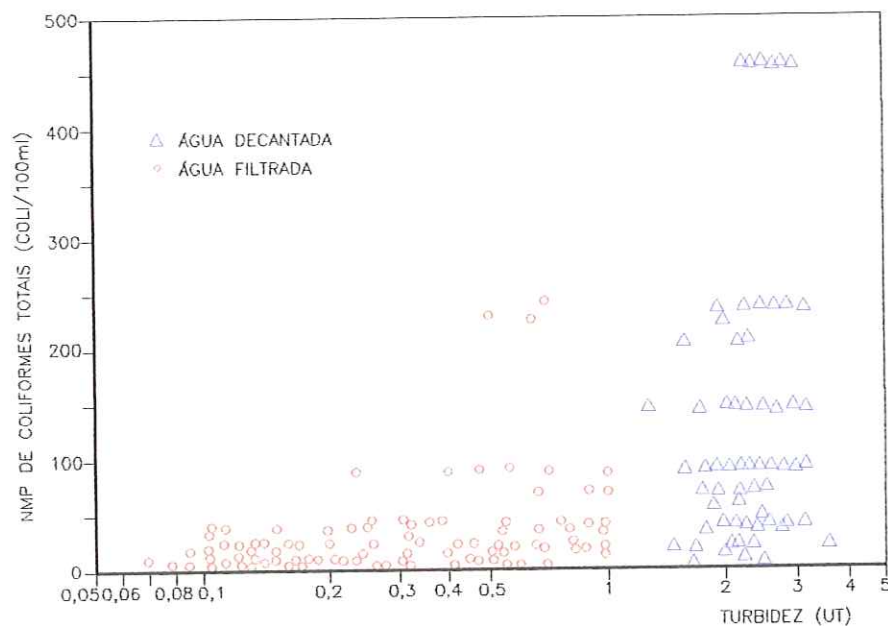


Figura 3.1 – NMP de coliformes totais em função da turbidez da água decantada e filtrada

Fonte: DI BERNARDO (1993)

### 3.1.2 – Características Físicas das Águas

Embora tenham pequena importância do ponto de vista sanitário, as características físicas da água podem ser decisivas na escolha da tecnologia de tratamento. A seguir são apresentadas as características físicas da água, com ênfase naquelas utilizadas no trabalho em questão.

#### **TURBIDEZ**

A turbidez das águas é devida à presença de partículas em estado coloidal, em suspensão, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida, plâncton e outros organismos microscópicos.

O comportamento dessas partículas no meio dispersante está intimamente ligado às suas dimensões, distinguindo-se três fenomenologias distintas conforme se tenham soluções, dispersões coloidais ou suspensões.

Nas soluções, o fracionamento das partículas ocorre a nível de moléculas ou átomos, sendo possível a separação das fases somente por evaporação ou destilação. Já nas dispersões coloidais, as partículas são finamente divididas e não sedimentam em um intervalo de tempo razoável. E por último, as suspensões, nas quais a separação de fases é conseguida por simples decantação em um tempo relativamente curto. A distinção entre dispersão coloidal e suspensão é arbitrária, porém tem sido adotado o tamanho de uma esfera de 1 µm. Na Figura 3.2 é mostrada a distribuição de tamanho das partículas e moléculas presentes nas águas.

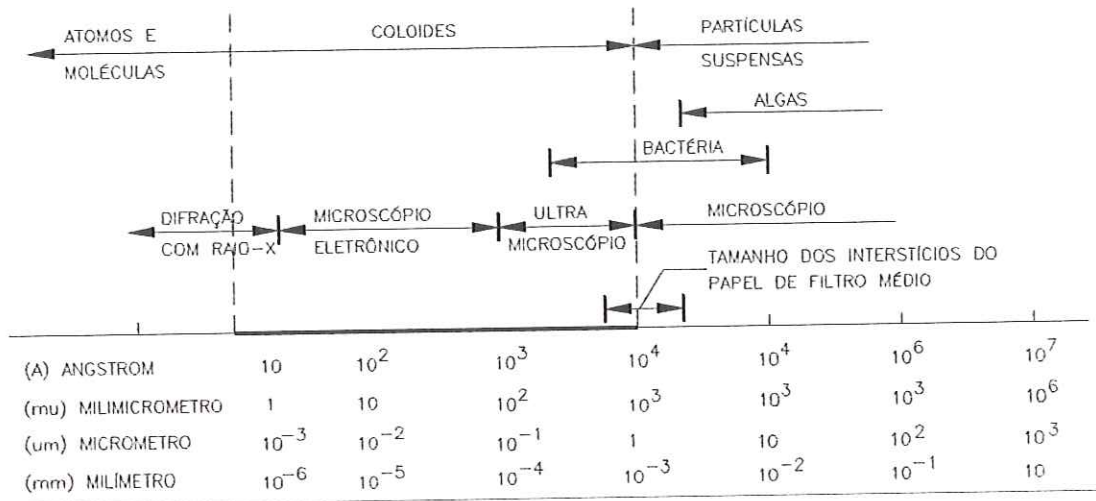


Figura 3.2 – Distribuição de tamanhos de partículas na água  
 Fonte: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (1990)

As águas superficiais contêm sólidos em suspensão e em estado coloidal. Em lagos, a maior parte da turbidez é devida à matéria coloidal ou à partículas extremamente pequenas. Já cursos d'água correntes, onde há maior turbulência, a turbidez é devida, principalmente, a partículas em suspensão. As argilas comumente encontradas são : Caulinita, Bentonita, Ilita e Muscovita. As argilas são constituídas por partículas extremamente pequenas: argilominerais, matéria orgânica, partículas de quartzo, mica, pirita, calcita e outros materiais residuais, podendo

conter também minerais não cristalizados ou amorfos. O pequeno tamanho de suas partículas faz com que as argilas tenham propriedades coloidais.

Morfologicamente, as partículas de argila apresentam formato de plaquetas, que por sua vez são compostas por lâminas extremamente finas, como mostrado na Figura 3.3.

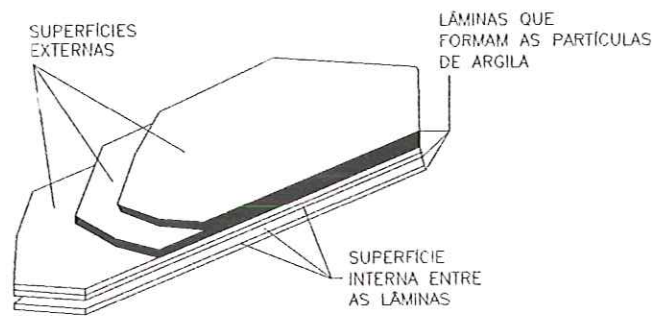


Figura 3.3 – Representação esquemática de uma partícula de argila

Fonte: OLPHEN (1977)

As cargas existentes na argila atraem e retêm cátions dissolvidos na água, fenômeno chamado de adsorção iônica, ilustrado na Figura 3.4.

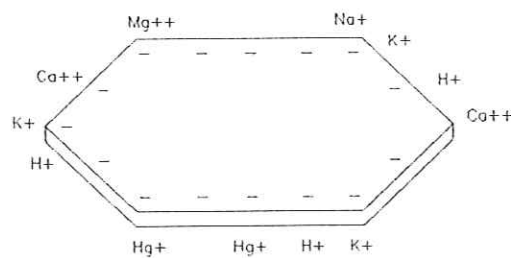


Figura 3.4 – Partícula de argila em forma de placa com suas cargas negativas e cátions adsorvidos

Fonte: OLPHEN (1977)

### *COR APARENTE E COR VERDADEIRA*

Os compostos orgânicos naturais nas águas são oriundos da degradação de plantas e animais, e são denominados substâncias húmicas. Antigamente a medida de cor era feita apenas por motivo estético, porém, com a descoberta de que tais substâncias são precursoras da formação de trihalometanos e organo-halogenados em geral, quando a desinfecção é feita com cloro livre, a quantificação da cor passou a ser muito importante.

Quando a medida de cor é feita com o sobrenadante de amostra de água submetida a 30 min com rotação de 3000 rpm, obtém-se a cor verdadeira. Com a amostra de água no seu estado natural, tem-se a cor aparente, pois há interferência de partículas coloidais e suspensas, além de microrganismos.

As substâncias húmicas, geralmente, são compostas pelo ácido húmico e ácido fúlvico (Figura 3.5). As dimensões das moléculas destas substâncias variam com o pH e com o grau de polimerização (entre 3,5 e 10 nm). A cor medida depende do pH da amostra, o que pode ser visto na Figura 3.6, em que se tem a cor verdadeira em função da absorvância. Nota-se que quanto menor o pH, maior resulta o valor da cor (DI BERNARDO, 1993).

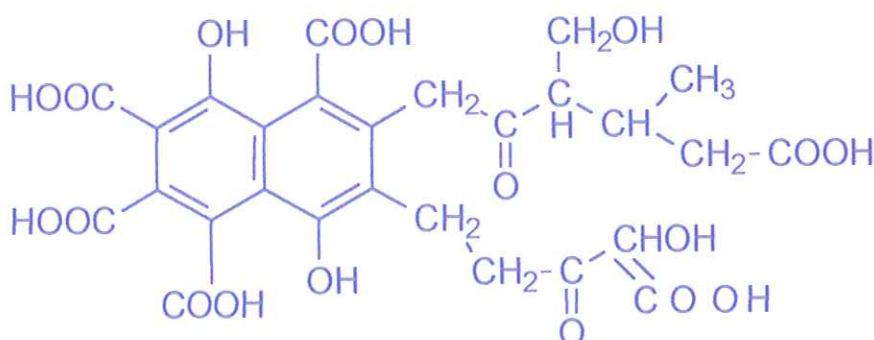


Figura 3.5 - Uma das estruturas moleculares do ácido fúlvico

Fonte: DI BERNARDO (1993)

Separando compostos orgânicos causadores da cor em diversas águas naturais, BLACK & CHRISTIMAN (1963) apud DI BERNARDO (1993), concluíram que a maior parte da cor era devida ao ácido fúlvico (87 %), seguido do ácido himatomelânico (11%) e do ácido húmico (2 %).

Embora a concentração de ácido fúlvico seja superior à de ácido húmico em águas naturalmente coloridas, diversos trabalhos na EESC-USP têm sido realizados com água preparada com ácido húmico, devido ao fácil manuseio deste se comparado com o ácido fúlvico.

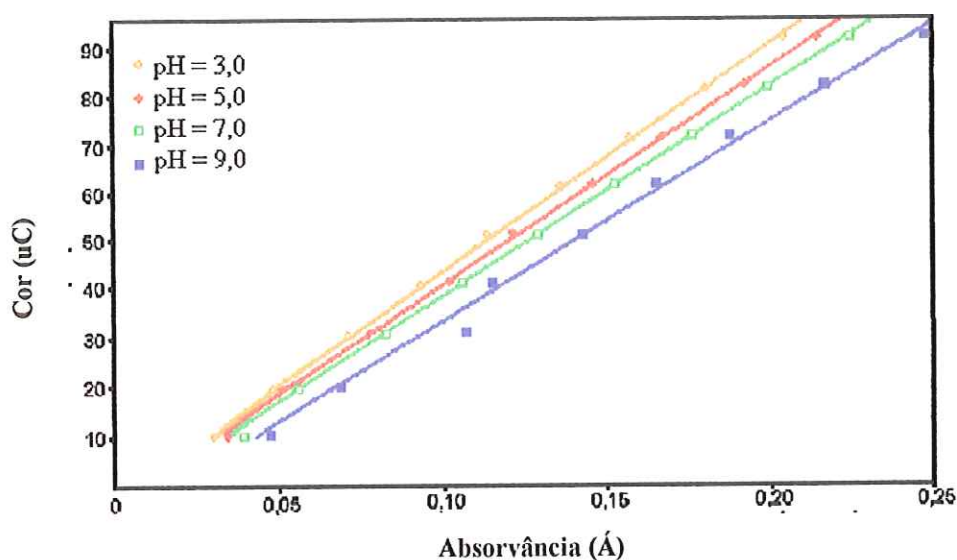


Figura 3.6 - Variação da cor verdadeira em função da absorvância e pH

Fonte: DI BERNARDO (1993)

#### *TEMPERATURA*

É de extrema importância conhecer-se a variação de temperatura prevista na água a ser tratada, uma vez que esta influi nas reações de hidrólise do coagulante, na eficiência da desinfecção, na solubilidade de gases e, em especial, no desempenho das unidades de mistura rápida, floculação, decantação e filtração.

#### *POTENCIAL ZETA*

O potencial zeta é um parâmetro muito utilizado para avaliar a estabilidade e a tendência à floculação de sistemas coloidais, uma vez que pode ser considerado um parâmetro razoável para se medir a magnitude das interações repulsivas entre partículas coloidais.

A medida do potencial zeta, ou potencial eletrocinético, corresponde à determinação da carga eletrostática superficial de pequenas partículas sólidas dispersas em água (colóide). A maioria dos colóides na natureza têm carga negativa, e a magnitude dessa carga determina a estabilidade do colóide.



Se a carga das partículas é alta, elas se repelem mutuamente e o colóide é estável. Se as partículas têm carga resultante próxima de zero, o movimento Browniano das partículas é transmitido ao colóide, tendo como efeito final a aglomeração das partículas, o que pode levar à floculação (YOKOSAWA, 1996).

### 3.1.3 – Características Químicas das Águas

#### *ALCALINIDADE, ACIDEZ e pH*

A alcalinidade é a capacidade da água em neutralizar ácidos, e a acidez de neutralizar bases. Essas duas características são baseadas no sistema do ácido carbônico, que é um ácido diprótico fraco e que possui três pontos de equivalência. As principais reações, para a temperatura de 25 ° C , são:



Na Figura 3.7 são mostradas as curvas que relacionam as porcentagens dos constituintes do sistema ácido carbônico para  $T = 25 \text{ ° C}$  e  $P = 1 \text{ atm}$ . Em função do pH, a alcalinidade pode ser devida a:

- $4,4 < \text{pH} < 8,3$  : alcalinidade de bicarbonatos;
- $8,3 < \text{pH} < 9,4$  : alcalinidade de carbonatos e bicarbonatos;
- $9,4 < \text{pH} < 12,3$  : alcalinidade de hidróxidos e carbonatos.

A alcalinidade é importantíssima, pois influi consideravelmente na coagulação química, já que os principais coagulante primários, comumente encontrados no Brasil – Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico – atuam como ácidos dipróticos em solução. Se a alcalinidade da água for baixa, a coagulação poderá requerer a adição de um alcalinizante para ajuste do pH, mas, se por outro lado a alcalinidade e pH forem relativamente altos, é provável que o sulfato de alumínio não seja indicado (DI BERNARDO, 1993).

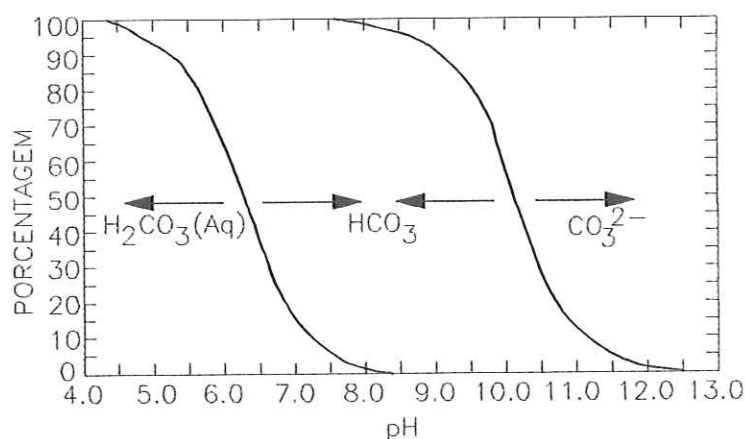


Figura 3.7 – Constituintes do sistema ácido carbônico em função do pH

Fonte: DI BERNARDO (1993)

O pH depende da acidez, que é devida a dissolução do  $CO_2$ , que estará presente somente para valores de pH inferiores a 8,3 e superiores a 4,4. Abaixo deste valor, a acidez decorre da existência de ácidos fortes, que não costumam estar presentes nas águas. Há interesse em se conhecer a acidez, pois o condicionamento final da água em uma Estação de Tratamento de Água pode exigir a adição de alcalinizantes para manter a estabilidade do carbonato de cálcio e evitar problemas relacionados com a corrosão dos constituintes de um sistema de abastecimento de água.

## 3.2 – COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

### 3.2.1 – Propriedades das Partículas Coloidais e Substâncias Húmicas

#### 3.2.1.1 - Introdução

Do ponto de vista energético, algumas partículas coloidais são termodinamicamente estáveis e denominadas colóides reversíveis, incluindo moléculas de detergente ou sabão (miscelas), proteínas, amidos e alguns polímeros de grande cadeia. Outros colóides, termodinamicamente instáveis, são denominados irreversíveis, como argilas, óxidos metálicos, microrganismos, etc, e estão sujeitos à coagulação. Alguns colóides coagulam rapidamente e outros lentamente. Os termos estável e instável são muitas vezes aplicados aos colóides irreversíveis, referindo-se porém, à cinética da coagulação e não às características termodinâmicas e energéticas (DI BERNARDO, 1993).

### 3.2.1.2 – Origem das Cargas nas Partículas Coloidais e nas Moléculas de Substâncias Húmicas

Existem duas formas de estabilidade das partículas e moléculas: estabilidade eletrostática e estabilidade estérica.

#### 3.2.1.2.1 - Estabilização Eletrostática

##### *DUPLA CAMADA ELÉTRICA*

Na água, a maior parte das partículas e moléculas de substâncias húmicas possui superfície carregada eletricamente, decorrente de três processos:

- grupos presentes na superfície sólida, ao reagir com a água, podem receber ou doar prótons;
- grupos superficiais podem reagir na água com outros solutos além de prótons;
- imperfeições na estrutura da partícula são responsáveis por parcela substancial da carga das argilas minerais.

Devido aos três processos, através dos quais os colóides se apresentam com carga superficial negativa, ocorre um balanço com íons de carga contrária presentes na água. A carga superficial influencia a distribuição espacial de íons vizinhos na solução circundante, pois provoca atração de íons de cargas opostas para a superfície e repulsão de íons com carga de mesmo sinal.

WILLIAMS <sup>1</sup>(1994) apud MARINELLI (1999) comenta que a carga superficial, juntamente com a movimentação Browniana, conduz à formação da Dupla Camada Elétrica, formada pelas cargas superficiais e pelo excesso de íons com carga oposta (contra-íons) adsorvidos na partícula, deixando o meio circundante eletricamente neutro e mais distante da superfície, e por co-íons (íons de mesma carga) distribuídos de uma maneira difusa no meio polar (Figura 3.8).

O tratamento da dupla camada elétrica é fundamental para qualquer descrição de sistemas coloidais, embora normalmente isto envolva grande dificuldade. O modelo mais simples considera a interface como um dispositivo armazenador de carga, análogo a um capacitor de placa paralela. Um modelo mais realista envolve a divisão da dupla camada em

---

<sup>1</sup> WILLIAMS, R.A. (1994). *Characterization of process dispersions*. In: *Colloid and surface engineering: application in the process industries*. 2.ed. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd. apud MARINELLI, P. S. (1999). *Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Flocculação no Tratamento de Água*. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, USP.

duas regiões, Camada Compacta e Camada Difusa, conforme mostrado na Figura 3.9. Sendo a superfície da partícula negativa, há um acúmulo de íons positivos na região da interface sólido-líquido, formando, juntamente com a carga negativa da partícula, a Dupla Camada Elétrica, também denominada de Camada Compacta. Íons negativos aproximam-se da Camada Compacta e atraindo íons positivos, formam a Camada Difusa, que engloba a primeira; a camada difusa resulta, na realidade, da atração de íons positivos, repulsão eletrostática de íons negativos e difusão térmica.

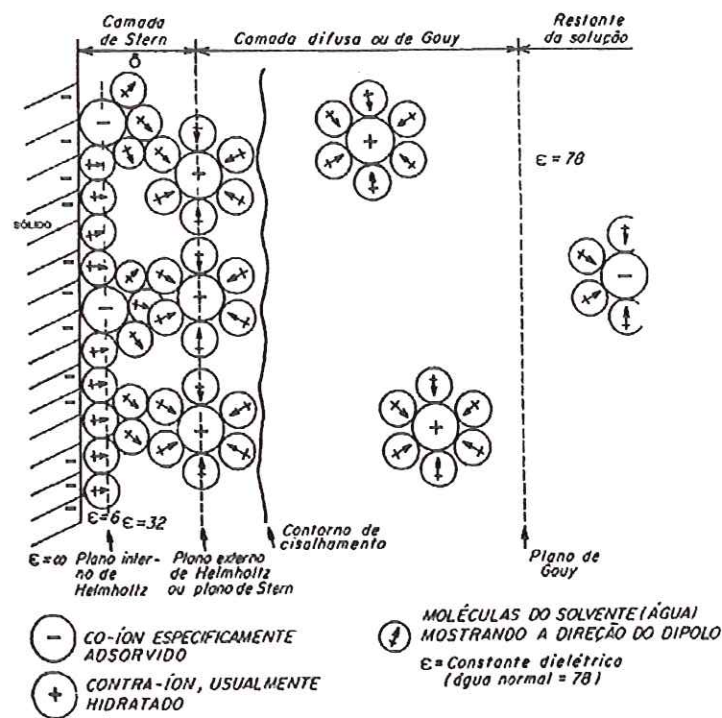


Figura 3.8 - Representação esquemática da dupla camada elétrica nas vizinhanças de uma interface sólido-líquido.

Fonte: WILLIAMS<sup>1</sup> (1994) apud MARINELLI (1999)

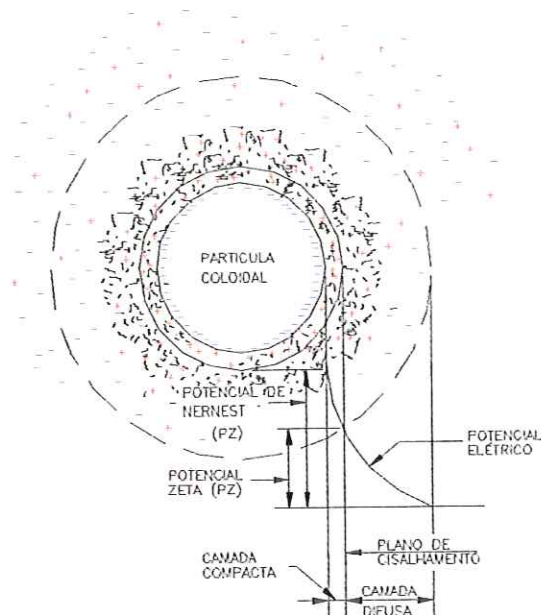


Figura 3.9 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica  
 Fonte: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (1990)

A elevada concentração de íons positivos próximos à superfície do colóide é denominada Camada de Stern, a partir da qual se forma a Camada Difusa, onde a concentração de íons é menor. O potencial elétrico criado pela presença do colóide na água diminui com a distância, a partir da superfície do mesmo, onde é denominado Potencial de Nernst. Stern, apud DI BERNARDO (1993), afirmou que existe uma distância mínima entre a superfície do colóide e os íons de carga contrária, no qual o potencial elétrico decresce linearmente; em seguida, a diminuição resulta exponencial, passando pela fronteira das camadas Compacta e Difusa, região em que o potencial elétrico, segundo LYKLEMA (1978), é chamado de Potencial Zeta. O conceito deste potencial está associado à aplicação da diferença de potencial em uma amostra de água contendo colóides negativos de tal forma que certa porção do meio, em torno de partícula, caminha junto com esta ao eletrodo positivo, caracterizando o Plano de Cisalhamento.

Não existe um meio experimental direto de medida do potencial de Stern, embora seja possível medir o potencial zeta. Porém, o potencial zeta não é necessariamente uma boa indicação do potencial superficial, pois é possível que ocorra adsorção específica de íons no plano de Stern, o que pode até alterar a magnitude do potencial de Stern e do potencial de superfície. Em vista disso, deve-se tomar cuidado na interpretação das medidas de potencial zeta,

a menos que o eletrólito usado seja classificado como indiferente, o que pode ser verificado avaliando a dependência do pH com o potencial zeta.

De acordo com WILLIAMS<sup>2</sup> (1994) apud MARINELLI (1999), se o pH no qual o potencial zeta é zero (ponto isoelétrico, i.e.p.) e independe da concentração de eletrólito, então, o eletrólito é denominado eletrólito indiferente e o ponto isoelétrico pode ser seguramente vinculado ao ponto de carga zero (point zero charge – p.z.c.). O ponto de carga zero é, geralmente, uma característica própria da superfície sólida, e a sua variação pode ser tomada como evidência de adsorção específica do eletrólito na superfície.

### INTERAÇÃO ENTRE DUAS PARTÍCULAS COLOIDAIS

Quando dois colóides semelhantes se aproximam um do outro, ocorre interação entre as camadas difusas, fazendo com que haja repulsão devida à força eletrostática entre os mesmos. A energia potencial de repulsão diminui com a distância a partir da superfície do colóide, conforme esquematizado na Figura 3.10.

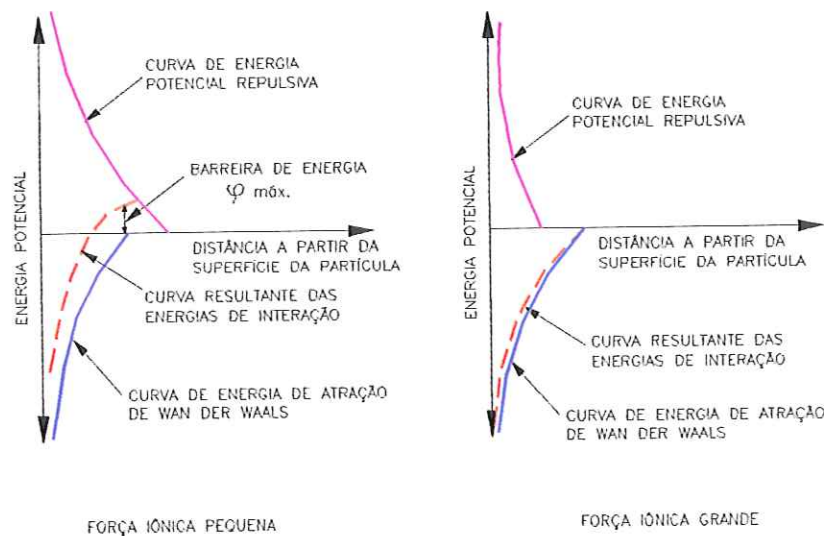


Figura 3.10 – Interação entre duas partículas coloidais semelhantes

Fonte: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (1990)

<sup>2</sup> WILLIAMS, R.A. (1994). *Characterization of process dispersions*. In: Colloid and surface engineering: application in the process industries. 2.ed. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd. apud MARINELLI, P. S. (1999). *Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Flocculação no Tratamento de Água*. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, USP.

Existem forças atrativas entre as partículas, denominadas Forças de van der Waals. Estas forças surgem de interações dipolo-dipolo, dipolo-dipolo induzido e de dispersão, e são, dependentes da estrutura química e da topologia das superfícies de interação. Contudo, as forças exercidas por todas as superfícies são decorrentes dos efeitos de dispersão, e estão associadas a flutuações na densidade eletrônica de átomos, mesmos aqueles totalmente neutros, que possuem uma média de distribuição eletrônica ao redor do núcleo esfericamente simétrico. A interação entre as forças de repulsão de origem elétrica e de atração de van der Waals, entre partículas que se movem continuamente devido ao Movimento Browniano, contribui para a estabilidade do sistema (Figura 3.10). A Energia Potencial de Repulsão é conhecida como o trabalho necessário para a aproximação de duas partículas coloidais semelhantes, partindo-se de uma distância infinita, e é tanto maior quanto menor a distância entre as mesmas .

DI BERNARDO (1993) afirma que quando a força iônica é pequena, a energia resultante é de repulsão, e atinge um valor máximo, denominado de Barreira de Energia, a uma distância próxima àquela em que se tem o plano de cisalhamento. Por isso, o potencial zeta pode fornecer informações sobre o grau de estabilidade de um sistema coloidal. Já quando a força iônica é grande, a energia resultante pode ser reduzida a ponto de eliminar a barreira de energia, de modo que as partículas podem se aproximar sem que haja repulsão entre elas.

#### 3.2.1.2.2 - Estabilização Estérica

A estabilização estérica pode resultar da adsorção de polímeros na superfície das partículas coloidais, que pode ocorrer à uma interação coulombiana (carga-carga), ligações de hidrogênio, interações de van der Waals, ou por uma combinação destas interações.

Segundo LYKLEMA (1978), o polímero estabelece interações com o solvente e com a superfície do colóide, e como resultado, alguns segmentos da cadeia estarão fixados à superfície (“trains”), separados por “alças” (“loop”) que se projetam para o meio, terminando com as caudas (“tail”) nos finais das cadeias, estando as alças e as caudas solvatadas (Figura 3.11)

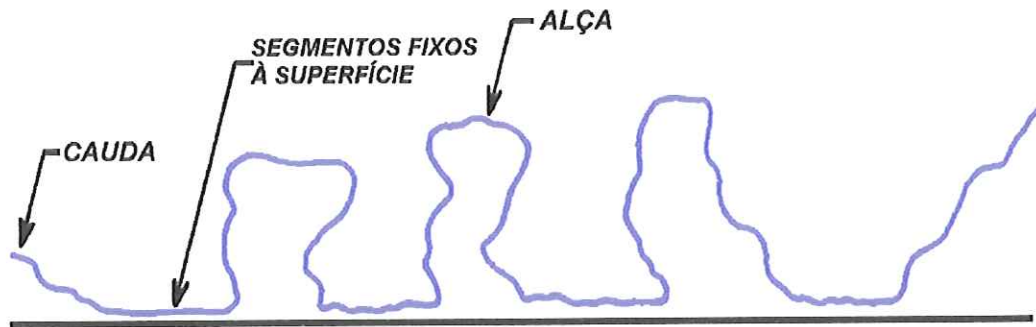


Figura 3.11 - Modelo de dispersante polimérico adsorvido, mostrando alças, segmentos e caudas

Fonte: LYKLEMA (1978)

Os polímeros adsorvidos tanto podem estabilizar como desestabilizar, dependendo, principalmente, da quantidade relativa de polímero e de partículas, da afinidade entre o polímero com a partícula e a água, e do tipo e concentração de eletrólitos presentes.

Quando há interação entre as superfícies de duas partículas recobertas por polímeros, que se encontrem próximas, a repulsão entre elas pode ocorrer de duas formas: compressão e interpenetração, como mostrado na Figura 3.12.

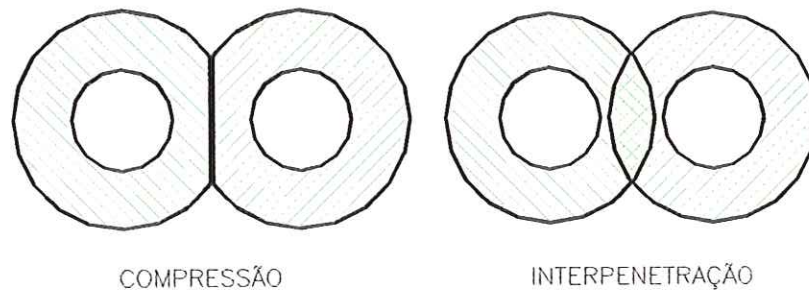


Figura 3.12 – Possibilidades de interações repulsivas devido a polímeros adsorvidos nas superfícies de partículas coloidais

Fonte: GREGORY (1978)



Na compressão, com a colisão entre as partículas, cada camada de polímero pode ser comprimida, reduzindo o volume disponível para as moléculas adsorvidas e restringindo o movimento dos polímeros, causando assim, a repulsão entre as partículas. Na interpenetração, mais freqüente, as camadas adsorvidas se entrelaçam, aumentando a concentração dos segmentos dos polímeros nessa região; se os segmentos estendidos dos polímeros forem fortemente hidrofílicos, ocorre, preferencialmente, a interação atrativa entre eles e a água, tendendo à repulsão.

### 3.2.2 – Coagulação

Neste item serão abordados os mecanismos de coagulação e a aplicabilidade dos diagramas de coagulação .

#### 3.2.2.1 – Mecanismos de Coagulação

##### *COMPRESSÃO DA CAMADA DIFUSA*

Segundo DI BERNARDO (1993), desde o final do século XIX, sabe-se que um sistema coloidal pode ser desestabilizado pela adição de íons de cargas contrárias à das partículas coloidais. Sais simples, como cloreto de sódio, são considerados “eletrólitos indiferentes” e não têm características de hidrólise ou de adsorção, como ocorre com sais de ferro e alumínio. A introdução de um eletrólito indiferente num sistema coloidal irá causar um aumento na densidade de cargas na camada difusa e diminuir a “esfera” de influência de partículas, ocorrendo a coagulação por compressão da camada difusa.

Concentrações elevadas de íons positivos e negativos (força iônica elevada) na água acarretam um acréscimo do número de íons na camada difusa que, para manter-se eletricamente neutra, necessariamente, tem o seu volume reduzido (diminuição da espessura), de modo tal que as forças de van der Waals resultem dominantes, eliminando a estabilização eletrostática.

De acordo com DI BERNARDO (1993), os aspectos que merecem referência no fenômeno da compressão da dupla camada são:

- a quantidade de eletrólitos necessários para conseguir-se a coagulação é praticamente independente da concentração de colóides na água;
- nesse mecanismo, não é possível causar a reversão de carga dos colóides (reestabilização), para qualquer quantidade de eletrólitos adicionada.

### *ADSORÇÃO E NEUTRALIZAÇÃO DE CARGAS*

Existem algumas espécies químicas capazes de serem adsorvidas na superfície das partículas coloidais. Se estas espécies possuírem carga contrária à da superfície dos colóides, haverá desestabilização dos mesmos. A atração entre a superfície e a espécie adsorvida resulta, provavelmente, de interações, tais como: ligação de hidrogênio, reações de coordenação, ligações covalentes e reações de troca iônica.

É importante observar que a intensidade de tais fenômenos é superior aos efeitos eletrostáticos obtidos pela compressão da camada difusa, o que de certa forma esclarece a possibilidade de reestabilização da solução coloidal por reversão da carga superficial, quando ocorrer superdosagem do coagulante.

São três as principais diferenças existentes entre os mecanismos de compressão da camada difusa e adsorção - neutralização de carga:

- as espécies adsorvíveis são capazes de desestabilizar os colóides em dosagens muito inferiores às necessárias para a compressão da camada difusa;
- a relação existente entre a concentração dos colóides e a quantidade necessária de espécies desestabilizantes por adsorção segue uma relação estequiométrica;
- é possível a reversão da carga superficial das partículas coloidais através da dosagem excessiva de espécies adsorvíveis.

Este mecanismo é muito importante quando o tratamento é realizado através de uma das tecnologia de filtração direta, pois não há necessidade da produção de flocos para posterior sedimentação, mas de partículas desestabilizadas que serão retiradas no meio filtrante (DI BERNARDO, 1993).

### *VARREDURA*

De acordo com DI BERNARDO (1993), dependendo da quantidade adicionada de sal (coagulante), do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água, poderá ocorrer a formação de precipitados. As partículas coloidais presentes comportam-se como núcleos de condensação para estes precipitados e, desta forma, são removidas por sedimentação. Com sais de ferros e alumínio, podem ser formados os precipitados  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{p})$  e  $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{p})$ .

O mecanismo da varredura é muito utilizado nas estações de tratamento de água nas quais se tem floculação e sedimentação antecedendo a filtração, pois os flocos resultantes são de maior tamanho e apresentam velocidades de sedimentação relativamente altas, se comparados aos flocos obtidos com a coagulação realizada no mecanismo de adsorção-neutralização (DI BERNARDO, 1993).

Ao estudarem água com cor verdadeira alta (100 uC) em relação à turbidez (5 uT), e outra com cor verdadeira baixa (5 uC) em relação à turbidez (200 uT), com alcalinidade de 30 a 40 mg/L de CaCO<sub>3</sub>, respectivamente, coaguladas nos mecanismos de adsorção-neutralização e da varredura, DI BERNARDO et al (1987), concluíram: a região de adsorção é caracterizada por valores de pH e dosagens de coagulante bem menores que os da região da varredura; a faixa de valores de dosagem de coagulante e pH final que produz resultados satisfatórios é bem mais estreita no mecanismo de adsorção-neutralização, em comparação ao da varredura; as condições de mistura rápida e de floculação não são necessariamente as mesmas quando são diferentes os mecanismos de coagulação.

Observa-se, nesse mecanismo, que o potencial zeta mínimo não corresponde às regiões ótimas de coagulação, dado que o processo em pauta independe da neutralização das cargas superficiais.

#### *ADSORÇÃO E FORMAÇÃO DE PONTES*

Existe uma grande variedade de compostos naturais e sintéticos, caracterizados por grande cadeia molecular, com a propriedade de apresentarem grupos com carga ao longo da cadeia e capazes de agirem como coagulantes eficientes. Tais compostos, denominados polieletrólitos, podem ser classificados como aniônicos, catiônicos, anfóteros e não-iônicos, dependendo da característica do grupo com carga que apresentam. Pesquisas do comportamento destes compostos têm mostrado que é possível a desestabilização de colóides carregados negativamente por ambos tipos de polímeros, catiônico e aniônico. Desta forma, nem o modelo de compressão da camada difusa e nem o da neutralização-adsorção podem ser considerados para caracterizar este mecanismo.

Segundo MENDES (1989), a teoria desenvolvida para explicar o comportamento dos polímeros como coagulantes, é baseada na adsorção dos mesmos à superfície das partículas coloidais, seguida ou pela redução da carga ou pelo “entrelaçamento” das partículas pelos polímeros.

GREGORY<sup>3</sup> (1985) e LIPATOV<sup>4</sup> (1988) apud MARINELLI (1999) comentam que se a adsorção do polímero ocorrer na maior parte da superfície da partícula, as interações existentes entre polímero-partícula mudarão as propriedades da superfície, aumentando a estabilidade. Quando duas superfícies recobertas por um polímero adsorvido se aproximam, ocorre a repulsão entre as “camadas” de polímeros, causando a chamada estabilização estérica das partículas.

#### *EFICIÊNCIA DA DESESTABILIZAÇÃO EM FUNÇÃO DOS MECANISMOS UTILIZADOS*

Na Figura 3.13 são mostradas as curvas de turbidez remanescente após sedimentação, conforme o mecanismo de coagulação predominante (DI BERNARDO, 1993). Na Figura 3.13 a, têm-se os resultados da coagulação realizada com os íons  $Al^{+3}$ ,  $Ca^{+2}$  e  $Na^{+}$ , e que estão corentes com a regra empírica de Schulze-Hardy. Entretanto, os coagulantes utilizados em tratamento de água não são eletrólitos indiferentes, indicando que além da compressão da camada difusa, poderão ocorrer outros fenômenos. Percebe-se na Figura 3.13b que é muito menor a dosagem de dodecilamônio (sal de amina de longa cadeia) necessária para causar o mesmo efeito do  $Na^{+}$ . Conforme os dados apresentados na Figura 3.13b, é provável que as interações coagulante-solvente (sal de amina-água) sejam as responsáveis pela adsorção do coagulante na interface colóide-água. No caso de espécies hidrolisadas de alumínio e ferro ou de polímeros sintéticos catiônicos, é comum ocorrer a adsorção específica, causada pela interação entre coagulante e colóide. Como o fenômeno da adsorção é dominante, nota-se que, em parte, são semelhantes as Figuras 3.13b, 3.13c e 3.13d.

<sup>3</sup> GREGORY, J. (1985). *Polymeric flocculants*. In: FINCH, C.A. Chemistry and technology of water-soluble polymers. p.307-308. 2.ed. New York, Plenum Press apud MARINELLI, P. S. (1999). *Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Flocculação no Tratamento de Água*. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, USP.

<sup>4</sup> LIPATOV, S.Y. (1988). Colloid chemistry of polymers. In: JENKINS, A.D. *Polymer Science Library*. v. 7, New York, Elsevier apud MARINELLI, P. S. (1999). *Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Flocculação no Tratamento de Água*. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, USP.

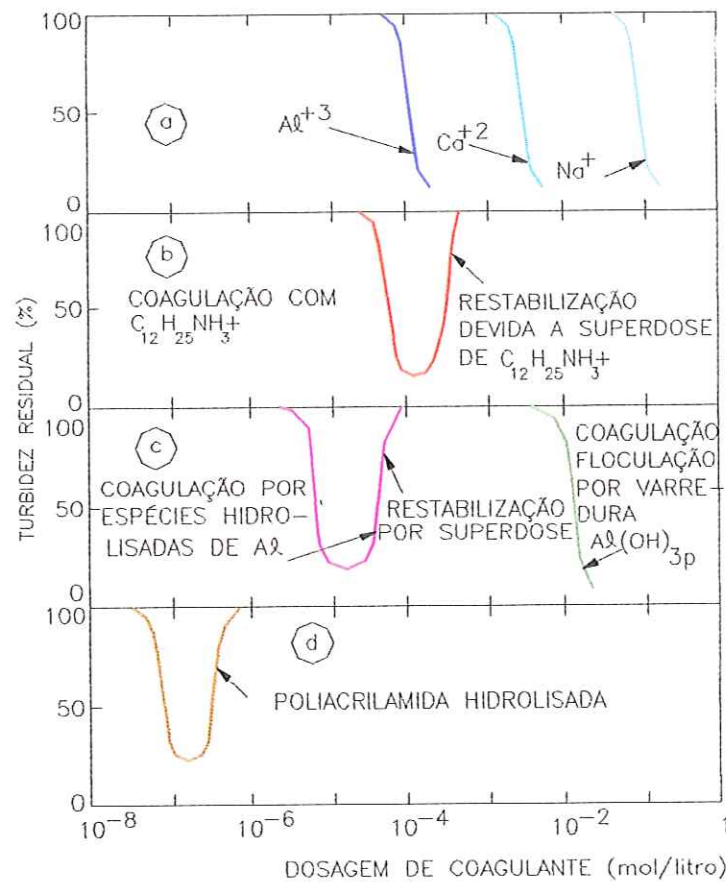


Figura 3.13 – Curvas de turbidez residual em função da concentração molar de quatro tipos de coagulantes. Ensaio de coagulação, floculação e sedimentação

Fonte: DI BERNARDO (1993)

### 3.2.2.2 – Diagrama de Coagulação do Sulfato de Alumínio

#### 3.2.2.2.1 – Aplicabilidade do diagrama de coagulação do Sulfato de Alumínio para remoção de turbidez

Os trabalhos realizados por BLACK & WILLEMS (1961), BLACK & HANNAH (1961), BLACK & CHRISTMAN (1963), O'MELIA (1978), RUBIN (1974), STUMM & O'MELIA (1968), TAMBO & WATANABE (1979a), TAMBO & WATANABE (1979b), TAMBO & WATANABE (1979c) e TAMBO & MISCHNICK (1979), contribuíram consideravelmente para que, na década de oitenta, AMIRTHARAJAH & MILLS (1982)

propusessem uma forma mais simples de se estudar a coagulação, baseada nos diagramas de solubilidade do alumínio e do ferro.

ARMITHARAJAH & MILLS (1982) desenvolveram o diagrama de coagulação (Figura 3.14), com base no diagrama de solubilidade do alumínio e das condições de coagulação, dosagem de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3 \text{ H}_2\text{O}$  e pH da mistura, no tratamento de águas sintéticas e naturais, com turbidez relativamente alta se comparada à cor verdadeira. Neste diagrama, além das curvas das espécies hidrolisadas do alumínio, há a delimitação das regiões nas quais predominam os diferentes mecanismos de coagulação, e também são mostradas a variação do potencial zeta da dispersão coloidal estabilizada, e a variação do potencial zeta resultante da interação entre os colóides da dispersão com as espécies hidrolisadas.

Na Figura 3.14 foram delimitadas quatro regiões distintas, que distinguem os diferentes mecanismos de coagulação e a reestabilização das partículas coloidais. Vale ressaltar que o diagrama em questão corresponde a uma situação particular que ilustra o uso do diagrama de solubilidade do alumínio, uma vez que as diferentes regiões se alteram com as características da água.

#### ***REGIÃO 1***

Na região 1 ocorre a neutralização de cargas das partículas coloidais pelas espécies hidrolisadas de alumínio, que são adsorvidas na superfície dos colóides. O potencial zeta se aproxima de zero, num pH da ordem de 4,8 e dosagem de sulfato de alumínio de 10 a 70 mg/L, caracterizando o ponto isoelétrico dos colóides recobertos com as espécies hidrolisadas.

#### ***REGIÃO 2***

A região 2 é chamada de zona de reestabilização, na qual o potencial zeta é positivo.

#### ***REGIÃO 3***

Segundo ARMITHARAJAH & MILLS (1982), a região 3 é chamada de corona, na qual o mecanismo de coagulação predominante se dá pela neutralização das partículas coloidais pelo hidróxido de alumínio positivo ( $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{p})$ ). O ponto isoelétrico é atingido novamente (potencial zeta igual a zero) em um valor de pH em torno de 6,8 e dosagem de coagulante de 10 mg/L. Essa região é considerada ideal para a coagulação quando se tem a filtração direta, ascendente ou descendente.

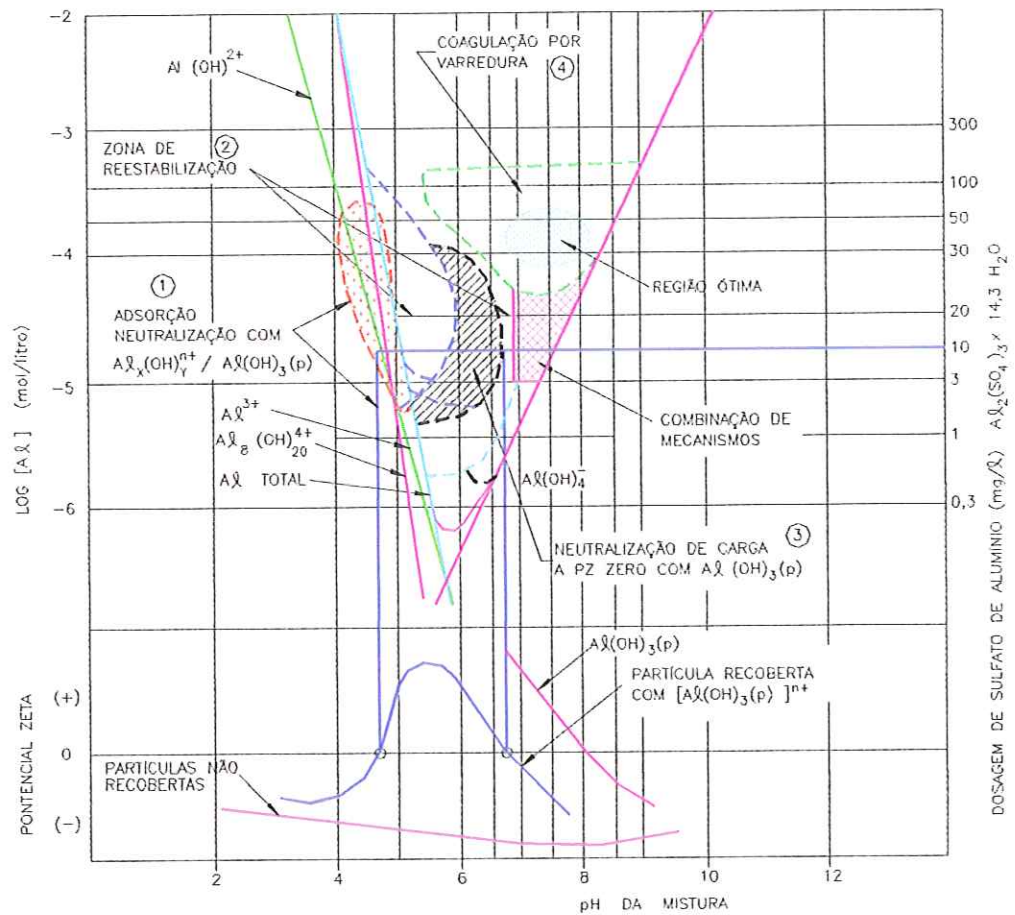


Figura 3.14 – Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio e sua relação com o potencial zeta

Fonte: ARMITHARAJAH & MILLS (1982)

#### REGIÃO 4

A região 4 é caracterizada pela formação excessiva dos precipitados de hidróxido de alumínio, de modo que as partículas coloidais são aprisionadas nos mesmos. A região é relativamente ampla, englobando a faixa de valores de pH entre 6 e 8 e dosagens de coagulante superiores a 30 mg/L. A coagulação neste mecanismo é recomendada quando se tem coagulação, floculação e decantação, antecedendo a filtração, pois os flocos obtidos são facilmente removidos nos decantadores.

Na Figura 3.15 são mostrados os resultados da aplicabilidade do diagrama de coagulação do alumínio na filtração direta descendente para a remoção de turbidez, realizado por ARMITHARAJAH (1989). Nota-se que, independentemente da dosagem do coagulante, a menor turbidez em todas as profundidades do meio filtrante, resultou para um valor de pH em torno de 7, no qual predomina o mecanismo de coagulação de neutralização de carga..

Nos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação realizados por ARMITHARAJAH & MILLS (1982), utilizando água preparada em laboratório com turbidez entre 17 e 27 uT, alcalinidade igual a 80 mg/L  $\text{CaCO}_3$  e pH igual a 8, verificou-se a influência da energia introduzida durante a mistura rápida na remoção de turbidez. A mistura rápida foi realizada para três condições:  $G_{mr} = 300 \text{ s}^{-1}$  e  $T_{mr} = 60 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$  e  $T_{mr} = 20 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 16.000 \text{ s}^{-1}$  e  $T_{mr} = 1 \text{ s}$ ; mantendo-se constante os parâmetros da floculação ( $G_f = 25 \text{ s}^{-1}$  e  $T_f = 20 \text{ min}$ ), sendo  $T_{mr}$  e  $G_{mr}$ , o tempo e o gradiente de velocidade na mistura rápida, respectivamente, e  $T_f$  e  $G_f$ , o tempo o gradiente de velocidade na floculação, respectivamente. Na Figura 3.16, são mostrados os principais resultados destes ensaios.

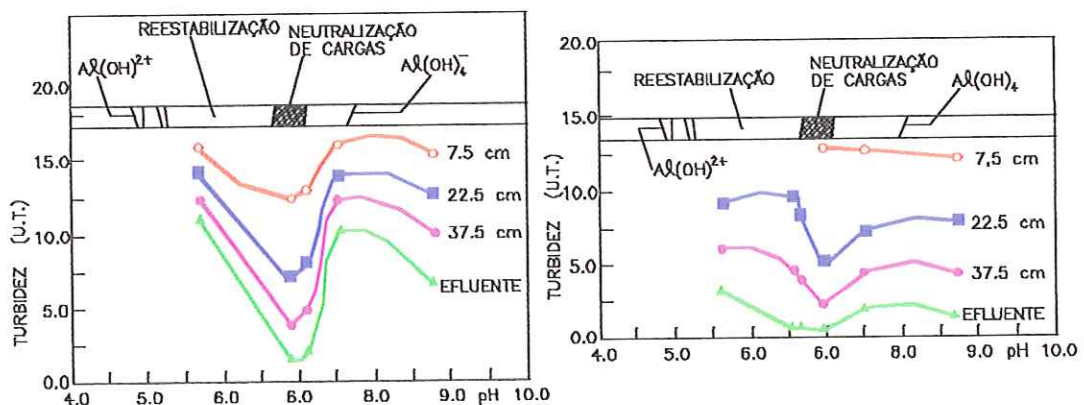


Figura 3.15 – Influência do pH de coagulação no desempenho da filtração direta descendente

Fonte: ARMITHARAJAH (1989)

ARMITHARAJAH & MILLS (1982) concluíram que : quando a coagulação é resultante da combinação dos mecanismos de neutralização e varredura, há pequena influência das condições de mistura rápida (Figura 3.16a); quando a varredura é o mecanismo predominante de coagulação, as condições de mistura rápida praticamente não influíam na eficiência da



sedimentação, desde que o produto  $G_{mr} \times T_{mr}$  fosse mantido constante (Figura 3.16e); no mecanismo de neutralização de carga, é considerável a influência das condições da mistura rápida na eficiência da remoção de turbidez, sendo os melhores resultados obtidos com o maior valor de  $G_{mr}$  (Figuras 3.16c e 3.16f); no mecanismo de neutralização de carga com pequena dosagem de coagulante, é baixa a eficiência da sedimentação (Figura 3.16d); na região de reestabilização, a sedimentação é pobre, e os melhores resultados também são obtidos com o maior valor de  $G_{mr}$  (Figura 3.16b).

A explicação dos resultados obtidos baseia-se no fato de que formação das espécies solúveis de alumínio ocorre instantaneamente após a sua adição na água, enquanto a formação do precipitado insolúvel  $Al(OH)_3(p)$  se dá em períodos variáveis de 1 a 7 s.

#### 3.2.2.2.2 – Considerações sobre a Coagulação na varredura com o Sulfato de Alumínio

BANCHE et al (1999) comentam que o precipitado existe em duas formas principais. A primeira delas é decorrente das partículas primárias cobertas por depósitos de carga positiva, decorrentes das espécies hidrolisadas positivas do sulfato de alumínio. A parte restante, denominada de corpo do precipitado, mostra evidências de mobilidade, coesão e tem carga baixa; esta forma do precipitado é atribuída ao  $Al(OH)_3(p)$  amorfo, mas também contém formas de sulfatos. Na Figura 3.17 é ilustrado o modelo conceitual da matriz do floco. Segundo os autores, as partículas primárias são mantidas juntas através das pontes promovidas pelas forças eletrostáticas, e o restante do espaço contém o corpo do precipitado.

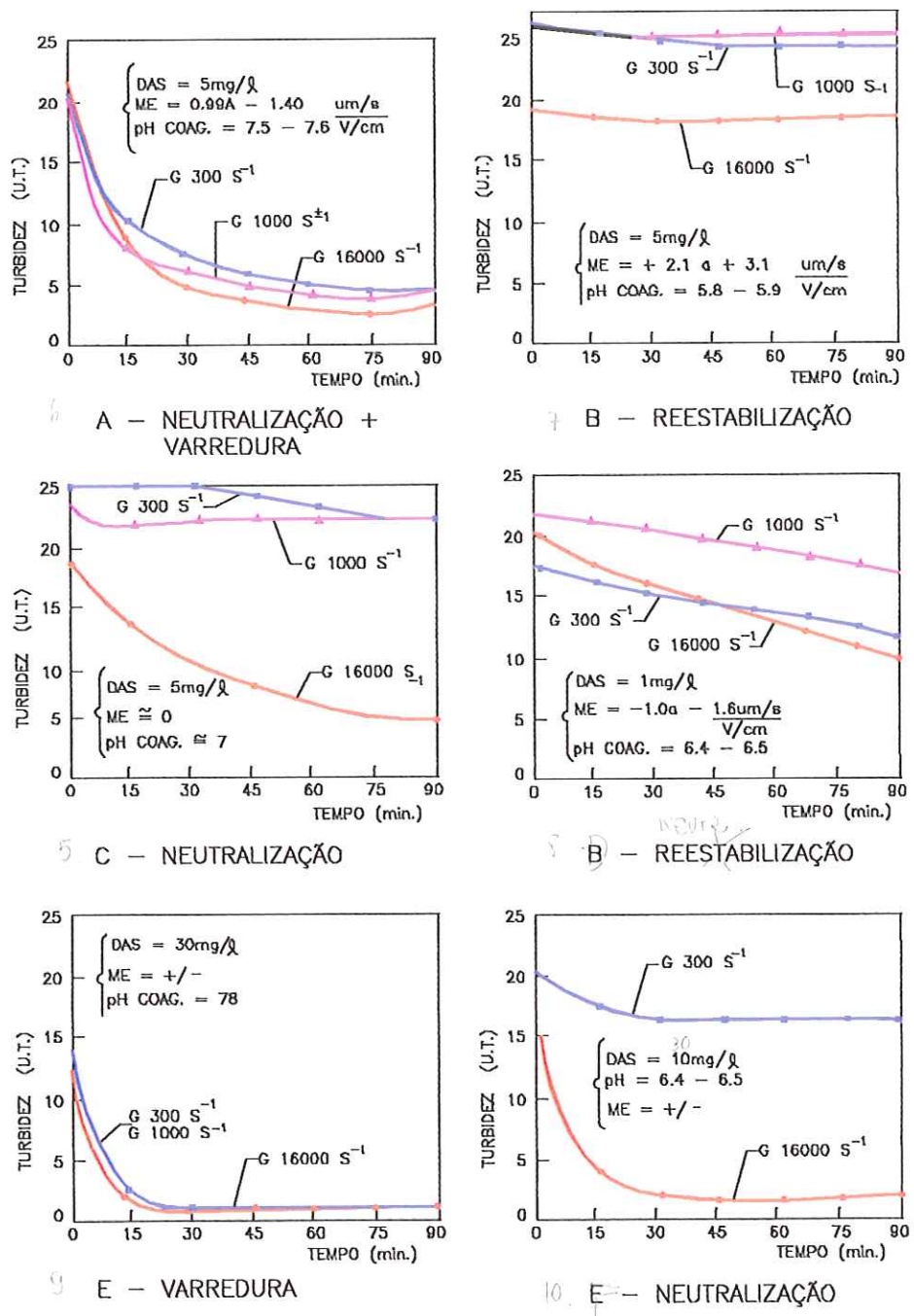


Figura 3.16- Eficiência da sedimentação para diferentes condições de coagulação e da mistura rápida

Fonte: ARMITHARAJAH & MILLS (1982)

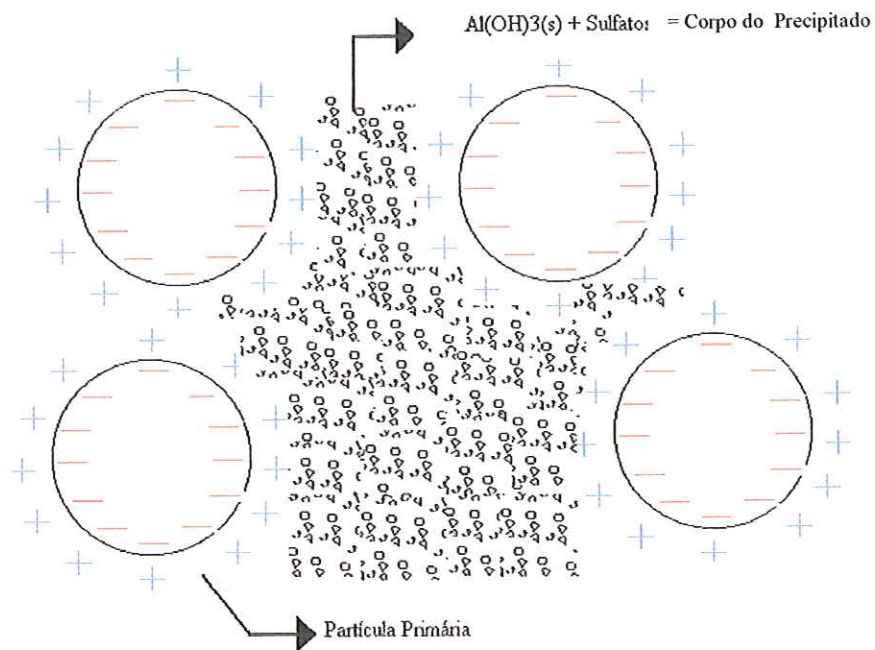


Figura 3.17 – Modelo conceitual de uma matriz de floco

Fonte: BANCHE et al (1999)

Na Figura 3.18 é apresentado um esquema das pontes eletrostáticas. A ligação decorre da atração entre as partículas primárias e os depósitos carregados positivamente entre as partículas.

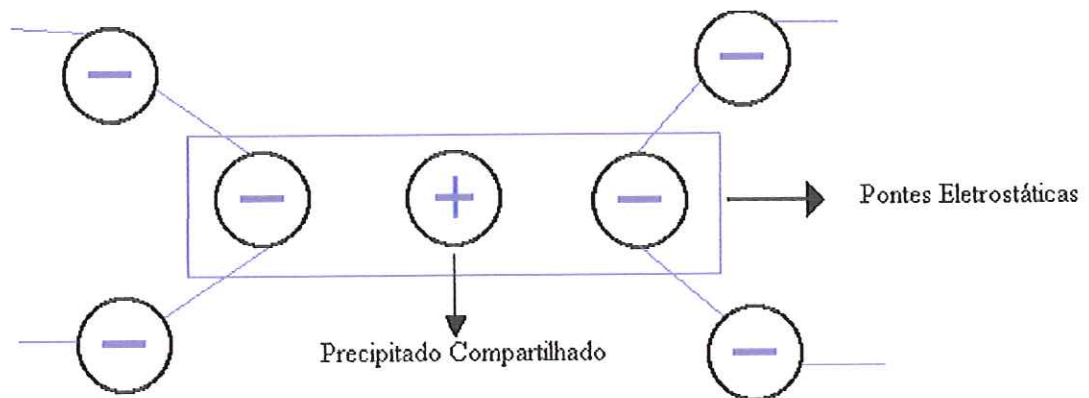


Figura 3.18 - Esquema das pontes eletrostáticas baseado nas cargas pontuais

Fonte: BANCHE et al (1999)

Embora o corpo do precipitado contribua para a resistência do floco, BANCHE et al (1999) citam que é necessário enfatizar que são as pontes decorrentes das partículas primárias que estabilizam a sua estrutura. Desta maneira, qualquer fator que afete essa ligação, irá influenciar na resistência do floco. Os principais fatores que afetam a estrutura dos flocos são: temperatura, mistura rápida e superdosagem. Segundo os autores, estudos baseados em flocos de uma suspensão de grânulos de amido de arroz coagulada com alumínio, mostraram que a superdosagem acarreta redução na resistência e densidade do floco.

Nas Figuras 3.19 e 3.20 são mostrados o estado de subdosagem (3 mg Al/L), com uma pequena evidência do corpo do precipitado, e o de superdosagem (9 mg Al/L), respectivamente, (dosagem ótima entre 4 e 5 mg Al/L). Uma possível explicação para o fenômeno da superdosagem, é que as partículas primárias são recobertas (na forma de uma mistura de carga positiva e material neutro), durante os primeiros estágios da floculação, fato que reduz a superfície de carga efetiva. Este fator, combinado com uma camada do precipitado entre as partículas primárias nos seus pontos de contato, reduzem as forças de ligação em virtude da distância e da redução da carga (BANCHE et al, 1999).

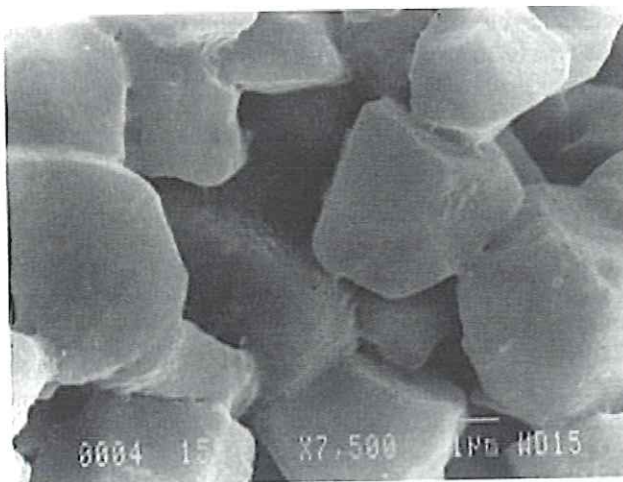


Figura 3.19 – Recobrimento dos grânulos de amido de arroz no estado de subdosagem (3 mg Al/L)

Fonte: BANCHE et al (1999)

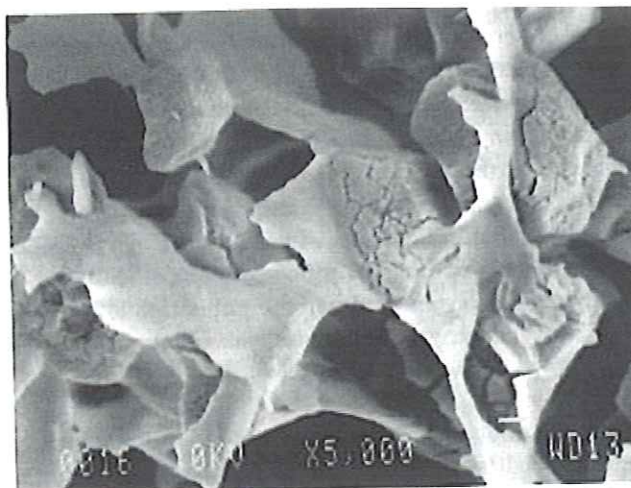


Figura 3.20 – Recobrimento dos grânulos de amido de arroz no estado de superdosagem (9 mg Al/L)

Fonte: BANCHE et al (1999)

### 3.2.2.3 – Uso de polímeros como auxiliares de floculação com base no diagrama de coagulação

DI BERNARDO (1993) propôs uma metodologia racional do uso de polímeros sintéticos e naturais como auxiliares de floculação, com base no diagrama de coagulação (AMIRTHARAJAH & MILLS, 1982). Esta metodologia foi comprovada através dos trabalhos de COSTA (1992), PAIXÃO (1996), DI BERNARDO (1997) e MARINELLI (1999).

A partir da observação da forma das curvas de mesma turbidez ou cor aparente remanescentes nos diagramas de coagulação, as quais geralmente apresentavam um ponto com dosagem mínima de coagulante, COSTA (1992) estudou o uso de polímeros naturais como auxiliares de floculação a partir da seleção de determinados pontos no diagrama para dois tipos de água, uma com cor verdadeira elevada (100 uC) e turbidez baixa (5 uT) e outra, com cor verdadeira baixa (5 uC) e turbidez alta (200 uT). Devido aos gradientes de velocidade relativamente baixos adotados pela pesquisadora durante a floculação para a construção do diagrama de coagulação, não foi evidenciada a vantagem da aplicação dos polímeros naturais para os pontos selecionados, especialmente para a água com turbidez elevada.

Em função dos resultados obtidos por COSTA (1992), e tendo em vista a potencialidade da aplicação dos diagramas de coagulação, foi realizado por PAIXÃO (1996) o trabalho com o objetivo de propor uma metodologia racional para o uso combinado de um sal de alumínio como coagulante primário e de polímeros sintéticos como auxiliares de floculação.

A metodologia proposta por COSTA (1992) e PAIXÃO (1996), consiste na construção do diagrama de coagulação, traçando-se as curvas de turbidez ou cor aparente remanescente e selecionando-se os pontos de menor dosagem do coagulante primário nas curvas de diferentes valores de turbidez ou cor aparente remanescente. Para estes pontos, são realizados ensaios variando-se a dosagem dos polímeros a serem estudados e coletando-se amostras do sobrenadante para diferentes velocidades de sedimentação. Desta forma, estudam-se, simultaneamente, os efeitos da dosagem de polímeros e da velocidade de sedimentação na eficiência da remoção de turbidez ou de cor aparente para os diferentes pontos selecionados. A escolha das condições apropriadas dependerá dos custos envolvidos e da turbidez ou cor aparente máxima admissível.

Na Figura 3.21 é apresentado o diagrama de coagulação construído por PAIXÃO (1996) conforme metodologia apresentada. A seguir são discriminados os pontos assinalados no diagrama, obtidos para a velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min:

- Ponto A : DSA = 40 mg/l ;  $pH_{co}$  = 6,2 ; T = 2,0 uT; T/To = 1 %;
- Ponto B : DSA = 25 mg/l ;  $pH_{co}$  = 6,8 ; T = 6 uT; T/To = 3 %;
- Ponto C : DSA = 17 mg/l ;  $pH_{co}$  = 7,2 ; T = 10 uT; T/To = 5 %;
- Ponto D : DSA = 11 mg/l ;  $pH_{co}$  = 6,9 ; T = 30 uT; T/To = 15 %;
- Ponto E : DSA = 7 mg/l ;  $pH_{co}$  = 6,8 ; T = 40 uT; T/To = 20 %;
- Ponto F : DSA = 8 mg/l ;  $pH_{co}$  = 5,4 ; T = 34 uT; T/To = 17 %;

onde DAS: dosagem de sulfato de alumínio;  $pH_{co}$ : pH de coagulação; T: turbidez remanescente; T/To: fração da turbidez inicial remanescente (%).

Nas tabelas 3.1 e 3.2 são mostrados os principais resultados obtidos por PAIXÃO (1996), referentes aos ensaios com os polímeros sintéticos não-iônico e catiônico, respectivamente.

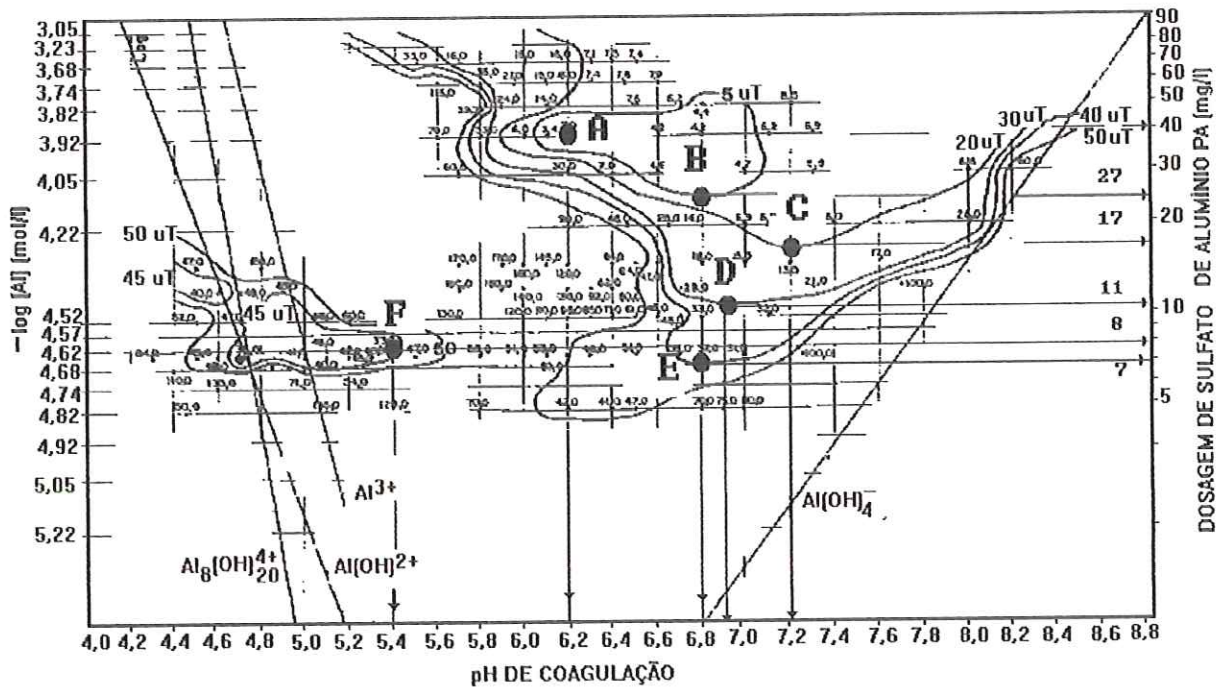


Figura 3.21 - Diagrama de coagulação construído para a água de estudo, contendo curvas de mesma turbidez remanescente,  $V_s = 2$  cm/min  
 Fonte: PAIXÃO (1996)

As principais conclusões do trabalho realizado por PAIXÃO (1996) foram as seguintes: a metodologia proposta foi comprovada, permitindo redução considerável do coagulante primário (da ordem de 40 a 60 %) ao se utilizar polímeros sintéticos não iônico e catiônico como auxiliares de floculação, com dosagens entre 0,1 e 1,0 mg/l; de acordo com a metodologia proposta, pode-se projetar decantadores com maior velocidade de sedimentação, ou seja, menores unidades, no caso de novas estações de tratamento de água; em se tratando de estações de tratamento de água existentes, pode-se aumentar a vazão tratada sem a construção de unidades adicionais se for empregada a metodologia proposta; dos polímeros sintéticos utilizados, o sobrenadante com menor turbidez remanescente foi obtido com menor dosagem do polímero catiônico.

Tabela 3.1 - Fração mínima da turbidez inicial e respectiva dosagem de polímero não iônico em função da velocidade de sedimentação para os pontos selecionados no diagrama de coagulação

Ponto	Dosagem de Sulfato de Alumínio PA (mg/l)	pH de Coagu lação	Valores de T/To (%)							
			Velocidade de Sedimentação (cm/min) e Dosagem de Polímero							
			Vs 1,7	DP (mg/l)	Vs 3,6	DP (mg/l)	Vs 6,3	DP (mg/l)	Vs 10,0	DP (mg/l)
A	40	6,2	1,6	3,0	1,6	3,0	4,5	3,0	7,5	3,0
B	25	6,8	1,1	1,0	1,3	1,0	1,3	1,0	7,0	3,0
C	17	7,2	2,2	0,3	2,2	0,5	2,4	0,5	8,0	0,5
D	11	6,9	3,5	0,5	5,5	0,5	6,0	0,5	10,5	0,5
E	7	6,8	8,0	0,3	8,5	0,3	9,5	0,3	13,0	0,5
F	8	5,4	10,5	0,5	10,5	0,5	13,5	0,3	15,5	0,3

Fonte: PAIXÃO (1996)

Tabela 3.2 - Fração mínima da turbidez inicial e respectiva dosagem de polímero catiônico em função da velocidade de sedimentação para os pontos selecionados no diagrama de coagulação

Ponto	Dosagem de Sulfato de Alumínio PA (mg/l)	pH de Coagu lação	Valores de T/To (%)							
			Velocidade de Sedimentação (cm/min) e Dosagem de Polímero							
			Vs 1,7	DP (mg/l)	Vs 3,6	DP (mg/l)	Vs 6,3	DP (mg/l)	Vs 10,0	DP (mg/l)
A	40	6,2	1,3	3,0	1,6	3,0	2,2	3,0	8,0	3,0
B	25	6,8	1,0	3,0	1,7	3,0	2,0	3,0	2,2	3,0
C	17	7,2	1,1	3,0	1,5	3,0	1,6	1,0	3,4	3,0
D	11	6,9	8,0	3,0	8,5	3,0	8,0	3,0	12,0	3,0
E	7	6,8	8,0	3,0	9,0	0,3	9,0	0,3	11,0	3,0
F	8	5,4	12,0	3,0	12,0	3,0	12,5	0,3	17,0	3,0

Fonte: PAIXÃO (1996)



DI BERNARDO (1997) realizou ensaios de coagulação-floculação-sedimentação em reatores estáticos com água preparada em laboratório tendo turbidez e cor verdadeira não muito elevadas, objetivando a construção dos diagramas de coagulação do sulfato de alumínio, e posterior avaliação da influência do método de preparação (a frio com hidróxido de sódio ou a quente), das soluções de amido de mandioca e milho, nativos e catiônicos, quando utilizados como auxiliares na floculação. Para a escolha dos pontos nos diagramas, foi utilizada a metodologia proposta por DI BERNARDO (1993).

Na Figura 3.22 é apresentado o diagrama de coagulação com o sulfato de alumínio obtido por DI BERNARDO (1997), para a velocidade de sedimentação de 3,5 cm/min, e os pontos selecionados.

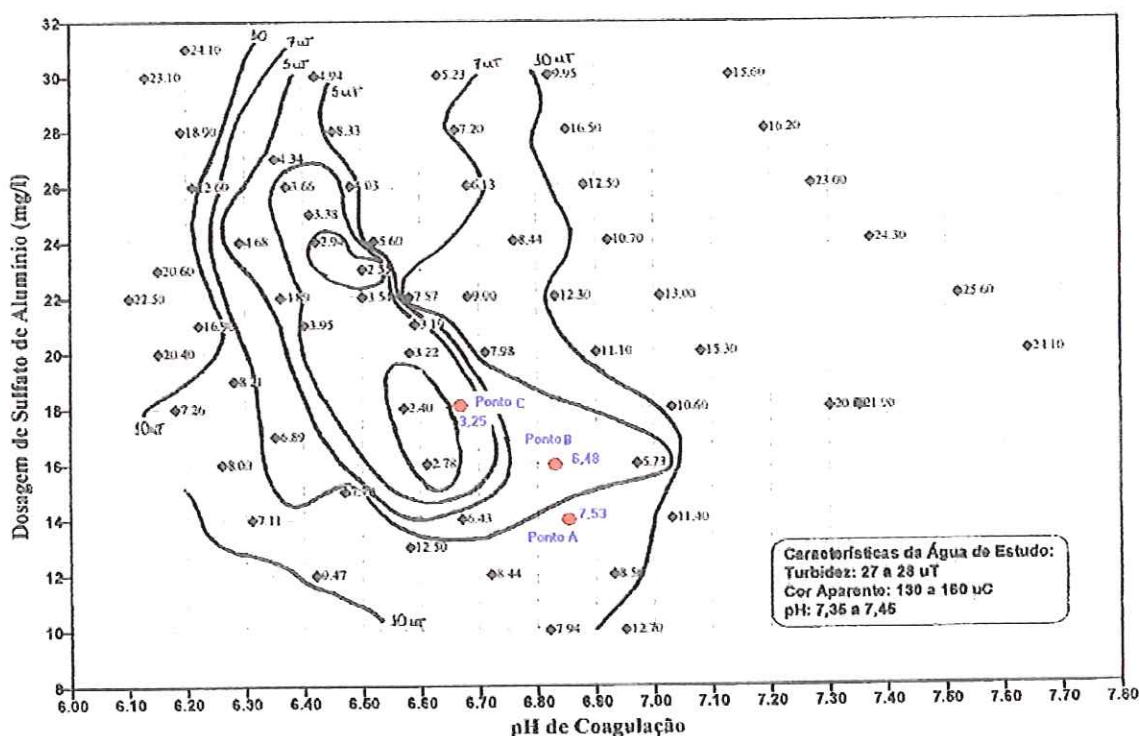


Figura 3.22 – Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio, contendo curvas de mesma turbidez remanescente,  $V_s = 3,5$  mc/min

Fonte: DI BERNARDO (1997)

Nas Figuras 3.23 e 3.24 são apresentados alguns resultados com o emprego do amido de mandioca catiônico e amido de mandioca, preparados a quente, respectivamente, para o ponto C do diagrama (Dosagem de Sulfato de Alumínio PA = 18 mg/L). Percebe-se que o aumento da dosagem de amido de mandioca catiônico melhorou consideravelmente a qualidade da água decantada somente para velocidades de sedimentação maiores que 2,7 cm/min, sendo os melhores resultados obtidos com a dosagem de amido de 3 mg/L. Já com o amido de mandioca não foram obtidos bons resultados para todas as velocidades de sedimentação estudadas.

Verificou-se que o amido de mandioca catiônico proporcionou melhores resultados que o amido de mandioca natural em praticamente todos os ensaios realizados, provavelmente pelo fato de também atuar como coagulante. Constatou-se também que, com o método de preparação a frio, foram obtidos melhores resultados que com o método de preparação a quente para o amido de mandioca natural; já para o amido de mandioca catiônico, com a preparação a quente, os resultados foram tão bons quanto com a preparação a frio, em termos de remoção de turbidez e de cor aparente.

DI BERNARDO (1997) concluiu que só é vantajoso o uso do amido de mandioca natural ou catiônico, preparado a quente ou a frio, para velocidades de sedimentação relativamente altas, pois para velocidades baixas (< 3 cm/min), as melhorias na qualidade da água decantada decorrentes do uso do amido não são significativas.

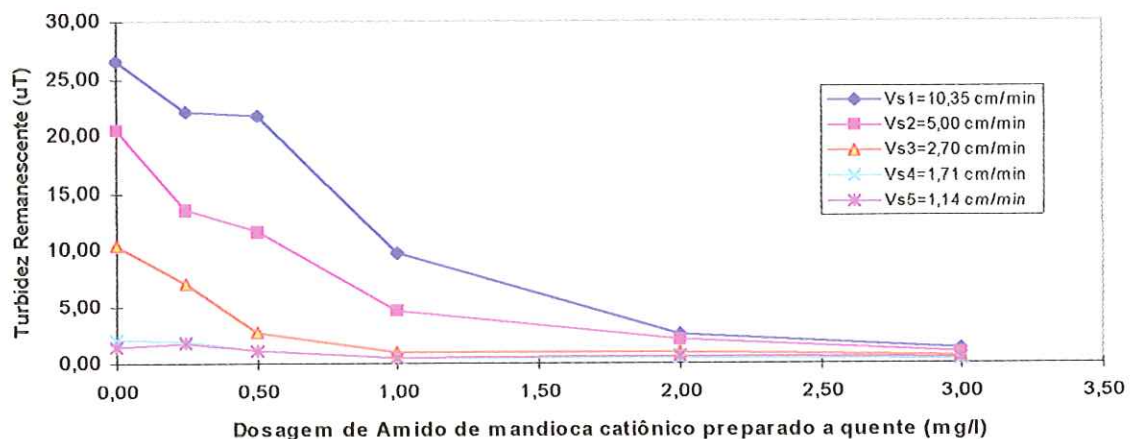


Figura 3.23 - Turbidez remanescente em função da dosagem de amido de mandioca catiônico preparado a quente para diferentes velocidades de sedimentação – Ponto C (DSA = 18 mg/L)

Fonte: DI BERNARDO (1997)

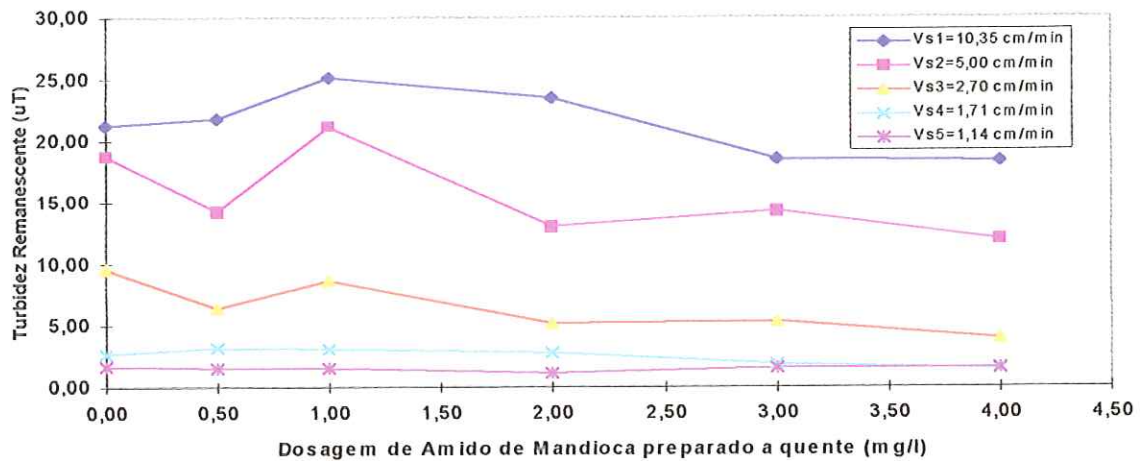


Figura 3.24 - Turbidez remanescente em função da dosagem de amido de mandioca preparado a quente para diferentes velocidades de sedimentação – Ponto C (DSA = 18 mg/L)

Fonte: DI BERNARDO (1997)

MARINELLI (1999) estudou amidos de milho catiônicos com diferentes concentrações de amilose e amilopectina. Após a construção do diagrama de coagulação do sulfato de alumínio, e escolha dos pontos nos diagramas segundo a metodologia em questão, foi avaliada a eficiência na remoção da turbidez e de cor aparente da água em função da dosagem do polímero e da velocidade de sedimentação.

Nas Figuras 3.25 e 3.26 são mostrados os diagramas de coagulação obtidos por MARINELLI (1999), para as velocidades de sedimentação de 3,5 e 2,0 cm/min

Na Figura 3.27 são apresentados os resultados da aplicação do amido de milho híbrido e do amido de milho comum como auxiliares de floculação para o ponto C do diagrama (Figuras 3.25 e 3.26). Nota-se que com o amido de milho comum foram obtidos melhores resultados em termos de remoção de turbidez que com o amido de milho híbrido.

As principais conclusões do autor sobre o trabalho realizado foram : com o amido catiônico de milho comum (27% de amilose) foram obtidos melhores resultados do que com o amido catiônico de milho híbrido (98% de amilopectina), em diversas condições, mostrando que as cadeias de amilose têm importante função floculação; os resultados como um todo indicam que ambos amidos podem ser usados como auxiliar de floculação, principalmente quando se consideram maiores dosagens dos mesmos.

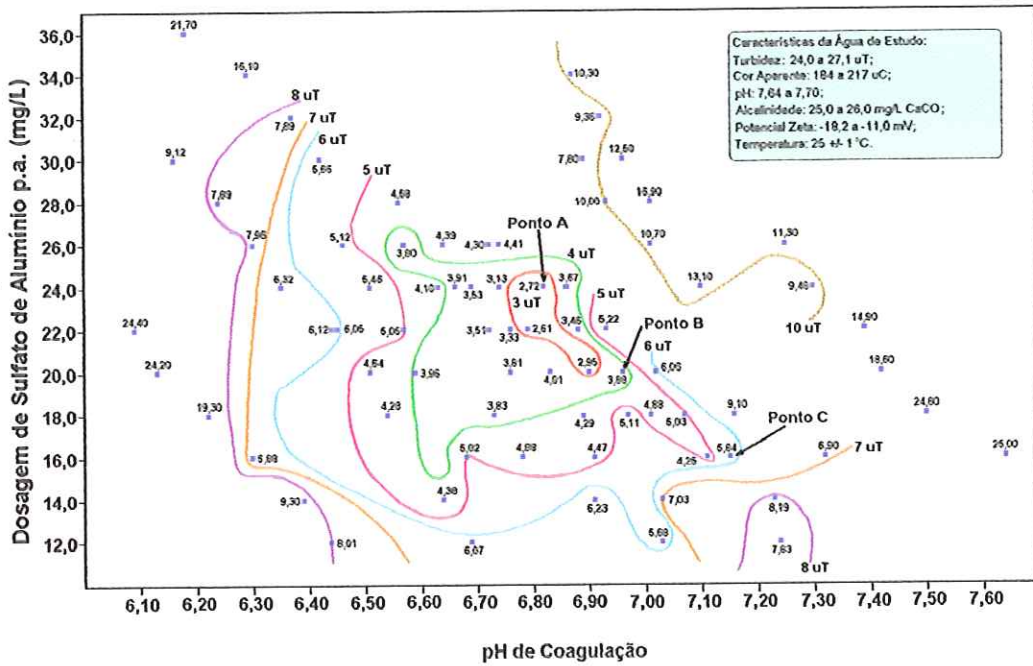


Figura 3.25 – Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio, contendo curvas de mesma turbidez remanescente,  $V_s = 3,5$  cm/min, Fonte: MARINELLI (1999)

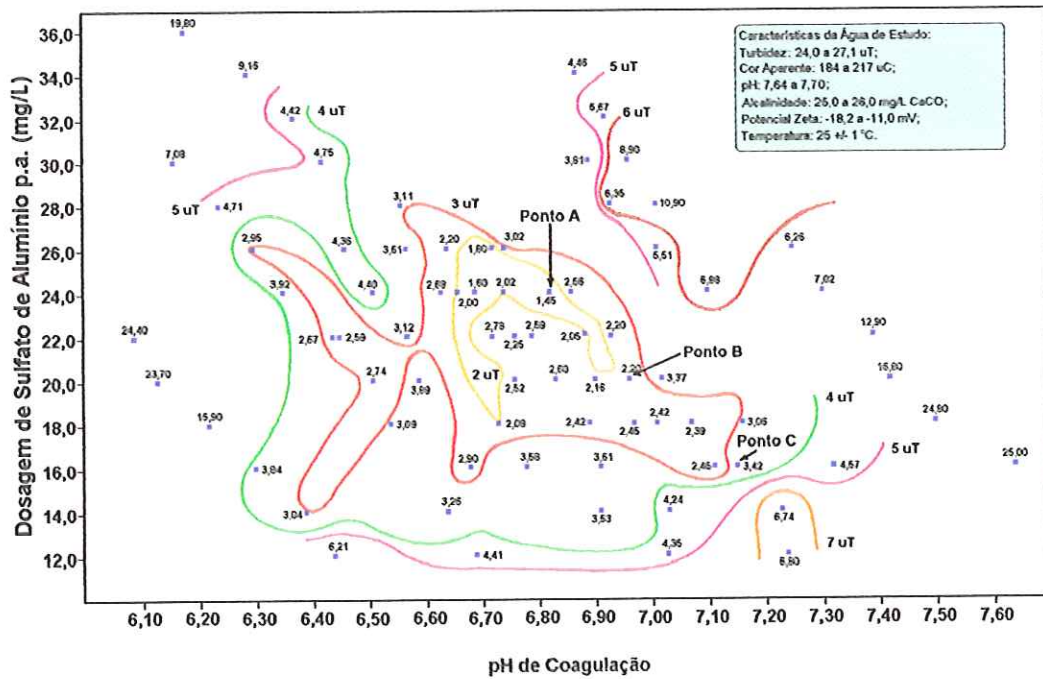


Figura 3.26 – Diagrama de coagulação para o sulfato de alumínio, contendo curvas de mesma turbidez remanescente,  $V_s = 2,0$  cm/min, Fonte: MARINELLI (1999)

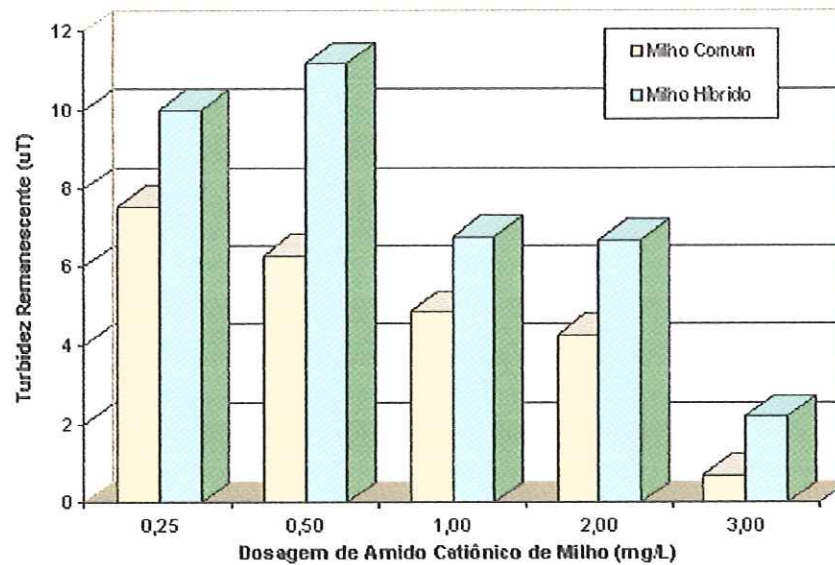


Figura 3.27 – Comparação da eficiência dos amidos catiônicos não purificados na remoção de turbidez,  $V_s = 5,0$  cm/min (Ponto C)

Fonte: MARINELLI (1999)

#### 3.2.2.4 – Considerações sobre o tempo de aplicação do polímero

HUDSON (1981) considera que o tempo, decorrido após a mistura rápida, para a adição do polímero, deve ser objeto de estudo, no entanto, o autor comenta que a adição do auxiliar de floculação um minuto após o término da mistura rápida, é suficiente para produzir bons resultados. DI BERNARDO (1993) recomenda a introdução do polímero logo após a mistura do coagulante primário, em uma câmara provida de agitador, de forma que se tenha um gradiente de velocidade de  $300 \text{ s}^{-1}$  e agitação por um minuto.

Segundo a AWWA (1976), os polímeros podem ser adicionados em diferentes estágios do processo de tratamento, quando utilizados como auxiliares de coagulação:

- antes da mistura rápida;
- durante a mistura rápida;
- imediatamente após a mistura rápida;

Existem inúmeros tipos de polímeros e pontos de aplicação. A adição de polímero catiônico antes da mistura rápida, e a introdução de uma pequena quantidade de polímero aniônico de alta massa molecular imediatamente após a mistura rápida, é uma opção. A adição de pequenas quantidades de polímeros aniônicos e não-iônicos para complementar o uso do catiônico, pode melhorar a sedimentabilidade do floco (AWWA, 1976).

A Fundação de pesquisa da AWWA (AWWA, 1976) realizou diversas pesquisas sobre avaliação de polímeros em “Jar Test”. Em uma delas, o sulfato de alumínio era adicionado primeiro, seguido do polímero (vários tipos de polímeros sintéticos), com rotação de 100 rpm.; após 2 min, a rotação era reduzida para 50 rpm por mais 7 min; o sobrenadante era coletado após 5 min de sedimentação. Em outra pesquisa, o coagulante era adicionado com o agitador a 100 rpm e realizada a mistura por 3 min, seguida da adição do polímero e redução da rotação para 80 rpm, mantida por 15 min ;o tempo de sedimentação era de 5 min.

Não foi encontrado na literatura consultada trabalhos sobre o tempo, decorrido após a mistura do coagulante primário, que se deve aguardar para adicionar o polímero como auxiliar de floculação, e informações sobre a influência deste tempo na estrutura do floco.

#### 3.2.2.5 – Fatores intervenientes no desempenho da Mistura Rápida

A coagulação depende consideravelmente das características da água bruta e das impurezas presentes, conhecidas pelos seguintes parâmetros: pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez, temperatura, mobilidade eletroforética (potencial zeta), sólidos totais dissolvidos (força iônica), tamanho e distribuição de tamanhos das partículas em estado coloidal e em suspensão, vírus, bactérias, protozoários, principais gêneros de algas, metais, etc. As variações sazonais das características da água bruta influem substancialmente nas tecnologias de tratamento, como será visto posteriormente.

As principais tecnologias de tratamento com coagulação química são: filtração direta ascendente, filtração direta descendente e tratamento em ciclo completo. Na Figura 3.28 são mostradas as variantes nas tecnologias de tratamento com coagulação química.

DI BERNARDO et al (1998) mencionam que água com cor e turbidez relativamente baixas, ausência de algas e temperatura superior a 15 °C, sem se considerar as demais características, são candidatas em potencial ao uso da filtração direta, não havendo, na maioria dos casos, necessidade da floculação e da sedimentação. Por outro lado, quase sempre, águas com cor verdadeira ou turbidez, ou grande quantidade de algas, requerem tratamento com coagulação, floculação e decantação ou flotação, antecedendo a filtração. Também, águas com alcalinidade elevada ou com temperatura menor que 10 °C, podem exigir o uso de um coagulante que não seja um sal de alumínio, como um polímero catiônico e, eventualmente, um sal de ferro.

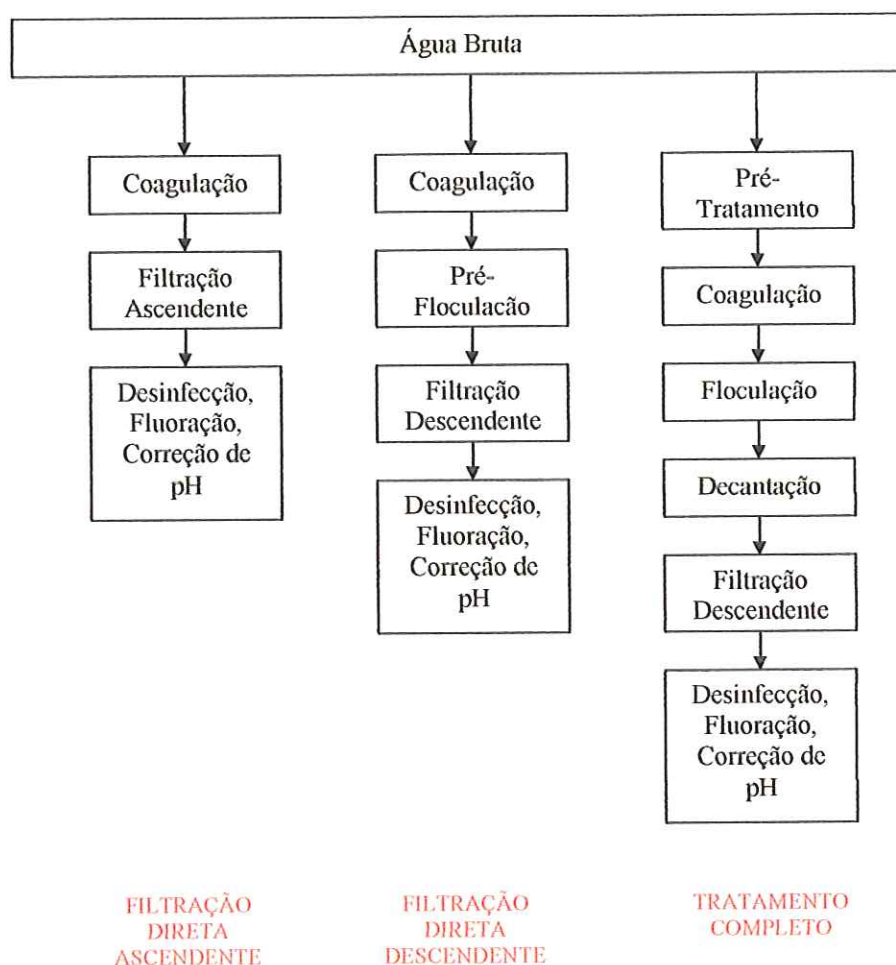


Figura 3.28 – Variações nas tecnologias de tratamento com coagulação química

Fonte: DI BERNARDO (1993)

A coagulação química está intimamente relacionada ao tipo de tecnologia de tratamento, em ciclo completo ou filtração direta, estas, por sua vez, dependem das características da água bruta. Na maioria dos países tropicais, há dois períodos sazonais marcantes, quais sejam, de estiagem e de chuva. Devido à quantidade relativamente elevada de material suspenso, em estado coloidal e dissolvido durante a época de chuvas, há necessidade de algum tipo de pré-tratamento. Nas ETAs em ciclo completo, o pré-tratamento geralmente consiste da floculação e decantação (ou flotação), após a coagulação, com o fim de reduzir a quantidade de matéria afluente aos filtros, enquanto, nas ETAs de filtração direta, a água coagulada é geralmente submetida à filtração, após coagulação (às vezes com floculação no caso da filtração direta

descendente). Se a água bruta for captada em lagos ou em cursos d'água correntes com características aproximadamente constantes, ou cujas variações não sejam acentuadas, a filtração direta pode ser a tecnologia recomendada. No entanto, quando a água bruta apresenta-se com variações acentuadas de qualidade e com picos elevados de turbidez, cor, etc, pode ser recomendável o tratamento em ciclo completo.

Segundo DI BERNARDO et al (1998), há muitas situações nas quais é utilizado o tratamento em ciclo completo para águas superficiais que apresentam variações sazonais de suas características, favorecendo a filtração direta em certos períodos do ano e o tratamento em ciclo completo em outros. Assim, as ETAs devem ser projetadas e construídas com flexibilidade para permitir o tratamento eficiente de uma ou de outra forma.

Os principais tipos de coagulantes químicos comumente utilizados no Brasil são: sulfato de alumínio, sulfato ferroso clorado, sulfato férrico, cloreto férrico e hidroxiclreto de alumínio. Polímeros catiônicos, como coagulantes primários, podem ser usados em ocasiões especiais. DI BERNARDO (1993) observou que além das características da água bruta (principalmente pH, alcalinidade e temperatura), as condições de operação e manutenção são fundamentais para a escolha do coagulante apropriado, devendo-se considerar as características da comunidade e os custos envolvidos com vistas à sustentabilidade do funcionamento contínuo da ETA.

Em função das características da água bruta e das comunidades, do tipo de coagulante químico, da tecnologia de tratamento e da operação e manutenção da ETA, pode-se escolher entre a mistura rápida mecanizada ou hidráulica. A primeira é geralmente realizada por meio de agitadores mecanizados em câmaras, canais ou tubulações, enquanto na segunda, têm-se injetores ou promove-se o ressalto hidráulico em unidades especiais para misturar a solução do coagulante na água. Dependendo das características da água bruta (especialmente o tamanho das partículas em estado coloidal e em suspensão) e do tipo de coagulante, pode ser necessário alterar a micro-escala de turbulência, ou seja, o tamanho médio dos turbilhões formados durante a agitação. A micro-escala de turbulência está relacionada ao gradiente de velocidade médio produzido, de forma que este parâmetro, apesar das restrições encontradas na literatura, ainda é muito utilizado para otimizar o desempenho da mistura rápida (DI BERNARDO, 1993).

Em geral, os parâmetros ótimos da mistura rápida, gradiente de velocidade médio e tempo de agitação, variam com a qualidade da água bruta e com a tecnologia de tratamento. Há indicações de alguns valores, os quais devem ser tomados como recomendações gerais, como mostrado na Tabela 3.3. Entretanto, é imprescindível que sejam feitos ensaios visando a otimização dos parâmetros.



BRITO (1998) realizou ensaios em “Jar Test” com água preparada em laboratório (turbidez de aproximadamente 25 uT e cor verdadeira entre 5 e 15 uC), utilizando como coagulante o sulfato de alumínio e, em uma segunda etapa, o cloreto férrico, com o objetivo de verificar a influência da velocidade de sedimentação na determinação dos coeficientes de agregação e ruptura durante a floculação (os coeficientes de agregação e ruptura serão definidos e comentados posteriormente). Uma das partes do trabalho foi a otimização dos parâmetros da mistura rápida. Nas Figuras 3.29, 3.30 e 3.31 são mostrados os resultados da otimização da mistura rápida com o sulfato de alumínio, para as velocidades de sedimentação iguais a 5,0, 2,5 e 0,5 cm/min, respectivamente.

Tabela 3.3 - Parâmetros usuais de projeto de unidades de mistura rápida

Parâmetro ou Característica	Sulfato de Alumínio, Sulfato Férrico, Sulfato Ferroso Clorado, Hidroxicloreto de Alumínio	Polímero Catiônico
Gradiente de Velocidade Médio $G_{mr}$ ( $s^{-1}$ )	3 000 a 7 000 (Coagulação por Adsorção e Neutralização de Carga)	200 a 800 (Depende da Temperatura)
Tempo de Agitação $T_{mr}$ (s)	250 a 1 500 (Coagulação por Varredura) $\leq 5$ (Coagulação por Adsorção e Neutralização de Carga) $\leq 60$ (Coagulação por Varredura)	30 a 300 (Coagulação por Varredura)
$G_{mr} \times T_{mr}$	10 000 a 35 000 (Coagulação por Adsorção e Neutralização de Carga) 15 000 a 35 000 (Coagulação por Varredura)	5 000 a 30 000

Fonte: DI BERNARDO et al (1998)

BRITO (1998) observou que tanto para  $V_s = 5,0$  cm/min como para  $V_s = 2,5$  cm/min, os melhores resultados, com turbidez remanescente de aproximadamente 22,5 e 5,44% da inicial, respectivamente, foram encontrados para  $G_{mr} = 400s^{-1}$  e  $T_{mr} = 5s$ . Já para  $V_s$  de 0,5 cm/min o melhor resultado -  $N = 0,49uT$  (cerca de 1,96% da Turbidez inicial) - foi para  $G_{mr} = 1000s^{-1}$  e  $T_{mr} = 20s$ . Desta forma, os parâmetros de mistura rápida escolhidos, após os ensaios realizados, foram  $G_{mr} = 400s^{-1}$  e  $T_{mr} = 5s$ .

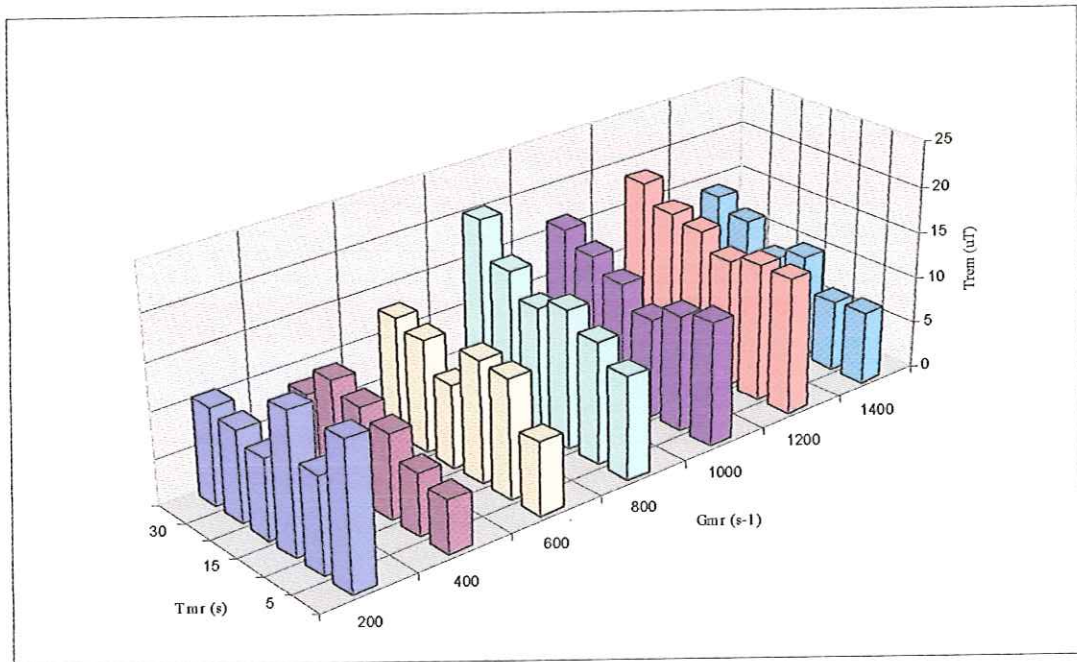


Figura 3.29 – Otimização da mistura rápida (Dosagem de Sulfato de Alumínio = 20 mg/L; pH de coagulação = 6,32; Floculação : Tf = 20 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Sedimentação : Vs = 5,0 cm/min)

Fonte: BRITO (1998)

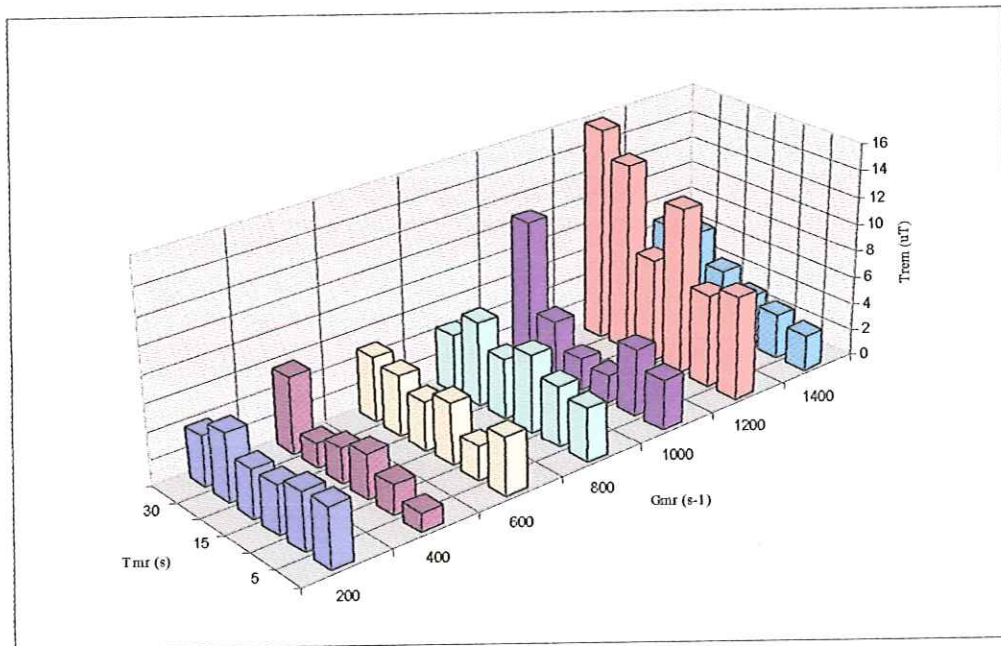


Figura 3.30 – Otimização da mistura rápida (Dosagem de Sulfato de Alumínio = 20 mg/L; pH de coagulação = 6,32; Floculação : Tf = 20 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Sedimentação : Vs = 2,5 cm/min)

Fonte: BRITO (1998)

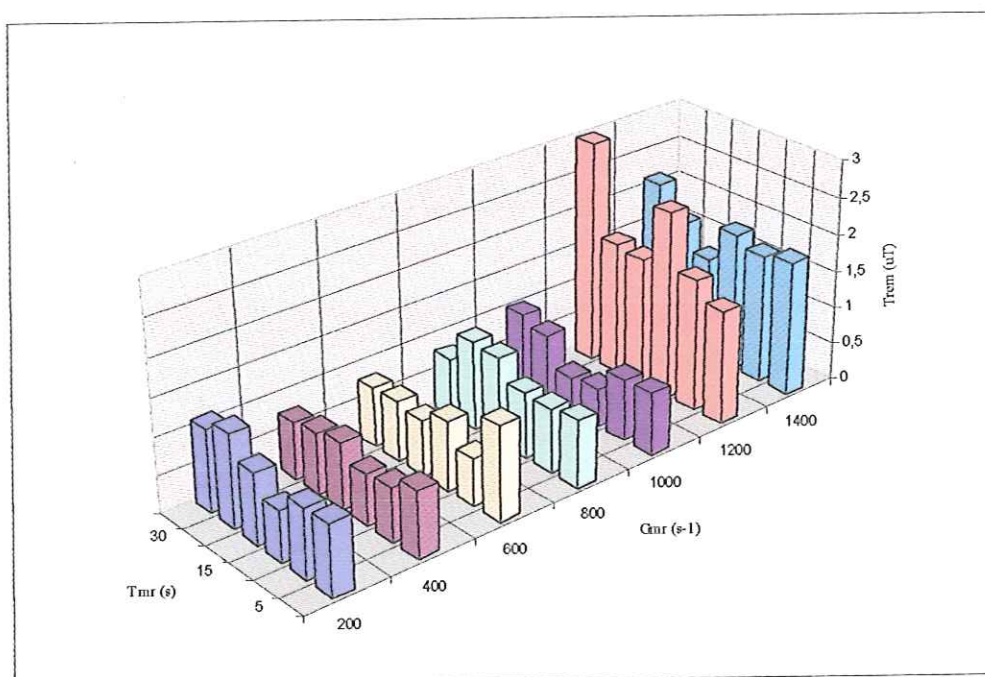


Figura 3.31 – Otimização da mistura rápida (Dosagem de Sulfato de Alumínio = 20 mg/L; pH de coagulação = 6,32; Floculação : Tf = 20 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Sedimentação : Vs = 0,5 cm/min)

Fonte: BRITO (1998)

### 3.2.3 – Floculação

#### 3.2.3.1 - Introdução

Nas ETAs, a floculação corresponde à etapa em que são fornecidas condições para facilitar o contato e a agregação de partículas previamente desestabilizadas por coagulação química, visando a formação de flocos com tamanho e massa específica que favoreçam sua remoção por sedimentação, flotação ou filtração direta. A eficiência da unidade de floculação depende do desempenho da unidade de mistura rápida, a qual é influenciada por fatores tais como tipo de coagulante, pH de coagulação, temperatura da água, concentração e idade da solução de coagulante, tempo e gradiente de velocidade de mistura rápida, tipo e geometria do equipamento de agitação e qualidade da água bruta. O desempenho das unidades de mistura rápida e de floculação influi na qualidade da água clarificada produzida na ETA e, conseqüentemente, na duração da carreira de filtração. O estabelecimento do tempo e do gradiente de velocidade de projeto da unidade de floculação dependem, fundamentalmente, da qualidade da água bruta e da tecnologia de tratamento utilizada na ETA, PÁDUA et al (1998).

MENDES (1989) estudou, em reator estático, a floculação de dez tipos de águas naturais e sintéticas, tendo constatado que, para cada tempo de floculação, existia um único gradiente de velocidade com o qual obtinha-se a melhor remoção de cor ou turbidez da água bruta, constatando que o gradiente de velocidade ótimo de floculação ( $G_r^*$ ) diminuía à medida que aumentava o tempo de floculação (Figuras 3.32 e 3.33).

Nos ensaios em reator estático, é possível calcular o gradiente de velocidade ótimo quando o mesmo é mantido constante durante o período de floculação, o que difere da metodologia apresentada por PÁDUA et al (1998). Esta teve como finalidade determinar os gradientes de velocidade ótimos quando os mesmos variam nas câmaras em série ou nos canais da unidade de floculação com escoamento contínuo das ETAs.

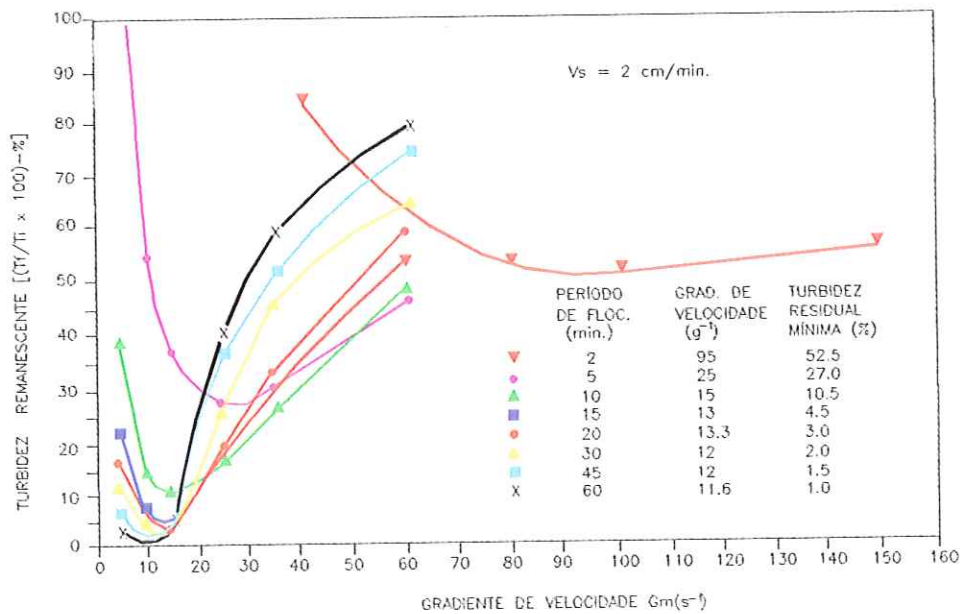


Figura 3.32 – Turbidez remanescente em função do gradiente de velocidade para diferentes tempos de floculação, Água Tipo I

Fonte: MENDES (1989)

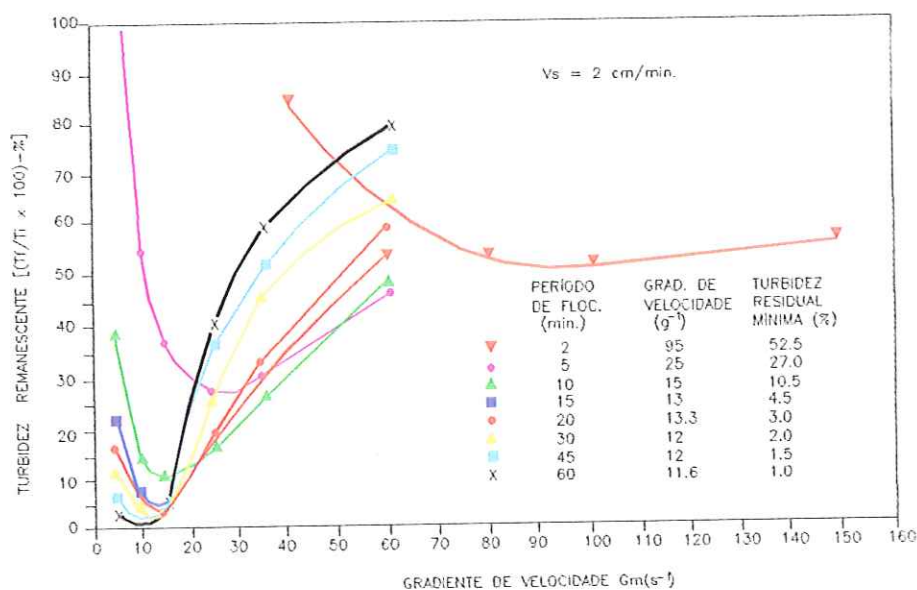


Figura 3.33 – Cor aparente remanescente em função do gradiente de velocidade para diferentes tempos de floculação, Água Tipo II

Fonte: MENDES (1989)

### 3.2.3.2 - Gradiente de Velocidade e Tempo de Floculação

Em geral, os modelos matemáticos que visam prever o desempenho das unidades de floculação baseiam-se nos trabalhos de Smoluchowski, e no conceito de gradiente de velocidade médio definido por CAMP & STEIN (1943). Embora a validade deste parâmetro venha sendo questionada por pesquisadores como CLEASBY (1984) e CLARK (1985), o mesmo, devido sua simplicidade, é ainda amplamente empregado para estabelecer as condições de projeto e de operação das unidades de mistura rápida e de floculação das ETAs.

No início da floculação necessita-se de gradientes de velocidade com valores mais elevados, para aumentar as chances de contato e agregação das partículas pequenas previamente desestabilizadas por coagulação química. À medida que os flocos são formados, o gradiente de velocidade deve ser reduzido, de modo a atenuar a ruptura dos mesmos sem, contudo, impedir o seu crescimento decorrente da agregação com outros flocos. MENDES (1989) estudou em reator estático a floculação de dez tipos de água, e observou para todas elas um comportamento

semelhante ao reproduzido na Figura 3.34, pela qual pode-se notar que o  $G_f^*$  diminui à medida que aumenta o tempo de floculação ( $T_f$ ).

Em todos os casos estudados pelo autor, a curva que relaciona a cor aparente (ou turbidez) remanescente mínima com o tempo de floculação, considerando-se o gradiente de velocidade de floculação otimizado para cada tempo, pôde ser representada pela equação 3.04.

$$(G_f^* - G_{fc})^n T_f = K^* \quad (3.04)$$

em que:

$G_f^*$ : gradiente de velocidade ótimo de floculação correspondente ao tempo de floculação  $T_f$  ( $s^{-1}$ );

$G_{fc}$ : gradiente de velocidade ótimo quando o tempo de floculação tende para o infinito ( $s^{-1}$ );

$T_f$ : tempo de floculação (s);

$n$  e  $K^*$ : constantes determinadas experimentalmente em reatores estáticos.

Pela equação proposta por MENDES (1989), após a realização de ensaios que permitam estabelecer o valor das constantes  $n$  e  $K^*$ , é possível calcular o valor do gradiente de velocidade ótimo, correspondente a cada tempo de floculação, para ensaios realizados em reator estático. Contudo, este equacionamento não fornece meios de calcular o gradiente de velocidade ótimo quando o mesmo é variado durante o tempo de floculação  $T_f$ , ou seja, o  $G_m^*$  quando a água já foi pré-floculada, como no caso das unidades de floculação com escoamento contínuo das ETAs.

MENDES (1989) observou que a cor aparente (ou turbidez) remanescente mínima podia ser calculada, pela equação 3.05, quando o ensaio no reator estático era realizado com  $G_f^*$ .

$$(C_f/C_i) \times 100 = K T_f^m \quad (3.05)$$

em que:

$C_f$ : cor aparente (ou turbidez) da água decantada (uC ou uT);

$C_i$ : cor aparente (ou turbidez) da água bruta (uC ou uT);

$K$  e  $m$ : constantes determinadas experimentalmente em reatores estáticos.

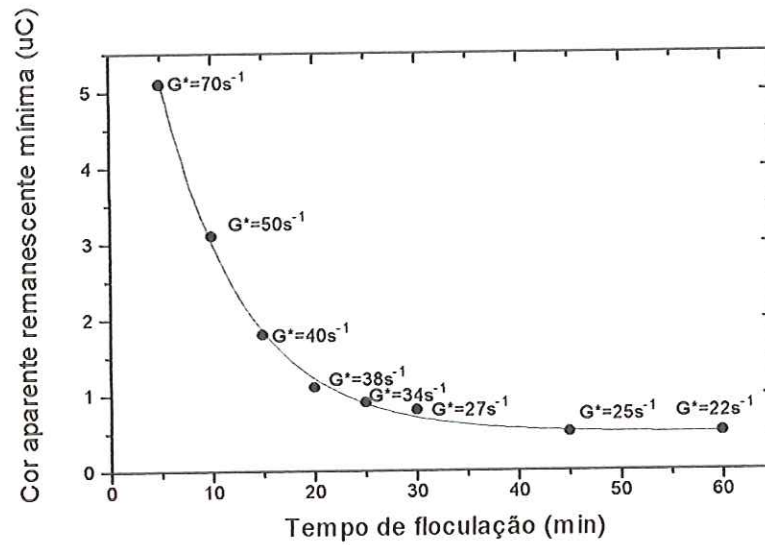


Figura 3.34 - Variação da cor aparente remanescente mínima em função do tempo de floculação  
 Fonte: MENDES (1989).

Quanto às unidades de floculação de mistura completa com escoamento contínuo com  $m$  reatores idênticos em série, o desempenho do  $i$ -ésimo compartimento pode ser previsto pela equação (3.06), proposta por ARGAMAN e KAUFMAN (1970):

$$\frac{n_1^{i-1}}{n_1^i} = \frac{1 + K_A G_f \frac{T_f}{m}}{1 + \frac{n_1^o}{n_1^{i-1}} K_B G_f^2 \frac{T_f}{m}} \quad (3.06)$$

em que:

$K_A$ : constante de agregação, determinada experimentalmente em reatores com escoamento contínuo;

$K_B$ : constante de ruptura, determinada experimentalmente em reatores com escoamento contínuo (s);

$T_f$ : tempo de floculação (s);

$n_1^0$ : número de partículas primárias por unidade de volume ( $m^{-3}$ );

$G_f$ : gradiente de velocidade médio de floculação ( $s^{-1}$ ).

Se os coeficientes de agregação e de ruptura e o gradiente de velocidade médio não variarem, a eficiência global do sistema composto por  $m$  câmaras em série pode ser expressa pela equação 3.07.

$$\frac{n_1^0}{n_1^m} = \frac{\left(1 + K_A G_f \frac{T_f}{m}\right)^m}{1 + K_B G_f^2 \frac{T_f}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \left(1 + K_A G_f \frac{T_f}{m}\right)^i} \quad (3.07)$$

BRATBY et al (1977), apresentam a equação 3.08, com a qual é possível determinar os coeficientes  $K_A$  e  $K_B$  a partir de ensaios em reatores estáticos. Os pesquisadores comentam que a equação aplica-se perfeitamente a reatores de mistura completa para valores de  $G_f$  menores que  $100s^{-1}$ .

$$\frac{n_o}{n_1} = \left[ \frac{K_B}{K_A} G_f + \left(1 - \frac{K_B}{K_A} G_f\right) e^{-K_A G_f T_f} \right]^{-1} \quad (3.08)$$

Pode-se estimar o tempo de floculação necessário para se obter uma determinada eficiência ( $n_1^o / n_1^m$ ) no reator contínuo, a partir dos resultados obtidos no reator estático, se forem calculados os coeficientes de agregação ( $K_A$ ) e de ruptura ( $K_B$ ), referentes a um determinado gradiente de velocidade médio ( $G_f$ ). Substituindo os valores de  $K_A$ ,  $K_B$  e  $G_f$  na equação (3.08), determina-se o tempo de floculação ( $T_f$ ) para o qual é esperada a eficiência ( $n_1^o / n_1^m$ ) na unidade de mistura completa com  $m$  câmaras em série e escoamento contínuo.

As equações apresentadas não permitem estabelecer os gradientes de velocidade que otimizam o desempenho das unidades de floculação, sendo necessário, para este fim, a realização de ensaios em instalação piloto com escoamento contínuo, combinando diferentes gradientes de velocidade nas câmaras. Embora este procedimento seja o mais indicado para estabelecer as condições de projeto e de operação das unidades de floculação, esse recurso é raramente utilizado, devido aos custos e ao tempo dispendido neste tipo de ensaio.

### 3.2.3.3 - Otimização de Gradientes de Velocidade em Unidades de Floculação

Vários pesquisadores, tais como CAMP (1953), BRATBY (1981) e DI BERNARDO (1993) fazem referência à possibilidade de melhorar a qualidade da água decantada quando a floculação é realizada com gradiente de velocidade decrescente ao longo do tempo, visto que no início necessita-se agitação mais intensa para aumentar as chances de contato entre as partículas



desestabilizadas, de modo a formar flocos, devendo-se reduzir a agitação posterior para diminuir a quebra dos flocos formados.

A construção de instalação piloto na qual possam ser testadas várias combinações de gradientes de velocidade para as câmaras em série da unidade de floculação é um recurso raramente empregado no projeto e na operação de ETAs. Com o objetivo de orientar os projetos para os quais é inviável a construção e operação de instalação piloto, BRATBY (1981), sugeriu uma metodologia para otimizar os gradientes de velocidade das unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série a partir de ensaios em reator estático. A metodologia requer o emprego das equações (3.06) e (3.07), da relação  $K_B/K_A$  fornecida pela equação (3.09) e supõe como válida a equação (3.10), a qual relaciona o coeficiente de ruptura ( $K_B$ ) com o gradiente de velocidade médio de floculação.

$$\frac{K_B}{K_A} = \frac{1}{G_f \cdot \frac{N_o}{N}} \quad (3.09)$$

$$K_B = k_1 \cdot \ln G_f + k_2 \quad (3.10)$$

em que:

$N_o$ : turbidez inicial do sobrenadante após desestabilização e sedimentação sem floculação (uT);

$N$ : turbidez do sobrenadante após floculação e sedimentação (uT);

$k_1$ : constante determinada experimentalmente;

$k_2$ : constante determinada experimentalmente ( $m^2/s$ ).

Por meio de ensaios em reator estático BRATBY (1981), obteve, para determinada água:  $K_A = 1,28 \times 10^{-4}$ ,  $k_1 = -4,12 \times 10^{-7}$  e  $k_2 = 20,6 \times 10^{-7} m^2/s$ . Conhecidos  $K_A$ ,  $k_1$  e  $k_2$ , supondo-se um tempo de detenção igual a 25 min, 3 câmaras em série e empregando a equação (3.06), o autor preparou a Tabela 3.4, concluiu que a combinação de gradientes de velocidade de floculação igual a  $80s^{-1}$ ,  $25s^{-1}$  e  $12,5s^{-1}$  para a primeira, segunda e terceira câmara, respectivamente, resultava o melhor desempenho da unidade (maior valor  $N_o/N_3$ ). Neste

exemplo, o valor de  $n_1^i$  foi substituído por  $N_i$  na equação (3.09), uma vez que foram empregados os valores da turbidez inicial e remanescente ( $N_i$ ) ao invés do número de partículas primárias ( $n_1^i$ ).

Contudo, a partir dos valores de  $K_A$ ,  $k_1$  e  $k_2$  fornecidos por BRATBY (1981), é possível obter outras combinações de gradientes de velocidade médios de floculação com as quais são obtidos resultados melhores que com aquela mencionada pelo pesquisador, como pode ser notado na Tabela 3.4. Além disso, a metodologia não estabelece a faixa de valores de gradientes de velocidade a que se aplica, de modo que sua utilização fica carente de critérios, pois tomando um gradiente de velocidade de floculação igual a  $100s^{-1}$  nas 3 câmaras, resulta  $N_0/N_3 = 7,74$ . Para  $Gf = 148s^{-1}$  a relação  $N_0/N_3$  é igual a 455. É improvável, contudo, obter-se bom desempenho na unidade de floculação com gradientes de velocidade desta ordem.

Tabela 3.4 - Previsão do desempenho da unidade de floculação com escoamento contínuo em função da combinação de gradientes de velocidade médios nas câmaras em série

Gradiente de velocidade de floculação ( $s^{-1}$ )			$N_0/N_3$
1ª câmara	2ª câmara	3ª câmara	
80	40	20	6,16
80	40	15	6,30
80	40	10	6,30
80	40	8	6,22
80	40	12,5	6,33
80	30	12,5	6,37
80	20	12,5	6,38
80	15	12,5	6,31
80	25	12,5	6,39
70	25	12,5	6,18
72	25	12,5	6,22
75	25	12,5	6,28

Fonte: BRATBY (1981)

Tabela 3.5 - Previsão do desempenho da unidade de floculação com escoamento contínuo em função da combinação de gradientes de velocidade médios nas câmaras em série (Simulações feitas a partir dos dados apresentados por BRATBY, 1981)

Gradiente de velocidade de floculação ( $s^{-1}$ )			$N_0/N_3$
1ª câmara	2ª câmara	3ª câmara	
80	80	11	6,91
80	60	12	6,44
75	75	11	6,70

Fonte: BRATBY (1981)

Devido as limitações da metodologia proposta por BRATBY (1981), foi desenvolvida por PÁDUA et al (1998) uma metodologia para determinar os gradientes de velocidade em unidades de floculação com escoamento contínuo a partir da execução de ensaios em reator estático.

A metodologia proposta por PÁDUA et al (1998) requer a realização de ensaios de coagulação-floculação-sedimentação em reator estático sob diferentes condições de tempo e de gradiente de velocidade de floculação, de modo a serem obtidos resultados tais como os apresentados na Tabela 3.6, os quais referem-se a uma água coagulada com cloreto férrico no mecanismo da varredura. Além da qualidade da água bruta, o tipo de coagulante, sua dosagem e pH de coagulação, assim como a velocidade de sedimentação, o uso de polímero e demais condições de mistura rápida, influem no resultado dos ensaios de floculação, de modo que os mesmos devem ser realizados para cada situação particular.

Tomando como exemplo os dados reproduzidos na Tabela 3.5, adotou-se  $T_f = 20$  minutos e considerando que a unidade de floculação com escoamento contínuo possua 4 câmaras em série ( $m = 4$ ), PÁDUA et al (1998) determinou os gradientes de velocidade nas câmaras de floculação da seguinte maneira:

- para o tempo de floculação estabelecido ( $T_f=20$  min) e sendo igual a 4 o número de câmaras em série ( $m = 4$ ), obtém-se o tempo teórico de detenção ( $T_d$ ) em cada câmara. No caso,  $T_d = T_f/m = 20\text{min}/4 = 5$  min. Para este tempo de floculação (5 min), obtém-se na Tabela 2.5 o gradiente de velocidade médio que resulta na menor turbidez remanescente ( $N$ ). No caso,  $N = 8,4 \text{ uT}$  e  $G_f = 55\text{s}^{-1}$ . Este será o gradiente de velocidade a ser aplicado na primeira câmara;

- é necessário então determinar o gradiente de velocidade da floculação da segunda câmara, sabendo-se que o afluente à mesma é a água pré-floculada que, teoricamente, deve apresentar turbidez remanescente igual a 8,4 uT para a velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) estudada ( $V_s=3,5$  cm/min). Desta forma, é preciso, para cada um dos gradientes de velocidade médios estudados, obter o tempo de floculação ( $T_f$ ) com o qual resultará a turbidez remanescente igual a 8,4 uT, fazendo-se interpolação caso necessário (ver Figura 3.35). Soma-se a este tempo o valor do tempo teórico de detenção em cada câmara, no caso,  $T_d=5$  min, e determina-se, novamente por interpolação, a turbidez remanescente, para cada um dos gradientes de velocidade (turbidez remanescente do efluente da segunda câmara). O gradiente de velocidade médio de floculação para o qual resultar o menor valor de turbidez (ou cor aparente) remanescente será adotado para a segunda câmara. Este procedimento é repetido até que sejam obtidos os valores de  $G_f$  para as demais câmaras da unidade de floculação.

Tabela 3.6 - Turbidez remanescente em função do gradiente de velocidade médio e do tempo de floculação após ensaio de coagulação-floculação-sedimentação em reator estático

Tempo de floculação (min)	Turbidez remanescente (uT) - $V_s=3,5$ cm/min				
	$G_f$ $20s^{-1}$	$G_f$ $30s^{-1}$	$G_f$ $40s^{-1}$	$G_f$ $55s^{-1}$	$G_f$ $70s^{-1}$
5,0	22	18	14	8,4	18
7,5	8,6	5,5	5,7	6,2	7,3
10	4,8	3,5	3,9	4,3	9,0
15	2,7	2,2	4,2	6,7	15
20	1,4	1,5	4,0	6,9	13
30	1,3	2,5	9,0	9,2	16
45	1,2	3,2	6,2	15	16
60	2,2	3,5	4,0	7,0	7,4

Fonte: PÁDUA et al (1998)

Pela Figura 3.35 percebe-se que o gradiente de velocidade da segunda câmara da unidade de floculação resulta igual a  $30 s^{-1}$  (menor valor de turbidez remanescente= 3,0 uT). Em

procedimento semelhante, pelas Figuras 3.36 e 3.37, obtém-se o  $G_f$  da terceira e da quarta câmaras, resultando a seguinte combinação:  $G_f = 55, 30, 20$  e  $20 \text{ s}^{-1}$  para a primeira, segunda, terceira e quarta câmaras, respectivamente.

Pela Figura 3.36, nota-se que ao promover a variação do gradiente de velocidade de floculação no reator estático, após 20 minutos de ensaio, teoricamente, seria obtida água decantada com a mesma turbidez remanescente resultante da floculação por 24,1 min com  $G_f$  igual a  $20 \text{ s}^{-1}$ . Entretanto, para a água estudada não há diferença significativa na turbidez remanescente para  $T_f = 20$  ou 30 min, considerando-se  $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ , conforme pode ser notado na Tabela 3.5, de modo que a variação do gradiente de velocidade de floculação seria responsável apenas por uma pequena melhora na qualidade da água decantada. Por outro lado, pela Figura 3.37 pode-se notar que após 15 minutos de floculação, com  $G_f$  variável, a turbidez da água decantada seria igual a  $1,5 \text{ uT}$ , ao passo que mantendo o gradiente de velocidade constante, o melhor resultado para  $T_f = 15$  minutos é obtido com  $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ , resultando água decantada com turbidez remanescente igual a  $2,2 \text{ uT}$ .

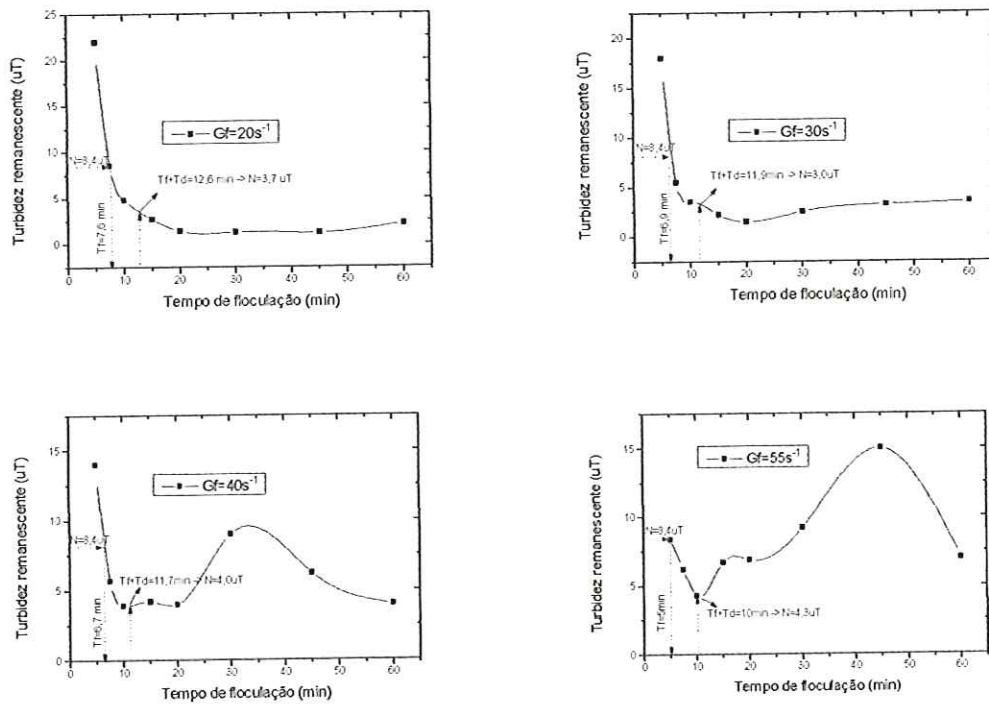


Figura 3.35 - Representação gráfica da interpolação para determinar o gradiente de velocidade médio na segunda câmara de floculação

Fonte: PÁDUA et al (1998)

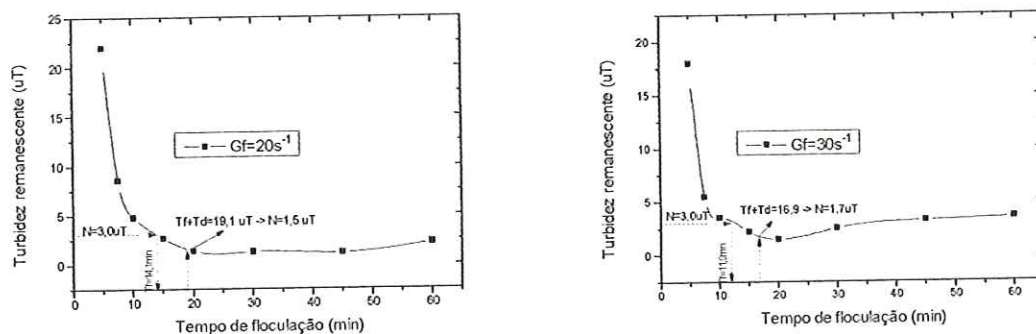


Figura 3.36 - Representação gráfica da interpolação para determinar o gradiente de velocidade médio na terceira câmara de flocculação

Fonte: PÁDUA et al (1998)

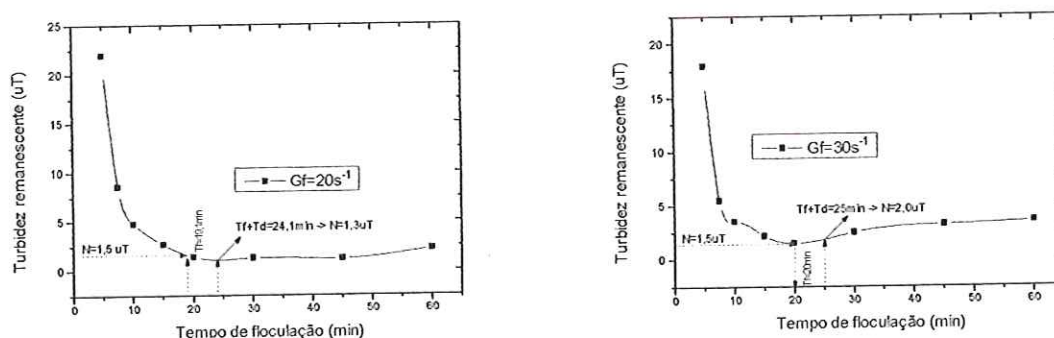


Figura 3.37 - Representação gráfica da interpolação para determinar o gradiente de velocidade médio na quarta câmara de flocculação

Fonte: PÁDUA et al (1998)

Segundo BRATBY (1981), embora o gradiente de velocidade determinado em reatores estáticos seja válido para projeto das unidades reais, o tempo de detenção não pode ser tomado diretamente destes ensaios e aplicados às unidades mecanizadas com escoamento contínuo. Para melhor interpretar os resultados obtidos em laboratório, é necessário conhecer a diferença de comportamento entre o sistema estático e a unidade de mistura completa com escoamento contínuo, de modo que pode ser necessária a realização de ensaios para avaliação do comportamento hidrodinâmico da unidade de flocculação da ETA.

A não-ocorrência de curto-circuito nos reatores estáticos, ao contrário do que é observado nas ETAs, explica discrepâncias quando se comparam os resultados de laboratório com os verificados nas ETAs. Para unidades mecanizadas com escoamento contínuo, o efeito de

curto-circuito influi decisivamente na floculação, sendo necessário majorar o tempo de detenção otimizado no reator estático para que o desempenho seja próximo do obtido em reator estático (PÁDUA et al, 1998). No caso de unidade de floculação mecanizada, quanto maior o número de câmaras em série, menor será o efeito de curto circuito. Porém, por razões de ordem prática e econômica, o número de câmaras em série na unidade de floculação geralmente não passa de quatro (HUDSON, 1981).

### 3.3 – PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS SINTÉTICOS E NATURAIS

#### 3.3.1 – Considerações sobre Polímeros Sintéticos Orgânicos

O polímero é uma cadeia de pequenas subunidades denominadas de meros. Muitos polímeros sintéticos contêm somente um tipo de mero, enquanto outros contêm dois ou três tipos diferentes. O total de meros em um polímero sintético pode variar, resultando materiais de massa molecular diferente. As cadeias dos polímeros podem ser lineares ou ramificadas (WEBER, 1972).

O termo polieletrólito foi introduzido por Fuoss (apud CAMPOS, 1980), denominando os polímeros que gozam da propriedade de apresentar “ sítios ionizáveis “ ao longo de sua cadeia. Fuoss, em sua definição original, não incluiu aqueles polímeros que não apresentam grupos ionizáveis e que possuem carga, mas atualmente o termo polieletrólito passou a assumir características mais amplas, de modo que englobou também esse tipo de polímero. Assim sendo, os polieletrólitos podem ser classificados em: aniônicos, catiônicos, anfotéricos e não-iônicos. Na Figura 3.38 são mostrados os meros de alguns polímeros sintéticos.

Os polieletrólitos têm sido utilizados intensivamente no tratamento de águas de abastecimento, tanto como auxiliares na floculação e/ou filtração, como também na forma de coagulantes primários. Seu uso, no Brasil, ainda tem sido restrito ao primeiro caso, pois as dosagens necessárias para o seu emprego como coagulante podem ser desvantajosas no aspecto econômico.

São conhecidos muitos polieletrólitos comerciais, com diferentes características estruturais, e assim sendo, é conveniente que, quando se desejar utilizar esses produtos em uma estação de tratamento de água, deve-se fazer anteriormente um amplo trabalho de pesquisa para escolher aquele que melhor se adapte à água em questão. A eficiência de um polímero no

coagulação e floculação depende da sua estrutura química, das propriedades do meio e das características das substâncias ou partículas a serem coaguladas e/ou floculadas (CAMPOS, 1980).

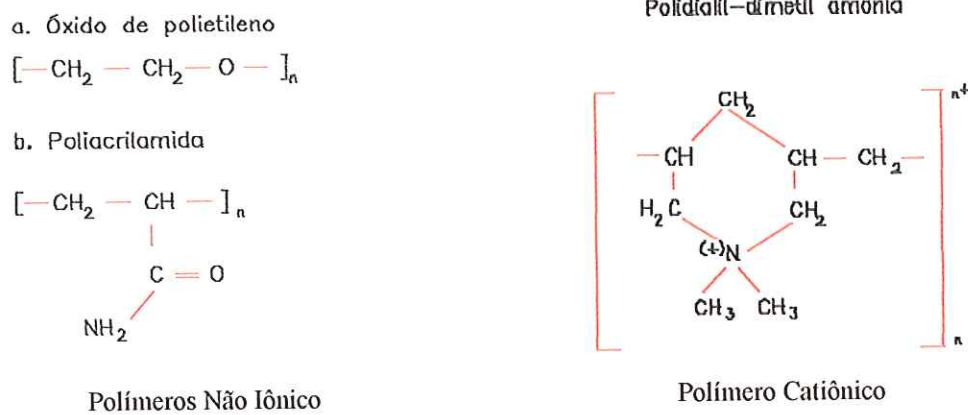


Figura 3.38 – Meros de polímeros sintéticos

Fonte: WEBER (1972)

Os modelos de coagulação baseados apenas nas forças eletrostáticas são insuficientes para explicar a coagulação com polieletrólitos, pois muitos outros fatores físicos e químicos assumem grande importância no fenômeno. Tomando-se por exemplo o fato de que é possível o uso de polieletrólitos aniônicos para coagular e flocular colóides carregados negativamente, fica evidente que existem situações em que ocorrem outros fenômenos que se sobrepõem à repulsão eletrostática.

Como já visto anteriormente, a melhor explicação para os mecanismos por meio dos quais os polieletrólitos desestabilizam os colóides é baseada na sua adsorção à superfície das partículas coloidais, seguida ou pela redução da carga ou pelo “entrelaçamento” das partículas pelos polieletrólitos.

Na Figura 3.39 são apresentados alguns esquemas da adsorção e subsequente interação entre as moléculas dos polímeros e as partículas coloidais. As interações 3 e 4 apresentadas na Figura 3.38 mostram duas situações em que as partículas coloidais permanecem estáveis, em detrimento da formação de flocos. A agitação excessiva pode ocasionar a ruptura dos flocos já formados e provocar novamente o aparecimento de partículas estáveis, semelhantes às obtidas através da interação 3. Na interação 4 o polieletrólito participa como um agente de proteção, pois



suas cadeias se estendem de maneira apreciável para o interior do meio, dificultando a agregação das partículas coloidais. Esse efeito é denominado “estabilização estérica “ (SINGLEY, 1972).

### *POLÍMEROS SINTÉTICOS CATIÔNICOS*

Os polímeros sintéticos catiônicos podem funcionar como coagulantes por neutralização de cargas ou adsorção-formação de pontes, ou uma combinação dos dois mecanismos (WEBER, 1972). Uma possibilidade de preparação destes polímeros é a co-polimerização de acrilamida com um monômero catiônico apropriado, resultando polímeros catiônicos de massa molecular relativamente alto (GREGORY, 1978).

Polieletrólitos que têm grupos, como por exemplo, carboxílico (- COOH) ou amínico ( $-N: \begin{matrix} | \\ | \end{matrix}$ ), terão a densidade de carga dependente das variações de pH da solução, e consequentemente, a habilidade destes polímeros em promover a floculação será prejudicada. Já os polieletrólitos com grupos ácidos fortes, como o sulfônico (- SO<sub>3</sub>H), ou com grupos com carga, mas não ionizáveis, como a amônia quaternária (R<sub>4</sub>N<sup>+</sup>), são menos sensíveis às variações de pH.

A forma e o tamanho das moléculas dos polieletrólitos dependem da força iônica da solução e do grau de ionização. A repulsão entre segmentos com carga causam a expansão da cadeia, porém, este efeito diminui com o aumento da força iônica da solução (GREGORY, 1978).

#### *Toxicidade dos Polieletrólitos*

Uma das principais preocupações do uso de polímeros sintéticos como auxiliares de floculação para tratamento de águas de abastecimento, diz respeito aos riscos potenciais à saúde da população. Consequentemente, deve existir uma garantia de que os benefícios advindos das novas tecnologias e produtos sejam conseguidos com um mínimo de risco.

Segundo GREGORY (1978), o uso de polímeros sintéticos em tratamento de água para abastecimento público, requer atenção especial ao problema da toxicidade. Em geral, os polímeros são motivos de preocupação, uma vez que podem aparecer traços de meros na água tratada, principalmente acrilamida, e representar perigo à saúde.

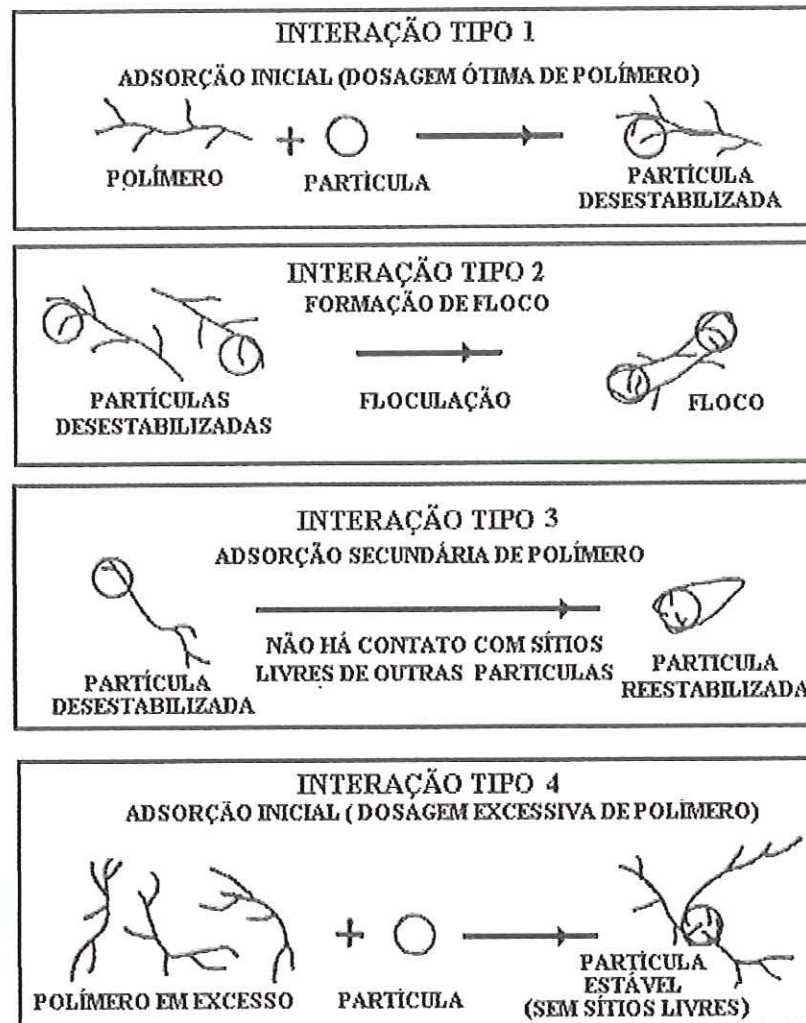


Figura 3.39 - Representação esquemática da desestabilização de colóides por polímeros

Fonte: SINGLEY (1972)

De acordo com GREGORY (1978), a porcentagem do mero acrilamida pode ser alta nas poliacrilamidas comerciais; no entanto, em água potável, o mero não deve exceder a concentração de 0,05 %. O autor menciona que não devem ser utilizadas dosagens maiores que 0,5 mg/L do polímero sintético catiônico, e que polímeros naturais (amidos) são geralmente menos tóxicos.

Nos Estados Unidos, o comitê para uso de auxiliares de coagulação para tratamento de águas de abastecimento (Committee on Coagulant Aids for Treatment of Drinking Water),

criado em 1957, funciona como um instrumento para aceitar ou rejeitar produtos químicos para a coagulação da água destinada ao abastecimento público, com base na segurança dos seus usos (ROBECK, 1972)

ROBECK (1972) comenta que o mínimo requerido pelo comitê para aceitar o teste de toxicidade de novos produtos, é um estudo definitivo dos efeitos obtidos em experimentos com animais, com projeção desses efeitos para o ser humano. O número mínimo de níveis de concentração em água para serem administrados em animais por um período de tempo prolongado são três: a concentração recomendada, 10 vezes a concentração e 100 vezes a concentração recomendada.

Segundo ROBECK (1972), as seguintes informações são necessárias para avaliação da aceitabilidade de novos produtos para seu uso como auxiliares de coagulação/floculação no tratamento de águas destinadas ao consumo humano:

- *Propriedades Químicas*: composição química e física; propriedades e especificações dos ingredientes comerciais do produto, incluindo solubilidade lipídica e massa molecular; no caso da substância ser um polímero, é necessária uma descrição detalhada dos métodos usados para caracterizar o produto, incluindo o conteúdo do mero (%); métodos analíticos para determinação dos resíduos do polímero e do mero em água; informações sobre estabilidade no armazenamento; reações com outros produtos utilizados no tratamento de água, como cloro, com contaminantes conhecidos presentes na água (metais pesados); etc.
- *Condições de Uso*: dosagens recomendadas; método de aplicação;
- *Evidências de Toxicidade*: estudos de toxicidade aguda, estudos de metabolismo, estudos de toxicidade crônica, estudos cancerígenos, estudos de mutagenicidade, etc.

### 3.3.2 – Tipos de Amido, Propriedades Químicas e Físicas

#### 3.3.2.1 - Generalidades

O amido pode ser encontrado em abundância no reino vegetal e extraído de sua origem com relativa facilidade, uma vez que constitui a maior reserva de carboidratos das plantas. Depois da celulose, o amido é o composto mais abundante sintetizado pelas células das plantas. O microscópio revela que o amido é composto de grãos pequenos e brancos, variando de 2 a 100 µm de tamanho. O tamanho e a forma dos grãos são características de cada tipo de amido. Na Figura 3.40 é mostrada esquematicamente a aparência de alguns amidos.

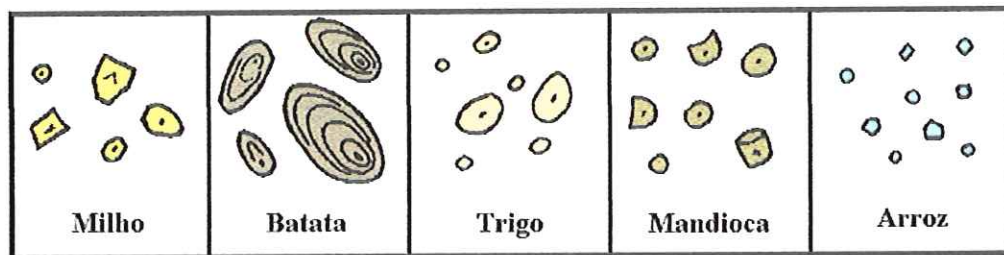


Figura 3.40 - Aparência microscópica de alguns amidos

Fonte: SWINKELS (1985)

Segundo SWINKELS (1985), os amidos comerciais podem ser divididos em três grupos. O primeiro grupo compreende os tubérculos (batata), raízes (mandioca, batata doce) e cerne (sagú), e o segundo grupo inclui os cereais comuns (milho, trigo, sorgo e arroz). O terceiro grupo compreende os amidos “waxy” (milho, sorgo e arroz). Estes amidos são obtidos de cereais, mas as propriedades físicas dos amidos “waxy” são similares às dos amidos de raízes.

As maiores fontes comerciais de amido são o milho, batata, mandioca e o trigo. A composição de cada material varia de acordo com alguns fatores como: idade, solo, variedade e o clima.

As propriedades dos amidos variam de acordo com a planta do qual este é derivado. A indústria do amido usa uma combinação de técnicas de moagem e de purificação molhada para manufaturar o amido com uma pureza de aproximadamente 95 %. De maneira geral o processo de obtenção do amido, qualquer que seja a fonte, obedece a uma série de operações fundamentais, com pequenas variações.

De acordo com ORTHOEFER (1985), após a lavagem ou limpeza inicial, é feita a trituração dos tubérculos ou dos grãos e preparada uma suspensão aquosa de material triturado. Depois de serem removidos todos os fragmentos grosseiros indesejáveis, seguem-se inúmeras operações destinadas a remover subprodutos e a triturar convenientemente as partículas de modo a possibilitar a separação posterior do amido por sedimentação natural ou acelerada (centrifugadoras), e, eventualmente do glúten, por flotação, em condições especiais de concentração e pH.

O material sedimentado é lavado e enviado a filtros-prensa ou centrifugadoras para que seja reduzido seu teor de umidade. A pasta resultante das operações anteriores é então submetida à secagem final em túneis aquecidos, secadores rotativos, etc. Depois dessas operações, o

material seco é novamente triturado em partículas do tamanho de pérolas ou moído de maneira a se obter um pó muito fino. Vale ressaltar que a descrição apresentada é apenas uma síntese do procedimento industrial, pois existem inúmeros detalhes relacionados com cada operação envolvida e com cada fonte de amido considerada.

### 3.3.2.2 - Composição Química e Estrutura

#### 3.3.2.2.1 - Composição Química dos Grânulos de Amido

SWINKELS (1985) afirma que os grânulos de amido de milho contêm usualmente 10 a 20 % em massa de umidade, e pequena quantidade de proteínas, material gorduroso, fósforo e traços de material inorgânico. Normalmente a água de hidratação nos grânulos de amido pode ser localizada no carbono 6 da unidade glucose (Figura 3.41).

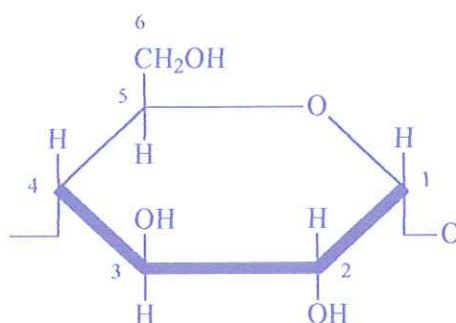


Figura 3.41 – Estrutura da molécula de glucose

Fonte: SWINKELS (1985)

Na tabela 3.07 são apresentadas algumas propriedades de grânulos de amido de fontes diversificadas. Na tabela 3.08 são mostrados os valores das composições químicas médias de vários amidos comerciais.

Tabela 3.07 - Propriedades dos grânulos de amido

AMIDO	TIPO	FAIXA DE TAMANHO (diâmetro - $\mu\text{m}$ )	TAMANHO MÉDIO (diâmetro - $\mu\text{m}$ )	FORMA
Milho	Cereal	3 – 26	15	Redondo, poligonal
Batata	Tubérculo	5 – 100	33	Oval, esférico
Trigo	Cereal	2 – 35	15	Redondo, lenticular
Mandioca	Raiz	4 – 35	20	Oval, truncado
Milho Waxy	Cereal	3 – 26	15	Redondo, poligonal
Sorgo	Cereal	3 – 26	15	Redondo, poligonal
Arroz	Cereal	3 – 8	5	Poligonal, angular
Sagú	Cerne	5 – 65	30	Oval, truncado
Amilomaize	Cereal	3 – 24	12	Redondo, deformado

Fonte: SWINKELS (1985)

Tabela 3.08 - Composição química média de grânulos de amido

Amido	Umidade a 65%	Lipídios: % na	Proteínas: % na	Cinzas: %	Fósforo: %
	UR* e 20°C	SS**	SS, N***	na SS	na SS
Milho	13	0,6	0,35	0,1	0,015
Batata	19	0,05	0,06	0,4	0,08
Trigo	14	0,8	0,4	0,15	0,06
Mandioca	13	0,1	0,1	0,2	0,01
Milho Waxy	13	0,2	0,25	0,07	0,007
Sorgo	13	0,7	0,3	0,08	-
Arroz	-	0,8	0,45	0,5	0,1
Sagú	-	0,1	0,1	0,2	0,02
Amilomaize	13	0,4	-	0,2	0,02
Batata doce	13	-	-	0,1	-

\*UR = Umidade Relativa do ar, \*\*SS = Substância Seca, \*\*\*N = Conteúdo de Nitrogênio

Fonte: SWINKELS (1985)

### 3.3.2.2.2 – Estrutura Química da Amilose e Amilopectina

O amido, hidrato de carbono, é altamente polimerizado, cujo monômero é representado pela glucose (Figura 3.40). Quando comparado a outros hidratos de carbono, o amido é considerado relativamente heterogêneo, sendo constituído por dois componentes principais: amilose e amilopectina. A amilose apresenta-se na forma de uma cadeia linear, formada por aproximadamente 6000 unidades de glucose conectadas pela ligação  $\alpha$  (1,4), conforme Figura 3.42.

A proporção entre amilose e amilopectina é praticamente constante para cada espécie de amido. Amidos de milho, trigo e sorgo contém cerca de 28 % de amilose, enquanto que os amidos de batata, mandioca e sagú contém apenas 20 %. Os amidos Waxy não contém amilose, e o amido amilomais pode conter até 80% de amilose (SWINKELS, 1985).

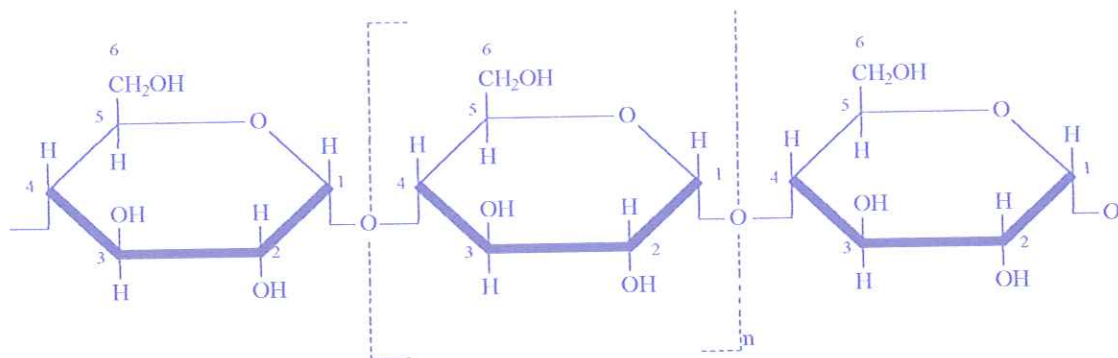


Figura 3.42 - Cadeia linear – estrutura da amilose

Fonte: SWINKELS (1985)

A amilopectina é formada por cadeias de amilose curtas, com um grau de polimerização entre 10 e 60 unidades de glucose (Figura 3.43). A média do grau de polimerização é em torno de 20.

Segundo ORTHOEFER (1985), a amilose e a amilopectina apresentam propriedades muito distintas, sendo as mais importantes: a) a amilose é solúvel em água e é totalmente hidrolisada pela ação da  $\beta$ -amilase à maltose; a amilopectina é insolúvel na água e é hidrolisada apenas 54 % sob ação da  $\beta$ -amilase; b) a amilose tem coloração azulada intensa na presença de iodo; c) a amilopectina apresenta coloração violeta na presença de iodo.

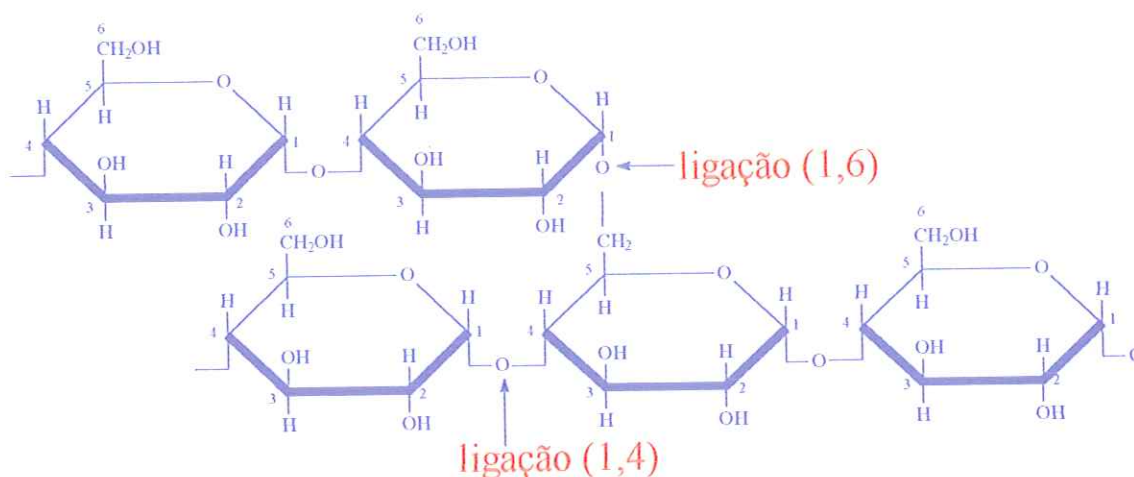


Figura 3.43 - Cadeia ramificada – estrutura da amilopectina

Fonte: SWINKELS (1985)

Na tabela 3.09 são apresentadas as diferentes porcentagens de amilose em amidos de fontes variadas, e seus respectivos graus de polimerização.

Tabela 3.09 - Conteúdo de amilose e amilopectina e grau de polimerização de vários amidos

Amido	Amilose % (m/m)	Amilopectina % (m/m)	*GP médio amilose	GP médio amilopectina
Milho	28	72	800	2.000.000
Batata	21	79	3000	2.000.000
Trigo	28	72	800	2.000.000
Mandioca	17	83	-	2.000.000
Milho waxy	0	100	-	2.000.000
Sorgo	28	72	-	-
Arroz	17	83	-	-
Sagú	27	73	-	-
Amilomaize	50 – 80	20 – 50	-	-

\* GP = Grau de Polimerização

Fonte: SWINKELS (1985)



A associação entre a cadeia polimérica e a água resulta na formação de uma rede intermolecular. Uma concentração de amido maior que 3% produz gel e quando em soluções diluídas, a forma associada pode precipitar. A precipitação é uma particularidade da amilose, sendo que a associação com a amilopectina é desfeita devido ao caráter altamente ramificado desta última (ORTHOEFER, 1985).

De acordo com JANE (1995), o tamanho das moléculas, a cadeia comprida ramificada de amilopectina, a proporção de amilose e amilopectina, são características que afetam as propriedades funcionais do amido. A amilopectina, de longa cadeia ramificada interage mais efetivamente com a amilose, gerando uma maior viscosidade. Quando a amilose contida no amido aumenta, a viscosidade da pasta de amido também aumenta.

### 3.3.2.3 – Propriedades Físicas

#### 3.3.2.3.1 – Estrutura e Organização dos Grânulos de Amido

SWINKELS (1985) formulou a concepção da estrutura do grânulo de amido, a qual foi muito bem aceita. Na Figura 3.44 é mostrado um esquema da organização miscelar dentro de um grânulo de amido.

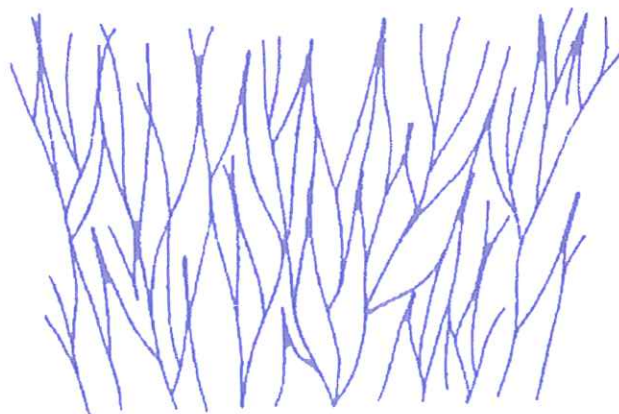


Figura 3.44 – Esquema da organização miscelar dentro de um grânulo de amido

Fonte: SWINKELS (1985)

Os grânulos de amido estão organizados em regiões com certo grau de cristalinidade e regiões não cristalinas (amorfas). Segundo SWINKELS (1985), as porcentagens de regiões cristalinas nos vários amidos naturais correspondem a 25 a 50% do volume total do grânulo de

amido. Nos amidos de tubérculos e raízes, somente as moléculas de amilopectina fazem parte da estrutura cristalina. A amilose desses amidos estão presentes na região amorfa. Nos amidos de cereais, a fração amilopectina é o elemento mais importante da estrutura cristalina. Uma porção das moléculas de amilose nos amidos de cereais está presente complexada com substâncias gordurosas. O complexo amilose-gordura promove um reforço nos amidos de cereal, que pode retardar o intumescimento do grânulo.

#### 3.3.2.2.2 – Intumescimento e Gelatinização

Os amidos nativos são insolúveis em águas com temperaturas inferiores às suas temperaturas de gelatinização. Esta é uma propriedade muito importante, a qual possibilita a fácil extração dos grânulos de amido da planta em sistema aquosos. Além disso, os amidos nativos podem ser modificados quimicamente em suspensões aquosas e recuperados na sua forma purificada por filtração, lavagem com água e secagem.

SWINKELS (1985) comenta que os grânulos de amido são insolúveis em água fria devido as ligações de hidrogênio intermoleculares, formadas pelas interações dos grupos hidroxila (OH). Grânulos de amido intumescem levemente em água fria (aumento de 10 a 15% no diâmetro), mas este intumescimento é reversível. Os grânulos voltam ao tamanho original por secagem. Com o aquecimento e agitação constante, as ligações de hidrogênio enfraquecem, mas são mantidas, sendo o intumescimento neste caso, irreversível. Por isso, o grânulo de amido absorve água o que possibilita a sua ruptura e o colapso, formando uma dispersão coloidal viscosa e mais clara, formada por fragmentos de grânulos intumescidos, agregados de amido hidratado e moléculas dissolvidas. A viscosidade da solução aumenta até um máximo e então cai com a ruptura dos grânulos e desintegração dos mesmos.

O intumescimento inicial ocorre na região amorfa do grânulo, rompendo a ponte entre as moléculas de amido e hidratando-as. O intumescimento tangencial rompe a ordem das miscelas, e o grânulo perde sua polimerização. Conforme aumenta a temperatura da mistura aquosa de amido, maior é a hidratação que ocorre na região amorfa, e as ligações de hidrogênio nas regiões cristalinas começam a romper. Os grânulos continuam a expandir até um grande retículo intumescido, o qual ainda permanece junto devido às persistentes miscelas que não foram rompidas, como mostrado na Figura 3.45 (SWINKELS, 1985).

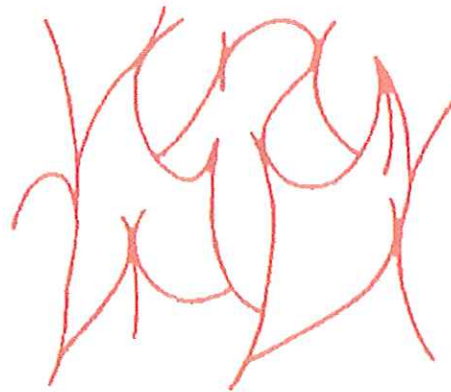


Figura 3.45 – Esquema da organização miscelar dentro de um grânulo de amido intumescido  
Fonte: SWINKELS (1985)

Segundo SWINKELS (1985), o intumescimento do amido de milho ocorre de forma relativamente lenta, restrito a dois estágios, o que sugere a participação de interações diferentes: um fraco relaxamento abaixo de 75°C e outro forte acima de 85°C. O complexo formado por amilose-lipídios no amido de milho inibe o intumescimento. (Figura 3.46).

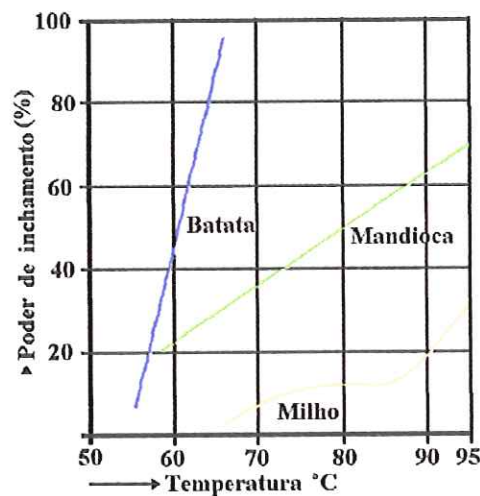


Figura 3.46 – Propriedades de intumescimento de amidos comuns  
Fonte: SWINKELS (1985)

De acordo com CAMPOS (1980), a quebra da estrutura do grão de amido de milho em presença de água quente, desenvolve-se em três fases distintas:

### ▪ **Intumescimento**

#### *Intumescimento limitado*

Constitui a primeira fase onde a viscosidade da suspensão não aumenta de maneira sensível. O grão ainda conserva a sua aparência e, após a secagem, não se notam alterações.

#### *Intumescimento*

Uma segunda fase do intumescimento ocorre quando a temperatura próxima de 65°C é atingida. A temperatura exata depende da natureza do amido. Nessa fase o grão tem seu volume bastante aumentado em relação ao seu volume inicial e a viscosidade da suspensão cresce sensivelmente. O grão perde a estrutura inicial (Figura 3.43 e Figura 3.44).

O intumescimento também pode ser induzido em temperaturas ambientes utilizando-se soluções alcalinas.

### ▪ **Gelatinização**

Essa fase ocorre em temperaturas mais elevadas ainda e constata-se uma evolução mais acentuada dos fenômenos observados na segunda fase do intumescimento.

A gelatinização de grânulos de amido em água é detectada pela perda de birrefringência, aumento da transmitância óptica e em aumento da viscosidade. A medida da perda de birrefringência é a mais sensível, precisa e reproduzível técnica para medir a temperatura de gelatinização de um grânulo de amido (SWINKELS, 1985).

### ▪ **Retrogradação**

Quando as soluções de amido permanecem armazenadas em temperatura ambiente ou inferior, há a tendência para retornar a um estado insolúvel, agregado ou cristalino, fenômeno denominado retrogradação. Nesse processo, uma parte do amido se agrega progressivamente formando um precipitado microcristalino insolúvel. A amilose possui uma tendência maior para a retrogradação que a amilopectina, podendo em pouco tempo ter todo o seu soluto sedimentado na forma cristalina como consequência da retrogradação.

A retrogradação pode ser atenuada mantendo-se a temperatura da suspensão acima da temperatura ambiente, ou então quando se adiciona à suspensão agentes que promovam intumescimento (Figura 3.47).

A velocidade de retrogradação de moléculas lineares também dependem do comprimento da cadeia e do pH (SWINKELS, 1985).

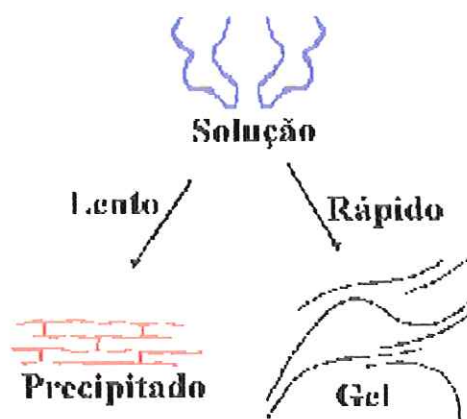


Figura 3.47 - Representação esquemática do mecanismo de retrogradação

Fonte: SWINKELS (1985)

Segundo SWINKELS (1985), a retrogradação de soluções de amido pode provocar os seguintes efeitos:

- aumento da viscosidade;
- desenvolvimento de opacidade e turbidez;
- precipitação de partículas insolúveis;
- formação de géis.

Desta forma, pode-se dizer que a retrogradação é um processo complexo e depende de muitos fatores, tais como: tipo do amido, concentração do amido, processo de cozimento, temperatura, pH e processo de resfriamento.

#### 3.3.2.4 - Modificação do Amido

##### 3.3.2.4.1 – Considerações Iniciais

As propriedades físicas dos amidos nativos não modificados e as soluções coloidais produzidas por estes amidos através do aquecimento, limitam o uso destes em muitas aplicações comerciais. Dependendo da aplicação, essas falhas podem incluir: repulsão à água pelo grânulos de amido, insolubilidade ou fracasso dos grânulos de amido em intumescer e desenvolver viscosidade em água fria; excesso ou incontrolável viscosidade depois do aquecimento; textura coesiva do amido cozido, particularmente dos amidos waxy, de milho, batata e mandioca; perda de claridade e a tendência das soluções de amido preparadas por amidos de milho e trigo e

amidos convencionais de cereais, de se tornarem opacas e gelatinosas quando cozinhadas (WURZBURG, 1987).

Segundo WURZBURG (1987), os amidos modificados foram desenvolvidos para superar essas falhas e expandir o uso do amido nas indústrias. A modificação é importante para o contínuo e crescente uso do amido para promover características de espessamento, gelatinização, coesão, adesividade e formação de película.

O objetivo da modificação do amido é alterar as características físicas e químicas do amido nativo para melhorar as suas propriedades. O propósito da reação de modificação é: 1) mudar o caráter de grânulo seco; 2) modificar a integridade do grânulo; 3) alterar as características químicas. Os derivados do amido incluem modificações que mudam algumas das unidades de D-glucopiranosil nas moléculas. As modificações envolvem oxidação, esterificação, eterificação, hidrólise e dextrinização (ORTHOEFER, 1985). Os métodos gerais para a modificação são: modificação por ácido, bleaching ou oxidação, cross-linking ou inibição, substituição ou derivatização.

Os amidos modificados são definidos pela sua origem, tratamentos prévios, pelo conteúdo de amilose e amilopectina, e pela medida do massa molecular ou grau de polimerização, tipo de derivativo ou substituto, grau de substituição, forma física e componentes associados.

A seguir é feita uma breve discussão sobre os tipos de modificação (físicas, químicas e enzimáticas).

#### ▪ **Modificações físicas do amido**

Segundo WURZBURG (1987), o amido pode ser modificado fisicamente para melhorar sua solubilidade em água e alterar o tamanho da partícula. Pequenas partículas de amido são desejáveis para uso como em enchimento de filmes plásticos e produtos cosméticos.

#### ▪ **Modificações químicas do amido**

As modificações químicas incluem entrecruzamento de cadeias, o que leva a um aumento da estabilidade molecular com relação a cisalhamento mecânico, hidrólises ácidas, submissão a altas temperaturas. A modificação química do amido é baseada na reatividade dos grupos hidroxila.

Segundo RUTEMBERG & SOLAREK (1984), o termo amido derivatizado é relacionado as modificações que mudam a estrutura química de algumas unidades da molécula

D-glucopiranosil. Estas modificações geralmente envolvem oxidação, esterificação e eterificação.

#### ▪ Modificações enzimáticas do amido

JANE (1985) cita que o amido pode ser enzimaticamente modificado para produzir maltodextrina, ciclodextrina e oligossacarídeos. ORTHOEFER (1985) afirma que a derivatização do amido pode influir no processo de gelatinização e cozimento, característicos do amido granular nos seguintes aspectos: diminuição da retrogradação e tendência a formação de gel de amilose contida no amido; aumento do caráter hidrofílico; propriedades hidrofóbicas. A modificação das propriedades do amido via derivatização é um importante fator para incrementar o uso do amido, pois pode intensificar a capacidade de espessante, formação de gel, aderência, adesivo, e formação de filme.

Um amido derivatizado é descrito de forma completa considerando-se vários fatores: fonte da planta (milho, milho waxy, batata, etc); tratamento anterior (hidrólise ácida catalizada), razão amilose/amilopectina; distribuição de massa molar ou grau de polimerização (GP); tipos de grupos substituintes (acetato, hidroxipropila, etc); grau de substituição (GS) ou substituição molar (SM); forma física (granular, pré-gelatinado); presença de componentes associados (proteínas, gorduras, fósforos) ou substituintes naturais (ORTHOEFER, 1985)

RUTEMBERG & SOLAREK (1984) comentam que os amidos comumente usados para derivatização comercial nos EUA são: milho, milho waxy, mandioca e batata. Outros amidos derivatizados menos disponíveis, tal como: sorgo, sorgo waxy, trigo, arroz, e sagú podem ser oferecidos comercialmente. As suas propriedades, disponibilidades em grandes quantidades e fatores econômicos, são parâmetros decisivos na determinação de qual amido é usado para derivatização. Na Austrália, por exemplo, o amido de trigo é comumente usado.

O conteúdo de amilose ou amilopectina pode ser variado usando-se um amido de alto conteúdo de amilose ou um amido que é constituído por praticamente 100% amilopectina (amido de milho waxy). Frações de amilose ou de amilopectina podem ser isoladas e usadas como tal.

Muitos produtos derivatizados comercializados têm um GS menor que 0,2 sendo esse amido inerentemente solúvel em água. Após a destruição da estrutura granular não é necessário um GS relativamente alto para possibilitar solubilidade ou dispersibilidade como é necessário com a celulose (RUTEMBERG & SOLAREK, 1984).

### 3.3.2.4.2 - Caracterização do amido modificado

#### GRAU DE SUBSTITUIÇÃO (GS)

O GS (grau de substituição) caracteriza o amido derivatizado, sendo uma medida do número médio, expresso na base molar, de grupos hidroxila de cada unidade D-glucopiranosil que foram derivatizados.

Como cada grupo catiônico possui um átomo de nitrogênio, pode-se então através da porcentagem de Nitrogênio, determinar o grau de substituição (GS).

Segundo CARR<sup>5</sup> (1994) apud MARINELLI (1999), a fórmula para calcular o grau de substituição (GS) do amido catiônico é dada por:

$$GS = \frac{162 \times \{\% \text{ do substituinte} \}}{152,5} \frac{100 - \{151,5 \times \% \text{ do substituinte} \}}{152,5} \quad (3.11)$$

Sendo 162 a massa molecular da unidade amido glicose anidra; o substituinte é – CH<sub>2</sub>CHOHCH<sub>2</sub>N(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>Cl com uma massa molar de 152,5. O denominador conta menos um átomo de hidrogênio da hidroxila do amido para cada substituição.

Na prática industrial, amidos modificados têm GS baixo (0,1 a 0,2; ou menos), isto é, 10 a 20 unidades elementares, foram substituídas em 100 unidades glucose; assim eles tem somente 10 a 20 —OH substituídas dentre as 300 hidroxilas possíveis (FLECHE<sup>6</sup>, 1985 apud MARINELLI, 1999).

<sup>5</sup> CARR, M.E. (1994). Preparation of Cationic Starch Containing Quaternary Ammonium Substituents by Reactive Twin-Screw Extrusion Processing. v.54, n.12, p.1855-1861, J. Appl. Polym. Sci. apud MARINELLI, P. S. (1999). Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Flocculação no Tratamento de Água. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, USP.

<sup>6</sup> FLECHE, G. (1985) Starch: Conversion Technology. In: Chemical Modification and Degradation of Starch. p. 73-97. Illinois, Deci Corporation apud MARINELLI, P. S. (1999). Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Flocculação no Tratamento de Água. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, USP.



### VISCOSIDADE

ORTHOEFER (1985) afirma que durante a derivatização, a formação de derivados químicos pode ser acompanhada, por exemplo, pelas variações na viscosidade.

A partir da viscosidade específica ( $\eta_{sp}$ ), pode-se calcular a viscosidade reduzida ( $\eta_r$ ):

$$\eta_{sp} = (\eta - \eta_o) / \eta_o \quad (3.12)$$

sendo:  $\eta$  = viscosidade da solução de concentração C;

$\eta_o$  = viscosidade do solvente;

$\eta_r = \eta_{sp} / C$  ;

$\eta_{rel} = \eta / \eta_o$  ;

A presença de carga no polímero catiônico faz com que o mesmo tenha um comportamento hidrodinâmico muito diferente de polímeros neutros, em decorrência das interações repulsivas existentes entre as cadeias, as quais provocam alteração na conformação das cadeias. Este comportamento pode ser estudado avaliando-se a variação de  $\eta_r$  *versus* C, em solventes diversificados (MARINELLI, 1999).

#### 3.3.2.4.3 – Amido Catiônico

Dentre os éteres de amido, os amidos catiônicos podem ser considerados o mais importante do grupo, devido a sua larga utilização na indústria de papel. Algumas categorias de amido catiônico são: amino terciário, quaternário de amônio, fosfônio quaternário, sulfônio quaternário e imino-amido, mas somente os dois primeiros são usados industrialmente (FLECHE<sup>7</sup>, 1985 apud MARINELLI, 1999).

Os amidos catiônicos derivatizados mais importantes são aqueles que contêm grupos amina terciária e amônio quaternário (FLECHE<sup>10</sup>, 1985 apud MARINELLI, 1999). RUTEMBERG & SOLAREK (1984) comentam que a temperatura de gelatinização do amido

<sup>7</sup> FLECHE, G. (1985) Starch: Conversion Technology. In: Chemical Modification and Degradation of Starch. p. 73-97. Illinois, Deci Corporation apud MARINELLI, P. S. (1999). Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Floculação no Tratamento de Água. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, USP.

catiônico diminui com o aumento do número de grupos substituintes catiônicos. A dispersão mostra estabilidade e claridade melhoradas.

#### ▪ Éteres de Amidos

*Cationização, RUTEMBERG & SOLAREK (1984)*

Geralmente, amidos catiônicos comerciais são preparados por reações com agentes cationizantes, e recuperação do amido na forma granular, conforme esquematizado na Figura 3.48.

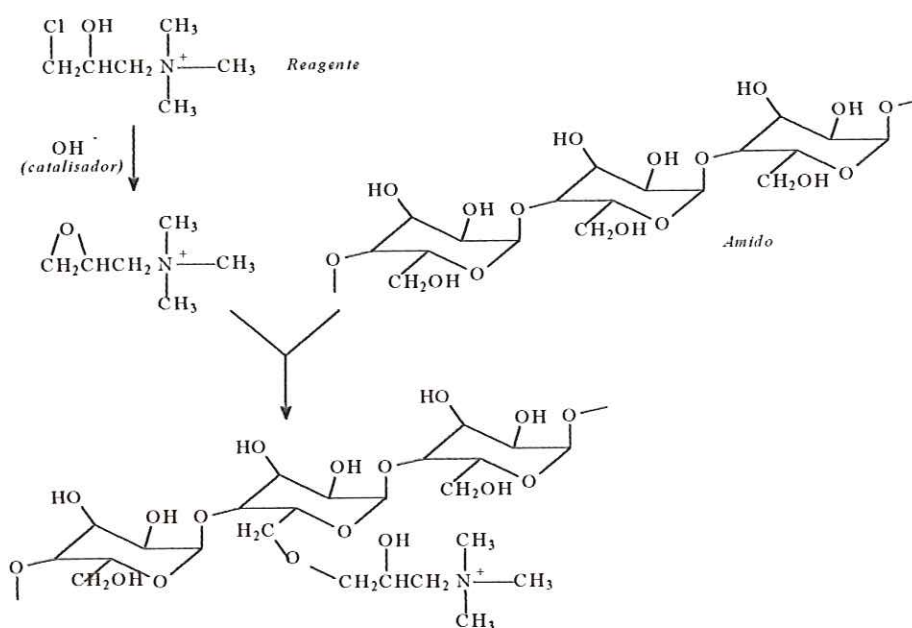


Figura 3.48 – Reação para produção do amido catiônico seguido da recuperação na forma granular

Fonte: RUTEMBERG & SOLAREK (1984)

#### 3.3.2.5 – Uso dos Amidos

Segundo ORTHOEFER (1985), a utilização de amido de milho é dividida em aproximadamente 35% para alimentos e o restante em outras aplicações. A indústria de bebidas contabiliza quase 20% do uso comestível, com quantidade similar nas indústrias químicas e farmacêuticas.

Os amidos de milho de uso não alimentício são principalmente utilizados na indústria de papel, com quase 86% do total. Adesivos, textil e outras aplicações utilizam 14%. O futuro da

utilização do amido de milho em alimentos e na produção industrial, é desafiado pelo surgimento de um produto competitivo, o amido derivatizado, obtido por modificação do amido de milho comum e waxy.

Polímeros solúveis em água são largamente usados em muitas aplicações, tais como: detergentes, tintas, intermediários químicos, tratamento de água. Muitos polímeros sintéticos solúveis em água não são biodegradáveis. Os polímeros naturais modificados solúveis em água têm a vantagem de serem biodegradáveis (SWIFT<sup>8</sup>, 1994 apud MARINELLI, 1999).

A afinidade eletroquímica do amido catiônico com fibras de celulose carregadas negativamente viabilizam quase 100% de adsorção irreversível do amido derivatizado sobre a celulose. O amido catiônico pode servir de ponte iônica entre a fibra de celulose e minerais.

O amido de milho modificado tem boa aplicabilidade em produtos cosméticos, pois confere excelentes características ao produto acabado, quanto ao toque acetinado na pele, absorve os óleos da formulação retirando o toque oleoso do produto acabado. É muito indicado para cremes e loções para pele (COSMETIC & TOILETRIES<sup>9</sup>, 1999 apud MARINELLI, 1999).

#### 3.3.2.6 – Estudo de Caso: Caracterização dos Amidos de Milho Catiônicos Comum e Híbrido

MARINELLI (1999) estudou a aplicação de amidos de milho catiônicos como auxiliares de floculação. Os amidos de milho catiônicos, híbridos (98 % de amilopectina) e comum (27 % de amilose) foram submetidos a um processo de purificação, o qual objetivava a eliminação de impurezas não solúveis em água, como cadeias de amido catiônico com pequeno grau de substituição. O rendimento na purificação conseguido foi de 81,9% para o milho híbrido, e 70,7% para o milho comum.

O autor determinou o grau de substituição (GS) e a viscosidade relativa desses amidos. Na tabela 3.10 são mostrados os resultados da porcentagem de nitrogênio e grau de substituição.

<sup>8</sup> SWIFT, G. (1994). Water-soluble polymers. *Polym. Degrad. Stabil.*, v.45, p.215-231 apud MARINELLI, P. S. (1999). *Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Floculação no Tratamento de Água*. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, USP.

<sup>9</sup> COSMETIC & TOILETRIES (1999). *Novas Matérias-Primas*, v.11, p.52 apud MARINELLI, P. S. (1999). *Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Floculação no Tratamento de Água*. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, USP.

Tabela 3.10 - Resultados da porcentagem de nitrogênio e grau de substituição (GS) para os amidos de milho catiônicos

AMOSTRA	NITROGÊNIO (%)	GS
Amido de milho catiônico comum não purificado	0,6340	0,068
Amido de milho catiônico comum Purificado	0,7323	0,078
Amido de milho catiônico híbrido não purificado	0,5910	0,063

Fonte: MARINELLI (1999)

Nas Figuras 3.49 a 3.52 são apresentadas as variações das viscosidades relativa ( $\eta_{rel}$ ) e reduzida ( $\eta_r$ ) em relação à concentração de amido catiônico de milho híbrido waxy e amido catiônico de milho comum na forma purificada.

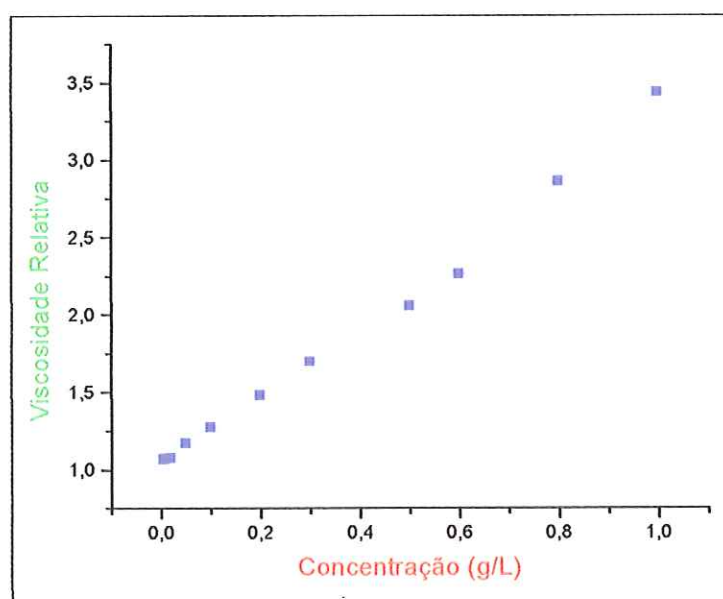


Figura 3.49 - Viscosidade relativa em função da concentração, para a solução aquosa de amido catiônico de milho híbrido purificado

Fonte: MARINELLI (1999)

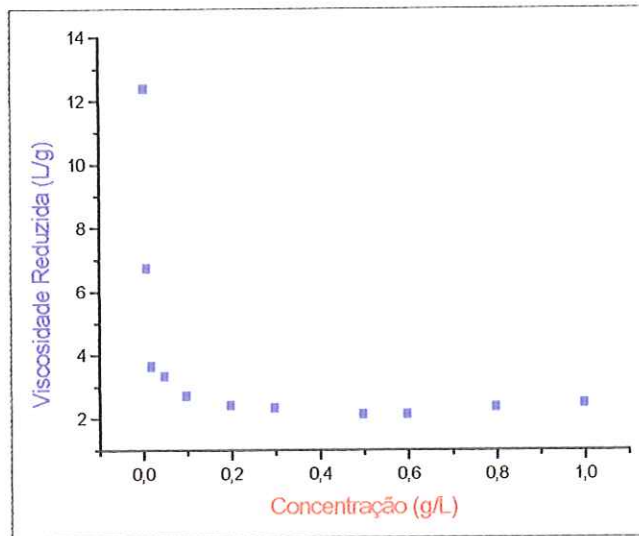


Figura 3.50 - Viscosidade reduzida em função da concentração, para a solução aquosa de amido catiônico de milho híbrido purificado

Fonte: MARINELLI (1999)

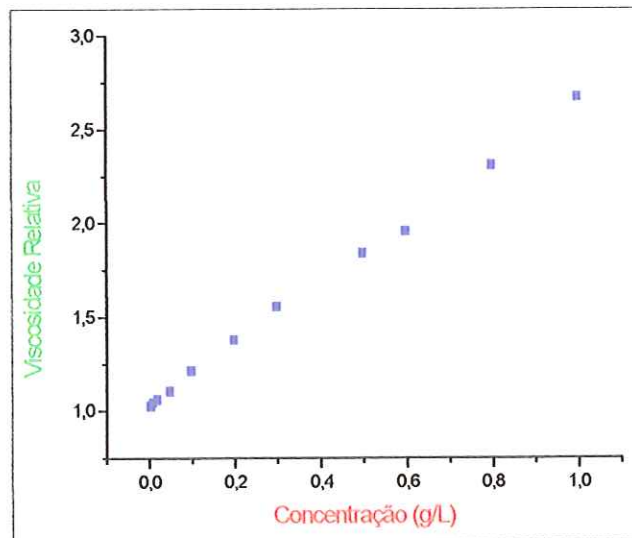


Figura 3.51 - Viscosidade relativa em função da concentração, para a solução aquosa de amido catiônico de milho comum purificado

Fonte: MARINELLI (1999)

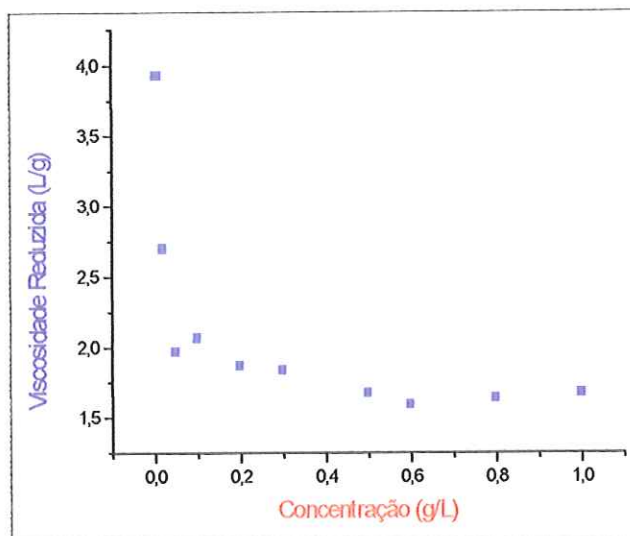


Figura 3.52 - Viscosidade reduzida em função da concentração, para a solução aquosa de amido catiônico de milho comum purificado

Fonte: MARINELLI (1999)

Segundo FROLLINI<sup>10</sup> et al (1995) apud MARINELLI (1999), os polieletrólitos apresentam um comportamento peculiar em solução aquosa: a viscosidade reduzida ( $\eta_r$ ) aumenta com a diminuição da concentração do polieletrólito e após passar por um máximo, as vezes é possível detectar uma diminuição no valor de  $\eta_r$ . Embora este efeito ainda não esteja totalmente explicado, pode-se, de forma geral, destacar que a diferença existente entre o comportamento viscosimétrico de polímeros neutros e polieletrólitos está relacionado à diferença de tamanho do macro íon comparado ao dos contra-íons (no presente trabalho o macro íon é a cadeia de amilose/amilopectina catiônica e o contra íon é o ânion cloreto), e também a expansão na cadeia que ocorre devido a repulsão causada pelas cargas.

<sup>10</sup> FROLLINI, E.; REED, W.F.; MILAS, M.; RINAUDO, M. (1995). Polyelectrolytes from polysaccharides: selective oxidation of guar-gum – a revisited reaction. *Carbohydr. Polym.*, v.27, p.129-135 apud MARINELLI, P. S. (1999). *Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Floculação no Tratamento de Água*. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materiais”, USP.

### 3.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA

Antes da proposição do diagrama de coagulação por ARMITHARAJAH (1989), não havia uma metodologia racional para o uso combinado de um sal de ferro ou alumínio com polímeros sintéticos ou naturais. Com base nesse diagrama, DI BERNARDO (1993) propôs uma metodologia comprovada por COSTA (1992) e PAIXÃO (1996), com a qual é possível reduzir a dosagem do coagulante primário com o uso de pequenas dosagens de polímero como auxiliar de floculação, e em muitos casos, conseguir-se a formação de flocos com maior velocidade de sedimentação.

A metodologia para otimização da mistura rápida em reator estático, proposta por ARMITHARAJAH & MILLS (1982), e complementada por BRITO (1998), permite que sejam encontrados os valores de gradiente de velocidade e o tempo de mistura rápida com os quais obtém-se maior eficiência na remoção de flocos para diferentes velocidades de sedimentação.

A metodologia para otimização dos gradientes de velocidade na floculação em reator estático, simulando instalações com câmaras em série e escoamento contínuo como se tem na prática, proposta por PÁDUA (1998), representou um avanço significativo para projeto e operação de Estações de Tratamento de Água.

A potencialidade da toxicidade decorrente do uso de polímeros sintéticos tem contribuído para que amidos de diversas fontes fossem estudados para substituir os primeiros. Com as pesquisas realizadas por DI BERNARDO (1997) e MARINELLI (1999), utilizando amidos catiônicos, constatou-se a possibilidade do emprego de dosagens bem menores que aquelas de amidos na sua forma nativa com as quais obtinha-se eficiência satisfatória de remoção de flocos sedimentação.

Uma questão que não se encontra devidamente esclarecida na literatura diz respeito ao tempo decorrido após a mistura do coagulante primário, que se deve aguardar para adicionar o polímero como auxiliar de floculação. As características da água de estudo, o tipo de coagulante primário, as características da mistura rápida, o tipo de polímero e suas propriedades, o gradiente de velocidade e o tempo durante a mistura do polímero, devem influir na eficiência da floculação e da sedimentação, e provavelmente, na filtração.

HUDSON (1981) considera que o tempo, decorrido após a mistura rápida, para que seja adicionado o polímero, deve ser objeto de estudo. O autor comenta que a adição do auxiliar de floculação um minuto após o término da mistura rápida, é suficiente para produzir bons resultados. DI BERNARDO (1993) recomenda a introdução do polímero logo após a mistura do

coagulante primário, em uma câmara provida de agitador, de forma que se tenha um gradiente de velocidade de  $300 \text{ s}^{-1}$  e agitação por um minuto.

No presente trabalho, pretende-se empregar as metodologias mencionadas, e estudar o efeito do gradiente de velocidade e do tempo de agitação na flocculação com um polímero sintético catiônico e amidos catiônicos (mandioca e milho), na eficiência da flocculação, quando utilizados como auxiliares.



## CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O trabalho experimental foi realizado no laboratório de saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (USP).

A água de estudo foi preparada com água do poço do campus, e foram utilizados caulinita e ácido húmico para conferir, respectivamente, turbidez e cor verdadeira à água.

Os ensaios de coagulação-floculação-sedimentação, realizados em equipamento de reatores estáticos (“Jar Test”), foram divididos em séries, cada uma com uma finalidade específica:

- SÉRIE I: Construção dos Diagramas de Coagulação;
- SÉRIE II: Otimização da Mistura Rápida;
- SÉRIE III: Otimização da Floculação;
- SÉRIE IV: Verificação da Influência do Escalonamento do Gradiente de Velocidade na Eficiência da Floculação;
- SÉRIE V: Otimização das Dosagens de Polímeros;
- SÉRIE VI: Otimização do Tempo de Agitação na Floculação com Polímero – Gradiente Escalonado na Floculação;
- SÉRIE VII: Otimização do Tempo de Agitação na Floculação com Polímero – Gradiente Constante na Floculação;

Nos itens seguintes é feita uma descrição dos equipamentos e das séries de ensaios, e discriminados os produtos químicos utilizados.

#### 4.2 – EQUIPAMENTOS E PRODUTOS QUÍMICOS

Os equipamentos utilizados durante a preparação da água de estudo e execução dos ensaios, foram os seguintes:

- Equipamento de Reatores Estáticos, da Nova Ética: o equipamento possui 6 frascos (ver Figura 4.1), e permite a obtenção de gradiente de velocidade até  $2200 \text{ s}^{-1}$ . A curva característica do aparelho relacionando o gradiente de velocidade com a rotação fornecida pelo mesmo é apresentada na Figura 4.2;
- Turbidímetro nefelométrico, modelo 2100N, da Hach: utilizado para leitura de turbidez;
- Balança analítica eletrônica, modelo SA-210, da Quimis;
- Centrífuga, modelo 215, da Fanem: utilizada para obter a amostra a partir da qual foi lida a cor verdadeira da mesma no DR/4000;
- Espectrofotômetro de leitura direta, modelo DR/4000, da Hach: utilizado para leitura de cor (verdadeira, no caso da amostra centrifugada, ou aparente, caso contrário);
- Potenciômetro, modelo 420A, da Orion: utilizado para leitura de pH;
- Zetâmetro, modelo Zetamaster, da Malvern Instruments: leituras do potencial zeta;
- Termômetro;
- Cronômetro;
- Ebulidor;

Os produtos químicos utilizados na preparação da água de estudo e execução dos ensaios foram:

- Kaolin K-5, da Fisher Scientific Company: produto utilizado para conferir turbidez à água de estudo;
- Ácido Húmico, da Aldrich Chemical Company, Inc.: produto utilizado para conferir cor à água de estudo;
- Sulfato de Alumínio PA,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{ a } 18 \text{ H}_2\text{O}$ , da Synth: produto utilizado como coagulante;
- Ácido Clorídrico PA: produto utilizado acidificante;

- Hidróxido de Sódio PA: produto utilizado como alcalinizante;
- Amido de Milho Catiônico (da CornProducts), Polímero Sintético Catiônico (Polyfloc CE1163, da BetzDearborn); Amido de Mandioca Catiônico Waxy (ver estrutura molecular na Figura 4.3); Amido de Batata (Fécula de Batata comprada em supermercado); Polímero Sintético Catiônico (da Adecom, antiga Adesol): produtos utilizados como auxiliares de floculação;

A descrição da preparação das soluções desses produtos é feita nos itens subsequentes, de acordo com as séries de ensaios em que foram utilizados.

Antes de passar à descrição do procedimento experimental, é conveniente que sejam feitos comentários a respeito do equipamentos de laboratório:

- atenção especial deve ser tomada no manuseio das cubetas do turbidímetro e do espectrofotômetro para evitar que impurezas interfiram no resultado das leituras;
- o eletrodo do potenciômetro utilizado apresentou problemas para estabilizar as leituras de pH das amostras, dificultando, principalmente, a construção dos diagramas de coagulação, os quais dependem de leituras corretas e coerentes de pH para servirem como ferramenta para escolha dos pontos de estudo.

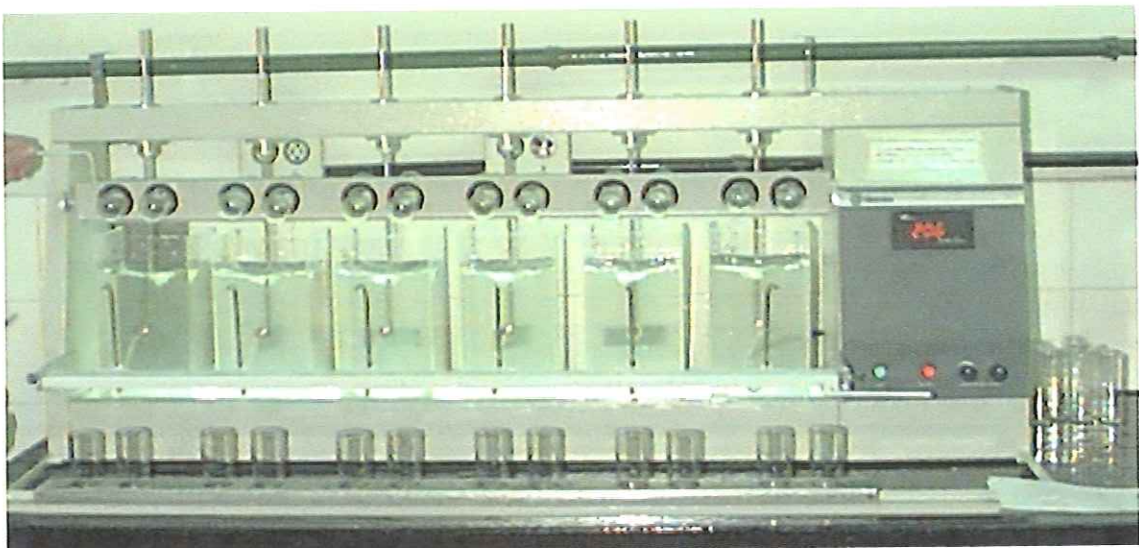


Figura 4.1 – Equipamento de reatores etáticos

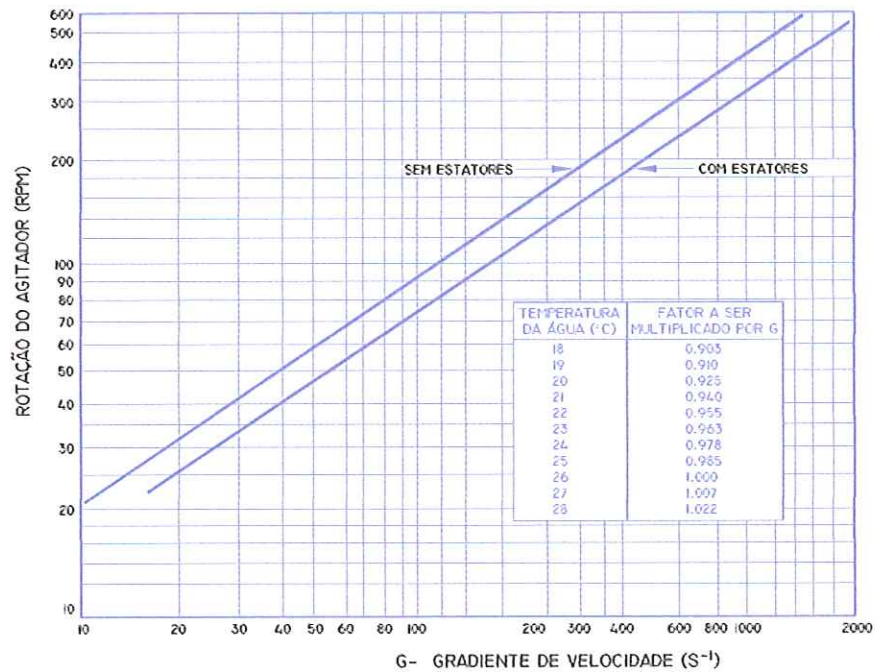


Figura 4.2 - Gradiente de velocidade em função da rotação do agitador

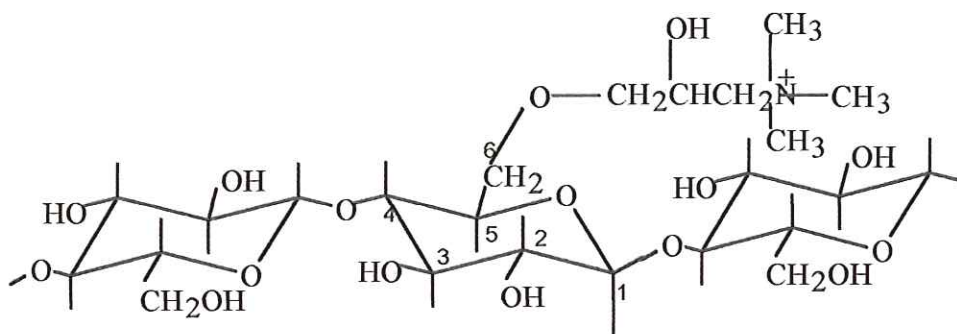


Figura 4.3 - Estrutura molecular do amido de mandioca catiônico waxy

Fonte: DI BERNARDO (1997)

### 4.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 4.3.1 – Fluxograma da Metodologia

Na Figura 4.4 é apresentado o fluxograma da metodologia empregada para a realização da parte experimental .

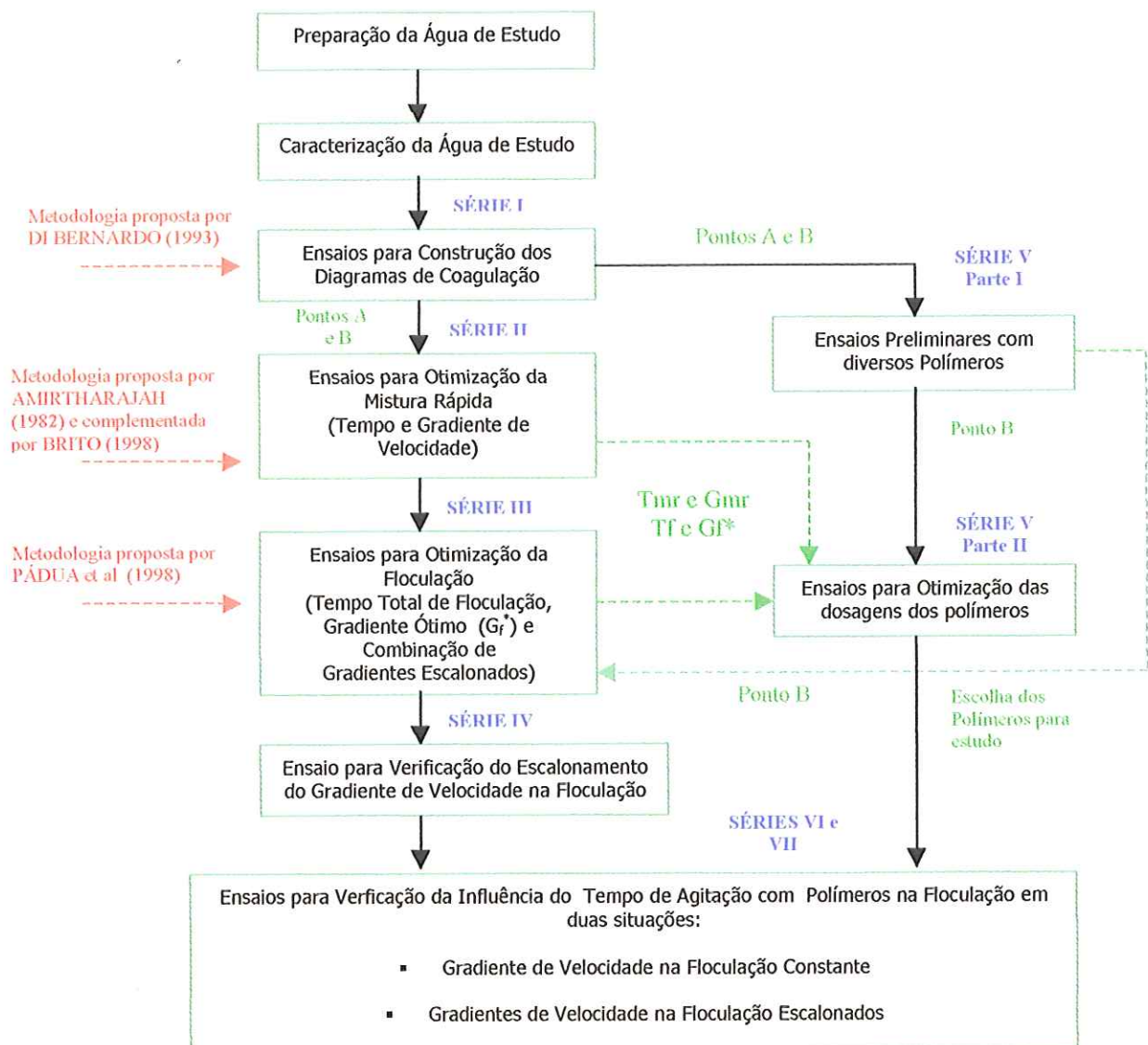


Figura 4.4 – Fluxograma da parte experimental

#### 4.3.2 - Preparação e Caracterização da água de estudo

As características almejadas da água de estudo são justificáveis por se tratar de uma água comumente encontrada no Brasil, com turbidez e cor verdadeira em torno de 25 uT e 35 uC, respectivamente, pH por volta de 7,5, e temperatura na faixa de 24 a 26 ° C.

Para conferir estas características à água de estudo, foram introduzidos na água do poço (não clorada), coletada no campus da EESC-USP, caulinita K-5 e ácido húmico.

A *dispersão-mãe* da caulinita (K-5) foi preparada de acordo com a metodologia citada por CAMPOS (1980), pela adição de 300 g de caulinita em 14,0 L de água destilada. Após duas horas de intensa agitação, seguidas por 15 horas de repouso, succionou-se o sobrenadante, armazenando-se a dispersão em recipiente previamente lavado. Introduziu-se um total de 12 L da *dispersão-mãe* e 1,88 g de ácido húmico em aproximadamente 900 L de água do poço.

Após a adição desses produtos, foi feito um controle diário das características da água (turbidez, cor aparente, cor verdadeira, pH, alcalinidade e potencial zeta) até que não fossem observadas variações significativas durante duas semanas.

Na tabela 4.1 são mostradas as características da água de estudo.

Tabela 4.1 – Características da água de estudo

Características	Valores
Turbidez (uT)	24,0 a 28,0
Cor Aparente (uC)	175 a 215
Cor Verdadeira (uC)	30 a 35
Temperatura (° C)	25 ± 1
pH	7,35 a 7,55
Alcalinidade total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	23,0 a 27,0
Potencial Zeta (mV)	-18,1 a -16,5
Carbono Total (mg/L)	7,50
Carbono Inorgânico (mg/L)	7,43
Carono Orgânico Total (mg/L)	0,07
Cloretos (mg/L)	1,2
Sulfatos (mg/L)	3,0
Dureza total (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	15,0
Condutividade Elétrica (µS/cm)	45,9
Fluoretos (mg/L)	0
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	0,213
Nitrogênio-Nitrato (mg/L)	0,002
Nitrogênio-Nitrito (mg/L)	2,36

A água de estudo foi armazenada em duas caixas d'água de plástico de 500 L (Figura 4.5). Para garantir a homogeneidade da água no decorrer dos ensaios, foi utilizada uma bombona de 200 L, na qual era introduzida diariamente água das duas caixas, após agitação com vassoura de plástico.

Para que todos os ensaios fossem realizados com a água na mesma temperatura ( $25 \pm 1$  °C), utilizou-se um ebulidor quando a temperatura da água estava abaixo de 24 °C. Como os ensaios foram realizados nos meses de abril a agosto, não foi necessário o resfriamento da água.



Figura 4.5 – Caixas d'água de 500 L para armazenamento e preparação da água de estudo e acessórios para homogeneizá-la antes de cada ensaio

### 4.3.3 – Série I: Construção dos Diagramas de Coagulação

#### *Preparação das soluções dos produtos químicos*

- Sulfato de Alumínio PA,  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 a 18 H_2O$

Foram pesados 4 g do produto granular e adicionados em um balão de 2L, contendo água destilada, resultando uma solução com concentração de 2 mg/mL.

A solução de coagulante era preparada a cada 72 h.

- Ácido Clorídrico PA, HCl

Foi preparada uma solução de HCl a 0,1 N a partir da solução concentrada de HCl. A diluição foi feita com água destilada.

- Hidróxido de Sódio PA, NaOH

Foi preparada uma solução de NaOH a 0,1 N a partir da NaOH na forma de lentilhas. Após pesagem do produto, o mesmo foi dissolvido em água destilada, e introduzido em um

balão de 1 L. Completou-se o volume restante com água destilada para obtenção da concentração desejada.

#### *Características dos Ensaios em “Jar Test”*

O equipamento de reatores estáticos é composto de 6 frascos de acrílico transparente, com capacidade de 2,0 L cada, quadrados em planta, com lado de 115 mm e altura útil de 151 mm. O ponto de coleta nos frascos situa-se a 70 mm abaixo do nível de água, quando cheio até a marca dos 2,0L. O equipamento possui dois suportes na parte superior, com seis cubetas cada um, que possibilitam a introdução dos produtos químicos simultaneamente nos seis frascos. Na parte inferior há um suporte que possibilita a coleta do sobrenadante dos seis frascos ao mesmo tempo.

Foram realizados vinte ensaios de coagulação-floculação-sedimentação, objetivando a construção dos diagramas de coagulação para remoção de turbidez e cor aparente, com as seguintes características:

- **COAGULANTE:** Solução de Sulfato de Alumínio PA → Dosagens: 8,0 a 28,0 mg/L;
- **ACIDIFICANTE:** Solução de Ácido Clorídrico 0,1 N → Dosagens: 0 a 5,4 mg/L;
- **ALCALINIZANTE:** Solução de Hidróxido de Sódio 0,1 N → Dosagens: 0 a 12,0 mg/L
- **CONDIÇÕES do ENSAIO**
  - *Mistura Rápida:*
    - ❖ **Gradiente de Velocidade Médio:**  $1000\text{ s}^{-1}$ ; **Tempo de Agitação:** 20 s
  - *Floculação:*
    - ❖ **Gradiente de Velocidade Médio:**  $20\text{ s}^{-1}$ ; **Tempo de Agitação:** 20 min
  - *Sedimentação:*
    - ❖ **Velocidade de Sedimentação:** 2,0 e 4,0 cm/min
- **PARÂMETROS DE CONTROLE:** turbidez, cor aparente, potencial zeta e pH de coagulação do sobrenadante

Os ensaios foram conduzidos variando-se o pH de coagulação pela adição de NaOH ou HCl, e a dosagem de coagulante, conforme procedimento descrito a seguir:



**PROCEDIMENTO SÉRIE I**

- a) **Homogeneização da água de estudo contida nas duas caixas d'água com vassoura ;**
- b) **Enchimento da bombona de 200 L com quantidades iguais de água das duas caixas;**
- c) **Agitação da água da bombona e enchimento do balde de 25 L (quantidade necessária para realizar dois ensaios);**
- d) **Medição e correção da temperatura da água de estudo para  $25 \pm 1$  °C;**
- e) **Medição de turbidez, cor aparente e pH da água de estudo no balde;**
- f) **Enchimento dos frascos do “Jar Test” de forma aleatória, visando garantir a mesma qualidade da água em todos os reatores;**
- g) **Acionamento dos agitadores e acerto da rotação correspondente ao gradiente de velocidade médio na mistura rápida;**
- h) **Pipetagem e adição dos volumes das soluções de HCl ou NaOH nos frascos de um dos suportes, seguida da sua adição nos reatores;**
- i) **Pipetagem e adição dos volumes da solução de sulfato de alumínio nas frascos do outro suporte;**
- j) **Acionamento do cronômetro simultaneamente à adição do coagulante à água contida nos seis reatores;**
- k) **Após o tempo de mistura rápida, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade médio da floculação;**
- l) **Decorrido o tempo de floculação, paralisação das paletas dos agitadores;**
- m) **Realização de descarte de 5 s antes do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada;**
- n) **Coleta das amostras em frascos de coleta durante 20 s (10 s antes e 10 s depois do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada);**
- o) **Medição dos parâmetros de controle das amostras;**

Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 são mostradas algumas situações durante o ensaio.

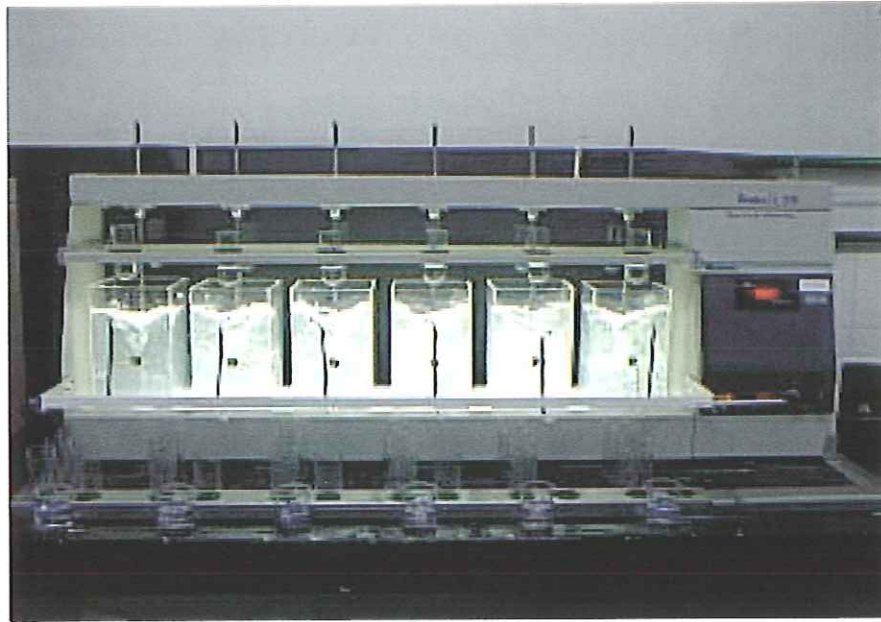


Figura 4.6 - Mistura rápida realizada no Jar Test ( $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ )



Figura 4.7 – Início da floculação ( $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ )



Figura 4.8 – Primeira coleta de amostras ( $V_s = 4,0$  cm/min)

#### *Apresentação dos resultados da Série I e comentários*

Com os resultados obtidos nos vinte ensaios foram construídos os diagramas de coagulação para remoção de turbidez e cor aparente para as duas velocidades de sedimentação fixadas. Por meio de interpolação manual, foram traçadas curvas de mesma turbidez e cor aparente remanescentes.

A escolha dos pontos de estudo, A e B, foi feita com base em dois critérios:

- turbidez e cor aparente remanescentes;
- necessidade de adição de alcalinizante ou acidificante para obtenção do ponto desejado.

A adaptação da metodologia proposta por DI BERNARDO (1993), deve-se ao fato dos pontos de mínima dosagem nas curvas de mesma turbidez ou cor aparente remanescentes nos diagramas, poderem precisar da adição de acidificante ou alcalinizante. A adição destes, além de dificultar a reprodutibilidade dos pontos escolhidos nos ensaios seqüentes, representam, na prática, gastos adicionais com produtos químicos. Dessa forma, procurou-se escolher pontos para os quais a turbidez ou cor aparente eram relativamente baixas (considerados convenientes), e que não fosse necessário o uso de acidificante ou alcalinizante.

#### 4.3.4 – Série II: Otimização da Mistura Rápida

##### *Preparação das soluções dos produtos químicos*

Nesta série foi usada somente a solução de sulfato de alumínio, preparada da mesma maneira descrita na série I, uma vez que os pontos A e B não necessitavam a adição de acidificante ou alcalinizante.

##### *Características dos Ensaio em “Jar Test”*

Fixados os pontos de estudo nos diagramas, foram realizados quatro ensaios com o ponto A e três com o ponto B, objetivando a otimização das condições de mistura rápida.

As características dos ensaios foram as seguintes:

- **COAGULANTE:** Solução de Sulfato de Alumínio PA → Dosagens: Ponto A = 24 mg/L , Ponto B = 16 mg/L;
  
- **CONDIÇÕES do ENSAIO**
  - *Mistura Rápida:*
    - ❖ Gradientes de Velocidade Médios: 400, 600, 1000 e 1200 s<sup>-1</sup> (Ponto A)  
800, 1000 e 1200 s<sup>-1</sup> (Ponto B)
    - Tempo de Agitação: 5, 10, 15, 20, 40 e 60 s
  - *Floculação:*
    - ❖ Gradiente de Velocidade Médio: 20 s<sup>-1</sup> ; Tempo de Agitação: 20 min
  - *Sedimentação:*
    - ❖ Velocidade de Sedimentação: 2,0 e 4,0 cm/min
  
- **PARÂMETROS DE CONTROLE:** turbidez, cor aparente e potencial zeta e pH de coagulação do sobrenadante.

O procedimento para a realização dos ensaios desta série é descrito a seguir:

**PROCEDIMENTO SÉRIE II****Ítems a) a f) da série I**

- g) Acionamento dos agitadores e acerto da rotação correspondente ao gradiente de velocidade médio na mistura rápida fixado;
- h) Pipetagem e adição do volume da solução de sulfato de alumínio fixado na série I (Pontos A e B), em béquers; a adição do coagulante foi feita em tempos diferentes para que o início da floculação fosse simultânea em todos os frascos;
- i) Acionamento do cronômetro simultaneamente à adição do coagulante no frasco com maior tempo de mistura rápida (frasco 1) ;
- j) A cada tempo pré-determinado, adição do coagulante no respectivo frasco;
- k) Após o maior tempo de mistura rápida, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade médio da floculação;
- l) Decorrido o tempo de floculação, paralisação das paletas dos agitadores;
- m) Realização de descarte de 5 s antes do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada;
- n) Coleta das amostras em frascos de coleta durante 120 s (10 s antes e 10 s depois do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada) ;
- o) Medição dos parâmetros de controle das amostras;

*Apresentação dos resultados da Série II e comentários*

Com os resultados obtidos nos ensaios, foram construídas figuras para os pontos A e B, contendo turbidez ou cor aparente remanescente em função dos tempo de mistura rápida para cada gradiente de velocidade médio na mistura rápida, e para cada velocidade de sedimentação.

Após análise das figuras, foi escolhida a combinação de Tmr e Gmr que forneceu os menores valores de turbidez e cor aparente remanescentes, para os pontos A e B.

**4.3.5 – Série III: Otimização da Floculação***Observações*

Faz-se necessário esclarecer que simultaneamente a série II, foi realizada a parte I da série V, que são os ensaios preliminares com polímeros e amidos catiônicos, com os pontos A e B escolhidos nos diagramas. Como será discutido posteriormente, os resultados destes ensaios

mostraram que as melhoras na remoção de cor aparente e turbidez não foram significativas para o Ponto A quando foram empregados os polímeros estudados como auxiliares de floculação, motivo pelo qual este ponto foi descartado nas demais séries.

Para utilizar a metodologia proposta por PÁDUA et al (1998) visando a determinação dos gradientes de velocidade nas câmaras de floculação, foram adotados para desenvolvimento do presente trabalho, quatro câmaras hipotéticas de floculação em série, situação comum em Estações de Tratamento de Água.

#### *Preparação das soluções dos produtos químicos*

Nesta série foi usada somente a solução de sulfato de alumínio, preparada da mesma maneira descrita na série I.

#### *Características dos Ensaios em “Jar Test”*

Foram realizados onze ensaios com o ponto B, com os parâmetros da mistura rápida já otimizados na Série II ( $T_{mr} = 10$  s e  $G_{mr} = 1000$   $s^{-1}$ ), objetivando a otimização da floculação (tempo total e gradientes de velocidade nas câmaras). As características dos ensaios foram as seguintes:

- **COAGULANTE:** Solução de Sulfato de Alumínio PA → Dosagem: Ponto B = 16 mg/L
- **CONDICÕES do ENSAIO**

- *Mistura Rápida:*

- ❖ Gradiente de Velocidade Médio: 1000  $s^{-1}$  ; Tempo de Agitação: 10 s

- *Floculação:*

- ❖ Gradientes de Velocidade Médios: 20, 25, 30, 35, 40, 50 e 60  $s^{-1}$   
Tempos de Agitação: 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 32 min ( $G_f = 20$   $s^{-1}$ )  
6, 10, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 min ( $G_f = 25$   $s^{-1}$ )  
6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 32 min ( $G_f = 30$   $s^{-1}$ )  
6, 8, 10, 12, 14, 16 min ( $G_f = 35$   $s^{-1}$ )  
6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 28 min ( $G_f = 40$   $s^{-1}$ )  
4, 6, 8, 10, 12, 14 min ( $G_f = 50$   $s^{-1}$ )  
6, 8 min ( $G_f = 60$   $s^{-1}$ )

- *Sedimentação:*

- ❖ Velocidade de Sedimentação: 2,0 e 4,0 cm/min

- **PARÂMETROS DE CONTROLE:** turbidez, cor aparente e potencial zeta e pH de coagulação do sobrenadante; .

O procedimento para a realização dos ensaios desta série é descrito a seguir:

### ***PROCEDIMENTO SÉRIE III***

#### ***Ítems a) a f) da série I***

- g) Acionamento dos agitadores e acerto da rotação correspondente ao gradiente de velocidade médio na mistura rápida fixado na série II;
- h) Pipetagem e adição do volume da solução de sulfato de alumínio fixado na série I (Ponto B), nos frascos do suporte, para adição simultânea do coagulante em todos os reatores;
- i) Acionamento do cronômetro simultaneamente à adição do coagulante;
- j) Após o tempo de mistura rápida fixado na série II, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade médio da floculação;
- k) Paralisação e suspensão das paletas dos agitadores de cada reator separadamente, conforme decorrido o tempo de floculação de cada um;
- l) Realização de descarte de 5 s antes do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada;
- m) Coleta das amostras em frascos de coleta durante 120 s (10 s antes e 10 s depois do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada);
- n) Medição dos parâmetros de controle das amostras;

#### *Apresentação dos resultados da Série III e comentários*

Com os resultados obtidos nos ensaios, foram construídas figuras de turbidez mínima remanescente em função dos tempos de floculação, para as duas velocidades de sedimentação, objetivando a determinação do tempo total de floculação, e o respectivo gradiente de velocidade ótimo na floculação ( $Gf^{\circ}$ ) para este tempo (semelhantes à Figura 3.34).

Escolhido o tempo total de floculação, e fixado o número de câmaras de floculação em série, foi possível a determinação dos gradientes nas câmaras de floculação a partir da metodologia proposta por PÁDUA et al (1998), para as duas velocidades de sedimentação. Com

esse objetivo, foram traçadas curvas de turbidez remanescente em função do tempo de floculação, para cada gradiente de velocidade médio estudado.

#### 4.3.6 – Série IV: Verificação da Influência do Escalonamento do Gradiente de Velocidade da Floculação na Eficiência de Remoção de Turbidez e Cor Aparente

##### *Preparação das soluções dos produtos químicos*

Nesta série foi usada somente a solução de sulfato de alumínio, preparada da mesma maneira descrita na série I.

##### *Características dos Ensaios em “Jar Test”*

Foram realizados dois ensaios com o ponto B, com os parâmetros da mistura rápida e da floculação fixados nas séries anteriores, objetivando verificar a influência do escalonamento do gradiente de velocidade nas quatro câmaras de floculação hipotéticas, na eficiência da floculação/sedimentação. Foram feitas réplicas de cada situação para confirmação dos resultados. As características dos ensaios foram as seguintes:

- **COAGULANTE:** Solução de Sulfato de Alumínio PA → Dosagem: Ponto B = 16 mg/L ;

- **CONDICÕES do ENSAIO**

- *Mistura Rápida:*

- ❖ Gradiente de Velocidade:  $1000 \text{ s}^{-1}$  ; Tempo de Agitação: 10 s

- *Floculação:*

Ensaio 01:

- ❖ Gradiente de Velocidade Ótimo ( $Gf^{\circ}$ ):  $25 \text{ s}^{-1}$  ;

Tempo Total de Agitação: 24 min

Ensaio 02:

- ❖ Combinação de Gradientes de Velocidade: 50, 25, 25 e  $25 \text{ s}^{-1}$

Tempo Total de Agitação: 24 min

Tempo de Agitação em cada câmara hipotética: 6 min (= 24/4)



- *Sedimentação:*

❖ Velocidade de Sedimentação: 1,89; 3,95; 7,20 cm/min

**PARÂMETROS DE CONTROLE:** turbidez e cor aparente e pH de coagulação do sobrenadante.

O procedimento para a realização dos ensaios desta série é descrito a seguir:

#### **PROCEDIMENTO SÉRIE IV**

##### **Ítems a) a e) da série I**

- f) Enchimento de apenas três frascos do “Jar Test” de forma aleatória, visando garantir a mesma qualidade da água em todos os reatores; foram realizadas tréplicas para confirmação dos resultados;
- g) Acionamento dos agitadores e acerto da rotação correspondente ao gradiente de velocidade médio na mistura rápida fixado na série II;
- h) Pipetagem e adição do volume da solução de sulfato de alumínio fixado na série I (Ponto B), nos frascos do suporte, para adição simultânea do coagulante em todos os reatores;
- i) Acionamento do cronômetro simultaneamente à adição do coagulante;
- j) Para o ensaio 01, após o tempo de mistura rápida fixado na série II, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade ótimo da floculação ( $Gf^o$ ) fixado na série III. Para o ensaio 02, após o tempo de mistura rápida fixado na série II, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade na primeira câmara de floculação, determinado na Série III;
- k) Somente para o ensaio 02, após o tempo de floculação de 6 min, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade na segunda câmara; a partir deste tempo, como os gradientes determinados na série III para as segunda, terceira e quarta câmaras foram os mesmos, não foi necessário mudar a rotação no agitador;
- l) Decorrido o tempo total de floculação fixado na série III, paralisação das paletas dos agitadores;
- m) Realização de descarte de 5 s antes do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada;
- n) Coleta das amostras em frascos de coleta durante 20 s (10 s antes e 10 s depois do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada);
- o) Medição dos parâmetros de controle das amostras.



#### *Apresentação dos resultados da Série IV e comentários*

Foram traçadas curvas de turbidez e cor aparente remanescentes em função da velocidade de sedimentação, com os resultados dos dois ensaios, para verificação do efeito do escalonamento do gradiente de velocidade na floculação.

#### **4.3.7 – Série V: Otimização das Dosagens dos Polímeros**

##### *Observações*

Pretendia-se, numa primeira instância, estudar a aplicação do polímero sintético catiônico da BetzDearborn e do amido de milho catiônico da Corn Products (disponíveis em grande quantidade no laboratório de saneamento), somente no Ponto A. Como os resultados dos primeiros ensaios mostraram que estes polímeros não estavam sendo eficientes naquelas condições, optou-se pelo estudo do Ponto B, e pela realização de testes com outros polímeros, como o polímero sintético catiônico da Adesol, disponível em pequenas quantidades, o amido de mandioca catiônico waxy, que, segundo DI BERNARDO (1997), apresentou ótimos resultados como auxiliar de floculação, e o amido de batata (sugestão dada pela banca de qualificação), pelos bons resultados em outros trabalhos, e não ser catiônico (mais barato).

##### *Preparação das soluções dos produtos químicos*

Nesta série foi usada a solução de sulfato de alumínio, preparada da mesma maneira descrita na série I.

Os polímeros utilizados foram os seguintes: Amido de Milho Catiônico (da CornProducts), Amido de Mandioca Catiônico Waxy, Amido de Batata, Polímero Sintético Catiônico (Polyfloc CE1163, da BetzDearborn) e Polímero Sintético Catiônico (da Adecom, antiga Adesol).

A preparação das soluções dos amidos foi feita a quente. Adicionou-se 0,5g de amido em 0,5 litro de água destilada (solução com concentração de 1,0 mg/mL). Esta solução foi aquecida até a temperatura de gelatinização ( $80 \pm 5$  ° C).

As soluções dos polímeros sintéticos foram preparadas pela diluição do produto comercial em água destilada, com agitação intensa para que não houvesse formação de “grumos”. A concentração das soluções variou de 0,5 a 1,0 mg/mL.

### *Características dos Ensaio em “Jar Test”*

#### Parte 1 – Ensaio Preliminares com os polímeros para os pontos A e B

Foram realizados dois ensaios com o ponto A e um com o ponto B, empregando os polímeros sintéticos catiônicos da BetzDearborn e da Adesol, e o amido de milho catiônico, como auxiliares de floculação.

Estes ensaios da Parte 1 foram realizados paralelamente à série II, motivo pelo qual as condições de mistura rápida e de floculação ainda não estavam otimizadas.

#### Parte 2 – Ensaio com os polímeros para o pontos B

Foram realizados quatro ensaios com o ponto B, empregando o polímero sintético catiônico da BetzDearborn, o amido de milho catiônico, o amido de mandioca catiônico waxy, e o amido de batata, como auxiliares de floculação.

Estes ensaios da Parte 2 foram realizados após a série IV, com as condições de mistura rápida e de floculação já otimizadas.

O tempo de agitação com polímero foi aumentado de 1 min para 3 min na tentativa de melhorar os resultados.

As características destes ensaios foram:

- **COAGULANTE:** Solução de Sulfato de Alumínio PA → Dosagens: Ponto A = 24 mg/L , Ponto B = 16 mg/L;
- **AUXILIAR DE FLOCULAÇÃO:** polímero sintético catiônico (da BetzDearborn), polímero sintético catiônico (da Adecom), amido de milho catiônico (da Corn Products), amido de mandioca catiônico waxy, e o amido de batata; as dosagens variaram de 0,05 a 4,0 mg/L, dependendo do polímero utilizado no ensaio.

- **CONDICÕES do ENSAIO**

- *Mistura Rápida:*

- ❖ Gradiente de Velocidade Médio:  $1000 \text{ s}^{-1}$  ; Tempo de Agitação: 10 s

- *Aplicação do Polímero:*

Ensaio Parte 1

- ❖ Gradiente de Velocidade Médio:  $300 \text{ s}^{-1}$  ; Tempo de Agitação: 60 s

## Ensaio Parte 2

- ❖ Gradiente de Velocidade Médio:  $100 \text{ s}^{-1}$  ; Tempo de Agitação: 180 s

- *Floculação*:

## Ensaio Parte 1

- ❖ Gradiente de Velocidade Médio:  $20 \text{ s}^{-1}$  ; Tempo Total de Agitação: 20 min

## Ensaio Parte 2

- ❖ Gradiente de Velocidade Ótimo:  $25 \text{ s}^{-1}$  ; Tempo Total de Agitação: 24 min

- *Sedimentação*:

- ❖ Velocidade de Sedimentação: 1,08; 2,10; 4,60 ; 8,40 cm/min

**PARÂMETROS DE CONTROLE:** turbidez, cor aparente e potencial zeta e pH de coagulação do sobrenadante;

O procedimento para a realização dos ensaios desta série é descrito a seguir:

***PROCEDIMENTO SÉRIE V******Ítems a) a f) da série I***

- g) Acionamento dos agitadores e acerto da rotação correspondente ao gradiente de velocidade médio na mistura rápida fixado na série II;
- h) Pipetagem e adição do volume da solução de sulfato de alumínio fixado na série I (Pontos A e B), nos frascos do suporte, para adição simultânea do coagulante em todos os reatores;
- i) Pipetagem e adição do volume da solução de polímero, nos frascos do outro suporte;
- j) Acionamento do cronômetro simultaneamente à adição do coagulante;
- k) Após o tempo de mistura rápida fixado, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade para agitação do polímero, e adição do polímero ;
- l) Após o tempo de agitação do polímero fixado, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade médio da floculação ;
- m) Decorrido o tempo total de floculação fixado, paralisação das paletas dos agitadores;
- n) Realização de descarte de 5 s antes do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada;

- o) Coleta das amostras em frascos de coleta durante 20 s (10 s antes e 10 s depois do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada);
- p) Medição dos parâmetros de controle das amostras.

#### *Apresentação dos resultados da Série V e comentários*

Com os resultados desta série, foram traçadas curvas de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de polímero, para cada velocidade de sedimentação, objetivando a escolha da dosagem ótima.

Nos ensaios da Parte 2, além das curvas de turbidez e cor aparente remanescentes, foram traçadas as curvas da variação do potencial zeta em função da dosagem do polímero.

Após a análise dos resultados, optou-se pelos seguintes polímeros para estudo nas séries VI, VII e VIII: polímero catiônico da BetzDearborn (Polyfloc CE1163), amido de milho catiônico (da Corn Products), e amido de mandioca catiônico waxy.

#### **4.3.8 – Série VI: Otimização do tempo de agitação na floculação com polímero (gradiente de velocidade na floculação escalonado)**

##### *Preparação das soluções dos produtos químicos*

Nesta série foram usadas a solução de sulfato de alumínio, preparada da mesma maneira descrita na série I, e as soluções de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163), amido de milho catiônico e amido de mandioca catiônico waxy, preparadas conforme descrição feita na série V.

##### *Características dos Ensaios em “Jar Test”*

Foram realizados cinco ensaios com o ponto B, com os parâmetros otimizados nas séries anteriores, objetivando otimizar o tempo de aplicação dos polímeros com o gradiente de velocidade na floculação escalonado. As características dos ensaios foram as seguintes:

- **COAGULANTE:** Solução de Sulfato de Alumínio PA → Dosagem: Ponto B = 16 mg/L ;
- **AUXILIAR DE FLOCULAÇÃO:** Polímero Sintético Catiônico (POLYFLOC CE1163): 0,75 mg/L, Amido de Milho Catiônico : 2,0 mg/L e Amido de Mandioca Catiônico: 1,0 mg/L ;

- **CONDIÇÕES do ENSAIO**

- *Mistura Rápida:*

- ❖ Gradiente de Velocidade:  $1000 \text{ s}^{-1}$  ; Tempo de Agitação: 10 s

- *Aplicação do Polímero:*

- ❖ Ensaio 01: Após a mistura rápida (início da 1ª câmara de floculação hipotética);  
 $G_p = 50 \text{ s}^{-1}$  = Gradiente de velocidade na primeira câmara de floculação hipotética;
- ❖ Ensaio 02: Após 6 min de floculação (início da 2ª câmara de floculação hipotética);  
 $G_p = 25 \text{ s}^{-1}$  = Gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação hipotética;
- ❖ Ensaio 03: Após 12 min de floculação (início da 3ª câmara de floculação hipotética);  
 $G_p = 25 \text{ s}^{-1}$  = Gradiente de velocidade na terceira câmara de floculação hipotética;
- ❖ Ensaio 04: Após 6 min de floculação (início da 4ª câmara de floculação hipotética);  
 $G_p = 25 \text{ s}^{-1}$  = Gradiente de velocidade na quarta câmara de floculação hipotética;
- ❖ Ensaio 05: Réplica dos melhores resultados

- *Floculação:*

- ❖ Combinação de Gradientes de Velocidade: 50, 25, 25 e  $25 \text{ s}^{-1}$   
Tempo Total de Agitação: 24 min  
Tempo de floculação em cada câmara de floculação hipotética: 6 min

- *Sedimentação:*

- ❖ Velocidade de Sedimentação: 1,08; 2,01; 4,60; 8,40 cm/min

**PARÂMETROS DE CONTROLE:** turbidez, cor aparente e pH de coagulação do sobrenadante.

O procedimento para a realização dos ensaios desta série é descrito a seguir:

**PROCEDIMENTO SÉRIE VI****Ítems a) a e) da série I**

- f) Enchimento de apenas três frascos do “Jar Test” de forma aleatória, visando garantir a mesma qualidade da água em todos os reatores; foram realizadas trélicas para confirmação dos resultados;
- g) Acionamento dos agitadores e acerto da rotação correspondente ao gradiente de velocidade médio na mistura rápida fixado na série II;
- h) Pipetagem e adição do volume da solução de sulfato de alumínio fixado na série I (Ponto B), nos frascos do suporte, para adição simultânea do coagulante em todos os reatores;
- i) Pipetagem e adição do volume da solução de polímero, nos frascos do outro suporte;
- j) Acionamento do cronômetro simultaneamente à adição do coagulante;
- k) Após o tempo de mistura rápida fixado na série II, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade na primeira câmara de floculação , determinado na Série III, somente no Ensaio 01, adição das dosagens dos três polímeros nos frascos;
- l) Após o tempo de floculação de 6 min, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação , determinado na Série III, e somente no Ensaio 02, adição das dosagens dos polímeros nos frascos ;
- m) Após o tempo de floculação de 12 min, somente no Ensaio 03, adição das dosagens dos polímeros nos frascos ;
- n) Após o tempo de floculação de 18 min, somente no Ensaio 04, adição das dosagens dos polímeros nos frascos ;
- o) Decorrido o tempo total de floculação fixado na série III, paralisação das paletas dos agitadores;
- p) Realização de descarte de 5 s antes do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada;
- q) Coleta das amostras em frascos de coleta durante 20 s (10 s antes e 10 s depois do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada);
- r) Medição dos parâmetros de controle das amostras.

### *Apresentação dos resultados da Série VI e comentários*

Os resultados desta série foram analisados juntamente com os resultados da série VII, a partir de dois tipos de figuras. A primeira delas visa a comparação dos resultados de cada polímero separadamente, com o gradiente de velocidade constante (série VII) e com o gradiente escalonado (série VI) na floculação, e a combinação “Ponto de aplicação e Gradiente de Velocidade na Floculação” que conduz aos melhores resultados em termos de remoção de turbidez e cor aparente. No outro tipo de figura, compara-se a eficiência dos polímeros estudados.

#### **4.3.9 – Série VII: Otimização do tempo de agitação na floculação com polímero (gradiente de velocidade na floculação constante)**

##### *Preparação das soluções dos produtos químicos*

Nesta série foram usadas a solução de sulfato de alumínio, preparada da mesma maneira descrita na série I, e as soluções de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163), amido de milho catiônico e amido de mandioca catiônico waxy, preparadas conforme descrição feita na série V.

##### *Características dos Ensaios em “Jar Test”*

Foram realizados cinco ensaios com o ponto B, com os parâmetros otimizados nas séries anteriores, objetivando otimizar o tempo de aplicação dos polímeros com o gradientes de velocidade na floculação constante. As características dos ensaios foram as seguintes:

- **COAGULANTE:** Solução de Sulfato de Alumínio PA → Dosagem: Ponto B = 16 mg/L ;
- **AUXILIAR DE FLOCULAÇÃO:** Polímero Sintético Catiônico (POLYFLOC CE1163): 0,75 mg/L, Amido de Milho Catiônico : 2,0 mg/L e Amido de Mandioca Catiônico: 1,0 mg/L ;

- **CONDIÇÕES do ENSAIO**

- *Mistura Rápida:*

- ❖ Gradiente de Velocidade:  $1000 \text{ s}^{-1}$  ; Tempo de Agitação: 10 s

- *Aplicação do Polímero:*  $G_p = G_f^* = \text{cte} = 25 \text{ s}^{-1}$  ;

- ❖ Ensaio 01: Após a mistura rápida (início da 1ª câmara de floculação hipotética);

- ❖ Ensaio 02: Após 6 min de floculação (início da 2ª câmara de floculação hipotética);



- ❖ Ensaio 03: Após 12 min de floculação (início da 3ª câmara de floculação hipotética);
- ❖ Ensaio 04: Após 6 min de floculação (início da 4ª câmara de floculação hipotética);
- ❖ Ensaio 05: Réplica dos melhores resultados

- *Floculação*:

- ❖ Gradiente de Velocidade Médio:  $25 \text{ s}^{-1}$

Tempo Total de Agitação: 24 min

- *Sedimentação*:

- ❖ Velocidade de Sedimentação: 1,08; 2,01; 4,60; 8,40 cm/min

PARÂMETROS DE CONTROLE: turbidez, cor aparente e pH de coagulação do sobrenadante.

O procedimento para a realização dos ensaios desta série é descrito a seguir:

### ***PROCEDIMENTO SÉRIE VII***

#### ***Ítems a) a e) da série I***

- f) Enchimento de apenas três frascos do “Jar Test” de forma aleatória, visando garantir a mesma qualidade da água em todos os reatores; foram realizadas tréplicas para confirmação dos resultados;
- g) Acionamento dos agitadores e acerto da rotação correspondente ao gradiente de velocidade médio na mistura rápida fixado na série II;
- h) Pipetagem e adição do volume da solução de sulfato de alumínio fixado na série I (Ponto B), nos frascos do suporte, para adição simultânea do coagulante em todos os reatores;
- i) Pipetagem e adição do volume da solução de polímero, nos frascos do outro suporte;
- j) Acionamento do cronômetro simultaneamente à adição do coagulante;
- k) Após o tempo de mistura rápida fixado na série II, redução da rotação para o valor correspondente ao gradiente de velocidade ótimo da floculação, determinado na Série III, e somente no Ensaio 01, adição das dosagens dos três polímeros nos frascos;
- l) Após o tempo de floculação de 6 min, somente no Ensaio 02, adição das dosagens dos polímeros nos frascos ;

- m) Após o tempo de floculação de 12 min, somente no Ensaio 03, adição das dosagens dos polímeros nos frascos ;
- n) Após o tempo de floculação de 18 min, somente no Ensaio 04, adição das dosagens dos polímeros nos frascos ;
- o) Decorrido o tempo total de floculação fixado na série III, paralisação das paletas dos agitadores;
- p) Realização de descarte de 5 s antes do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada;
- q) Coleta das amostras em frascos de coleta durante 20 s (10 s antes e 10 s depois do tempo de coleta correspondente à cada velocidade de sedimentação fixada);
- r) Medição dos parâmetros de controle das amostras.

#### *Apresentação dos resultados da Série VII e comentários*

Os resultados desta série foram analisados juntamente com os resultados da série VI, a partir de dois tipos de figuras, já descritas na série VI.

## **CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

A seguir é feita uma descrição do conteúdo de cada anexo para melhor entendimento da discussão dos dados.

ANEXO A: Resultados da série I, Construção dos Diagramas de Coagulação;

ANEXO B: Resultados da série II, Otimização da Mistura Rápida;

ANEXO C: Resultados da série III, Otimização da Floculação;

ANEXO D: Resultados da série IV, Verificação da Influência do Escalonamento do Gradiente de Velocidade na Floculação na remoção de turbidez e cor aparente;

ANEXO E: Resultados da série V, Otimização das Dosagens de Polímeros;

ANEXO F: Resultados da série VI, Otimização do Tempo de Agitação na Floculação com Polímero – Gradiente Escalonado na Floculação;

ANEXO G: Resultados da série VII, Otimização do Tempo de Agitação na Floculação com Polímero – Gradiente Constante na Floculação;

ANEXO H: Comparação dos resultados das Séries VI e VII – Gradiente de Velocidade Constante x Escalonamento do Gradiente de Velocidade na Floculação, e Influência do Tempo de Aplicação do Polímero;

ANEXO I: Comparação dos resultados das Séries VI e VII – Polímero Sintético Catiônico x Amidos Catiônicos;

Na Tabela 5.1 é mostrado o quadro geral das séries de ensaios, com suas características, finalidades e principais resultados.

Tabela 5.1 – Quadro geral das séries de ensaios

	<b>Finalidade</b>	<b>Características</b>	<b>Resultados</b>
<b>Série I</b>	Construção dos Diagramas de Coagulação para remoção de turbidez e cor aparente, e escolha dos pontos de estudo.	$T_{mr} = 20 \text{ s}$ ; $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ $T_f = 20 \text{ min}$ ; $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ $V_{s1} = 4,0 \text{ cm/min}$ ; $V_{s2} = 2,0 \text{ cm/min}$	<b>ANEXO A:</b> Ponto A : DAS = 24,0 mg/L e pHcoagulação = 6,45 Ponto B : DAS = 16,0 mg/L e pHcoagulação = 6,72
<b>Série II</b>	Otimização do Tempo e Gradiente de Velocidade na Mistura Rápida para os Pontos A e B	$T_{mr} = 5, 10, 15, 20, 40 \text{ e } 60 \text{ s}$ Ponto A - $G_{mr} = 400, 800, 1000 \text{ e } 1200 \text{ s}^{-1}$ Ponto B - $G_{mr} = 800, 1000 \text{ e } 1200 \text{ s}^{-1}$ $V_{s1} = 4,0 \text{ cm/min}$ ; $V_{s2} = 2,0 \text{ cm/min}$	<b>ANEXO B:</b> $T_{mr} = 10 \text{ s}$ e $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ para os pontos A e B
<b>Série III</b>	Otimização da Floculação para o Ponto B: Determinação do tempo total de Floculação; Determinação do Gradiente de Velocidade Ótimo na Floculação; Determinação dos Gradientes de Velocidade nas quatro câmaras hipotéticas de floculação;	$T_{mr} = 10 \text{ s}$ ; $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ Floculação: - 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 32 min ( $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ ) - 6, 10, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 min ( $G_f = 25 \text{ s}^{-1}$ ) - 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 32 min ( $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ ) - 6, 8, 10, 12, 14, 16 min ( $G_f = 35 \text{ s}^{-1}$ ) - 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 28 min ( $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ ) - 6, 8, 10, 12, 14 min ( $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ ) - 6, 8 min ( $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ ) $V_{s1} = 4,0 \text{ cm/min}$ ; $V_{s2} = 2,0 \text{ cm/min}$	<b>ANEXO C:</b> Tempo Total de Floculação: $T_f = 24 \text{ min}$ ; Gradiente de Velocidade Ótimo na Floculação para o tempo $T_f$ : $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ; Combinação de Gradientes de Velocidade nas 4 câmaras hipotéticas de floculação para as velocidades de sedimentação de 2,0 e 4,0 cm/min: $G_f : 50, 25, 25 \text{ e } 25 \text{ s}^{-1}$
<b>Série IV</b>	Verificação do efeito do escalonamento do gradiente de velocidade na floculação.	$T_{mr} = 10 \text{ s}$ ; $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ <b>Ensaio 1:</b> $T_f = 24 \text{ min}$ e $G_f = G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ <b>Ensaio 2:</b> $T_f = 24 \text{ min}$ e $G_f : 50, 25, 25 \text{ e } 25 \text{ s}^{-1}$ $V_s : 1,89, 3,95 \text{ e } 7,20 \text{ cm/min}$	<b>ANEXO D:</b> Escalonamento do gradiente de velocidade não foi eficiente para o tempo total de floculação escolhido
<b>Série V</b>	Otimização das dosagens dos Polímeros Parte 1: testes com diversos polímeros para os Pontos A e B; Parte 2: otimização das dosagens de polímeros para o Ponto B	<b>Parte 1:</b> $T_{mr} = 20 \text{ s}$ ; $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ $T_p = 60 \text{ s}$ ; $G_p = 300 \text{ s}^{-1}$ $T_f = 20 \text{ min}$ e $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ $V_s : 1,08, 2,10, 4,60 ; 8,40 \text{ cm/min}$ <b>Parte 2:</b> $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ; $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ $T_p = 180 \text{ s}$ ; $G_p = 100 \text{ s}^{-1}$ $T_f = 24 \text{ min}$ e $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ $V_s : 1,08, 2,10, 4,60 ; 8,40 \text{ cm/min}$	<b>ANEXO E:</b> Definição do Ponto de estudo: Ponto B. Dosagens dos Polímeros: 0,75 mg/L do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163, da BetzDearborn), 2,0 mg/L do amido de milho catiônico (da Corn Products), e 1,0 mg/L do amido de mandioca catiônico waxy
<b>Série VI</b>	Otimização do tempo de aplicação dos polímeros com o gradiente de velocidade na floculação escalonado (Ponto B)	$T_{mr} = 10 \text{ s}$ ; $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ $T_p : 0, 6, 12 \text{ e } 18 \text{ min}$ após o início da floculação; $G_p = G_f$ $T_f = 24 \text{ min}$ e $G_f : 50, 25, 25 \text{ e } 25 \text{ s}^{-1}$ $V_s : 1,08, 2,10, 4,60 ; 8,40 \text{ cm/min}$	<b>ANEXO F:</b> A melhor opção de aplicação dos polímeros na floculação variou com a $V_s$ e com o tipo de polímero
<b>Série VII</b>	Otimização do tempo de aplicação dos polímeros com o gradiente de velocidade na floculação constante (Ponto B).	$T_{mr} = 10 \text{ s}$ ; $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ $T_p : 0, 6, 12 \text{ e } 18 \text{ min}$ após o início da floculação; $G_p = G_f^*$ $T_f = 24 \text{ min}$ e $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ $V_s : 1,08, 2,10, 4,60 ; 8,40 \text{ cm/min}$	<b>ANEXO G:</b> A melhor opção de aplicação dos polímeros na floculação variou com a $V_s$ e com o tipo de polímero

## 5.2 – DISCUSSÃO

### 5.2.1 – Série I: Construção dos Diagramas de Coagulação

Com os dados obtidos nos vinte ensaios realizados foram construídos os diagramas de coagulação, nos quais se tem turbidez ou cor aparente remanescente em função da dosagem de sulfato de alumínio PA e do pH de coagulação para as velocidades de sedimentação de 4,0 e 2,0 cm/min. Vale ressaltar que apenas 84 pontos, de um total de 120, foram utilizados para a construção dos diagramas; os demais foram descartados uma vez que não apresentaram reprodutibilidade dos resultados de turbidez e cor aparente remanescentes.

Nas Figuras A1 e A3 se tem curvas de mesma turbidez e cor aparente remanescentes, respectivamente, para a velocidade de sedimentação de 4,0 cm/min. Duas regiões apresentaram bons resultados em termos de remoção de turbidez e cor aparente. A primeira está compreendida entre dosagens de sulfato de alumínio de 12,0 e 26,0 mg/L e valores de pH de coagulação entre 6,35 e 6,70 (turbidez remanescente  $\leq 5$  uT e cor aparente remanescente  $\leq 40$  uC). A segunda, com valores de turbidez remanescente  $\leq 6$  uT e cor aparente remanescente  $\leq 40$  uC, situou-se entre valores de pH de coagulação de 6,10 e 6,30 e dosagem de Sulfato de Alumínio PA de 14,0 a 28,0 mg/L.

Nas Figuras A2 e A4 se tem curvas de mesma turbidez e cor aparente remanescentes, para a velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min. A região que apresentou os melhores resultados em termos de remoção de turbidez e cor aparente, está compreendida entre dosagens de sulfato de alumínio de 16,0 e 28,0 mg/L e valores de pH de coagulação entre 6,10 e 6,70 (turbidez remanescente  $\leq 4$  uT e cor aparente remanescente  $\leq 25$  uC).

Na Figura A5 tem-se o pH de Coagulação em função da dosagem de Sulfato de Alumínio e a variação do Potencial Zeta. Percebe-se que o potencial zeta se aproximou de zero na região compreendida entre valores de pH de coagulação de 6,10 e 6,30, e dosagens de Sulfato de Alumínio entre 14,0 e 28,0 mg/L. Outros pontos (pH de coagulação x dosagem de coagulante) tiveram potencial zeta próximo de zero isoladamente.

Como já dito anteriormente, a escolha dos pontos de estudo, A e B, foi feita com base em dois critérios: turbidez e cor aparente remanescentes; necessidade de adição de alcalinizante ou acidificante para obtenção do ponto desejado. A adaptação da metodologia proposta por DI BERNARDO (1993), deve-se ao fato dos pontos de mínima dosagem nas curvas de mesma turbidez ou cor aparente remanescente nos diagramas construídos, precisarem da adição de

acidificante ou alcalinizante. A adição destes, além de dificultar a reprodutibilidade dos pontos escolhidos nos ensaios subseqüentes, representam, na prática, gastos adicionais com produtos químicos. Dessa forma, procurou-se escolher pontos para os quais a turbidez ou cor aparente resultassem relativamente baixas (considerados convenientes), e que não fosse necessário o uso daqueles produtos químicos para ajuste do pH de coagulação.

O ponto A está localizado na região ótima dos diagramas mencionados. Sua escolha é devida aos resultados satisfatórios de turbidez e cor aparente remanescentes, e a ausência de alcalinizante ou acidificante para a sua obtenção. Já o ponto B, principalmente para a velocidade de sedimentação de 4,0 cm/min, não apresentou bons resultados em termos de remoção de turbidez e cor aparente; para a velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min, os resultados foram melhores, estando o ponto B localizado na região de turbidez e cor aparente remanescentes de 5 uT e 35 uC, respectivamente. Sua escolha é devida aos resultados obtidos para a velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min, e a ausência de acidificante ou alcalinizante. Na Tabela 5.2 são mostradas as principais características dos Pontos A e B.

Tabela 5.2 - Características dos pontos escolhidos nos diagramas de coagulação

	<i>Ponto A</i>	<i>Ponto B</i>
Dosagem Sulfato de Alumínio (mg/L)	24,0	16,0
pH de Coagulação	6,45	6,72
Turbidez remanescente (uT) Vs = 4,0 cm/min	4,99	8,45
Cor Aparente remanescente (uC) Vs = 4,0 cm/min	34	57
Turbidez remanescente (uT) Vs = 2,0 cm/min	3,17	4,74
Cor Aparente remanescente (uC) Vs = 2,0 cm/min	22	33
Potencial Zeta (mV)	-3,2	-10,3

Faz-se necessário explicar que inicialmente, pretendia-se estudar apenas o Ponto A. Com os resultados da série V, parte I, realizada paralelamente a série II, optou-se pela escolha de um segundo ponto no diagrama, ponto B, cujos resultados não eram tão bons em termos de remoção de turbidez ou cor aparente, com dosagem de coagulante e potencial zeta menores, na tentativa de se obter resultados melhores com os polímeros catiônicos estudados.

### 5.2.2 – Série II: Otimização da Mistura Rápida

Os resultados dos ensaios para o Ponto A encontram-se no Anexo B, Tabelas B1 a B4, e representados graficamente nas Figuras B1, B2, B3 e B4. Percebe-se que para as duas velocidades de sedimentação estudadas (4,0 e 2,0 cm/min), o tempo e o gradiente de velocidade médio na mistura rápida que forneceram os menores valores de turbidez e cor aparente foram 10 s e  $1000 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. A turbidez e a cor aparente remanescentes nessas condições eram 3,31 uT e 26 uC, respectivamente ( $V_s = 4,0 \text{ cm/min}$ ), e 1,35 uT e 12 uC, respectivamente ( $V_s = 2,0 \text{ cm/min}$ ).

Os resultados dos ensaios para o Ponto B estão no Anexo B, Tabelas B5 a B7, e representados graficamente nas Figuras B5, B6, B7 e B8. Para a velocidade de sedimentação de 4,0 cm/min, a combinação  $T_{mr} \times G_{mr}$  que forneceu os melhores resultados em termos de turbidez e cor aparente foi 15 s e  $800 \text{ s}^{-1}$ . Já para a velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min, o tempo e o gradiente de velocidade médio na mistura rápida que apresentaram os menores valores de turbidez e cor aparente remanescentes foram 10 s e  $1000 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Para a escolha da melhor opção, foi feita uma análise dos valores de turbidez e cor aparente remanescentes das duas combinações  $T_{mr} \times G_{mr}$ , para as duas velocidades de sedimentação:

$$V_s = 4,0 \text{ cm/min}$$

$$\text{- } T_{mr} = 15 \text{ s; } G_{mr} = 800 \text{ s}^{-1} \Rightarrow \text{ Turbidez remanescente: } 4,21 \text{ uT}$$

$$\text{Cor Aparente remanescente: } 32 \text{ uC}$$

$$\text{- } T_{mr} = 10 \text{ s; } G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1} \Rightarrow \text{ Turbidez remanescente: } 5,35 \text{ uT}$$

$$\text{Cor Aparente remanescente: } 37 \text{ uC}$$

$$V_s = 2,0 \text{ cm/min}$$

$$\text{- } T_{mr} = 15 \text{ s; } G_{mr} = 800 \text{ s}^{-1} \Rightarrow \text{ Turbidez remanescente: } 3,25 \text{ uT}$$

$$\text{Cor Aparente remanescente: } 25 \text{ uC}$$

$$\text{- } T_{mr} = 10 \text{ s; } G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1} \Rightarrow \text{ Turbidez remanescente: } 2,28 \text{ uT}$$

$$\text{Cor Aparente remanescente: } 20 \text{ uC}$$

Optou-se pelo tempo de 10 s e gradiente de velocidade médio na mistura rápida de  $1000 \text{ s}^{-1}$ , para a realização dos ensaios subsequentes com o Ponto B.

### 5.2.3 – Série III: Otimização da Floculação

Como já mencionado anteriormente, faz-se necessário esclarecer que simultaneamente à série II, foi realizada a parte I da série V, que são os ensaios preliminares com polímeros e amidos catiônicos, com os pontos A e B escolhidos nos diagramas. Como será discutido no item 5.2.5, os resultados destes ensaios mostraram que as melhoras na remoção de cor aparente e turbidez não foram significativas para o Ponto A quando foram empregados os polímeros estudados como auxiliares de floculação, motivo pelo qual este ponto foi descartado nas demais séries.

Os resultados dos ensaios estão no Anexo C, Tabelas C1 a C11. A representação gráfica dos resultados foi feita de acordo com os objetivos da série. Na parte 1 foi adotado o mesmo procedimento que MENDES (1989) para a determinação do tempo total de floculação ( $T_f$ ) e do gradiente de velocidade ótimo na floculação para o tempo  $T_f$  ( $G_f^*$ ). Na parte 2, a partir da metodologia desenvolvida por PÁDUA et al (1998), foram determinados os gradientes de velocidade nas quatro câmaras hipotéticas de floculação para o tempo total de floculação  $T_f$ .

Vale ressaltar também, que durante a execução dos ensaios da parte 1 da série V, foi verificada a deposição de flocos no fundo do reator com as maiores dosagens de polímeros. Estes ensaios foram realizados com o gradiente de velocidade médio na floculação de  $20 \text{ s}^{-1}$ , motivo pelo qual optou-se pela exclusão dos resultados da série III com este gradiente de velocidade (Tabelas C1 e C2).

#### *Parte 1 – Tempo Total de Floculação e Gradiente de Velocidade Ótimo na Floculação ( $G_f^*$ )*

Nota-se nas Tabelas C12 a C15, que a remoção de turbidez é semelhante a da cor aparente. Optou-se, então, pela análise gráfica somente dos resultados de turbidez.

Para cada velocidade de sedimentação e para cada tempo de floculação estudados, foi escolhido o valor de  $G_f$  para o qual resultou a menor turbidez remanescente. Com estes dados, foram construídas as Figuras 5.1 e 5.2 (Figuras C1 e C2 do Anexo C), nas quais se tem a turbidez mínima remanescente e o respectivo gradiente de velocidade médio na floculação ( $G_f^*$ ), em função do tempo de floculação, para as velocidades de sedimentação de 4,0 e 2,0 cm/min.



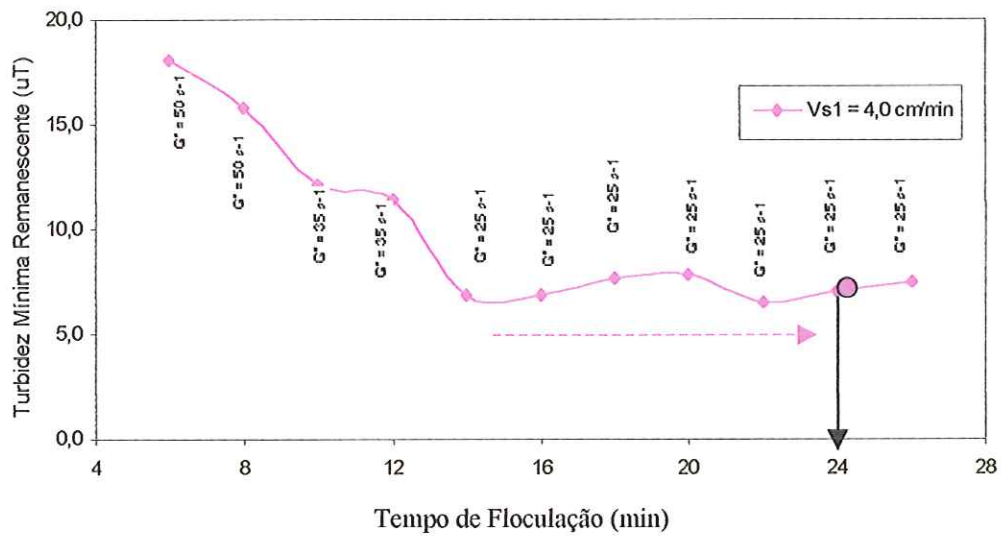


Figura 5.1 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação  
 $V_s = 4,0$  cm/min

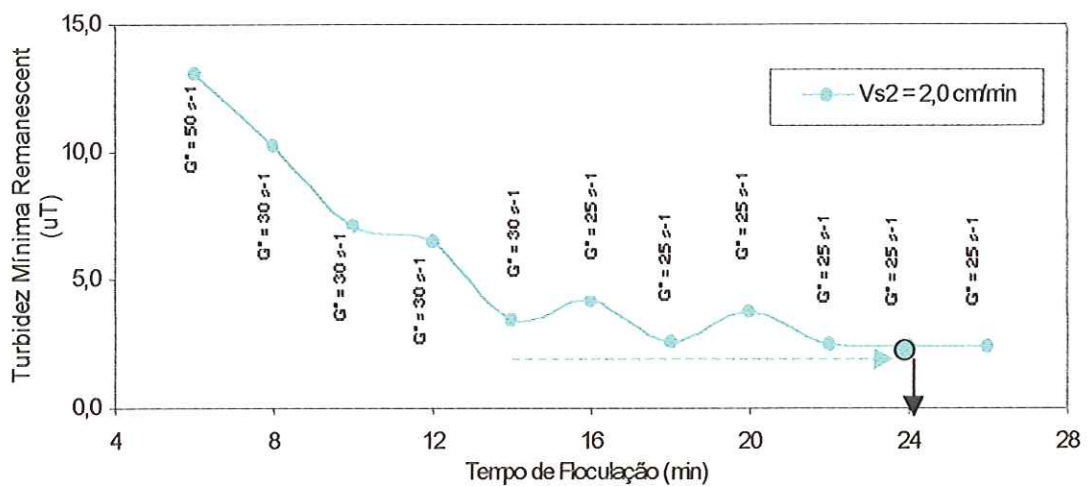


Figura 5.2 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação  
 $V_s = 2,0$  cm/min

Nas Figuras 5.1 e 5.2, nota-se que a turbidez mínima remanescente diminui à medida que cresce o valor de  $T_f$ , tendendo a um valor mínimo no tempo de floculação de 22 min para  $V_s = 4,0$  cm/min e de 24 min para  $V_s = 2,0$  cm/min. A partir deste mínimo, os valores de turbidez mínima começam a aumentar com o aumento do tempo de floculação. Em visto disso, foi adotado o tempo total de floculação de 24 min, e o gradiente de velocidade ótimo na floculação de  $25 s^{-1}$  ( $G_f^*$ ).

*Parte 2 – Gradientes de Velocidade nas Câmaras Hipotéticas de Floculação*

Como já mencionado anteriormente, foram adotadas quatro câmaras hipotéticas de floculação em série. O tempo total de floculação fixado foi de 24 min, o que corresponde a 6 min de floculação em cada uma delas.

Foram traçadas curvas de turbidez remanescente em função do tempo de floculação para cada gradiente de velocidade médio na floculação estudado, para as duas velocidades de sedimentação. A partir da metodologia desenvolvida por PÁDUA et al (1998), a seguinte combinação de gradientes de velocidade foi obtida para a velocidade de sedimentação de 4,0 cm/min :  $Gf = 50, 25, 25$  e  $25 \text{ s}^{-1}$  para a primeira, segunda, terceira e quarta câmaras de floculação hipotéticas, respectivamente (Figuras C3 a C10). A turbidez remanescente na saída da quarta câmara hipotética de floculação foi de 7,5 uT. Para a velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min, a combinação obtida foi a mesma:  $Gf = 50, 25, 25$  e  $25 \text{ s}^{-1}$  para a primeira, segunda, terceira e quarta câmaras de floculação hipotéticas, respectivamente (Figuras C11 a C16). A turbidez remanescente na saída da quarta câmara hipotética de floculação foi de 2,4 uT.

A comparação dos resultados da Tabela C4, referentes ao ensaio com o gradiente de velocidade médio na floculação de  $25 \text{ s}^{-1}$ , com os valores de turbidez remanescente na saída da quarta câmara hipotética de floculação, obtidos a partir da metodologia proposta por PÁDUA et al (1998), mostrou que deveria ter sido escolhido um tempo total de floculação menor que 24 min quando é feito o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação, pois este deve ter sido superior aquele que minimizaria a turbidez e cor aparente remanescentes (ver Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Turbidez remanescente após 24 min de floculação com  $Gf = 25 \text{ s}^{-1}$  e na saída da quarta câmara hipotética de floculação a partir da metodologia proposta por PÁDUA et al (1998)

SITUAÇÃO	TURBIDEZ (uT)	
	$V_s = 4,0 \text{ cm/min}$	$V_s = 2,0 \text{ cm/min}$
Turbidez após 24 min de floculação com $Gf = \text{constante} = 25 \text{ s}^{-1}$	7,01	2,42
Turbidez na saída da quarta câmara de floculação - resultado obtido a partir da metodologia de PÁDUA et al (1998) para o tempo total de floculação de 24 min $Gf: 50, 25, 25$ e $25 \text{ s}^{-1}$	7,5	2,4

Segundo DI BERNARDO (1993), o escalonamento decrescente dos gradientes de velocidade na floculação melhora a qualidade da água floculada. Na prática, isso significa que há uma redução do tempo total de floculação necessário para produzir água com qualidade semelhante à floculação realizada neste tempo, com o gradiente de velocidade constante. Tal resultado decorre da existência, no início da floculação, de partículas pequenas, de forma que com gradiente de velocidade maior, resulta maior oportunidade de choques entre elas. Para possibilitar o aumento do tamanho dos flocos, há necessidade de diminuir o gradiente de velocidade para que sejam reduzidas as forças de cisalhamento.

O tempo total de floculação adotado para execução dos ensaios subsequentes com os gradientes de velocidade escalonados foi de 24 min. Entretanto, a análise detalhada dos resultados após o término do trabalho experimental revelou que o tempo total de floculação poderia ter sido menor no caso do escalonamento dos gradientes de velocidade na floculação com câmaras em série, para que resultassem eficiências semelhantes à floculação realizada com  $T_f = 24$  min e  $Gf^* = 25$  s<sup>-1</sup>.

#### **5.2.4 – Série IV: Verificação da Influência do Escalonamento dos Gradientes de Velocidade na Floculação na remoção de turbidez e cor aparente**

Foram realizados dois ensaios com o ponto B. No primeiro, manteve-se o gradiente de velocidade na floculação constante e igual a 25 s<sup>-1</sup> ( $Gf^*$ ), e no segundo ensaio os gradientes de velocidade na floculação foram escalonados ( $Gf$ : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>). Em ambos os casos o tempo total de floculação foi de 24 min. Foram feitas réplicas de cada situação para confirmação dos resultados. Os resultados dos ensaios estão no Anexo D, Tabelas D1 e D2. A representação gráfica dos resultados é apresentada nas Figuras D1 e D2, nas quais se tem turbidez ou cor aparente remanescente em função da velocidade de sedimentação, para as duas condições de floculação: gradiente de velocidade constante ( $Gf^* = 25$  s<sup>-1</sup>) e gradientes de velocidades escalonados ( $Gf$ : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>).

Os resultados obtidos com o escalonamento dos gradientes de velocidade na floculação foram piores que os com o gradiente de velocidade constante, para todas as velocidades de sedimentação estudadas (1,89; 3,95 e 7,2 cm/min), em virtude do tempo de floculação adotado ter sido provavelmente maior que o necessário.

### 5.2.5 – Série V: Otimização das Dosagens de Polímeros

Esta série foi realizada em duas partes. Na primeira foram executados dois ensaios com o ponto A e um com o ponto B, e testados os seguintes polímeros como auxiliares de floculação: Amido de Milho Catiônico (da ComProducts), Polímero Sintético Catiônico (Polyfloc CE1163, da BetzDearborn) e Polímero Sintético Catiônico (da Adecom, antiga Adesol). Estes ensaios foram realizados com as condições de mistura rápida ( $T_{mr} = 20$  s e  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>) e de floculação ( $T_f = 20$  min e  $G_f = 20$  s<sup>-1</sup>) não otimizadas, uma vez que, como já mencionado anteriormente, esta parte da série V foi realizada paralelamente à série II. Na segunda etapa, foram realizados quatro ensaios com o Ponto B, com os parâmetros da mistura rápida ( $T_{mr} = 10$  s e  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>) e da floculação ( $T_f = 24$  min e  $G_f = 25$  s<sup>-1</sup>) otimizados nas séries anteriores. Os polímeros utilizados como auxiliares de floculação foram: Amido de Milho Catiônico (da ComProducts), Amido de Mandioca Catiônico Waxy, Amido de Batata e Polímero Sintético Catiônico (Polyfloc CE1163, da BetzDearborn).

Vale ressaltar que nesta série de ensaios foram adotados os parâmetros de aplicação de polímero como auxiliar de floculação ( $T_p$  e  $G_p$ ) recomendados por DI BERNARDO (1993), ou seja, a aplicação do polímero foi realizada após a mistura rápida, com gradiente de velocidade de 300 s<sup>-1</sup> e tempo de agitação de 60 s (parte 1). Na segunda parte, o tempo de agitação foi de 180 s na tentativa de melhorar a eficiência dos polímeros.

Antes de começar a discussão dos resultados, é importante que sejam feitas algumas observações:

- Para compreensão total dos resultados obtidos com os diversos polímeros, seria necessário o conhecimento de suas características, grau de substituição, massa molecular, viscosidade quando em solução, etc. Tentou-se a obtenção de tais características com os fornecedores desses polímeros (BetzDearborn e Com Products), mas nenhum dado foi conseguido. A determinação dessas características em laboratório foi descartada devido a sua complexidade e tempo das análises;
- WEBER (1972) comenta que os polímeros sintéticos catiônicos podem funcionar como coagulantes por neutralização de cargas ou adsorção-formação de pontes, ou uma combinação dos dois mecanismos. Uma vez que não são conhecidas as características dos polímeros, as leituras de potencial zeta foram responsáveis para avaliação do mecanismo de ação de cada polímero catiônico estudado. Por exemplo, nos ensaios em que o potencial zeta não apresentou aumentos significativos, mas o polímero propiciou boa eficiência na

remoção de turbidez e cor aparente, pode se dizer que o mecanismo predominante de ação deste polímero deve ter sido o de adsorção-formação de pontes. Entretanto, aumentos significativos nas leituras de potencial zeta indicam que o mecanismo predominante de ação do polímero catiônico foi o de neutralização de cargas.

- Nestes ensaios foram utilizadas dosagens de polímeros sintéticos catiônicos de até 1,5 mg/L, consideradas altas do ponto de vista prático, uma vez que além de aumentarem a concentração dos possíveis subprodutos na água tratada, são economicamente inviáveis.

### *Parte 1*

Na Tabela E1 do Anexo E, são mostrados os resultados do ensaio 1 realizado com o polímero sintético catiônico (polyfloc CE1163, da BetzDearborn), com o ponto A. Para análise dos resultados, foram traçadas curvas de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de polímero, para as quatro velocidades de sedimentação estudadas (Figuras E1 e E2, respectivamente). Percebe-se nessas figuras que o uso deste polímero sintético catiônico como auxiliar de floculação não foi vantajoso para nenhuma dosagem e velocidade de sedimentação estudadas.

Devido aos resultados do ensaio 1, foi realizado na seqüência um ensaio para testar vários polímeros catiônicos, ainda com o Ponto A. Os resultados são apresentados na Tabela E2, e a representação gráfica é feita nas Figuras E3 e E4. Nota-se que para velocidades de sedimentação maiores que 4,6 cm/min, somente dosagens de 0,30 mg/L do polímero sintético catiônico da Adesol e de 0,40 mg/L do polímero sintético catiônico da BetzDearborn, apresentaram bons resultados na remoção de turbidez e cor aparente. Com os resultados do potencial zeta, observou-se que o mecanismo predominante de ação desses polímeros foi o de adsorção-formação de pontes.

Na Tabela E3 e Figuras E5 e E6 são mostrados os resultados do ensaio com o Ponto B e com diversos polímeros catiônicos como auxiliares de floculação. As melhoras decorrentes do uso de polímeros como auxiliares de floculação foram significativas somente para velocidades de sedimentação maiores que 4,6 cm/min. Os melhores resultados foram obtidos com dosagem de 0,20 mg/L do polímero sintético catiônico da BetzDearborn. Os resultados do potencial zeta mostraram que o mecanismo predominante de ação desses polímeros pode ter sido o de adsorção-formação de pontes.

## Parte 2

Na Tabela E4 do Anexo E, são mostrados os resultados do ensaio realizado com o polímero sintético catiônico (polyfloc CE1163, da BetzDearborn), com o ponto B. Para análise dos resultados, foram traçadas curvas de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de polímero, para as quatro velocidades de sedimentação estudadas, e a variação do potencial zeta (Figuras E7 e E8, respectivamente). Nota-se que o polímero foi eficiente na remoção de turbidez e cor aparente para todas as velocidades de sedimentação e dosagens estudadas, sendo que as melhoras mais significativas foram obtidas com a velocidade de sedimentação de 8,4 cm/min e dosagens maiores que 0,75 mg/L. O potencial zeta variou de -10,5 mv (sem polímero) a - 2,1 mV (dosagem de polímero de 1,5 mg/L). Percebe-se que só foi conseguido um aumento significativo do potencial zeta com dosagens relativamente altas deste polímero, indicando que predominou a adsorção-formação de pontes para dosagens menores que 1,0 mg/L e neutralização de cargas para a dosagem de 1,5 mg/L. Foi escolhida a dosagem de 0,75 mg/L para estudo nas séries subseqüentes.

Os resultados do ensaio com o amido de milho catiônico com o Ponto B, são apresentados na Tabela E5. A análise dos resultados pode ser feita pelas Figuras E9 e E10. Observa-se que com este amido catiônico resultaram resultados excelentes de remoção de turbidez e cor aparente, principalmente com dosagens maiores que 1,0 mg/L. Com os resultados do potencial zeta, observou-se que houve reversão de cargas para a dosagem de 3,0 mg/L, indicando que para dosagens menores que 2,0 mg/L predominou a adsorção-formação de pontes e para a dosagem de 3,0 mg/L deste polímero predominou a neutralização de cargas. A dosagem do amido de milho catiônico escolhida para estudo nas demais séries de ensaios foi 2,0 mg/L.

Foi testado o amido de batata como auxiliar de floculação para o Ponto B. Os resultados são mostrados nas Tabelas E6 e E7. Foram utilizadas dosagens de até 9,0 mg/L deste amido, mas não foi conseguida uma remoção de turbidez ou cor aparente satisfatória que justificasse o seu uso como auxiliar de floculação (Figuras E11 e E12). Pelo fato de não apresentar carga, a aplicação do amido de batata não alterou o potencial zeta do ponto B, sendo as pequenas diferenças nas leituras atribuídas a erros experimentais. Devido aos resultados destes ensaios, o amido de batata não foi estudados nas demais séries.

Por último, foi estudado o amido de mandioca catiônico waxy no Ponto B. Os resultados são mostrados na Tabela E7, e representados graficamente nas Figuras E13 e E14. A análise desses resultados confirma os excelentes resultados obtidos por DI BERNARDO (1997) com o uso deste polímero como auxiliar de floculação. Para a velocidade de sedimentação de

8,4 cm/min, a remoção de turbidez com o uso do polímero foi muito maior que aquela obtida sem o seu uso (21,7 uT sem polímero e 0,85 uT com polímero). Neste ensaio, o potencial zeta foi de -13,6 mV sem amido e de -10,2 mV com 3,0 mg/L de amido, indicando que o mecanismo de ação predominante do amido de mandioca catiônico foi o de formação de pontes. Os ótimos resultados reforçam a possibilidade deste amido ter alta massa molecular. A dosagem deste amido escolhida para estudo foi de 1,0 mg/L.

### 5.2.6 – Séries VI e VII: Otimização do Tempo de Agitação na Flocação com Polímero – Gradiente Escalonado e Gradiente Constante na Flocação

Nas Tabelas F1, F2, F3, F4 e F5 do Anexo F são mostrados os resultados da série VI, na qual foram realizados ensaios variando o tempo de aplicação do polímero, com as condições de mistura rápida otimizadas na série II para o Ponto B ( $T_{mr} = 10$  s e  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>), e com o gradiente de velocidade na flocação escalonado, combinação determinada na série III ( $G_f$ : 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>). O tempo total de flocação foi de 24 min e foram estudadas as seguintes velocidades de sedimentação: 1,08; 2,01; 4,60 e 8,40 cm/min. A Tabela F1 corresponde aos resultados obtidos quando os polímeros foram adicionados logo após a mistura rápida, ou seja, no início da primeira câmara hipotética de flocação. Na Tabela F2 são mostrados os resultados da aplicação do polímero 6 min após o início da flocação (início da segunda câmara hipotética de flocação). As Tabelas F3 e F4 referem-se aos resultados da aplicação do polímero 12 e 18 min após o início da flocação (início das terceira e quarta câmaras hipotéticas de flocação, respectivamente). As dosagens utilizadas dos polímeros foram aquelas otimizadas na série V: 0,75 mg/L do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163, da BetzDearborn), 2,0 mg/L do amido de milho catiônico (da Corn Products), e 1,0 mg/L do amido de mandioca catiônico waxy.

No Anexo G são apresentados os resultados dos ensaios da série VII. Nesta série foram realizados ensaios variando o tempo de aplicação do polímero, com as condições de mistura rápida otimizadas na série II para o Ponto B ( $T_{mr} = 10$  s e  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>), e com o gradiente de velocidade na flocação constante e igual ao gradiente de velocidade ótimo ( $G_f^* = 25$  s<sup>-1</sup>), determinado na série III. O tempo total de flocação foi de 24 min e foram estudadas as seguintes velocidades de sedimentação: 1,08; 2,01; 4,60 e 8,40 cm/min. Os resultados são apresentados na forma de tabelas (Tabelas G1 a G5). O conteúdo de cada tabela é semelhante ao descrito para a série VI, Anexo F.

A discussão dos resultados destas séries é feita em conjunto, a partir da construção de dois tipos de figuras: as figuras tipo I (Figura 5.3), apresentadas no Anexo H, visam a comparação dos resultados de cada polímero separadamente, para cada velocidade de sedimentação, com o gradiente de velocidade constante (série VII) e com o gradiente escalonado (série VI) na floculação, e a combinação “Ponto de aplicação e Gradiente de Velocidade na Floculação” que conduz aos melhores resultados em termos de remoção de turbidez e cor aparente. Nas figuras tipo II (Figura 5.4), apresenta-se a eficiência dos polímeros estudado para cada velocidade de sedimentação.

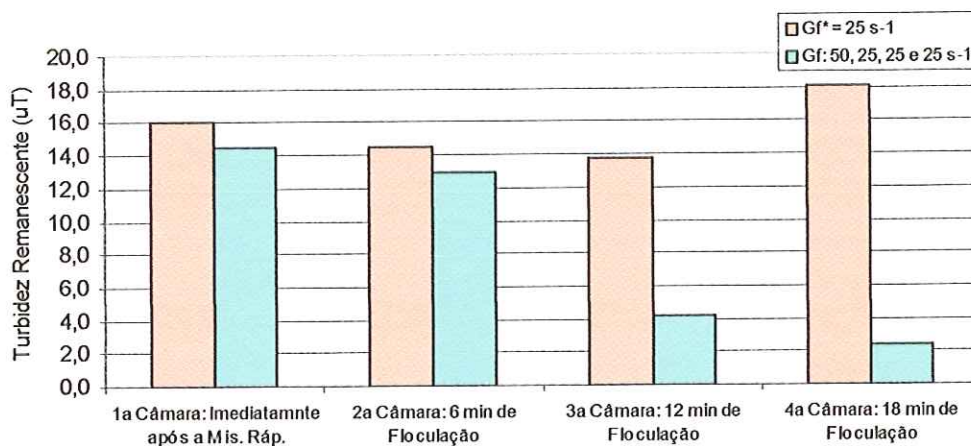


Figura 5.3 – Exemplo da Figura Tipo I: Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico na floculação, Vs1 = 8,40 cm/min

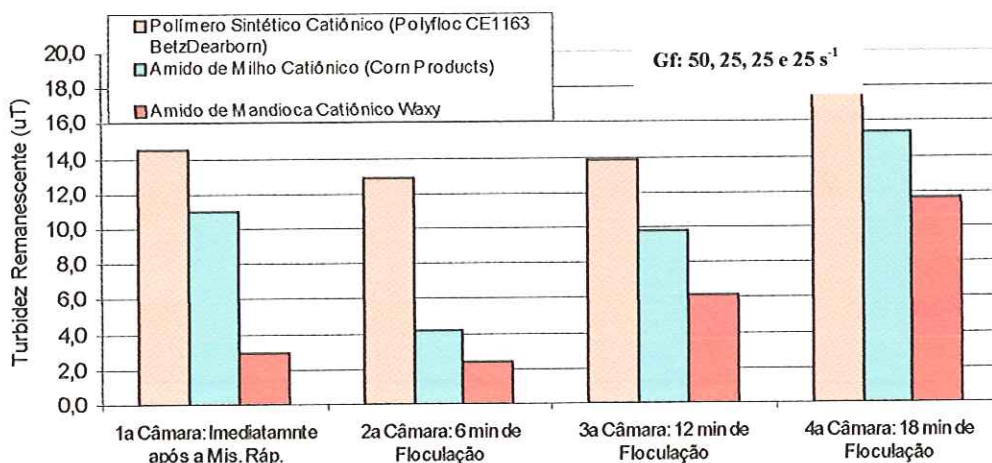


Figura 5.4 – Exemplo da Figura Tipo II - Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na floculação, Vs1 = 8,40 cm/min



### *Anexo H*

#### *Resultados obtidos com o Polímero Sintético Catiônico (Polyfloc CE1163 da BetzDearborn)*

Nas Figuras H1a H8 são mostrados os resultados obtidos com o polímero sintético catiônico (polyfloc CE1163). Para a velocidade de sedimentação de 8,40 cm/min, os resultados de turbidez remanescente obtidos com o gradiente de velocidade escalonado foram melhores que aqueles obtidos com o gradiente de velocidade constante na floculação, principalmente quando a aplicação do polímero foi feita nas terceira e quarta câmaras hipotéticas de floculação (Figura H1). Na Figura H2, percebe-se que a remoção de cor aparente foi praticamente a mesma nas duas condições de floculação. Para esta velocidade, a melhor opção para aplicar o polímero foi no início da terceira câmara hipotética, ou seja, 12 min após o início da floculação.

Para a velocidade de sedimentação de 4,60 cm/min (Figuras H3 e H4), os resultados de turbidez e cor aparente remanescentes foram menores quando a floculação foi realizada com o gradiente de velocidade escalonado na floculação. Os melhores resultados foram obtidos com a aplicação do polímero na segunda câmara, ou seja, 6 min após o início da floculação.

Nas Figuras H5 a H8 são mostrados os resultados para as velocidades de sedimentação de 2,01 e 1,08 cm/min. Observa-se que o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação melhorou a qualidade da água decantada somente quando o polímero foi introduzido nas primeira e segunda câmaras hipotéticas de floculação. Os melhores resultados foram obtidos com a aplicação do polímero na segunda câmara, ou seja, 6 min após o início da floculação.

Em uma análise geral, observou-se que o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação proporcionou uma melhora na qualidade da água decantada, principalmente quando o polímero sintético catiônico foi introduzido após 6 min do início da floculação, ou seja, no início da segunda câmara hipotética de floculação. O gradiente de velocidade neste tempo é  $Gf2 = 25 \text{ s}^{-1}$ . Provavelmente, o tamanho dos flocos resultantes após 6 min de floculação com  $Gf1 = 50 \text{ s}^{-1}$  favoreceu a ação do polímero.

Entretanto, o ensaio da série V, onde o polímero sintético catiônico foi introduzido logo após a mistura rápida, com tempo de agitação de 180 s e gradiente de velocidade de  $100 \text{ s}^{-1}$ , recomendados por DI BERNARDO (1993), resultou os menores valores de turbidez e cor aparente remanescente para todas as velocidades de sedimentação estudadas (Figura 5.5).

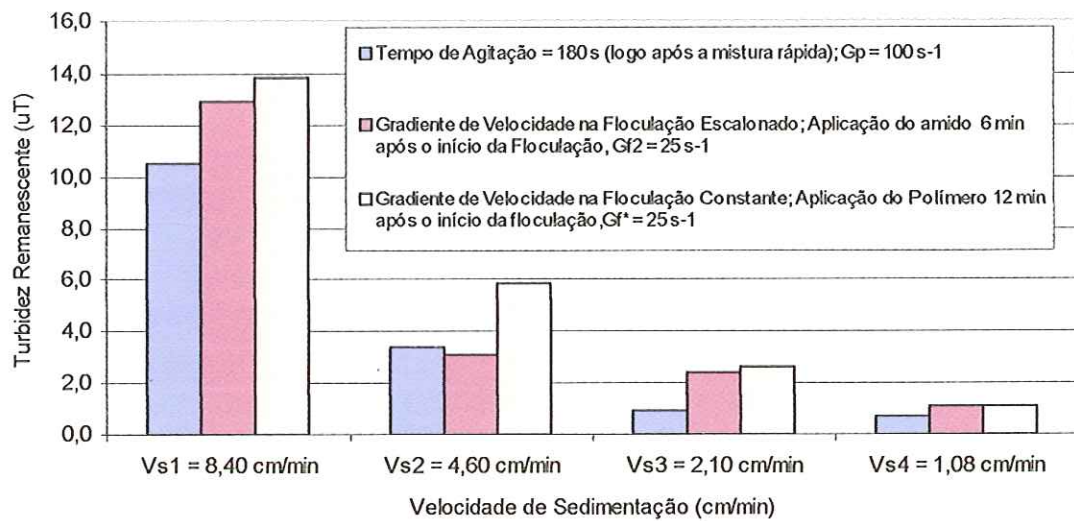


Figura 5.5 - Turbidez Remanescente em função Velocidade de Sedimentação para diferentes condições de Aplicação do Polímero Sintético Catiônico (Polyfloc CE1163) Dosagem Polímero: 0,75 mg/L

#### *Resultados obtidos com o Amido de Milho Catiônico (da Corn Products)*

Nas Figuras H9 a H16 são mostrados os resultados obtidos com o amido de milho catiônico. Para a velocidade de sedimentação de 8,40 cm/min, os resultados de turbidez e cor aparente remanescentes obtidos com o gradiente de velocidade escalonado foram menores que aqueles obtidos com o gradiente de velocidade constante na flocação, principalmente quando a aplicação do amido foi feita nas segunda e terceira câmaras hipotéticas de flocação (Figuras H9 e H10). Para esta velocidade, o melhor tempo de aplicação do amido foi no início da segunda câmara hipotética, ou seja, 6 min após o início da flocação.

Nas Figuras H11 a H12 são mostrados os resultados para a velocidade de sedimentação de 4,60 cm/min. Observa-se que o escalonamento dos gradiente de velocidade na flocação melhorou a qualidade da água decantada somente quando o amido de milho catiônico foi introduzido nas primeira e segunda câmaras hipotéticas de flocação. Os melhores resultados foram obtidos com a aplicação do amido na segunda câmara, ou seja, 6 min após o início da flocação.

Para as velocidades de sedimentação de 2,01 e 1,08 cm/min (Figuras H13 a H16), os resultados de turbidez e cor aparente remanescentes foram menores quando a flocação foi realizada com o gradiente de velocidade escalonado na flocação. Os melhores resultados foram

obtidos com a aplicação do amido na primeira câmara hipotética de floculação, ou seja, logo após a mistura rápida com gradiente de velocidade de  $50 \text{ s}^{-1}$ .

Em uma análise geral, observou-se que o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação proporcionou uma melhora na qualidade da água decantada, principalmente quando o amido de milho catiônico foi introduzido logo após a mistura rápida (velocidades de sedimentação menores que  $2,0 \text{ cm/min}$ ) e após 6 min do início da floculação (velocidades de sedimentação maiores que  $4,6 \text{ cm/min}$ ), ou seja, no início das primeira e segunda câmaras hipotéticas de floculação com gradiente de velocidade igual a  $Gf1 = 50 \text{ s}^{-1}$  e  $Gf2 = 25 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente.

Na Figura 5.6, nota-se que a aplicação deste amido segundo as recomendações de DI BERNARDO (1993), resultou em valores de turbidez e cor aparente remanescentes menores para todas as velocidades de sedimentação estudadas .

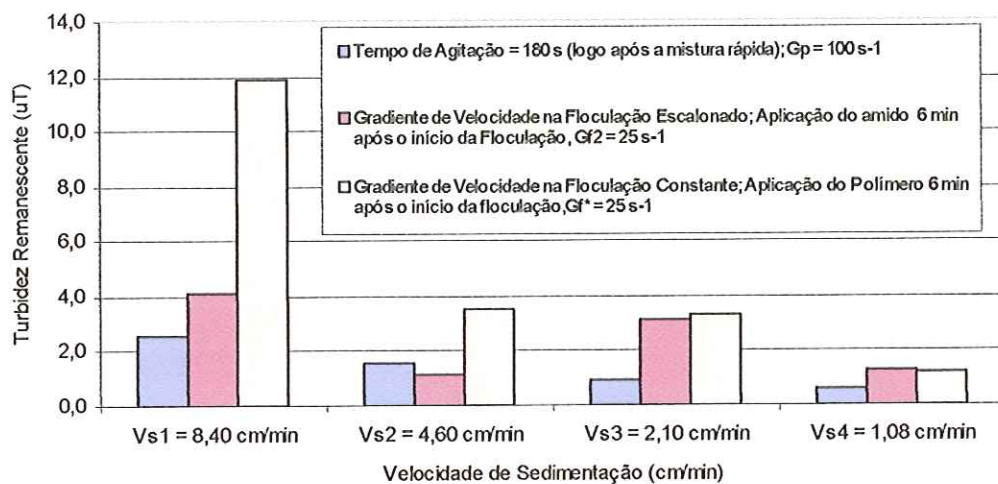


Figura 5.6 - Turbidez Remanescente em função Velocidade de Sedimentação para diferentes condições de Aplicação do Amido de Milho Catiônico  
Dosagem Polímero:  $2,0 \text{ mg/L}$ .

### Resultados obtidos com o Amido de Mandioca Catiônico Waxy

Nas Figuras H17 a H24 são mostrados os resultados obtidos com o amido de mandioca catiônico. Para a velocidade de sedimentação de  $8,40 \text{ cm/min}$ , os resultados de turbidez e cor aparente remanescentes obtidos com o gradiente de velocidade escalonado foram maiores que aqueles obtidos com o gradiente de velocidade constante na floculação, exceto quando a aplicação do amido foi feita na primeira câmara hipotéticas de floculação (Figuras H17 e H18).

Para esta velocidade, o melhor tempo de aplicação do amido foi no início da terceira câmara hipotética, ou seja, 12 min após o início da floculação.

Para as velocidades de sedimentação de 4,60 e 2,01 cm/min (Figuras H19 e H22), percebe-se que a floculação realizada com o gradiente de velocidade constante resultou mais eficiente em termos de remoção e turbidez e cor aparente, se comparada com a floculação com o gradiente de velocidade escalonado, exceto quando o amido foi adicionado após 18 min de floculação (início da quarta câmara). Os melhores resultados foram obtidos com a aplicação do amido de mandioca catiônico nas segunda e terceira câmaras hipotéticas de floculação.

Na Figura H23 são mostrados os resultados de turbidez remanescente para a velocidade de sedimentação de 1,08 cm/min. As condições de floculação não influenciaram nos resultados, sendo que a maior remoção de turbidez foi conseguida com a aplicação do amido 6 min após o início da floculação. Os resultados de cor aparente remanescente (Figura H24) foram melhores com o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação.

Em uma análise geral, observou-se que o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação não proporcionou uma melhora na qualidade da água decantada, sendo os melhores resultados obtidos com a aplicação do amido 6 e 12 min após o início da floculação (segunda e terceira câmaras, respectivamente), com  $Gf^* = 25 \text{ s}^{-1}$  constante.

Na Figura 5.7, nota-se que a aplicação deste amido segundo as recomendações de DI BERNARDO (1993), resultou em valores de turbidez e cor aparente remanescentes maiores para velocidades de sedimentação maiores que 4,60 cm/min.

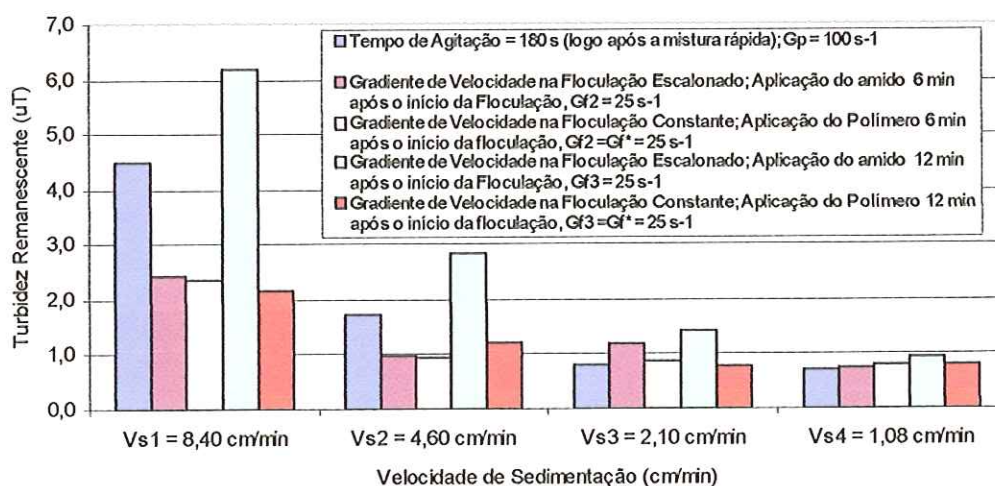


Figura 5.7 - Turbidez Remanescente em função Velocidade de Sedimentação para diferentes condições de Aplicação do Amido de Mandioca Catiônico Waxy  
Dosagem Polímero: 1,0 mg/L

### Anexo I

#### Resultados obtidos com o Gradiente de Velocidade Escalonado na Floculação

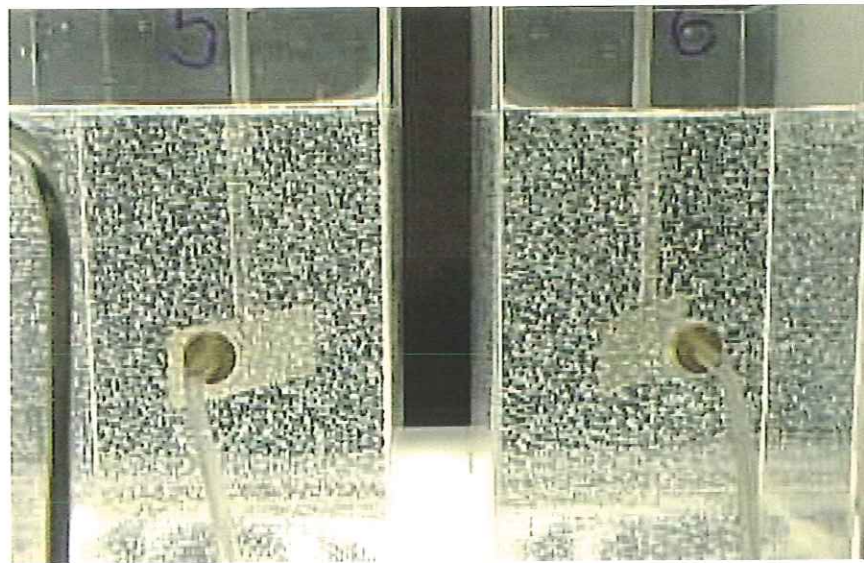
Nas Figuras 11 a 18 são feitas comparações dos polímeros catiônicos estudados, em termos de turbidez e cor aparente remanescentes, quando a floculação foi realizada com o gradiente de velocidade escalonado (Gf: 50, 25, 25 e 25 s-1).

Para todas as velocidades de sedimentação estudadas, o amido de mandioca catiônico waxy foi mais eficiente que os outros dois polímeros na remoção de turbidez e cor aparente. Os resultados obtidos com o amido de milho catiônico foram, no geral, melhores que aqueles obtidos com o polímero sintético catiônico. As razões pelas quais o amido de mandioca catiônico foi mais eficiente deve ser consequência do seu alta massa molecular, pois sabe-se que o mecanismo de ação predominante deste amido foi o de adsorção-formação de pontes.

Nas Figuras 5.8 a 5.11 são mostradas algumas situações no decorrer dos ensaios com os polímeros.



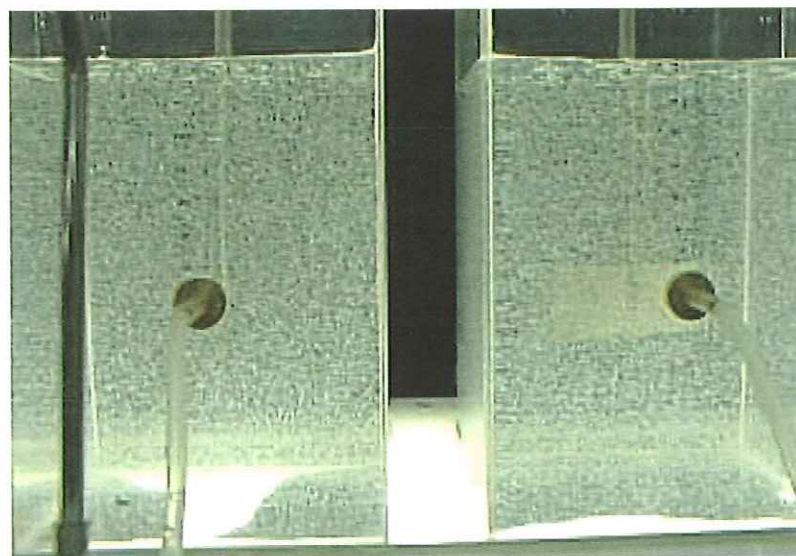
Figura 5.8 - Foto ilustrativa do ensaio com polímeros  
Oito minutos após a introdução dos polímeros no início da terceira  
câmara hipotética de floculação  
Ensaio variando o tempo de aplicação dos polímeros com o gradiente na floculação escalonado  
Jarros 4 e 5: 2,0 mg/L de Amido de Milho Catiônico e 1,0 mg/L de Amido de Mandioca Catiônico



Jarro 5

Jarro 6

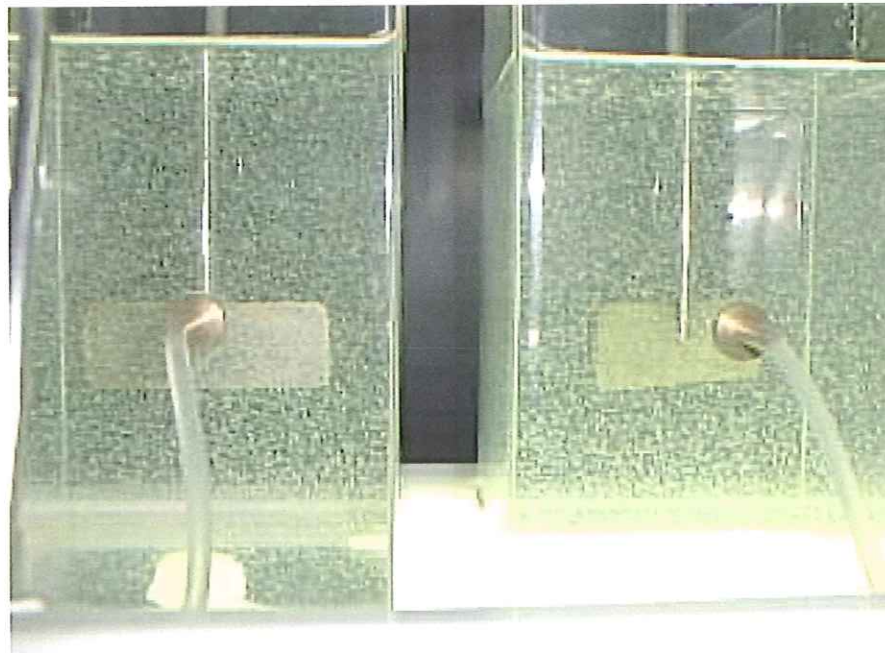
Figura 5.9 – Foto ilustrativa do ensaio com polímeros  
Dois minutos após a introdução do Amido de Mandioca Catiônico no início da Segunda  
câmara hipotética de floculação  
Ensaio de reprodução dos melhores resultados com o gradiente de velocidade escalonado na floculação  
Jarros 5 e 6: 1,0 mg/L de Amido de Mandioca Catiônico



Jarro 3

Jarro 4

Figura 5.10 – Foto ilustrativa do ensaio com polímeros  
Dois minutos após a introdução do Amido de Milho Catiônico no início da Segunda  
câmara hipotética de floculação  
Ensaio de reprodução dos melhores resultados com o gradiente de velocidade escalonado na floculação  
Jarros 3 e 4: 2,0 mg/L de Amido de Milho Catiônico



Jarro 1

Jarro 2

Figura 5.11 – Foto ilustrativa do ensaio com polímeros  
Dois minutos após a introdução do Polímero Sintético Catiônico no início da segunda  
câmara hipotética de floculação  
Ensaio de reprodução dos melhores resultados com o gradiente de velocidade escalonado na floculação  
Jarros 1 e 2: 0,75 mg/L de Polyfloc CE1163

#### *Resultados obtidos com os Gradientes de Velocidade Constantes na Floculação*

Nas Figuras I9 a I16 são feitas comparações dos polímeros catiônicos estudados, em termos de turbidez e cor aparente remanescentes, quando a floculação foi realizada com o gradiente de velocidade ótimo e constante ( $Gf^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ).

Para todas as velocidades de sedimentação estudadas, o amido de mandioca catiônico waxy foi mais eficiente que os outros dois polímeros na remoção de turbidez e cor aparente. Os resultados obtidos com o amido de milho catiônico foram, no geral, melhores que aqueles obtidos com o polímero sintético catiônico.

As razões pelas quais o amido de mandioca catiônico foi mais eficiente deve ser consequência do seu alta massa molecular, pois sabe-se que o mecanismo de ação predominante deste amido foi o de adsorção-formação de pontes.

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base no trabalho realizado e nas referências bibliográficas estudadas, concluiu-se que:

- a) para cada tipo de polímero, existe uma condição ótima de aplicação que depende da qualidade da água bruta, do tipo de polímero, das condições de mistura rápida e floculação, da velocidade de sedimentação, etc.
- b) os resultados obtidos com o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação, sem aplicação de polímero, foram piores que os resultados com o gradiente de velocidade constante, em virtude do tempo de floculação adotado ter sido provavelmente maior que o necessário;
- c) nos ensaios com o polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163, da BetzDearborn) predominou o mecanismo de adsorção-formação de pontes para dosagens menores que 1,0 mg/L, e o de neutralização de cargas para a dosagem de 1,5 mg/L;
- d) nos ensaios com o amido de milho catiônico (da Com Products) predominou o mecanismo de adsorção-formação de pontes para dosagens menores que 2,0 mg/L; para a dosagem de 3,0 mg/L, houve reversão de cargas (potencial zeta positivo), e mecanismo predominante de ação do amido de milho catiônico foi o de neutralização de cargas;
- e) não foi conseguida remoção de turbidez ou cor aparente satisfatória que justificasse o uso do amido de batata como auxiliar de floculação;
- f) nos ensaios com o amido de mandioca catiônico, o mecanismo de ação predominante foi o de adsorção-formação de pontes para todas as dosagens estudadas (0,25 a 3,0 mg/L), e os ótimos resultados reforçam a possibilidade deste amido ter alta massa molecular;
- g) nos ensaios com o polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163, da BetzDearborn), o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação proporcionou uma melhora na qualidade da água decantada, principalmente quando este foi introduzido após 6 min do início da floculação, (no início da segunda câmara hipotética de floculação); provavelmente,



- o tamanho dos flocos resultantes após 6 min de floculação com o gradiente de velocidade de  $50 \text{ s}^{-1}$  favoreceu a ação do polímero;
- h) nos ensaios com o amido de milho catiônico (da Corn Products), o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação proporcionou uma melhora na qualidade da água decantada, principalmente quando o amido foi introduzido logo após a mistura rápida (velocidades de sedimentação menores que  $2,0 \text{ cm/min}$ ) e após 6 min do início da floculação (velocidades de sedimentação maiores que  $4,6 \text{ cm/min}$ ), ou seja, no início das primeira e segunda câmaras hipotética de floculação com gradiente de velocidade igual a  $Gf1 = 50 \text{ s}^{-1}$  e  $Gf2 = 25 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente;
  - i) a condição ótima de aplicação do polímero sintético catiônico e do amido de milho catiônico, para todas as velocidades de sedimentação estudadas, foi a aplicação destes logo após a mistura rápida, com tempo de agitação de  $180 \text{ s}$  e gradiente de velocidade de  $100 \text{ s}^{-1}$ ;
  - j) nos ensaios com o amido de mandioca catiônico waxy, o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação não proporcionou uma melhora na qualidade da água decantada, sendo os melhores resultados obtidos com a aplicação do amido 6 e 12 min após o início da floculação (segunda e terceira câmaras, respectivamente) e gradiente de velocidade constante na floculação ( $Gf^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ); a condição ótima de aplicação do amido de mandioca catiônico waxy variou com a velocidade de sedimentação, sendo que para velocidades menores que  $4,60 \text{ cm/min}$ , sua aplicação logo após a mistura rápida, com tempo de agitação de  $180 \text{ s}$  e gradiente de velocidade de  $100 \text{ s}^{-1}$ , resultou os menores valores de turbidez e cor aparente remanescentes;
  - k) tanto nos ensaios com o gradiente de velocidade escalonado, como nos com o gradiente de velocidade constante na floculação, o amido de mandioca catiônico waxy (dosagem de  $1,0 \text{ mg/L}$ ), foi mais eficiente que os outros dois polímeros na remoção de turbidez e cor aparente, para todas as velocidades de sedimentação estudadas;
  - l) os resultados obtidos com a dosagem de  $2,0 \text{ mg/L}$  do amido de milho catiônico foram, no geral, melhores que aqueles obtidos com a dosagem de  $0,75 \text{ mg/L}$  do polímero sintético catiônico;
  - m) as razões pelas quais o amido de mandioca catiônico foi mais eficiente deve ser consequência do sua alta massa molecular, pois o mecanismo de ação predominante deste amido deve ter sido o de adsorção-formação de pontes;

Finalizando o presente trabalho, são feitas as seguintes recomendações:

- a) a análise detalhada dos resultados dos ensaios de otimização da floculação, antes da conclusão da parte experimental, para escolha do tempo total de floculação que maximiza a remoção de turbidez e cor aparente quando o gradiente de velocidade é escalonado na floculação;
- b) otimização da floculação com polímero; para tal, seria necessário que a otimização da dosagem de polímero fosse realizada em ensaios com as condições de floculação não otimizadas;
- c) não extrapolar os resultados deste trabalho para situações diferentes das aqui apresentadas; outros polímeros, qualidade da água bruta e condições de floculação diferentes, exigem a realização de ensaios para determinação da condição ótima de aplicação do polímero;
- d) a complementação da metodologia proposta por PÁDUA et al (1998) para determinação dos gradientes de velocidade ótimos nas câmaras de floculação, deve ser objeto de estudo, pois observou-se neste trabalho que é possível reduzir o tempo total de floculação a partir do escalonamento do gradiente de velocidade nas câmaras de floculação, e propiciar a mesma eficiência na remoção de cor aparente e turbidez quando a floculação é realizada com o gradiente de velocidade constante e igual ao ótimo ( $Gf^*$ );
- e) em Estações de Tratamento de Água pode-se ter vários conjuntos de floculação em paralelo, cada um contendo várias câmaras de floculação em série; para cada tipo de polímero, e em diferentes épocas do ano (qualidade da água bruta), recomenda-se que seja estudado *in loco* o melhor ponto de aplicação do polímero; vale ressaltar que a aplicação do polímero nas câmaras de floculação pode acarretar problemas operacionais, uma vez que é difícil o controle de dosagem em vários pontos.

# ANEXO A

## CONSTRUÇÃO DOS DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO

---

## SÉRIE I: CONSTRUÇÃO DOS DIAGRAMAS DE COAGULAÇÃO

CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO						
Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Alcalinidade Total (mg / L CaCO <sub>3</sub> )	Potencial Zeta (mV)	pH	Temperatura (°C)
24,0a 28,0	175 a 215	30 a 35	23,0 a 27,0	-18,0 a -16,5	7,35 a 7,55	25± 1 °C

CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DA SÉRIE I			
Mistura Rápida		Floculação	
Tmr = 20 s	Gmr = 1000 s <sup>-1</sup>	Tf = 20 min	Gf = 20 s <sup>-1</sup>

Tabela A1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação

Ensaio 01 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	10,0	-	6,98	-15,3	14,6	96	9,43	71
2	-	12,0	-	6,91	-16,3	25,9	197	24,1	193
3	-	16,0	-	6,72	-10,3	8,45	57	4,74	33
4	-	18,0	-	6,68	-8,4	7,61	51	5,85	38
5	-	20,0	-	6,53	-18,3	5,39	43	3,45	24

Tabela A2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação

Ensaio 02 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	3,0	14,0	-	6,82	-18,3	14,1	98	14,9	108
2	3,0	18,0	-	6,72	-17,8	8,42	60	6,85	48
3	3,0	20,0	-	6,60	-14,9	10,4	71	6,40	44

Tabela A3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação

Ensaio 03 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	6,0	14,0	-	7,21	-19,4	24,1	205	25,3	207
2	6,0	16,0	-	7,17	-19,8	25,3	211	24,8	214
3	6,0	18,0	-	7,12	-19,7	23,8	197	23,8	196
4	6,0	20,0	-	7,07	-19,0	15,2	115	8,72	63
5	6,0	24,0	-	6,79	-18,0	12,1	86	5,60	37

Tabela A4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação

Ensaio 04 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	3,0	24,0	-	6,56	-11,5	3,54	25	2,92	23
2	3,0	26,0	-	6,48	-11,0	7,57	41	3,19	23
3	6,0	22,0	-	6,84	-18,1	6,60	45	6,19	44
4	6,0	26,0	-	6,70	-14,7	11,0	73	2,90	18

Tabela A5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 05 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>;  $T_f = 20$  min;  
 $G_f = 20$  s<sup>-1</sup>,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	$V_{s1} = 4,0$ cm/min		$V_{s2} = 2,0$ cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	26,0	-	6,20	+0,3	4,33	27	3,23	25

Tabela A6 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 06 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>;  $T_f = 20$  min;  
 $G_f = 20$  s<sup>-1</sup>,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	$V_{s1} = 4,0$ cm/min		$V_{s2} = 2,0$ cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	4,5	10,0	-	7,18	-18,1	22,8	207	24,3	209
2	4,5	12,0	-	7,09	-18,8	24,7	209	23,8	215
3	4,5	14,0	-	6,98	-18,4	26,1	208	24,8	205
4	4,5	18,0	-	6,84	-17,7	5,90	45	5,71	44
5	4,5	20,0	-	6,79	-16,9	8,73	63	7,40	55

Tabela A7 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 07 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>;  $T_f = 20$  min;  
 $G_f = 20$  s<sup>-1</sup>,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	$V_{s1} = 4,0$ cm/min		$V_{s2} = 2,0$ cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	8,0	2,0	6,42	-14,2	11,5	79	8,43	65
2	-	10,0	2,0	6,36	-10,4	11,3	73	7,30	49
3	-	12,0	2,0	6,30	-7,6	7,32	52	4,65	38
4	-	14,0	2,0	6,24	-4,2	4,90	34	5,13	35
5	-	16,0	2,0	6,21	-2,6	5,71	32	4,28	35
6	-	18,0	2,0	6,13	-4,6	4,46	35	4,96	40

Tabela A8 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 08 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>;  $T_f = 20$  min;  
 $G_f = 20$  s<sup>-1</sup>,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	$V_{s1} = 4,0$ cm/min		$V_{s2} = 2,0$ cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	8,0	1,0	6,57	-14,0	13,6	97	14,7	95
2	-	10,0	1,0	6,53	-12,9	11,4	78	7,78	57
3	-	12,0	1,0	6,49	-11,7	10,2	65	7,42	55
4	-	14,0	1,0	6,37	-7,8	6,71	46	5,05	38
5	-	16,0	1,0	6,34	-5,9	5,08	42	4,22	32
6	-	18,0	1,0	6,31	-3,7	6,08	45	4,38	35

Tabela A9 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 09 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>;  $T_f = 20$  min;  
 $G_f = 20$  s<sup>-1</sup>,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	$V_{s1} = 4,0$ cm/min		$V_{s2} = 2,0$ cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	20,0	0,5	6,27	-3,1	5,13	35	4,36	30
2	-	24,0	0,5	6,19	+1,6	6,35	48	4,96	31
3	-	22,0	1,0	6,14	+0,3	4,72	36	4,66	30
4	-	24,0	1,0	6,10	+1,7	6,15	44	5,00	38

Tabela A10 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 10 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	10,0	0,5	6,65	-13,9	6,65	58	7,08	61
2	-	12,0	0,5	6,59	-14,1	5,14	32	4,05	31
3	-	14,0	0,5	6,51	-11,5	4,24	29	4,80	34

Tabela A11 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 11 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	1,5	22,0	-	6,44	-8,6	3,85	27	3,66	26
2	1,5	26,0	-	6,35	-6,6	6,96	47	3,91	24
3	-	28,0	-	6,12	+1,7	5,81	38	3,82	26
4	1,5	28,0	-	6,28	-3,1	4,46	32	3,28	23
5	3,0	28,0	-	6,36	-9,5	3,93	27	2,27	15

Tabela A12 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 12 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	12,0	3,0	6,17	-4,0	7,79	57	8,08	56
2	-	14,0	3,0	6,11	+0,7	7,30	56	6,71	50
3	-	16,0	3,0	6,02	+12,0	14,3	102	11,8	86
4	-	18,0	3,0	5,99	+15,1	24,0	200	23,3	169
5	-	20,0	3,0	5,87	+16,3	24,3	203	24,2	202
6	-	22,0	3,0	5,81	+18,1	25,0	207	24,3	205

Tabela A13 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 13 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	13,0	0,3	6,60	-13,6	6,60	48	4,25	44
2	-	13,0	0,6	6,54	-12,9	6,28	42	4,66	37
3	-	15,0	0,6	6,47	-11,4	6,02	39	5,56	40
4	-	17,0	0,3	6,50	-8,8	3,69	26	3,64	29

Tabela A14 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 14 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	4,5	28,0	-	6,42	-	5,34	37	2,85	22
2	5,0	22,0	-	6,69	+0,6	4,29	31	5,31	36
3	5,0	24,0	-	6,62	-14,1	4,38	32	3,14	27

Tabela A15 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 15 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	5,0	28,0	-	6,62	-11,3	7,11	53	3,20	23
2	-	18,0	0,2	6,55	-9,5	3,30	22	3,10	22
3	-	14,0	0,1	6,69	-14,0	12,7	81	6,21	40
4	-	12,0	0,1	6,78	-14,4	6,06	43	5,83	44

Tabela A16 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 16 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	17,0	0,6	6,44	-5,4	8,05	54	3,06	24
2	-	14,0	-	6,59	-12,2	8,76	63	8,40	58
3	-	16,0	-	6,56	-10,3	8,08	57	6,53	46

Tabela A17 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 17 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	4,5	26,0	-	6,62	-11,3	7,21	48	3,24	23
2	-	20,0	0,5	6,40	-6,0	5,12	35	3,84	30
3	-	14,0	-	6,77	-13,2	9,31	65	6,53	44

Tabela A18 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 18 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	18,0	0,8	6,45	-5,9	4,02	24	3,64	21
2	-	16,0	0,8	6,66	-9,5	5,57	36	4,17	25
3	3,0	22,0	-	6,73	-11,3	5,53	36	3,54	24

Tabela A19 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação  
Ensaio 19 para construção dos diagramas de coagulação: Tmr = 20 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	20,0	2,0	6,23	-	6,54	75	6,00	70
2	-	22,0	0,8	6,38	-4,0	9,68	59	3,46	24
3	-	18,0	2,0	6,38	+0,1	5,90	41	3,20	22
4	-	16,0	2,0	6,40	-3,5	4,65	36	3,41	22
5	1,5	22,0	-	6,63	-14,1	4,34	30	4,34	26
6	1,5	24,0	-	6,56	-	3,21	23	2,50	19

Tabela A20 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação

Ensaio 20 para construção dos diagramas de coagulação:  $T_{mr} = 20$  s;  $G_{mr} = 1000$  s<sup>-1</sup>;  $T_f = 20$  min;  
 $G_f = 20$  s<sup>-1</sup>,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min;  $V_{s2} = 2,0$  cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS			pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	$V_{s1} = 4,0$ cm/min		$V_{s2} = 2,0$ cm/min	
	Hidróxido de Sódio (mL)	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Ácido Clorídrico (mL)			Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	-	17,0	0,6	6,59	-7,6	6,49	43	3,50	24
2	-	24,0	-	6,45	-3,2	4,99	34	3,17	22
3	1,5	22,0	-	6,29	+5,3	5,64	41	5,56	39
4	1,0	24,0	-	6,30	+3,2	6,34	51	3,31	26



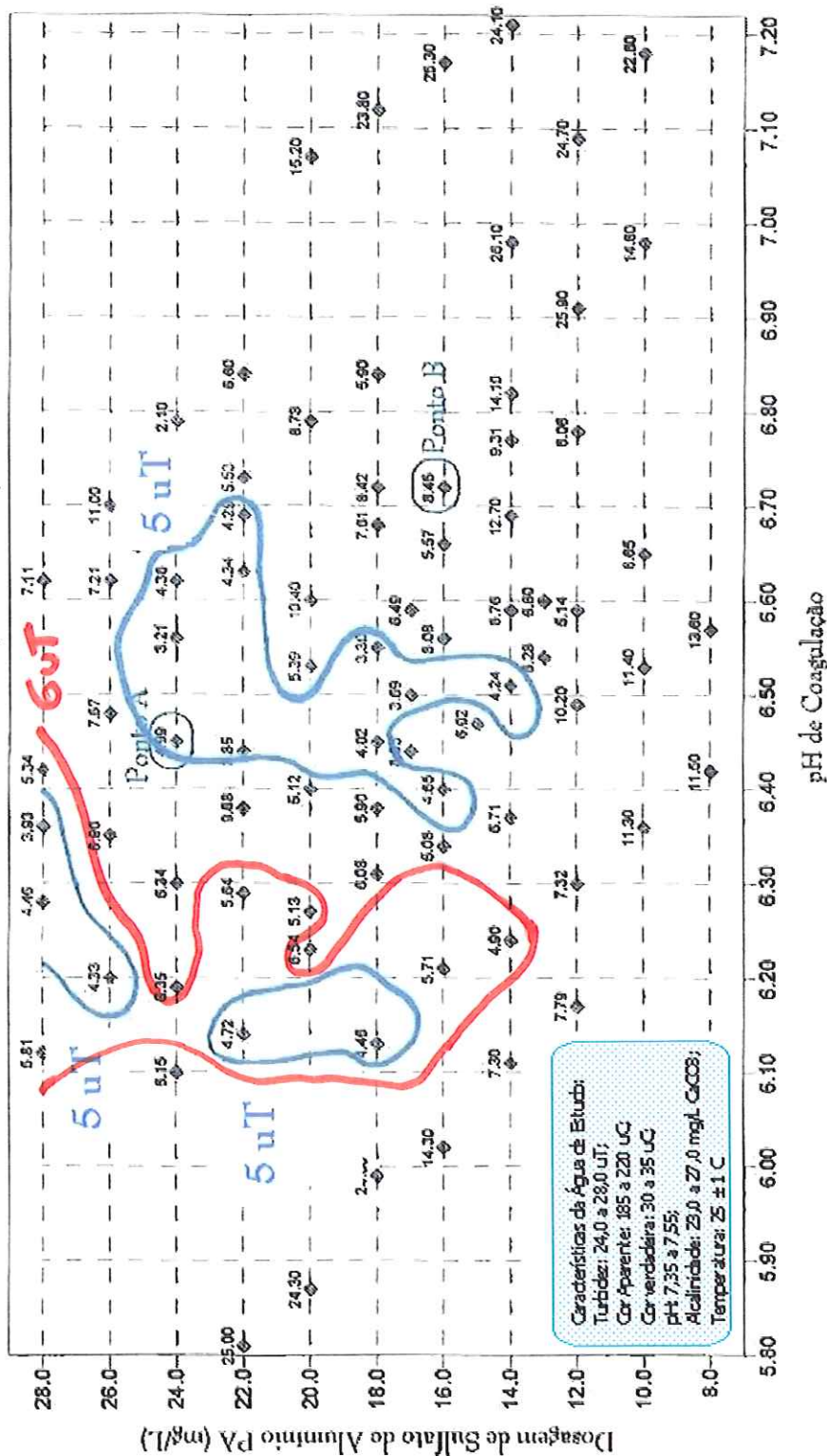


Figura A1 – CURVAS DE TURBIDEZ REMANESCENTE EM FUNÇ Ã O DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍ NIO E DO pH DE COAGULAÇ Ã O

Velocidade de Sedimentação = 4,0 cm/min

(T<sub>mr</sub> = 20 s; G<sub>mr</sub> = 1000 s<sup>-1</sup>; T<sub>f</sub> = 20 min; G<sub>f</sub> = 20 s<sup>-1</sup>)

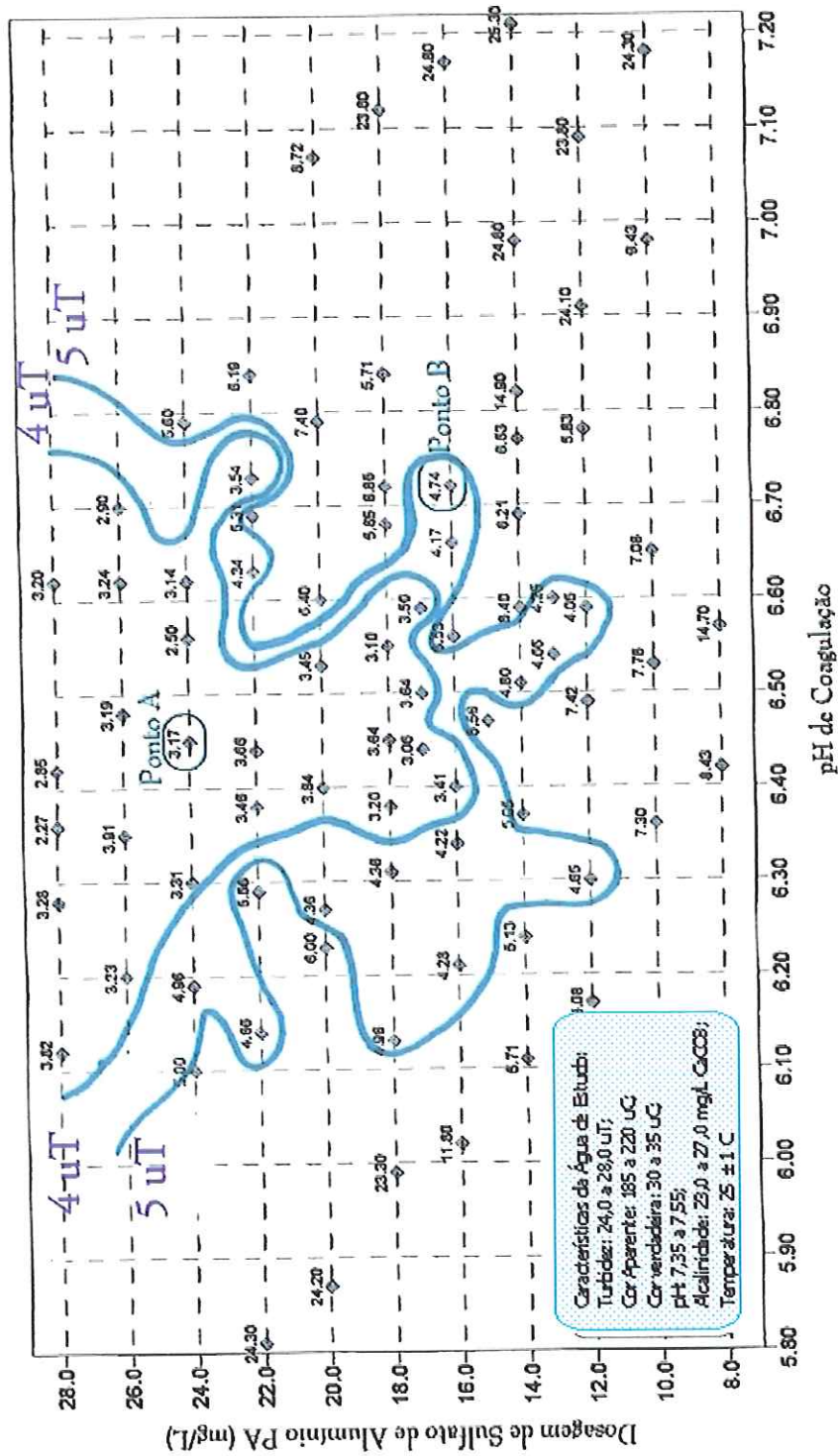


Figura A.2 – CURVAS DE TURBIDEZ REMANESCENTE EM FUNÇ. À O DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO E DO pH DE COAGULAÇÃO  
 Velocidade de Sedimentação = 2,0 cm/min  
 (T<sub>mr</sub> = 20 s; G<sub>mr</sub> = 1000 s<sup>-1</sup>; T<sub>f</sub> = 20 min; G<sub>f</sub> = 20 s<sup>-1</sup>)

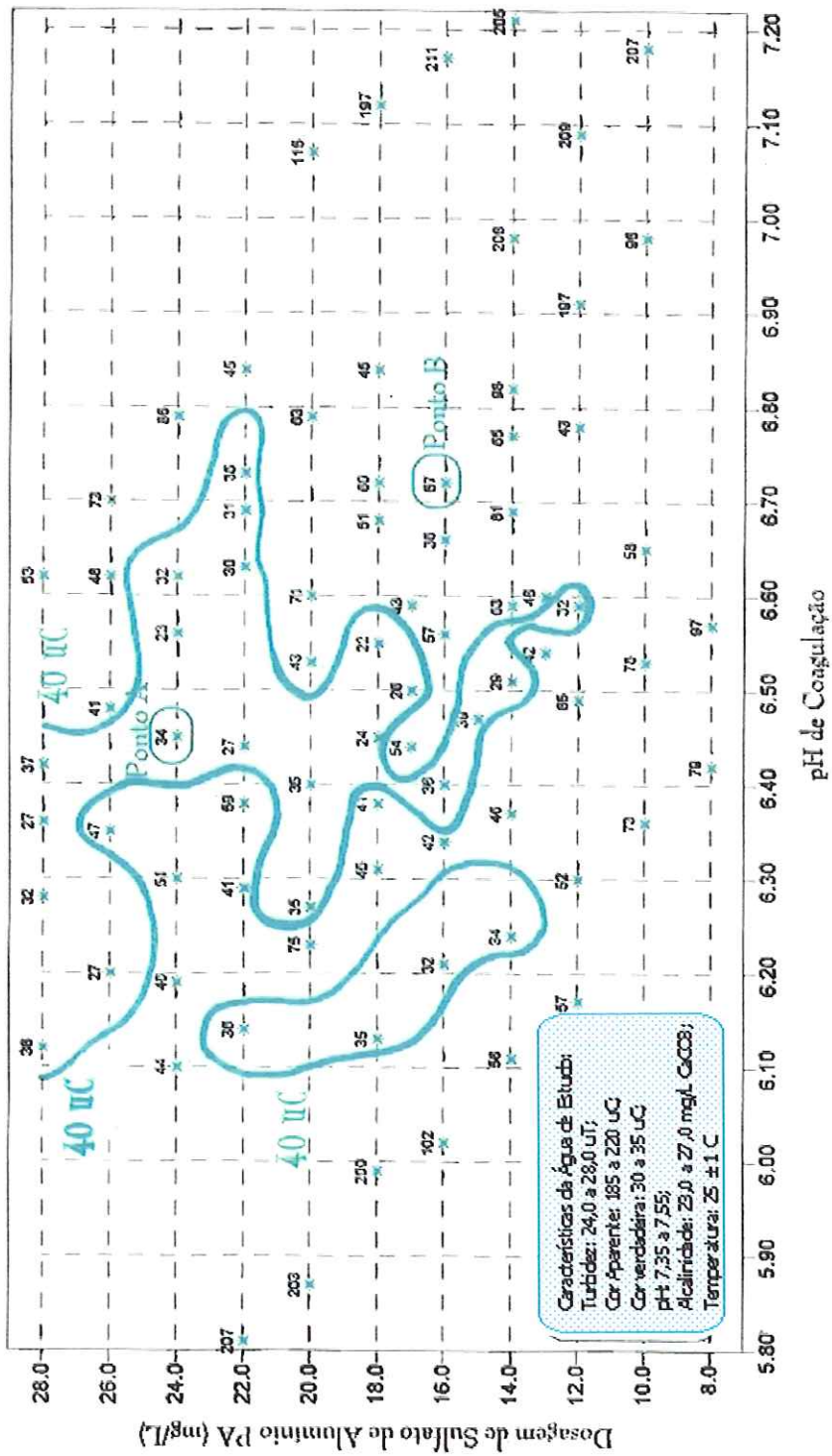


Figura A3 – CURVAS DE COR APARENTE REMANESCENTE EM FUNÇÃO DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO E DO pH DE COAGULAÇÃO  
 Velocidade de Sedimentação = 4,0 cm/min  
 (T<sub>mr</sub> = 20 s; G<sub>mr</sub> = 1000 s<sup>-1</sup>; T<sub>f</sub> = 20 min; G<sub>f</sub> = 20 s<sup>-1</sup>)

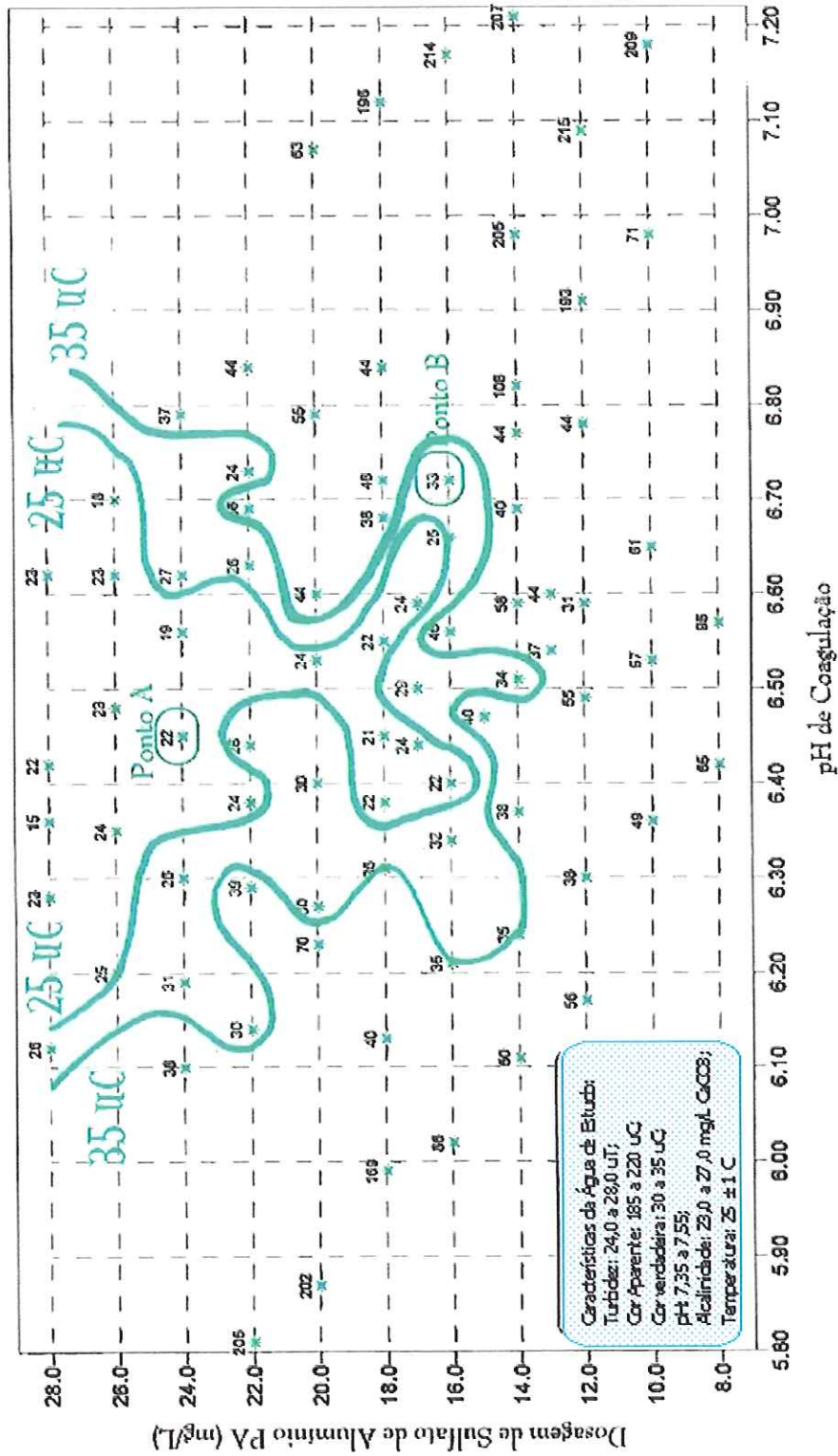


Figura A.4 – CURVAS DE COR APARENTE REMANESCENTE EM FUNÇ Ã O DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍ NIO E DO pH DE COAGULAÇ Ã O  
 Velocidade de Sedimentação = 2,0 cm/min  
 (T<sub>mr</sub> = 20 s; G<sub>mr</sub> = 1000 s<sup>-1</sup>; T<sub>f</sub> = 20 min; G<sub>f</sub> = 20 s<sup>-1</sup>)

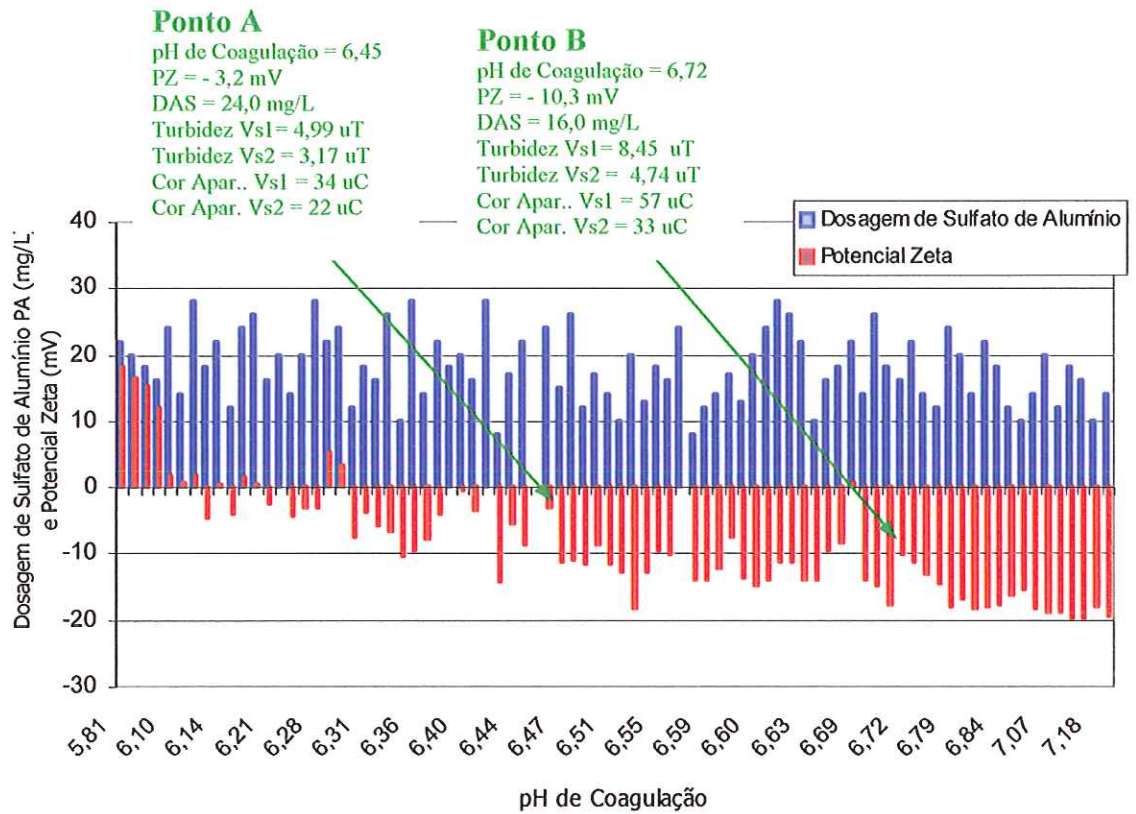


Figura A5 – DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO EM FUNÇÃO DO pH DE COAGULAÇÃO E A VARIAÇÃO DO POTENCIAL ZETA  
 (T<sub>mr</sub> = 20 s; G<sub>mr</sub> = 1000 s<sup>-1</sup>; T<sub>f</sub> = 20 min; G<sub>f</sub> = 20 s<sup>-1</sup>, V<sub>s1</sub> = 4,0 cm/min; V<sub>s2</sub> = 2,0 cm/min)

# ANEXO B

## OTIMIZAÇÃO DA MISTURA RÁPIDA

---

## SÉRIE II: OTIMIZAÇÃO DA MISTURA RÁPIDA

CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO						
Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Alcalinidade Total (mg / L CaCO <sub>3</sub> )	Potencial Zeta (mV)	pH	Temperatura (°C)
24,0 a 28,0	175 a 215	30 a 35	23,0 a 27,0	-18,0 a -16,5	7,35 a 7,55	25 ± 1 °C

CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DA SÉRIE II			
Tmr variável	Mistura Rápida Gmr variável	Tf = 20 min	Floculação Gf = 20 s <sup>-1</sup>

Tabela B1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida  
Ensaio 01 para otimização da mistura rápida : Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 600 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Mistura Rápida (s)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	24,0	-	60	6,30	-	3,60	29	3,28	26
2	24,0	-	40	6,37	-	4,35	31	2,22	18
3	24,0	-	20	6,40	-	3,59	28	2,81	19
4	24,0	-	15	6,41	-	6,09	42	1,93	16
5	24,0	-	10	6,38	-	3,84	30	2,62	17
6	24,0	-	5	6,42	-	3,07	23	1,73	15

Tabela B2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida  
Ensaio 02 para otimização da mistura rápida : Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 400 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Mistura Rápida (s)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	24,0	-	60	6,42	-	5,05	31	3,86	27
2	24,0	-	40	6,41	-	4,55	30	2,15	17
3	24,0	-	20	6,42	-	4,18	27	4,25	25
4	24,0	-	15	6,41	-	3,44	28	2,80	21
5	24,0	-	10	6,41	-1,0	6,49	45	2,51	22
6	24,0	-	5	6,40	-	3,37	27	3,68	26

Tabela B3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida  
Ensaio 03 para otimização da mistura rápida : Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Mistura Rápida (s)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	24,0	-	60	6,40	-	5,00	34	1,60	16
2	24,0	-	40	6,41	-	3,67	24	1,35	13
3	24,0	-	20	6,38	-	3,63	31	2,46	21
4	24,0	-	15	6,36	-	6,46	50	1,75	14
5	24,0	-	10	6,34	+0,2	3,31	26	1,35	12
6	24,0	-	5	6,38	+0,2	6,20	44	4,44	27

Tabela B4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida  
Ensaio 04 para otimização da mistura rápida : Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 1200 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Mistura Rápida (s)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	24,0	-	60	6,41	-	8,10	65	6,78	56
2	24,0	-	40	6,42	-	5,31	34	3,00	20
3	24,0	-	20	6,41	-	5,80	40	4,27	31
4	24,0	-	15	6,41	-	3,76	29	3,52	25
5	24,0	-	10	6,41	+0,5	6,34	43	4,73	31
6	24,0	-	5	6,38	-	4,19	32	3,90	32

Tabela B5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida  
Ensaio 05 para otimização da mistura rápida : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Mistura Rápida (s)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	60	6,88	-	19,3	125	11,8	82
2	16,0	-	40	6,85	-	8,46	61	8,20	60
3	16,0	-	20	6,88	-	5,00	34	4,54	31
4	16,0	-	15	6,83	-10,7	5,12	35	3,62	27
5	16,0	-	10	6,81	-11,2	5,35	37	2,28	20
6	16,0	-	5	6,80	-	5,34	38	2,55	21

Tabela B6 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida  
Ensaio 06 para otimização da mistura rápida : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 1200 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Mistura Rápida (s)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	60	6,78	-	14,8	90	14,3	91
2	16,0	-	40	6,81	-11,1	12,1	81	11,1	73
3	16,0	-	20	6,82	-9,9	6,11	43	4,50	31
4	16,0	-	15	6,88	-10,6	5,10	36	5,65	39
5	16,0	-	10	6,85	-9,9	7,23	56	3,80	31
6	16,0	-	5	6,78	-9,2	5,12	37	2,53	20

Tabela B7 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de mistura rápida  
Ensaio 07 para otimização da mistura rápida : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr variável; Gmr = 800 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min;  
Gf = 20 s<sup>1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Mistura Rápida (s)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	60	6,81	-9,6	18,7	112	12,8	88
2	16,0	-	40	6,82	-11,3	9,13	58	4,92	39
3	16,0	-	20	6,81	-	-	-	5,01	34
4	16,0	-	15	6,80	-	4,21	32	3,25	25
5	16,0	-	10	6,81	-11,3	6,55	45	2,75	22
6	16,0	-	5	6,81	-10,0	4,76	37	3,58	26



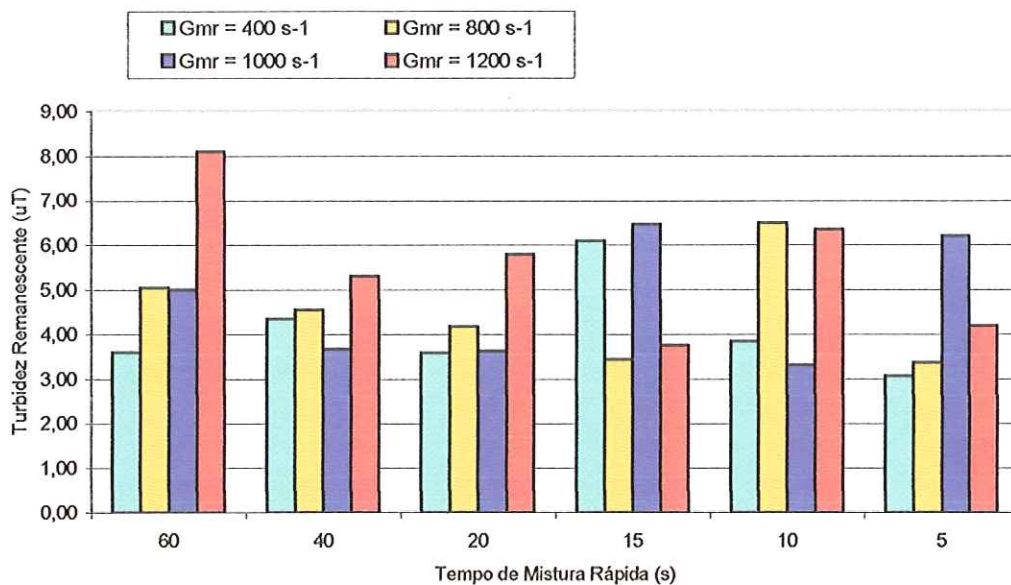


Figura B1 – Turbidez remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida  
(Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; T<sub>mr</sub> e G<sub>mr</sub> variáveis; T<sub>f</sub> = 20 min; G<sub>f</sub> = 20 s<sup>-1</sup>, V<sub>s1</sub> = 4,0 cm/min)

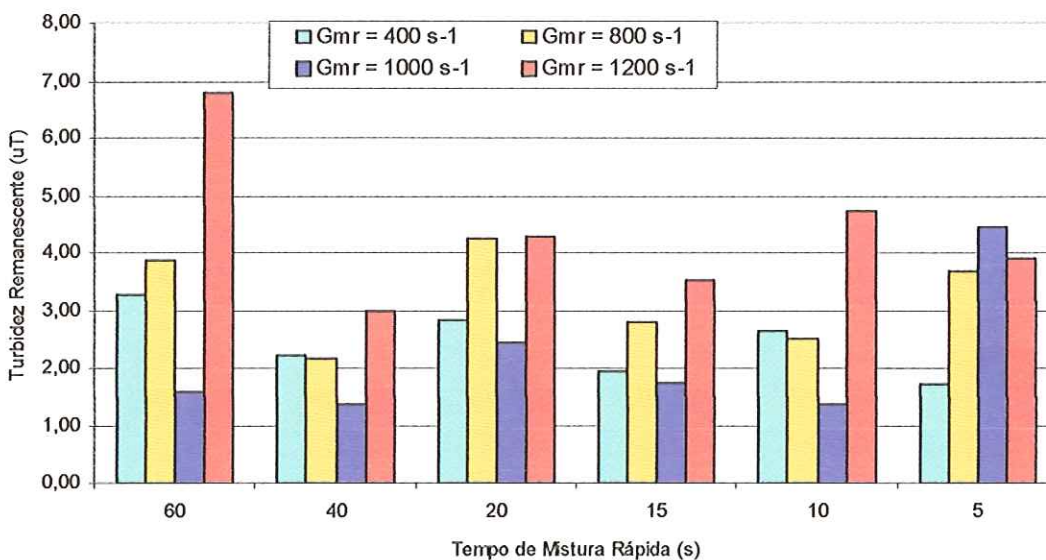


Figura B2 – Turbidez remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida  
(Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; T<sub>mr</sub> e G<sub>mr</sub> variáveis; T<sub>f</sub> = 20 min; G<sub>f</sub> = 20 s<sup>-1</sup>, V<sub>s2</sub> = 2,0 cm/min)

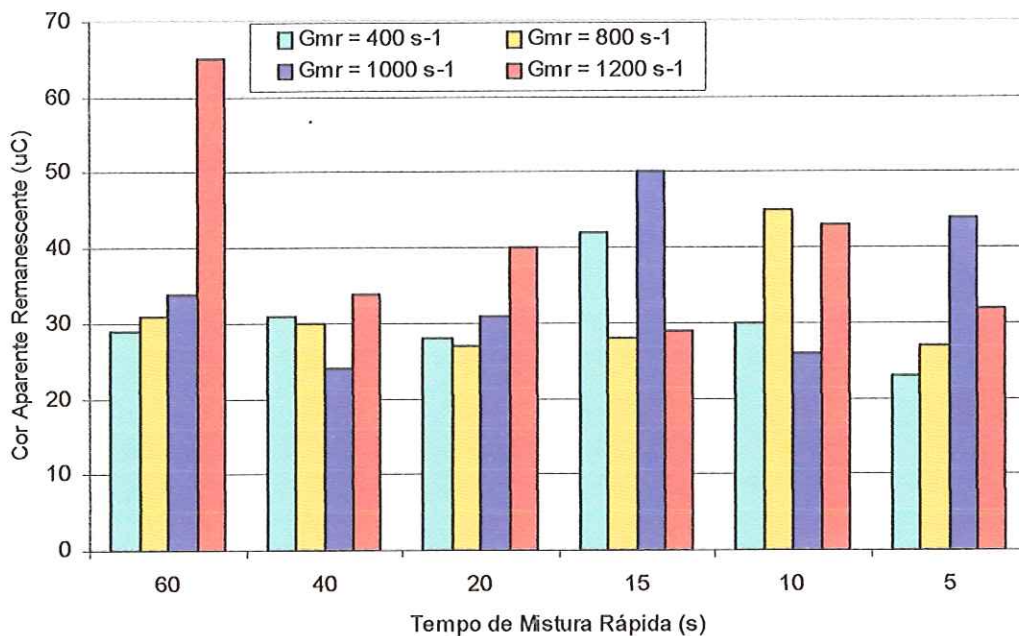


Figura B3 – Cor aparente remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida  
(Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr e Gmr variáveis; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min)

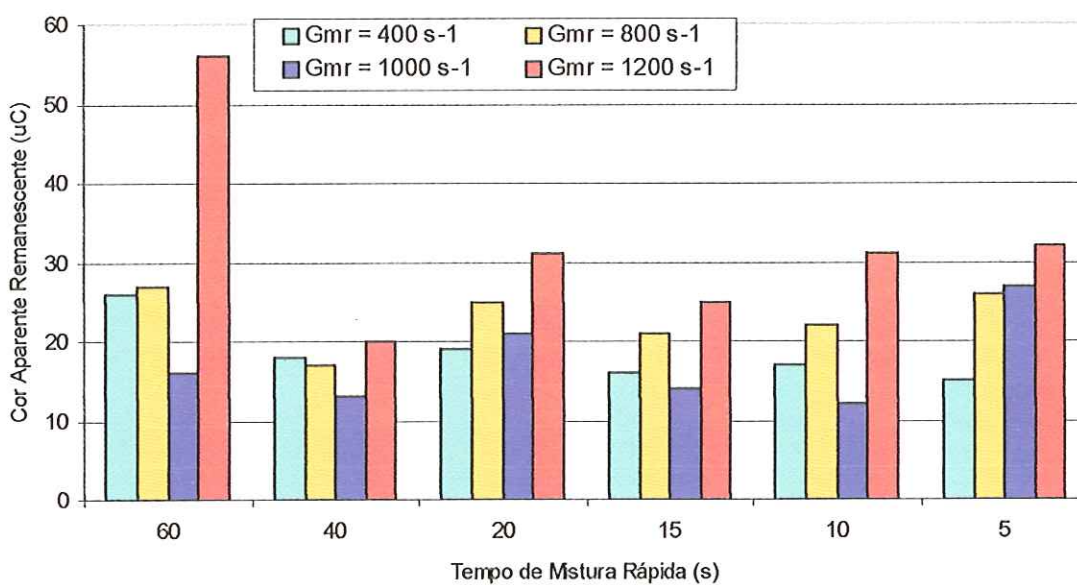


Figura B4– Cor aparente remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida  
(Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr e Gmr variáveis; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>, Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min)

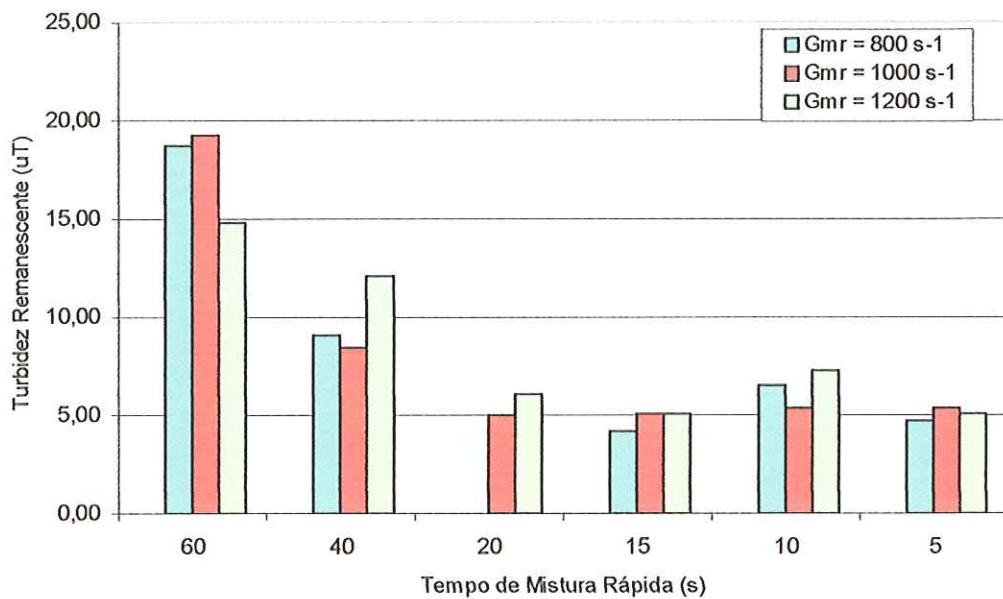


Figura B5 – Turbidez remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; T<sub>mr</sub> e G<sub>mr</sub> variáveis; T<sub>f</sub> = 20 min; G<sub>f</sub> = 20 s<sup>-1</sup>, V<sub>s1</sub> = 4,0 cm/min)

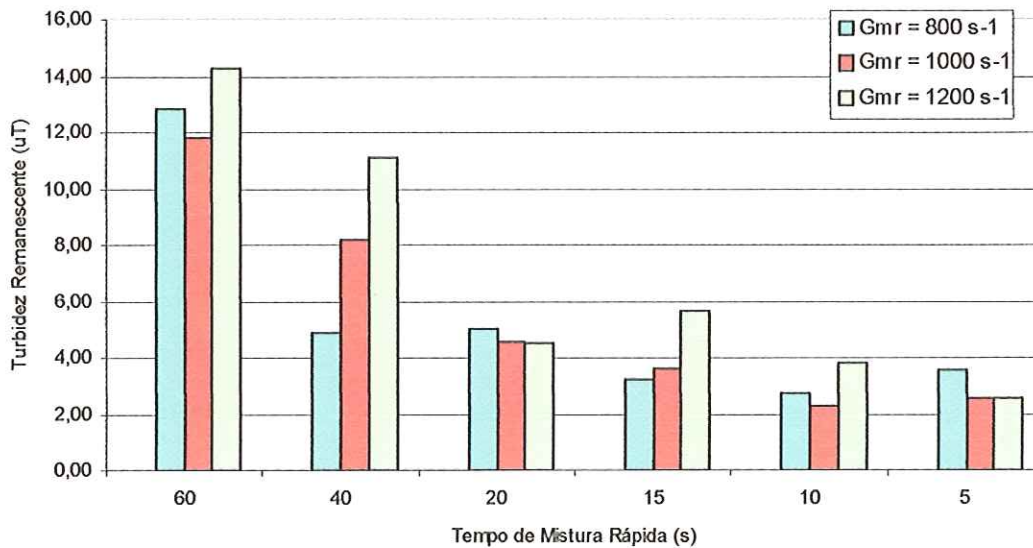


Figura B6 – Turbidez remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; T<sub>mr</sub> e G<sub>mr</sub> variáveis; T<sub>f</sub> = 20 min; G<sub>f</sub> = 20 s<sup>-1</sup>, V<sub>s2</sub> = 2,0 cm/min)

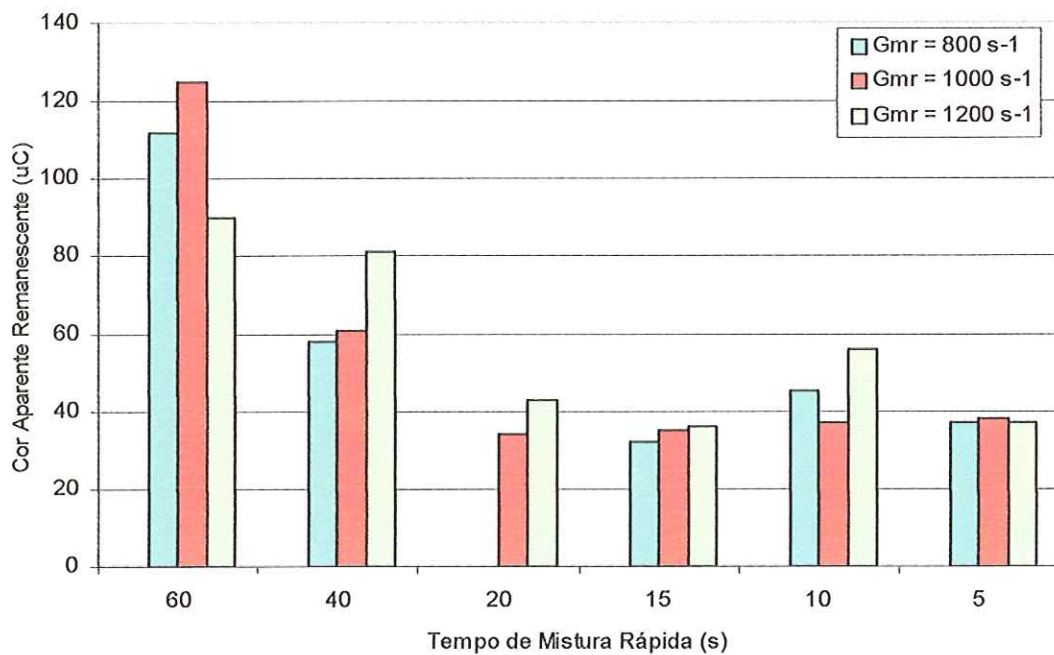


Figura B7 – Cor aparente remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr}$  e  $G_{mr}$  variáveis;  $T_f = 20$  min;  $G_f = 20$  s<sup>1</sup>,  $V_{s1} = 4,0$  cm/min)

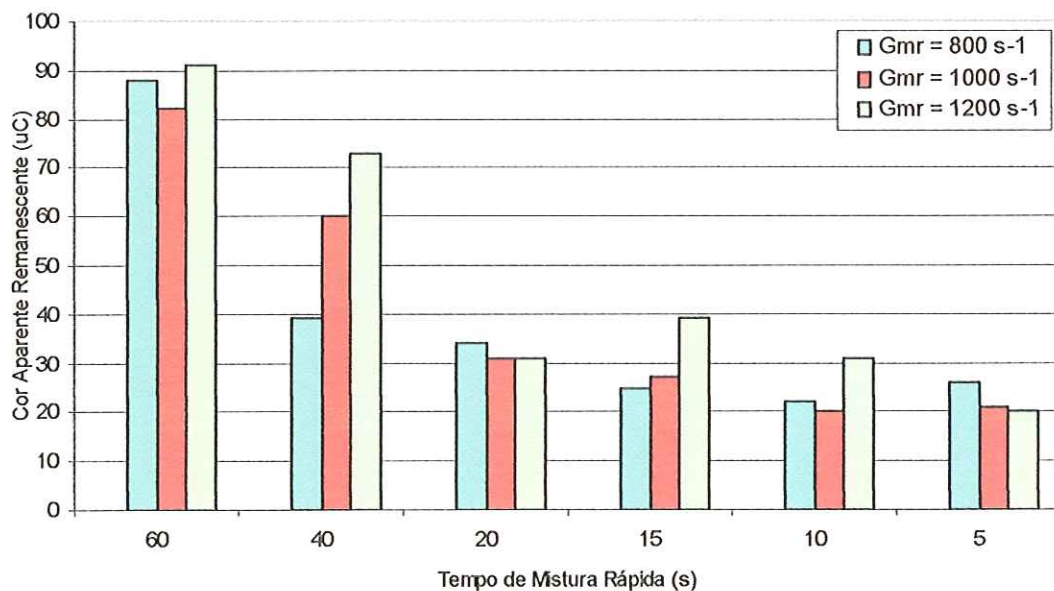


Figura B8 – Cor aparente remanescente em função do tempo de mistura rápida para diferentes gradientes de velocidade na mistura rápida  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr}$  e  $G_{mr}$  variáveis;  $T_f = 20$  min;  $G_f = 20$  s<sup>1</sup>,  $V_{s2} = 2,0$  cm/min)

# ANEXO C

## OTIMIZAÇÃO DA FLOCULAÇÃO PONTO B

---

## SÉRIE III: OTIMIZAÇÃO DA FLOCULAÇÃO

CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO						
Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Alcalinidade Total (mg / L CaCO <sub>3</sub> )	Potencial Zeta (mV)	pH	Temperatura (°C)
24,0 a 28,0	175 a 215	30 a 35	23,0 a 27,0	-18,0 a -16,5	7,35 a 7,55	25± 1 °C

CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DA SÉRIE III			
Tmr = 10 s	Mistura Rápida Gmr = 1000 s <sup>-1</sup>	Tf variável	Floculação Gf variável

Tabela C1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 01 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 20 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	12	6,75	-	12,0	68	7,72	55
2	16,0	-	14	6,72	-8,8	7,96	52	3,81	28
3	16,0	-	16	6,77	-	9,59	64	4,07	28
4	16,0	-	18	6,75	-8,6	6,78	43	3,15	22
5	16,0	-	20	6,71	-	7,43	49	2,39	19
6	16,0	-	22	6,77	-9,1	4,91	29	2,47	18

Tabela C2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 02 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 20 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	24	6,75	-	4,18	31	2,57	18
2	16,0	-	26	6,75	-10,5	3,83	25	3,04	21
3	16,0	-	28	6,76	-	3,45	25	2,28	20
4	16,0	-	32	6,71	-	4,67	32	3,10	22

Tabela C3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 03 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	6	6,81	-8,1	21,7	130	20,3	125
2	16,0	-	10	-	-	14,8	95	9,02	60
3	16,0	-	14	-	-	6,80	48	4,47	31
4	16,0	-	16	-	-	6,82	38	4,16	27
5	16,0	-	18	-	-	7,63	49	2,52	18
6	16,0	-	20	-	-	7,79	44	3,74	23

Tabela C4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 04 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	22	6,76	-10,2	6,53	30	2,43	20
2	16,0	-	24	-	-	7,01	43	2,42	18
3	16,0	-	26	-	-	7,47	49	2,37	20

Tabela C5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 05 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 30 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	6	7,88	-11,0	20,5	125	14,1	93
2	16,0	-	8	-	-	15,9	95	10,2	66
3	16,0	-	10	-	-	12,3	78	7,08	41
4	16,0	-	12	-	-	11,6	70	6,46	39
5	16,0	-	14	-	-	8,43	52	3,42	21
6	16,0	-	16	-	-	9,62	60	5,69	37

Tabela C6 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 06 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 30 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	18	7,79	-11,1	9,12	51	5,35	33
2	16,0	-	20	-	-	10,5	62	6,33	42
3	16,0	-	24	-	-	12,2	84	5,17	33
4	16,0	-	28	-	-	10,3	60	6,35	42
5	16,0	-	32	-	-	11,1	62	7,04	47

Tabela C7 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 07 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 35 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	6	6,75	-9,3	20,6	125	15,3	96
2	16,0	-	8	6,78	-9,7	16,3	95	10,5	58
3	16,0	-	10	6,77	-9,6	12,1	80	8,40	47
4	16,0	-	12	6,79	-9,1	11,4	62	7,61	41
5	16,0	-	14	6,80	-8,1	12,7	72	5,46	29
6	16,0	-	16	6,80	-9,6	10,0	53	7,44	43

Tabela C8 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 08 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 40 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	6	6,82	-8,4	20,1	121	15,1	86
2	16,0	-	8	6,94	-	16,7	98	11,8	62
3	16,0	-	10	6,80	-9,8	13,2	82	8,29	59
4	16,0	-	12	6,90	-10,0	13,8	90	7,54	51
5	16,0	-	16	6,87	-12,0	11,4	68	8,11	47
6	16,0	-	20	6,87	-9,6	16,9	96	5,89	37

Tabela C9 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 09 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 40 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	24	6,87	-9,6	12,2	71	9,79	54
2	16,0	-	28	6,86	-10,8	12,8	72	4,40	28

Tabela C10 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 10 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 50 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	4	6,84	-10,0	23,2	139	22,8	130
2	16,0	-	6	6,84	-11,1	18,1	113	13,0	86
3	16,0	-	8	6,82	-9,6	15,8	93	10,5	60
4	16,0	-	10	6,82	-9,5	16,4	98	9,09	57
5	16,0	-	12	6,84	-10,2	15,6	93	10,0	58
6	16,0	-	14	6,85	-8,9	19,2	111	9,60	59

Tabela C11 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes para diferentes condições de floculação  
Ensaio 11 para otimização da floculação : Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>;  
Tf variável; Gf = 60 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		Tempo de Floculação (min)	pH de Coagulação	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 4,0 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 2,0 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros				Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apa. (uC)
1	16,0	-	6	6,78	-9,8	21,8	124	17,0	105
2	16,0	-	8	6,81	-10,2	22,8	124	16,5	93



Parte 1 – DETERMINAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE FLOCULAÇÃO

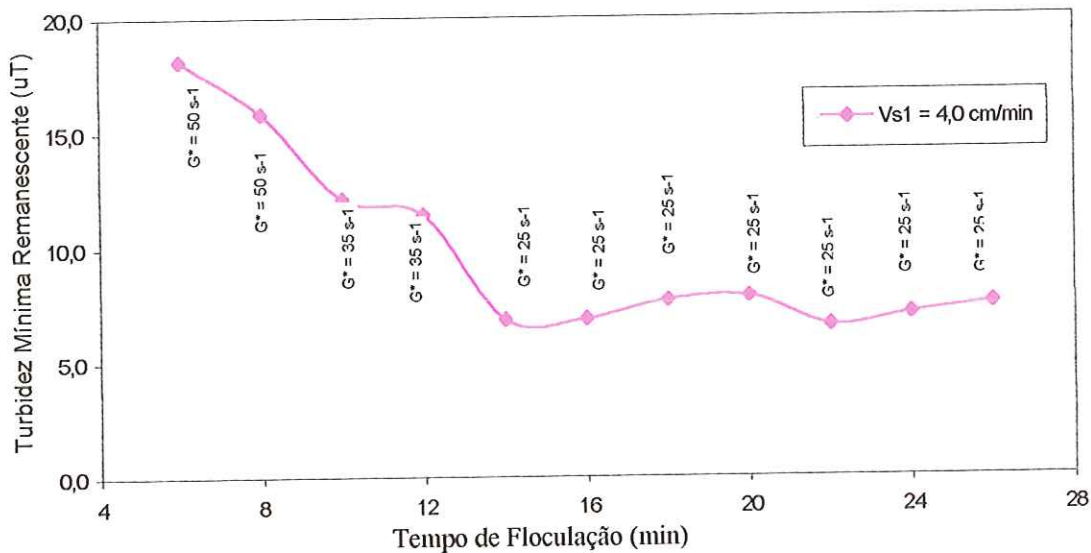


Figura C1 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; T<sub>mr</sub> = 10 s; G<sub>mr</sub> = 1000 s<sup>-1</sup>; T<sub>f</sub> e G<sub>f</sub> variáveis; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min)

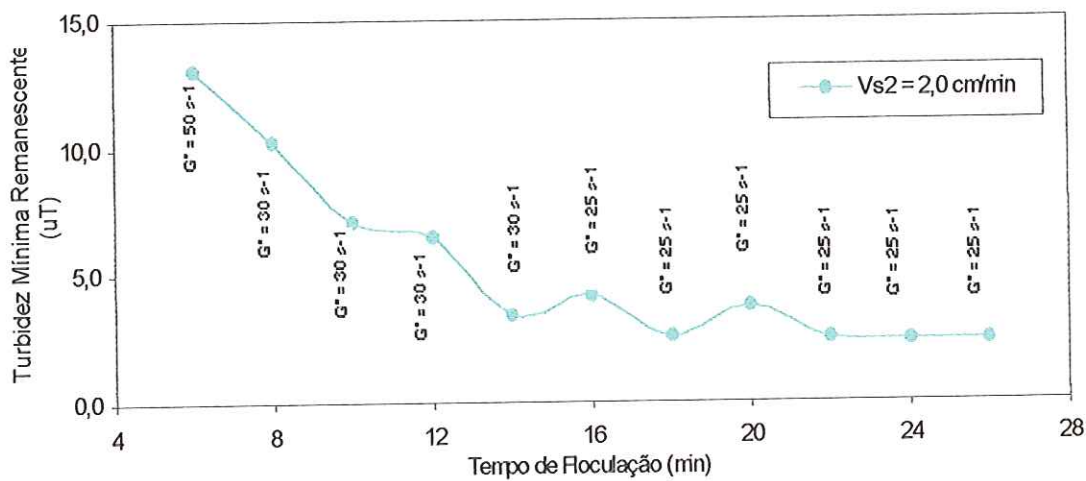


Figura C2 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; T<sub>mr</sub> = 10 s; G<sub>mr</sub> = 1000 s<sup>-1</sup>; T<sub>f</sub> e G<sub>f</sub> variáveis; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min)

## Parte 2 – DETERMINAÇÃO DOS GRADIENTES DE VELOCIDADE NAS QUATRO CÂMARAS DE FLOCULAÇÃO

a) Velocidade de Sedimentação = 4,0 cm/min

Parâmetro de Controle: Turbidez Remanescente

Número de câmaras em série (n) = 4

Tempo de Floculação em cada câmara (Td) = 6 min

a1) GRADIENTE DE VELOCIDADE NA PRIMEIRA CÂMARA DE FLOCULAÇÃO

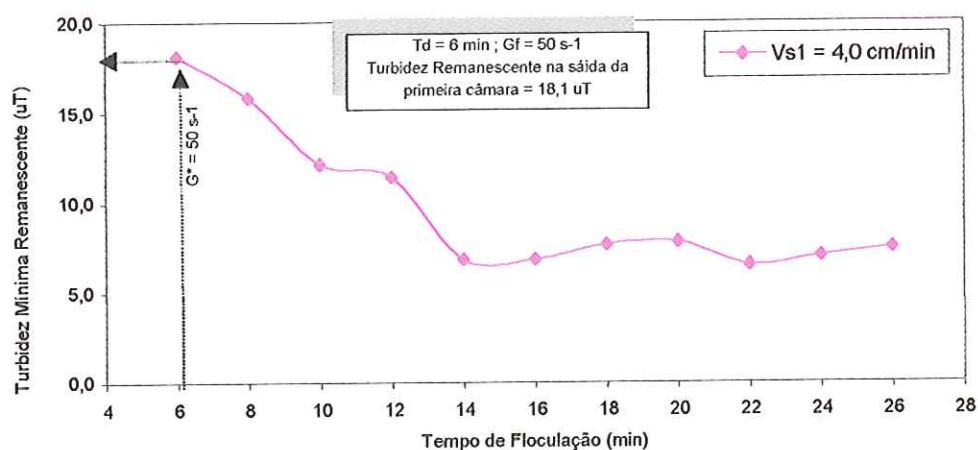


Figura C3 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf e Gf variáveis; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min)  
Determinação do gradiente de velocidade na primeira câmara de floculação

a2) GRADIENTE DE VELOCIDADE NA SEGUNDA CÂMARA DE FLOCULAÇÃO

Gradiente de Velocidade na primeira câmara de floculação:  $Gf_1 = 50 \text{ s}^{-1}$

Turbidez Remanescente na saída da primeira câmara:  $N_1 = 18,1 \text{ uT}$

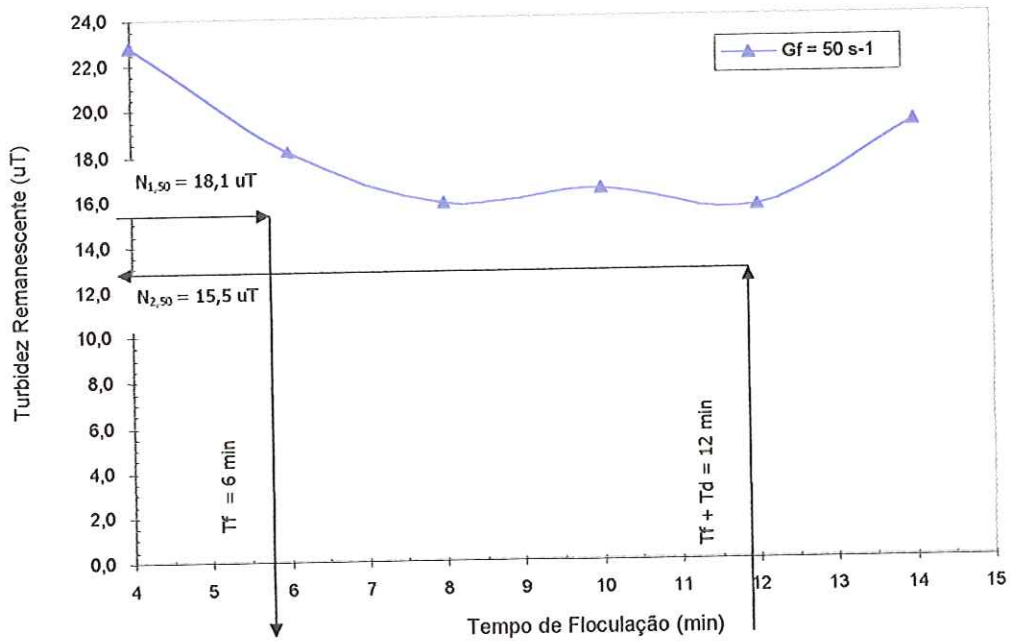


Figura C4 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação  
 ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 50 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min)  
 Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação

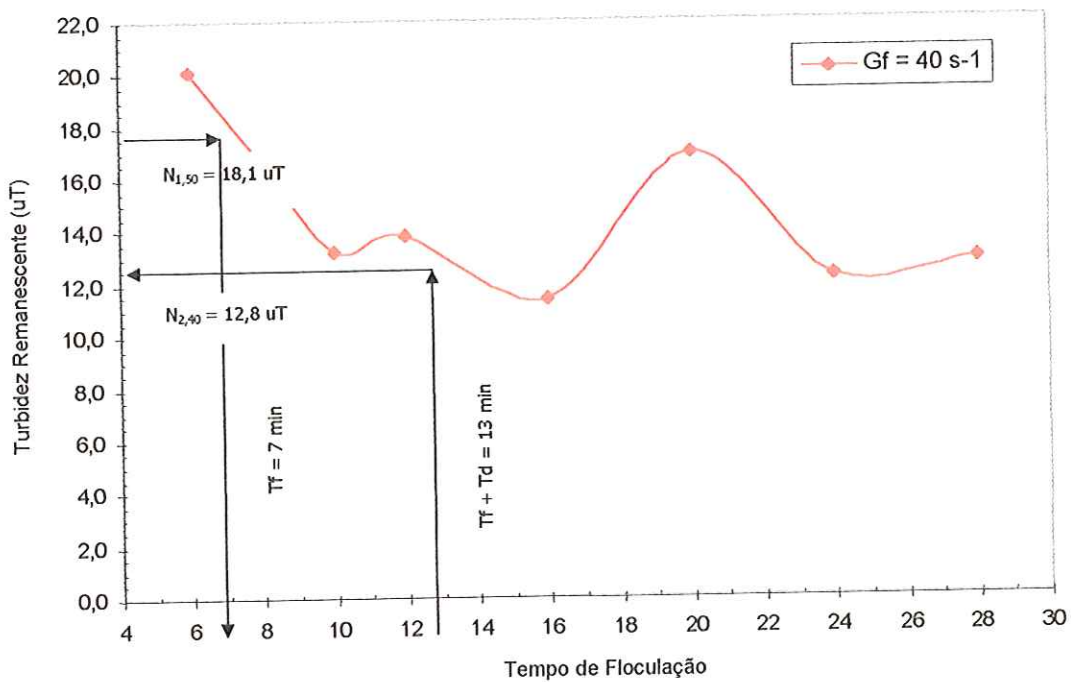


Figura C5 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação  
 ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 40 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min)  
 Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação

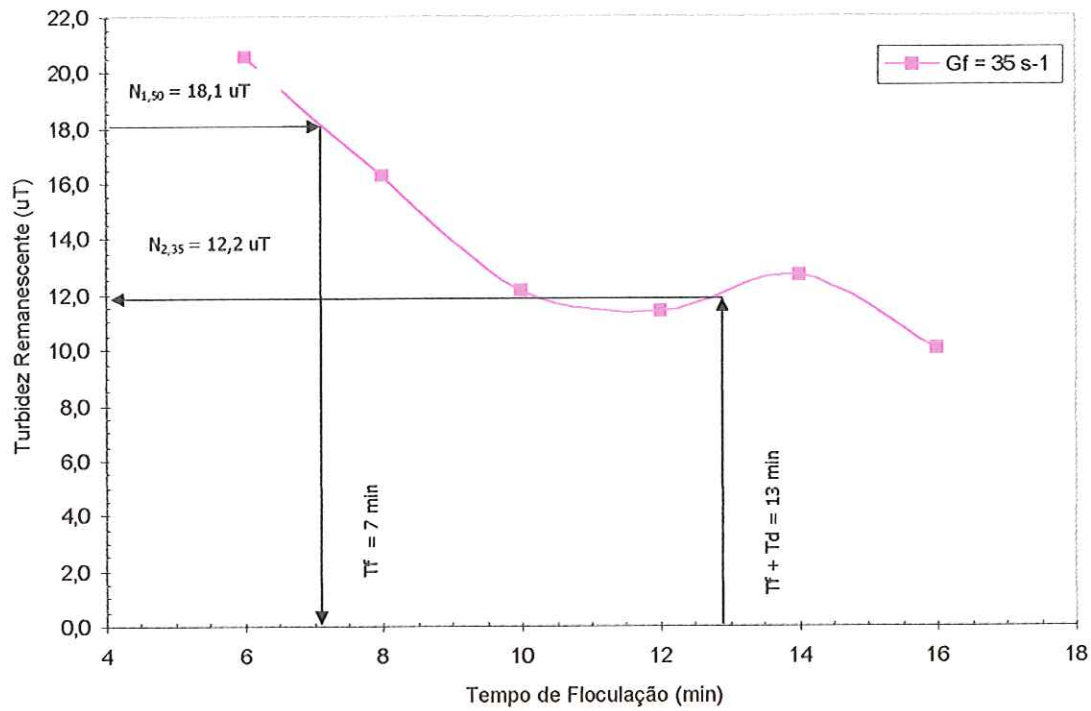


Figura C6 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação  
 (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 35 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min)  
 Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação

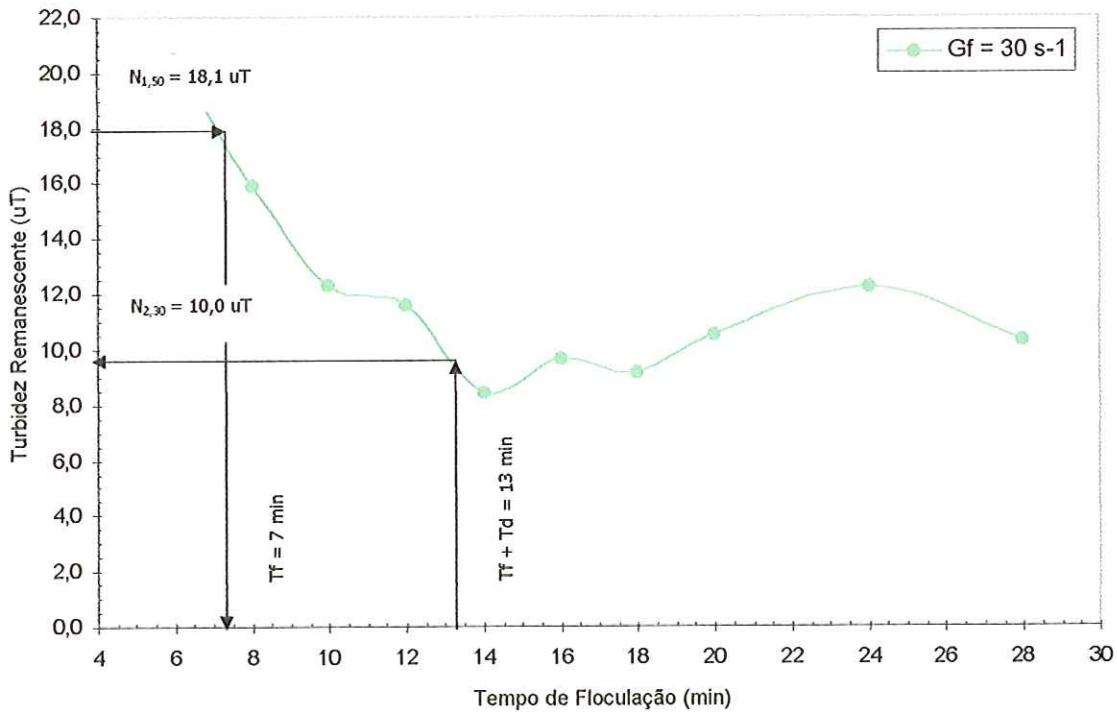


Figura C7 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação  
 (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 30 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 4,0 cm/min)  
 Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação

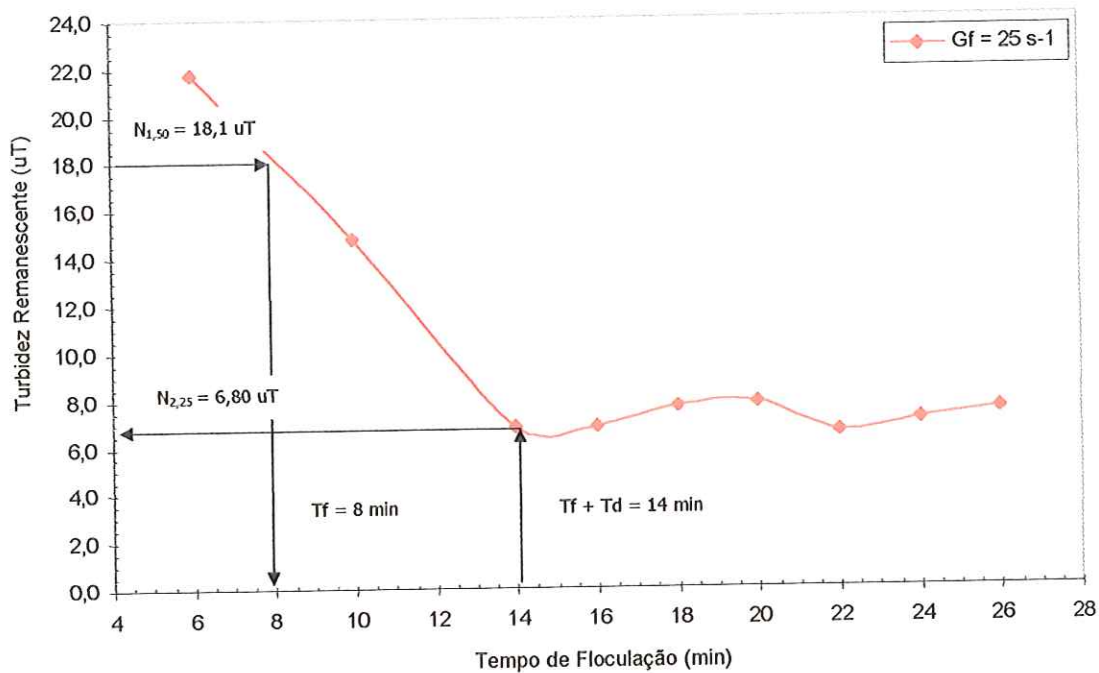


Figura C8 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação  
 (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; T<sub>mr</sub> = 10 s; G<sub>mr</sub> = 1000 s<sup>-1</sup>; T<sub>f</sub> variável; G<sub>f</sub> = 25 s<sup>-1</sup>; V<sub>s1</sub> = 4,0 cm/min)  
 Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação

**2ª câmara de floculação :**

**Gradiente de velocidade : 25 s<sup>-1</sup>**

**Turbidez remanescente na saída: 6,80 uT**

### a3 ) GRADIENTE DE VELOCIDADE NA TERCEIRA CÂMARA DE FLOCULAÇÃO

Gradiente de Velocidade na segunda câmara de floculação:  $Gf_2 = 25 \text{ s}^{-1}$

Turbidez Remanescente na saída da segunda câmara:  $N_2 = 6,80 \text{ uT}$

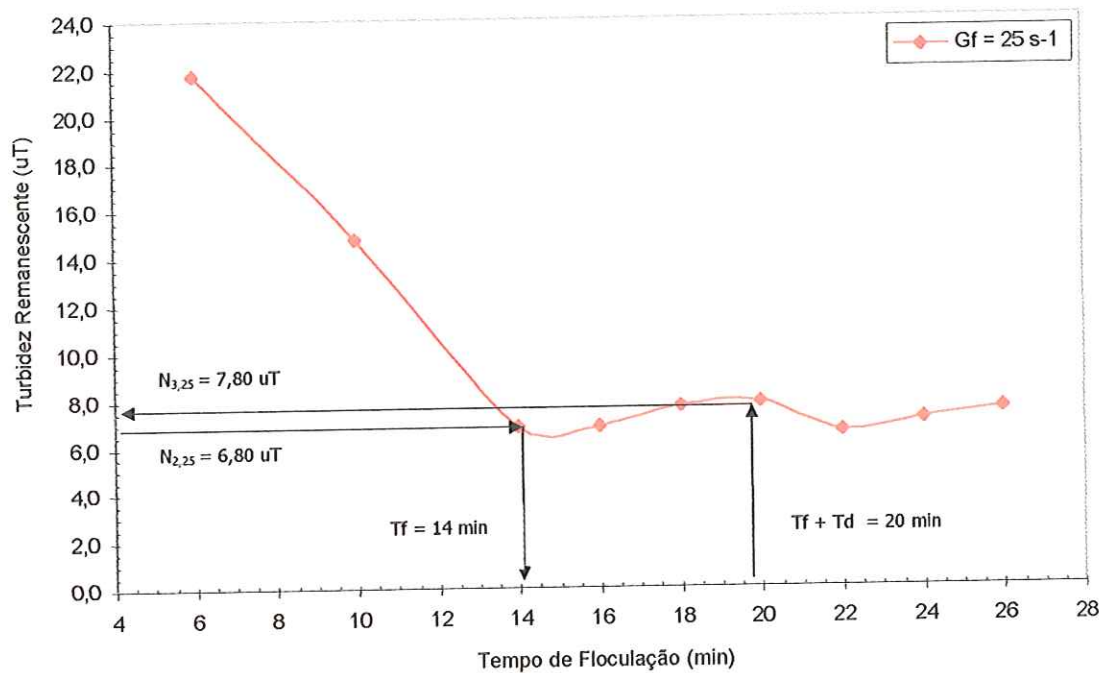


Figura C9 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_f$  variável;  $Gf = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s1} = 4,0 \text{ cm/min}$ )  
Determinação do gradiente de velocidade na terceira câmara de floculação

**3ª câmara de floculação :**

**Gradiente de velocidade :  $25 \text{ s}^{-1}$**

**Turbidez remanescente na saída:  $7,80 \text{ uT}$**

#### a4) GRADIENTE DE VELOCIDADE NA QUARTA CÂMARA DE FLOCULAÇÃO

Gradiente de Velocidade na terceira câmara de floculação:  $Gf_3 = 25 \text{ s}^{-1}$

Turbidez Remanescente na saída da terceira câmara:  $N_3 = 7,80 \text{ uT}$

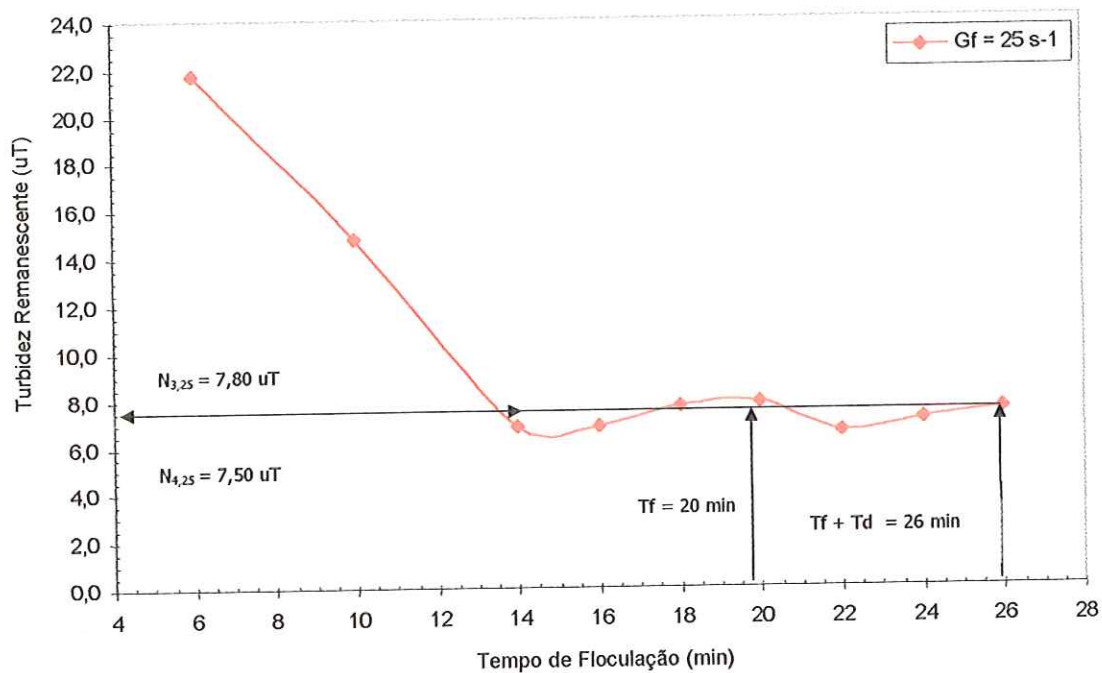


Figura C10 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação  
 ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_f$  variável;  $G_f = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s1} = 4,0 \text{ cm/min}$ )  
 Determinação do gradiente de velocidade na quarta câmara de floculação

**4ª câmara de floculação :**

**Gradiente de velocidade :  $25 \text{ s}^{-1}$**

**Turbidez remanescente na saída:  $7,50 \text{ uT}$**

b) Velocidade de Sedimentação = 2,0 cm/min

Parâmetro de Controle: Turbidez Remanescente

Número de câmaras em série (n) = 4

Tempo de Floculação em cada câmara (Td) = 6 min

b1) GRADIENTE DE VELOCIDADE NA PRIMEIRA CÂMARA DE FLOCULAÇÃO

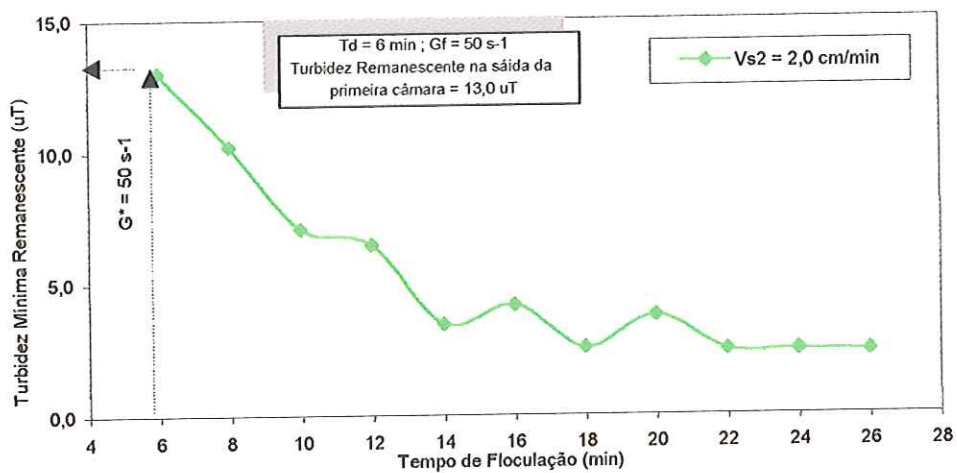


Figura C11 – Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf e Gf variáveis; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) Determinação do gradiente de velocidade na primeira câmara de floculação

b2) GRADIENTE DE VELOCIDADE NA SEGUNDA CÂMARA DE FLOCULAÇÃO

Gradiente de Velocidade na primeira câmara de floculação:  $Gf_1 = 50 \text{ s}^{-1}$

Turbidez Remanescente na saída da primeira câmara:  $N_1 = 13,1 \text{ uT}$



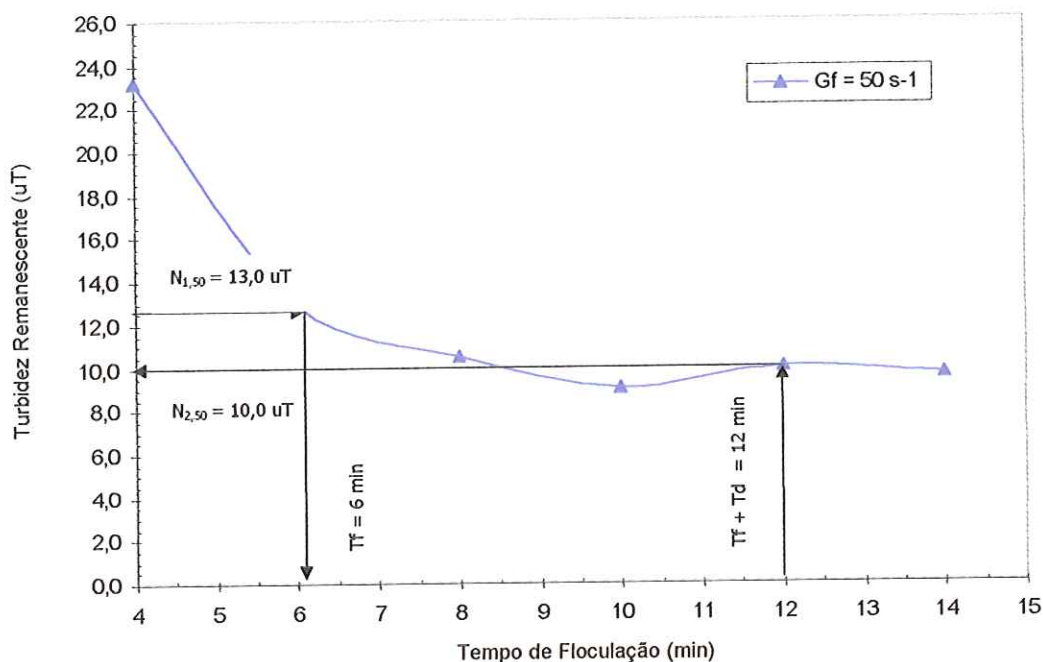


Figura C12 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 50 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação

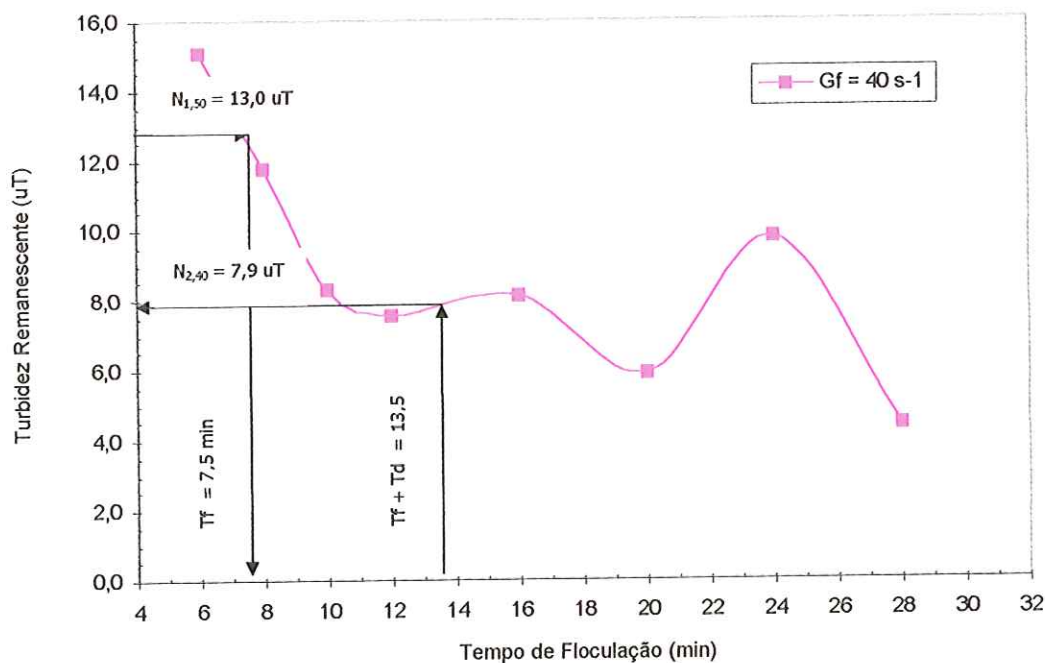


Figura C13 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 40 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação

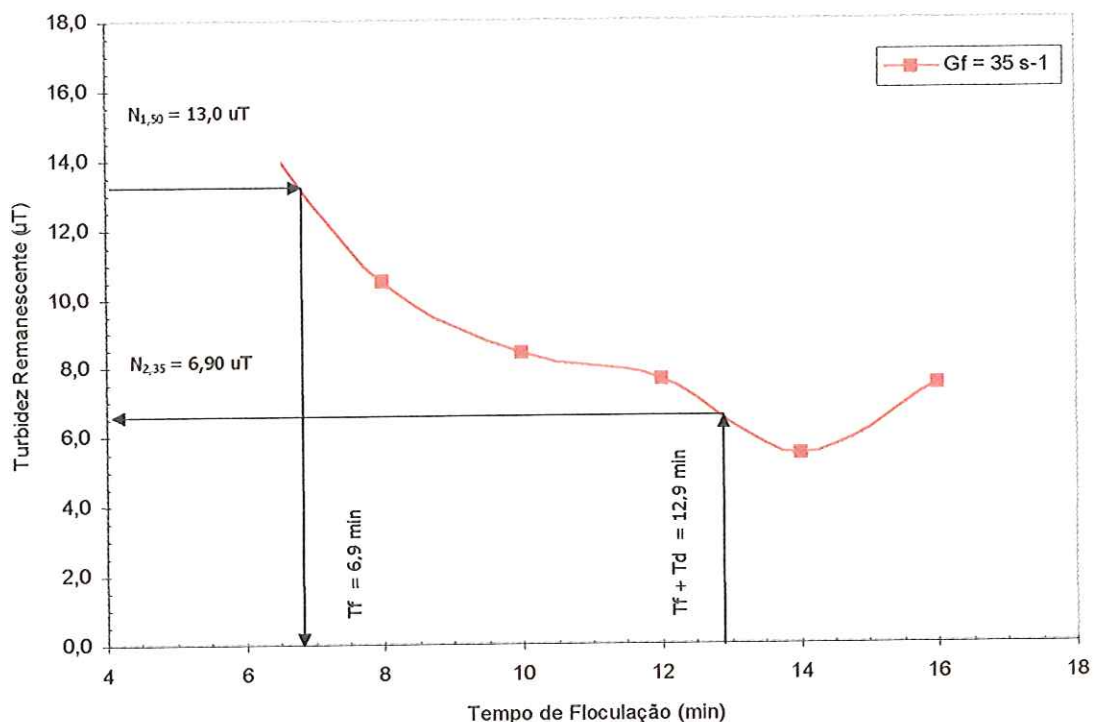


Figura C14 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 35 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação

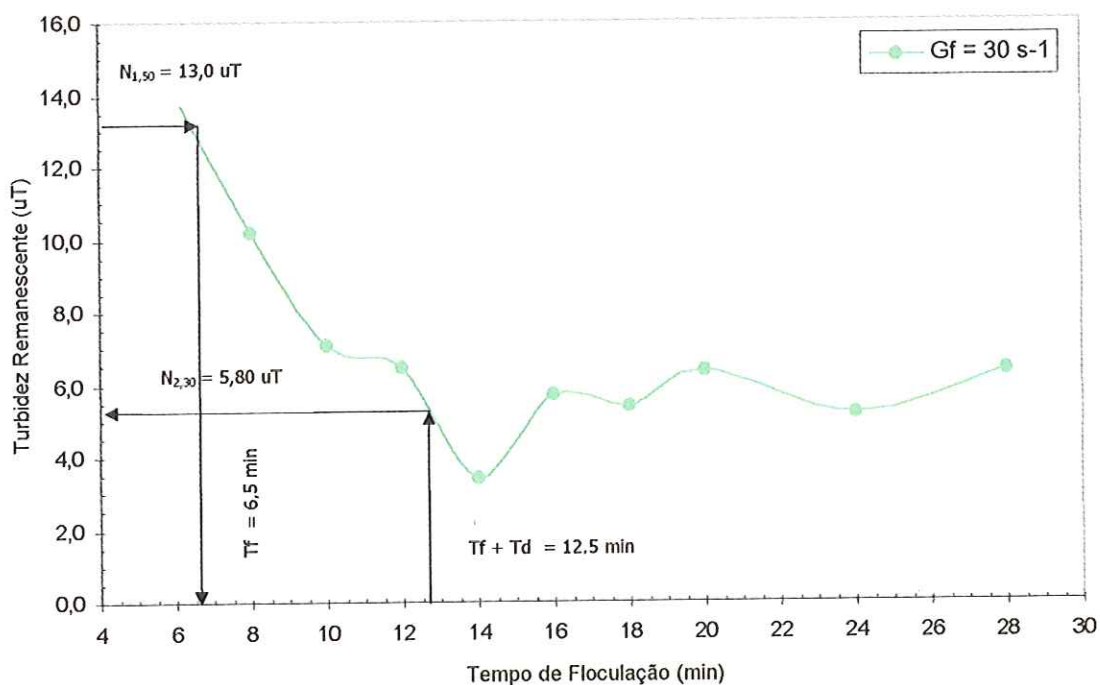


Figura C15 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf variável; Gf = 30 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>2</sub> = 2,0 cm/min) Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação

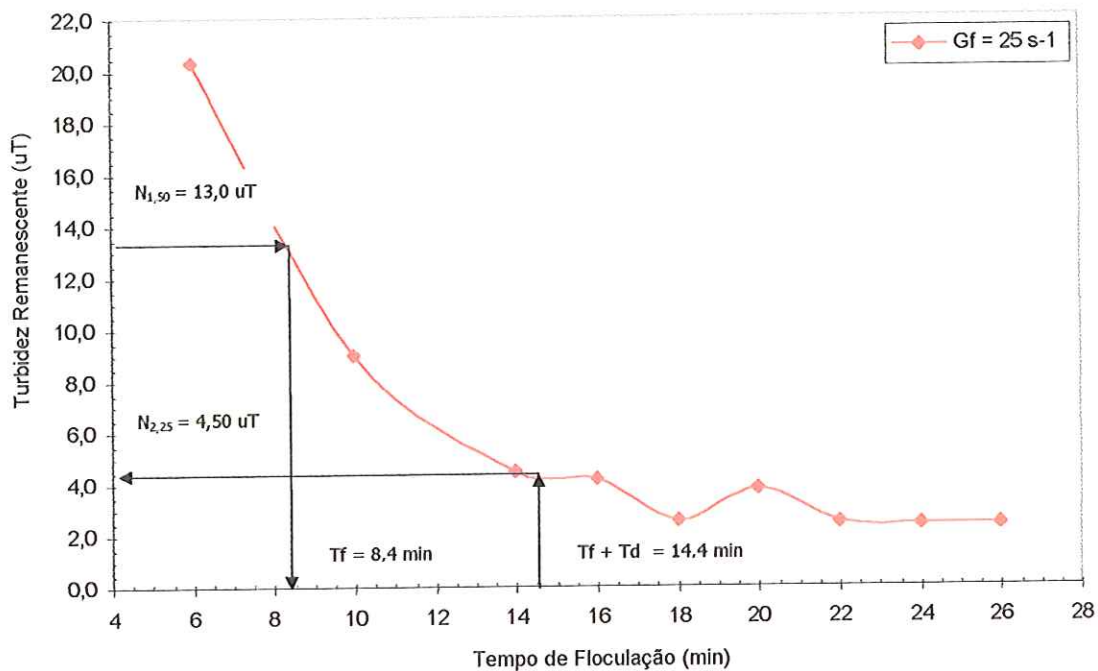


Figura C16 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação  
 ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_f$  variável;  $G_f = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s2} = 2,0 \text{ cm/min}$ )  
 Determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação

**2ª câmara de floculação :**

**Gradiente de velocidade :  $25 \text{ s}^{-1}$**

**Turbidez remanescente na saída: 4,50 uT**

### b3 ) GRADIENTE DE VELOCIDADE NA TERCEIRA CÂMARA DE FLOCULAÇÃO

Gradiente de Velocidade na segunda câmara de floculação:  $Gf_2 = 25 \text{ s}^{-1}$

Turbidez Remanescente na saída da segunda câmara:  $N_2 = 4,50 \text{ uT}$

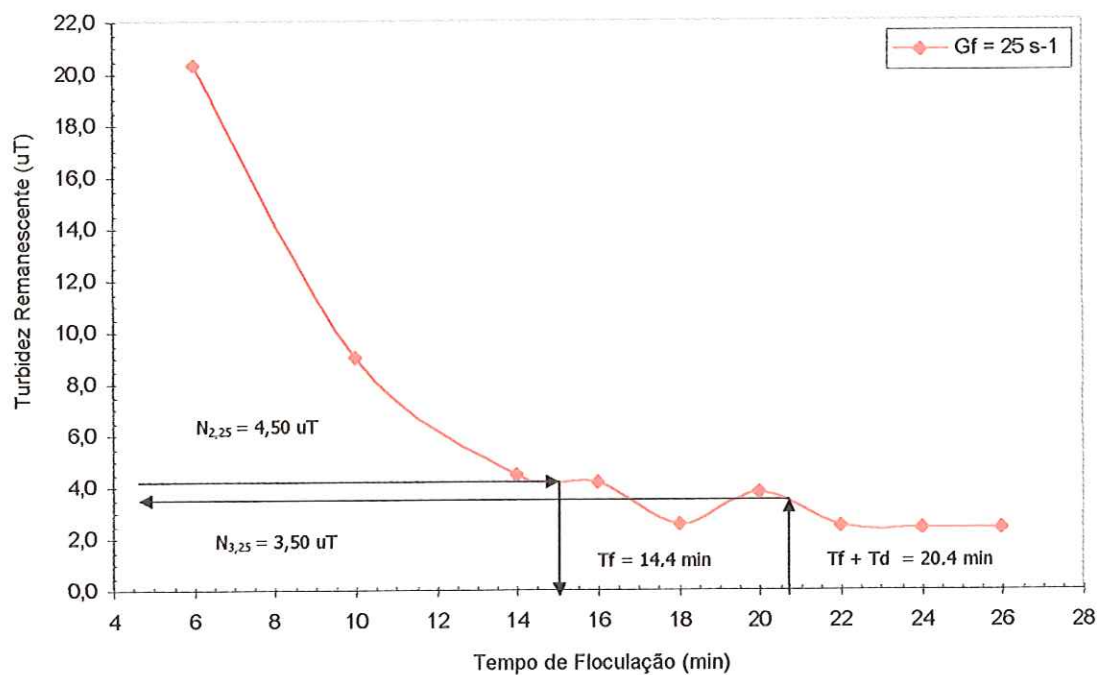


Figura C17 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação  
 ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_f$  variável;  $G_f = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s2} = 2,0 \text{ cm/min}$ )  
 Determinação do gradiente de velocidade na terceira câmara de floculação

#### 3ª câmara de floculação :

Gradiente de velocidade :  $25 \text{ s}^{-1}$

Turbidez remanescente na saída:  $3,50 \text{ uT}$

#### b4) GRADIENTE DE VELOCIDADE NA QUARTA CÂMARA DE FLOCULAÇÃO

Gradiente de Velocidade na terceira câmara de floculação:  $Gf_3 = 25 \text{ s}^{-1}$

Turbidez Remanescente na saída da terceira câmara:  $N_3 = 3,50 \text{ uT}$

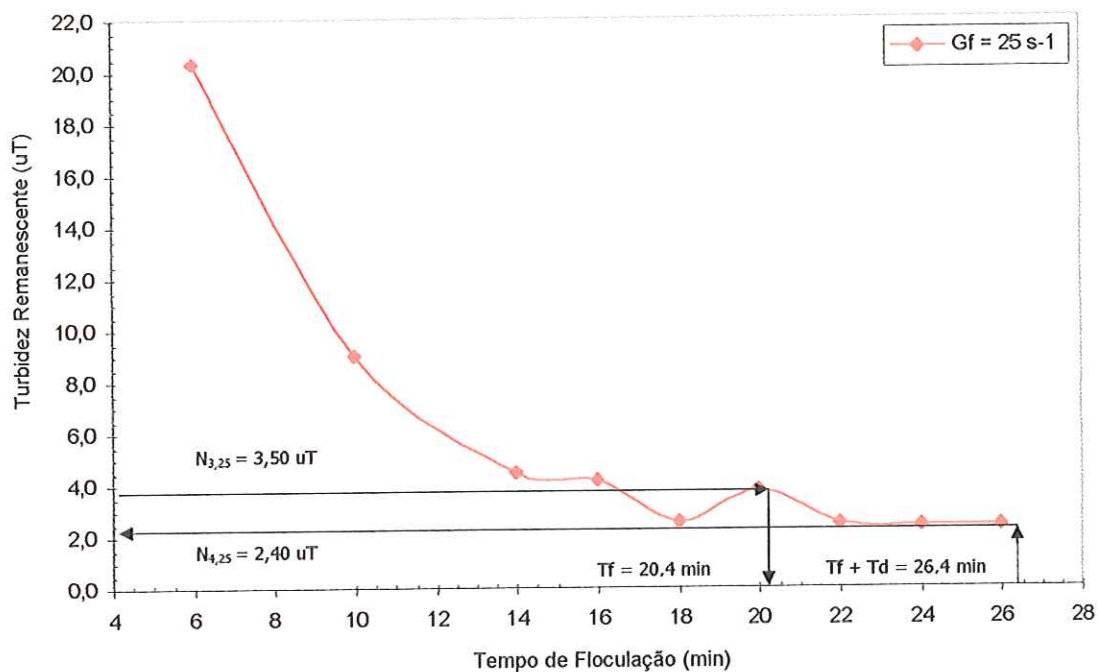


Figura C18 – Turbidez remanescente em função do tempo de floculação  
( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_f$  variável;  $G_f = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s2} = 2,0 \text{ cm/min}$ )  
Determinação do gradiente de velocidade na quarta câmara de floculação

**4ª câmara de floculação :**

**Gradiente de velocidade :  $25 \text{ s}^{-1}$**

**Turbidez remanescente na saída: 2,40 uT**

# ANEXO D

INFLUÊNCIA DO ESCALONAMENTO  
DO GRADIENTE DE VELOCIDADE NA  
FLOCULAÇÃO NA REMOÇÃO DE  
TURBIDEZ E COR APARENTE

---

**SÉRIE IV: INFLUÊNCIA DO ESCALONAMENTO DO GRADIENTE DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO NA REMOÇÃO DE TURBIDEZ E COR APARENTE**

CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO						
Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Alcalinidade Total (mg / L CaCO <sub>3</sub> )	Potencial Zeta (mV)	pH	Temperatura (°C)
24,0 a 28,0	175 a 215	30 a 35	23,0 a 27,0	-18,1 a 16,5	7,35 a 7,55	25 1

CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DA SÉRIE IV			
Mistura Rápida		Floculação	
Tmr = 10 s	Gmr = 1000 s <sup>-1</sup>	Tf = 24 min	Gf variável

Tabela D1 – Verificação da Influência do Escalonamento do Gradiente de Velocidade: G* = cte = 25 s <sup>-1</sup>										
FRASCO	DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS PONTO B		pH de Coagul.	Potencial Zeta (mV)	Vs1 = 7,20 cm/min		Vs2 = 3,95 cm/min		Vs3 = 1,89 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros			Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	-	6,75	-	15,6	100	5,19	37	2,30	16
2	16,0	-	6,81	-	18,6	104	8,42	51	4,49	26
3	16,0	-	6,78	-	14,3	92	6,11	42	2,47	16

Tabela D2 – Verificação da Influência do Escalonamento do Gradiente de Velocidade, Combinação de Gradientes : 50, 25, 25 e 25 s <sup>-1</sup>										
FRASCO	DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS PONTO B		pH de Coagul.	Potencial Zeta (mV)	Vs1 = 7,20 cm/min		Vs2 = 3,95 cm/min		Vs3 = 1,89 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Outros			Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	-	6,85	-	18,2	110	10,6	60	6,11	36
2	16,0	-	6,85	-	18,8	106	7,89	38	4,66	31
3	16,0	-	6,87	-	19,0	108	10,3	60	3,49	25

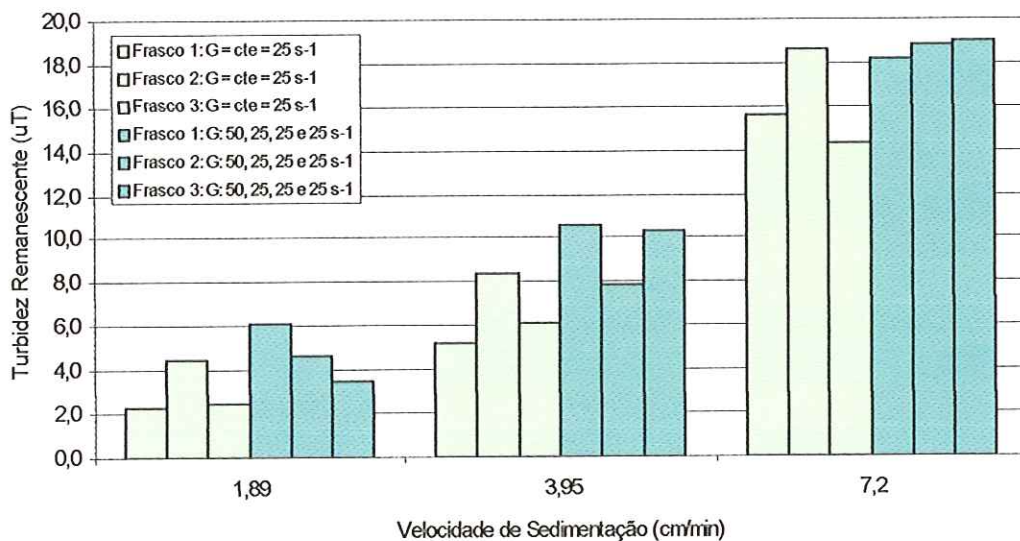


Figura D1 – Turbidez remanescente em função do velocidade de sedimentação para diferentes condições de floculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf variável)

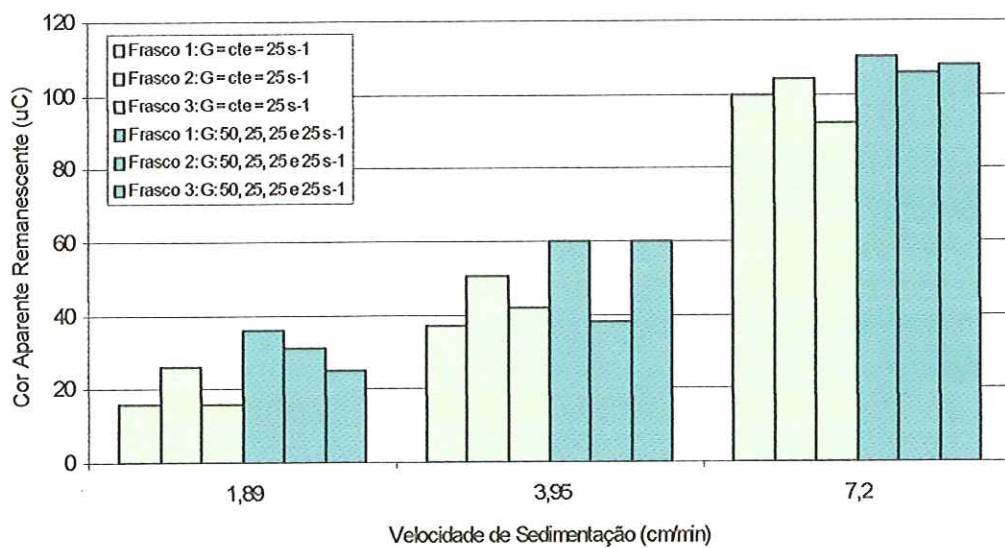


Figura D2 – Cor aparente remanescente em função do velocidade de sedimentação para diferentes condições de floculação  
( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf variável)



# ANEXO E

## OTIMIZAÇÃO DAS DOSAGENS DOS POLÍMEROS

---

## SÉRIE V: OTIMIZAÇÃO DAS DOSAGENS DOS POLÍMEROS

## PARTE 1

CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO						
Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Alcalinidade Total (mg / L CaCO <sub>3</sub> )	Potencial Zeta (mV)	pH	Temperatura (°C)
24,0 a 28,0	175 a 215	30 a 35	23,0 a 27,0	-18,1 a 16,5	7,35 a 7,55	25 1

CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DA SÉRIE V					
Mistura Rápida		Aplicação do Polímero		Floculação	
Tmr = 10 s	Gmr = 1000 s <sup>-1</sup>	Tp = 1 min	Gp = 300 s <sup>-1</sup>	Tf = 20 min	Gf = 20 s <sup>-1</sup>

Tabela E1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163)  
 Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>;  
 Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)			Coagulação	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)
1	24,0	0,50	6,35	-	7,28	53	2,71	21	2,25	16	1,73	14
2	24,0	0,30	6,39	-	9,68	65	4,37	33	2,16	16	1,22	9
3	24,0	0,20	6,35	-	8,84	58	2,89	19	3,26	21	1,12	11
4	24,0	0,10	6,38	-	7,27	49	4,28	25	2,79	20	2,05	15
5	24,0	0,05	6,40	-	8,80	61	4,79	27	3,29	22	2,25	19
6	24,0	0	6,39	-	8,36	56	4,50	31	2,67	19	1,29	12

Tabela E2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de diferentes polímeros catiônicos  
 Ponto A (DSA = 24,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>;  
 Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

FRASCO	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de	Potencial Zeta (mV)	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)			Coagulação	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)
1	24,0	-	6,30	+0,5	18,1	113	6,73	46	2,90	24	2,77	23
2	24,0	ADESOL: 0,15	6,32	+0,4	19,0	128	9,64	61	2,88	23	1,94	14
3	24,0	ADESOL: 0,30	6,32	-	6,27	36	3,13	31	3,12	28	2,29	17
4	24,0	POLY FLOC: 0,40	6,28	+0,4	13,7	84	4,52	32	3,13	22	2,12	16
5	24,0	AMIDO MILHO CATION. : 2,5	6,30	+0,8	9,06	59	4,58	43	3,79	25	1,60	10

**Tabela E3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de diferentes polímeros catiônicos**  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>;  
 Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

FR AS CO	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de	Poten cial	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)			Coagu lação	Zeta (mV)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	-	6,85	-10,5	24,6	154	18,0	112	6,35	43	3,95	38
2	16,0	ADESOL: 0,20	6,82	-9,7	19,1	114	9,60	61	8,01	52	5,85	38
3	16,0	AMIDO MILHO CATION. : 2,0	6,80	-10,2	5,16	36	1,84	17	1,55	15	1,28	14
4	16,0	AMIDO MILHO CATION. : 4,0	6,81	-11,0	5,98	43	3,00	22	2,36	21	2,42	20
5	16,0	POLY FLOC: 0,20	6,80	-14,5	13,3	80	6,33	43	6,04	42	1,92	19
6	16,0	POLY FLOC: 0,40	6,79	-11,0	10,0	63	4,75	32	3,86	29	3,28	29

**PARTE 2**

CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO						
Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Alcalinidade Total (mg / L CaCO <sub>3</sub> )	Potencial Zeta (mV)	pH	Temperatura (°C)
24,0 a 28,0	175 a 215	30 a 35	23,0 a 27,0	-18,1 a 16,5	7,35 a 7,55	25 ± 1

CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DA SÉRIE V					
Mistura Rápida		Aplicação do Polímero		Floculação	
Tmr = 10 s	Gmr = 1000 s <sup>-1</sup>	Tp = 3 min	Gp = 100 s <sup>-1</sup>	Tf = 24 min	Gf = 25 s <sup>-1</sup>

**Tabela E4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163)**  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>;  
 Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

FR AS CO	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de	Poten cial	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)			Coagu lação	Zeta (mV)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	0	6,75	-10,5	20,9	112	8,59	50	5,10	28	2,89	22
2	16,0	0,25	-	-10,1	18,2	100	5,90	41	4,03	27	2,75	19
3	16,0	0,50	-	-8,3	13,3	75	3,89	31	1,46	10	1,15	9
4	16,0	0,75	-	-5,5	10,5	57	3,42	27	0,890	8	0,701	8
5	16,0	1,0	-	-14,4	8,71	44	1,83	13	0,945	9	0,532	7
6	16,0	1,5	-	-2,1	6,41	32	1,10	10	0,878	9	0,755	9

**Tabela E5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de amido de milho catiônico**  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>;  
 Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

FR AS CO	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de	Potencial	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)			Coagulação	Zeta (mV)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	0	6,80	-10,8	19,9	111	10,4	67	6,40	35	4,32	25
2	16,0	0,25	-	-13,7	18,2	105	8,80	53	3,72	23	2,94	17
3	16,0	0,50	-	-11,1	15,6	93	5,37	38	3,44	23	1,44	10
4	16,0	1,0	-	-10,3	11,7	61	2,76	17	1,80	11	0,700	7
5	16,0	2,0	-	-	2,54	20	1,55	11	0,976	10	0,590	5
6	16,0	3,0	-	+2,0	1,04	9	0,841	10	0,732	9	0,750	7

**Tabela E6 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de amido de batata**  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>;  
 Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

FR AS CO	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de	Potencial	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)			Coagulação	Zeta (mV)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	0	6,80	-9,8	22,4	113	7,08	49	5,62	27	3,36	24
2	16,0	0,25	-	-11,0	20,0	108	10,8	64	4,15	23	3,91	22
3	16,0	0,50	-	-11,1	19,8	106	11,1	63	7,34	36	2,50	17
4	16,0	1,0	-	-10,2	19,9	110	14,2	78	6,50	32	4,24	26
5	16,0	2,0	-	-	21,1	112	7,12	40	6,47	38	2,80	19
6	16,0	3,0	-	-	18,0	100	11,7	68	4,79	28	4,43	27
7	16,0	5,0	-	-	19,2	103	10,8	61	4,48	29	3,12	24
8	16,0	7,0	-	-	19,4	103	6,82	42	5,12	30	2,95	22
9	16,0	9,0	-	-	20,1	105	7,11	45	5,23	33	3,47	26

**Tabela E7 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes em função da dosagem de amido de mandioca catiônico**  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>;  
 Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

FR AS CO	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de	Potencial	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)			Coagulação	Zeta (mV)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	0	6,91	-13,6	21,7	118	11,5	63	7,14	40	3,13	17
2	16,0	0,25	6,88	-12,9	19,4	115	8,43	46	5,70	34	1,86	11
3	16,0	0,50	6,87	-12,1	13,6	70	6,40	34	1,98	16	1,08	7
4	16,0	1,0	6,85	-14,8	4,49	22	1,71	9	0,816	7	0,713	6
5	16,0	2,0	6,85	-11,1	0,711	6	0,608	3	0,613	4	0,598	3
6	16,0	3,0	6,86	-10,2	0,845	4	0,591	4	0,498	3	0,414	3

Gráficos do Ensaio 01 (Tabela E1)

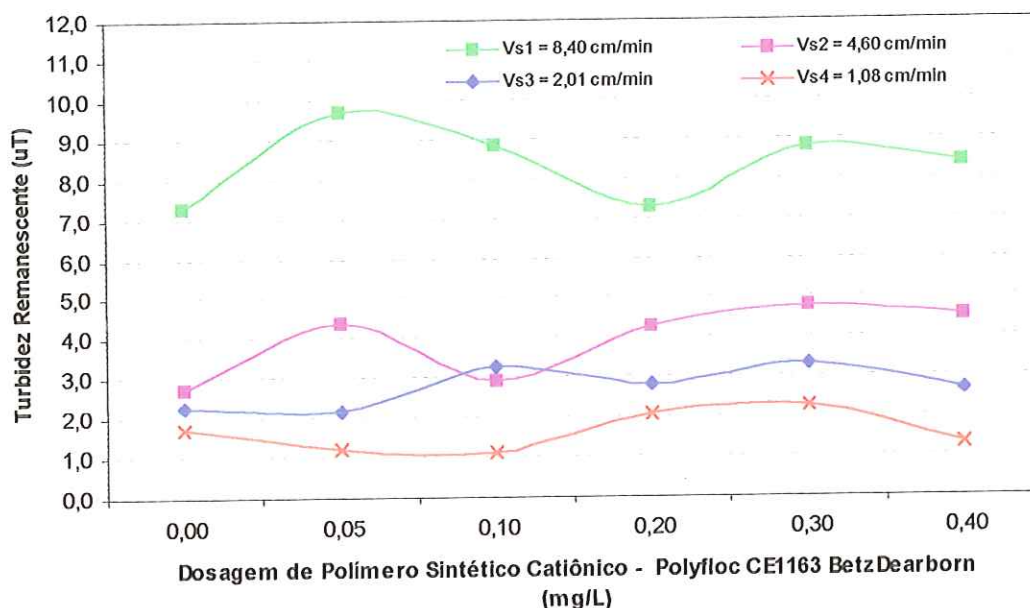


Figura E1 – Turbidez remanescente em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163) para diferentes velocidades de sedimentação (Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>)

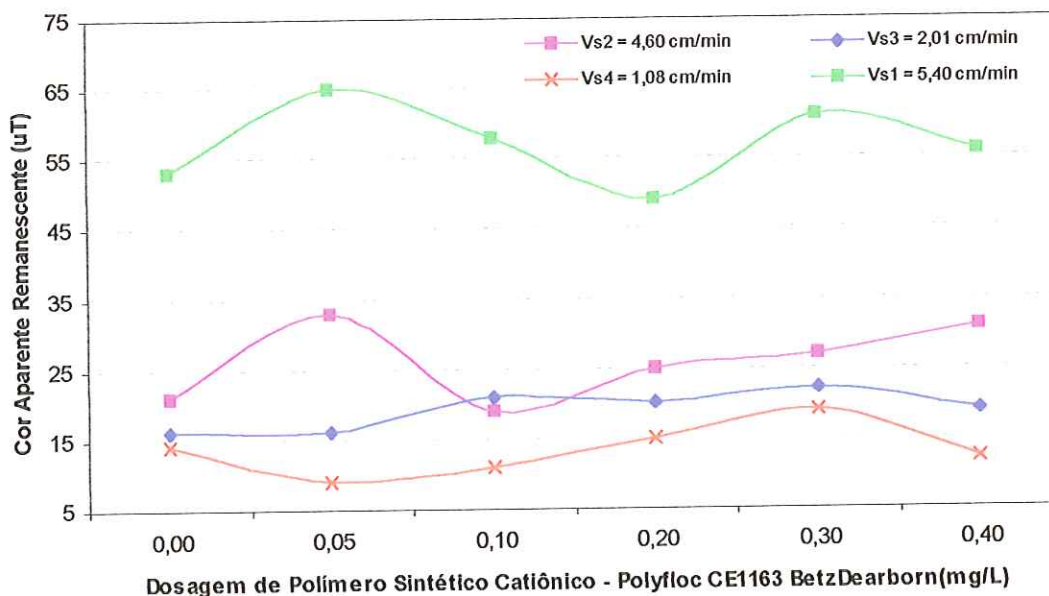


Figura E2 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163) para diferentes velocidades de sedimentação (Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>)

## Gráficos do Ensaio 02 (Tabela E2)

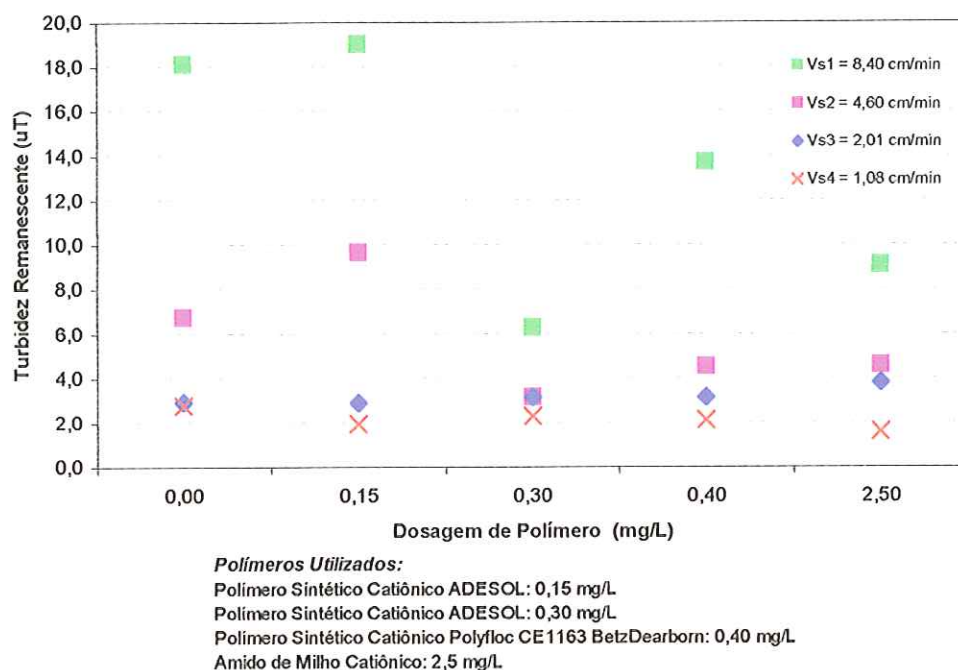


Figura E3 – Turbidez remanescente em função da dosagem de polímeros catiônicos para diferentes velocidades de sedimentação  
 (Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>)

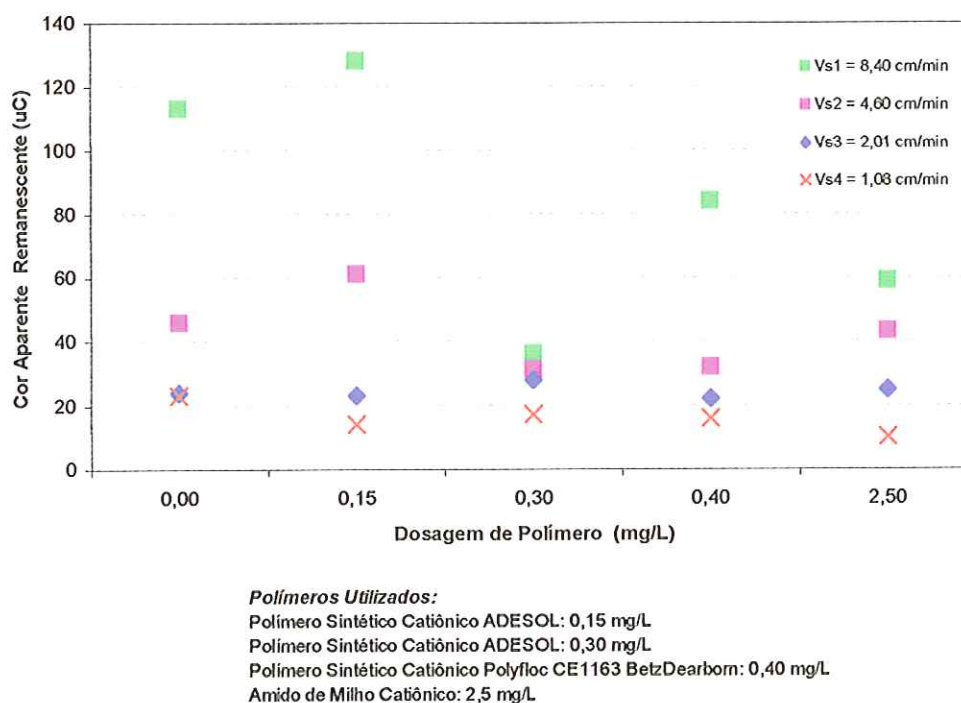


Figura E4 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de polímeros catiônicos para diferentes velocidades de sedimentação  
 (Ponto A: DSA = 24,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>)

Gráficos do Ensaio 03 (Tabela E3)

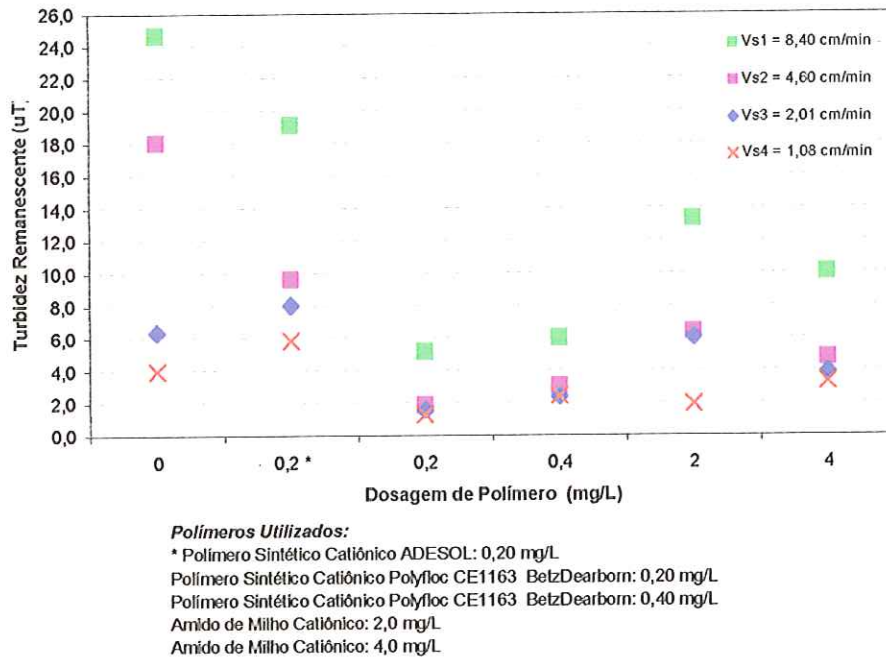


Figura E5 – Turbidez remanescente em função da dosagem de polímeros catiônicos para diferentes velocidades de sedimentação  
 ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>)

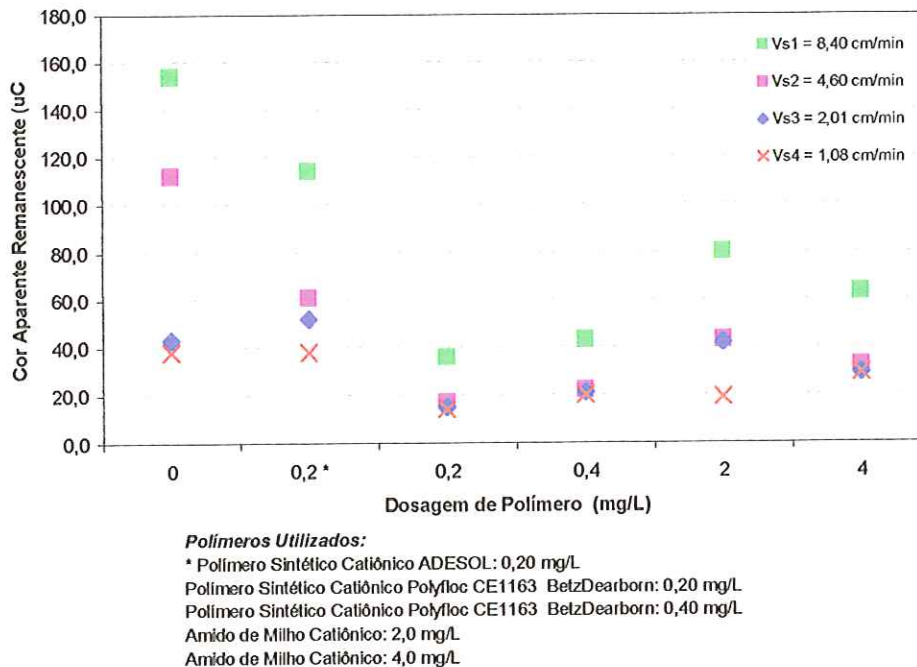


Figura E6 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de polímeros catiônicos para diferentes velocidades de sedimentação  
 ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 1 min; Gp = 300 s<sup>-1</sup>; Tf = 20 min; Gf = 20 s<sup>-1</sup>)

Gráficos do Ensaio 04 (Tabela E4)

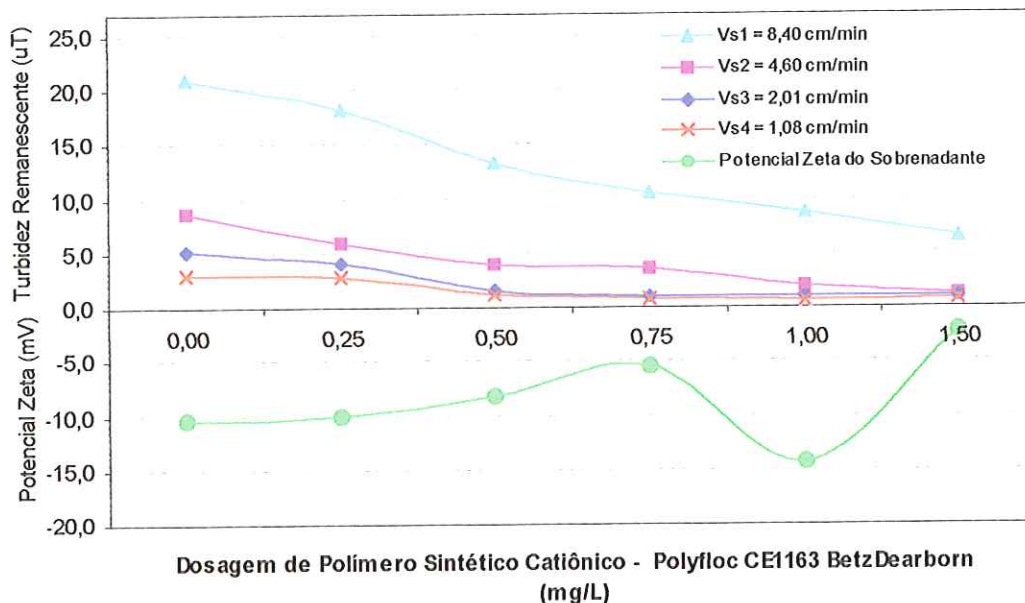


Figura E7 – Turbidez remanescente em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163) para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>)

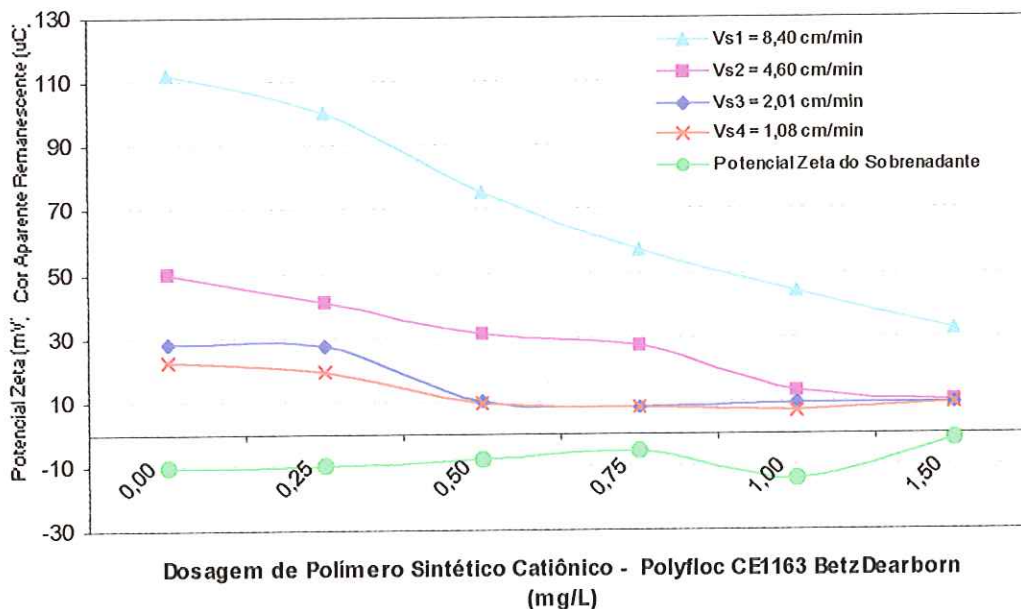


Figura E8 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163) para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>)



## Gráficos do Ensaio 05 (Tabela E5)

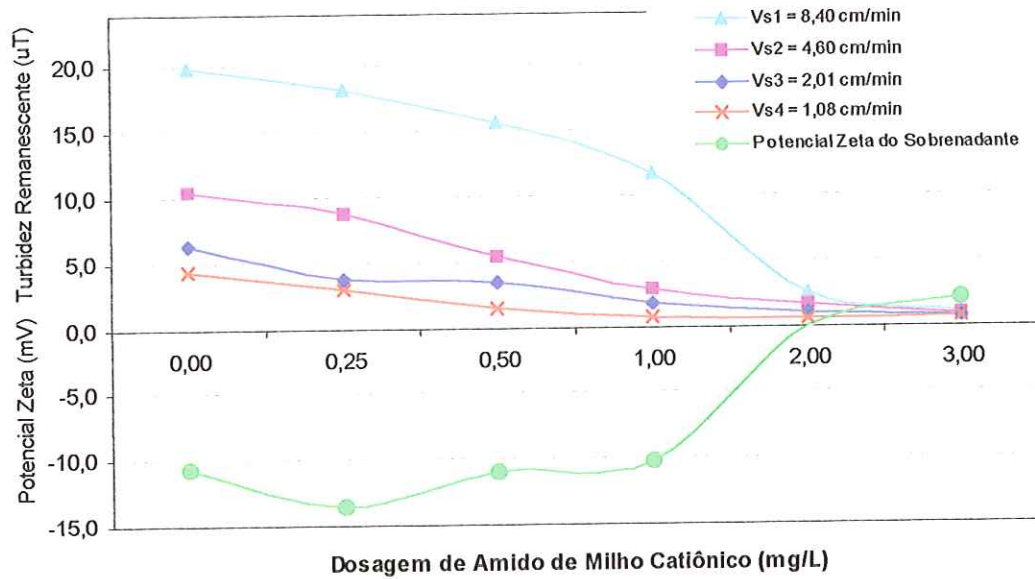


Figura E9 – Turbidez remanescente em função da dosagem de amido de milho catiônico para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; T<sub>mr</sub> = 10 s; G<sub>mr</sub> = 1000 s<sup>-1</sup>; T<sub>p</sub> = 3 min; G<sub>p</sub> = 100 s<sup>-1</sup>; T<sub>f</sub> = 24 min; G<sub>f</sub> = 25 s<sup>-1</sup>)

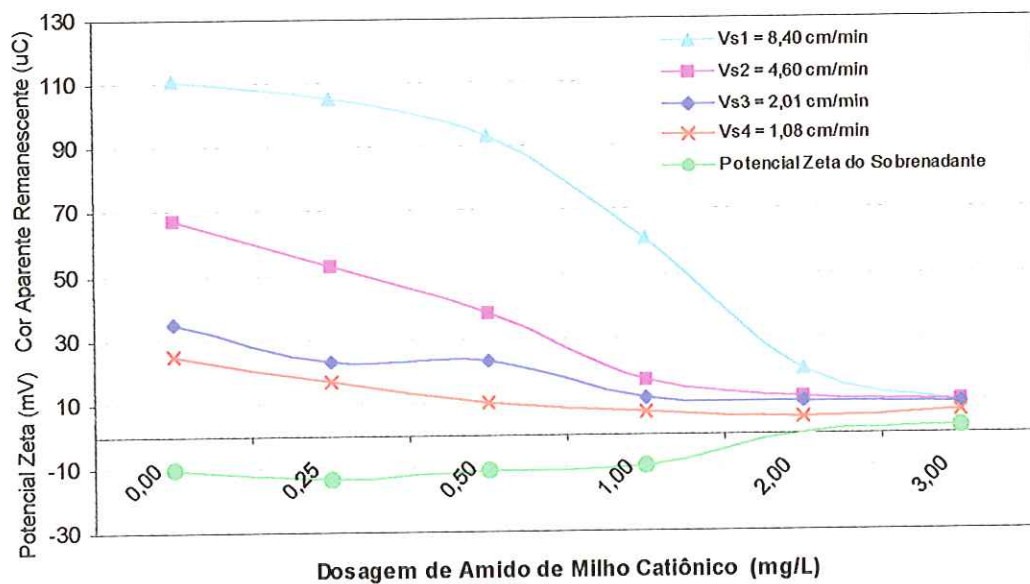


Figura E10 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de amido de milho catiônico para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; T<sub>mr</sub> = 10 s; G<sub>mr</sub> = 1000 s<sup>-1</sup>; T<sub>p</sub> = 3 min; G<sub>p</sub> = 100 s<sup>-1</sup>; T<sub>f</sub> = 24 min; G<sub>f</sub> = 25 s<sup>-1</sup>)

Gráficos dos Ensaio 06 e 07 (Tabelas E6 e E7)

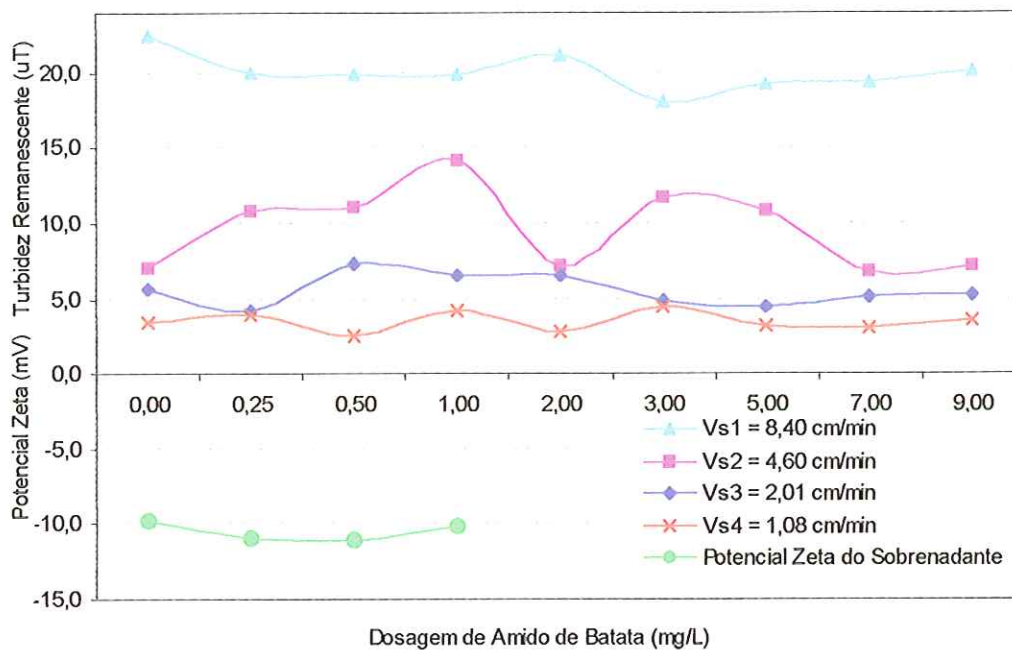


Figura E11 – Turbidez remanescente em função da dosagem de amido de batata para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta  
 . ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>)

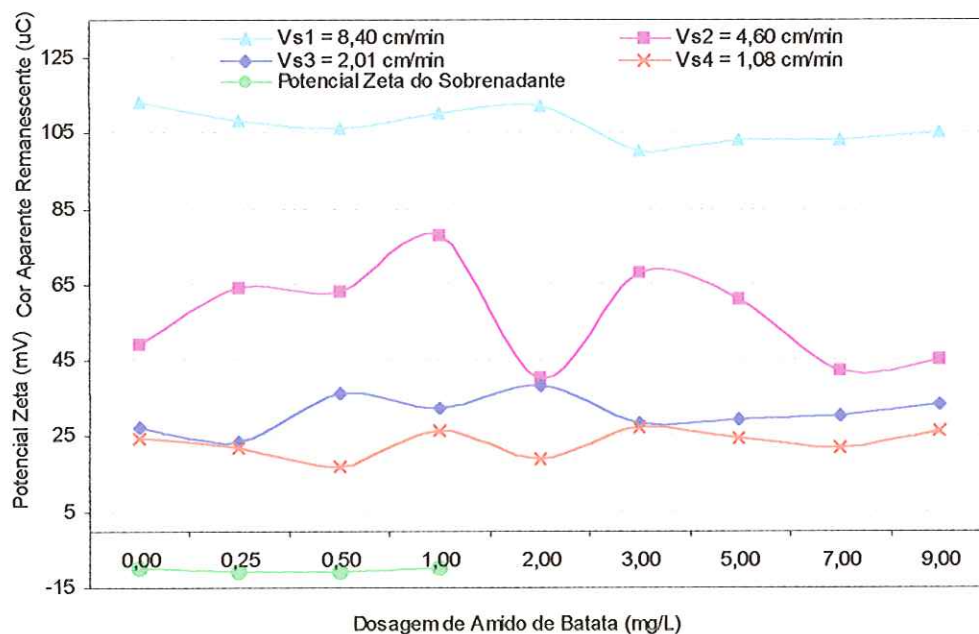


Figura E12 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de amido de batata para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta  
 ( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>)

Gráficos do Ensaio 08 (Tabela E8)

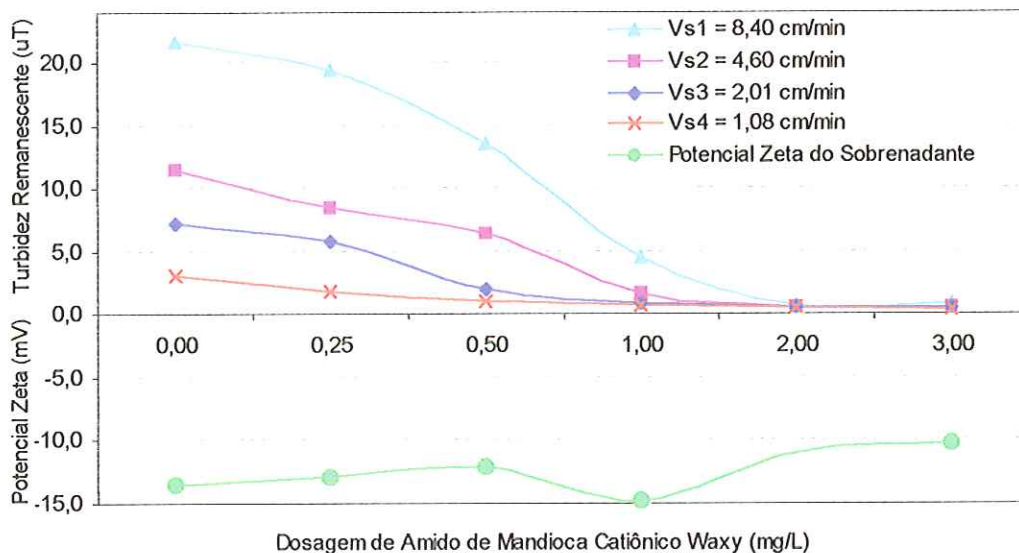


Figura E13 – Turbidez remanescente em função da dosagem de amido de mandioca catiônico para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>)

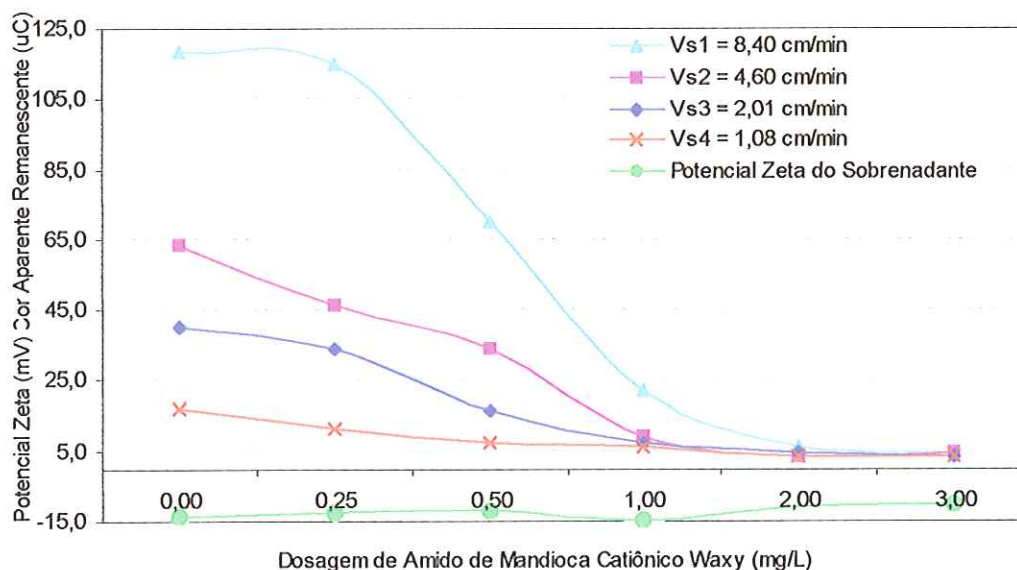


Figura E14 – Cor aparente remanescente em função da dosagem de amido de mandioca catiônico para diferentes velocidades de sedimentação e a variação do potencial zeta (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L; Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp = 3 min; Gp = 100 s<sup>-1</sup>; Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>)

# ANEXO F

OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE  
AGITAÇÃO NA FLOCULAÇÃO COM  
POLÍMERO  
GRADIENTE DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO  
ESCALONADO

---

**SÉRIE VI: OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE AGITAÇÃO NA FLOCULAÇÃO COM POLÍMERO**COMBINAÇÃO DE GRADIENTES DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>

CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO						
Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Alcalinidade Total (mg / L CaCO <sub>3</sub> )	Potencial Zeta (mV)	pH	Temperatura (°C)
24,0 a 28,0	175 a 215	30 a 35	23,0 a 27,0	-18,1 a 16,5	7,35 a 7,55	25 1

CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DA SÉRIE VI					
Mistura Rápida		Aplicação do Polímero		Floculação	
Tmr = 10 s	Gmr = 1000 s <sup>-1</sup>	Tp variável	Gp = Gf da câmara em que está sendo adicionado	Tf = 24min	Combinação de Gradientes: 50,25,25 e 25 s <sup>-1</sup>

Tabela F1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos imediatamente após a mistura rápida

Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis;Tf = 24 min; Gf escalonado: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>;Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

F R A S C O	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de Coagulação	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)		Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	POLYFLOC : 0,75	6,84	14,5	81	5,10	31	3,31	18	2,05	11
2	16,0	Amido Milho Catiônico: 2,0	6,82	11,0	56	4,75	24	1,49	10	0,882	6
3	16,0	Amido Mand. Catiônico: 1,0	6,82	3,01	23	1,35	12	1,02	10	1,02	8

Tabela F2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 6 min após o início da floculação (início da segunda câmara hipotética de floculação)

Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis;Tf = 24 min; Gf escalonado: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>;Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

F R A S C O	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de Coagulação	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)		Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	POLYFLOC : 0,75	6,83	12,9	67	3,11	18	2,40	16	1,06	7
2	16,0	Amido Milho Catiônico: 2,0	6,80	4,14	30	1,14	9	3,13	23	1,3	9
3	16,0	Amido Mand. Catiônico: 1,0	6,80	2,43	21	0,98	7	1,17	9	0,747	6

**Tabela F3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 12 min após o início da floculação (início da terceira câmara hipotética de floculação)**  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis;  
 Tf = 24 min; Gf escalonado: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>;  
 Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

F R A S C O	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de Coagu lação	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)		Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	POLYFLOC : 0,75	6,75	13,9	75	5,12	28	3,40	26	2,06	12
2	16,0	Amido Milho Catiônico: 2,0	6,78	9,78	60	5,80	35	1,83	15	1,15	8
3	16,0	Amido Mand. Catiônico: 1,0	6,75	6,19	34	2,83	18	1,42	12	0,936	8

**Tabela F4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 18 min após o início da floculação (início da quarta câmara hipotética de floculação)**  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis;  
 Tf = 24 min; Gf escalonado: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>;  
 Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

F R A S C O	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de Coagu lação	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)		Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	POLYFLOC : 0,75	6,76	17,7	106	7,70	46	6,90	41	3,26	22
2	16,0	Amido Milho Catiônico: 2,0	6,76	15,4	90	5,57	33	2,76	18	1,05	10
3	16,0	Amido Mand. Catiônico: 1,0	6,78	11,6	63	1,97	15	1,31	11	0,940	10

**Tabela F5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes na condição ótima de aplicação de cada polímero catiônico estudado**  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis;  
 Tf = 24 min; Gf escalonado: 50, 25, 25 e 25 s<sup>-1</sup>;  
 Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

F R A S C O	PRODUTOS QUÍMICOS		Aplica ção do Polímero	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)		Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	POLYFLOC : 0,75	2ª câmara	12,9	67	3,11	18	2,40	16	1,06	7
2	16,0	Amido Milho Catiônico: 2,0	2ª câmara	12,3	60	3,00	17	1,79	12	1,52	10
				11,6	67	6,66	38	3,41	18	1,58	10
3	16,0	Amido Mand. Catiônico: 1,0	2ª câmara	13,2	79	6,64	39	3,20	20	2,27	12
				4,82	31	2,03	14	1,25	8	1,27	8
				4,57	28	1,44	5	1,06	6	0,840	6

# ANEXO G

## OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE AGITAÇÃO NA FLOCULAÇÃO COM POLÍMERO

GRADIENTE DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO  
CONSTANTE

---

**SÉRIE VI: OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE AGITAÇÃO NA FLOCULAÇÃO COM POLÍMERO**GRADIENTE DE VELOCIDADE NA FLOCULAÇÃO:  $G_f^* = cte = 25 \text{ s}^{-1}$ 

CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO						
Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Alcalinidade Total (mg / L $\text{CaCO}_3$ )	Potencial Zeta (mV)	pH	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
24,0 a 28,0	175 a 215	30 a 35	23,0 a 27,0	-18,1 a 16,5	7,35 a 7,55	25 1

CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DA SÉRIE VII					
Mistura Rápida		Aplicação do Polímero		Floculação	
Tmr = 10 s	Gmr = 1000 $\text{s}^{-1}$	Tp variável	Gp = $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$	Tf = 24min	$G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$

Tabela G1 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos imediatamente após a mistura rápida

Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000  $\text{s}^{-1}$ ; Tp e Gp variáveis;Tf = 24 min;  $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s1} = 8,40 \text{ cm/min}$ ;  $V_{s2} = 4,60 \text{ cm/min}$ ;  $V_{s3} = 2,01 \text{ cm/min}$ ;  $V_{s4} = 1,08 \text{ cm/min}$ 

F R A S C O	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de	$V_{s1} = 8,40 \text{ cm/min}$		$V_{s2} = 4,60 \text{ cm/min}$		$V_{s3} = 2,01 \text{ cm/min}$		$V_{s4} = 1,08 \text{ cm/min}$	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)		Coagu Lação	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)
1	16,0	POLYFLOC : 0,75	6,79	16,0	95	6,41	38	3,80	22	1,96	13
2	16,0	Amido Milho Catiônico: 2,0	6,85	12,7	73	4,83	29	2,64	17	1,23	11
3	16,0	Amido Mand. Catiônico: 1,0	6,88	5,15	29	1,26	11	1,05	9	0,883	8

Tabela G2 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 6 min após o início da floculação (início da segunda câmara hipotética de floculação)

Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000  $\text{s}^{-1}$ ; Tp e Gp variáveis;Tf = 24 min;  $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s1} = 8,40 \text{ cm/min}$ ;  $V_{s2} = 4,60 \text{ cm/min}$ ;  $V_{s3} = 2,01 \text{ cm/min}$ ;  $V_{s4} = 1,08 \text{ cm/min}$ 

F R A S C O	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de	$V_{s1} = 8,40 \text{ cm/min}$		$V_{s2} = 4,60 \text{ cm/min}$		$V_{s3} = 2,01 \text{ cm/min}$		$V_{s4} = 1,08 \text{ cm/min}$	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)		Coagu lação	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)
1	16,0	POLYFLOC : 0,75	6,87	14,5	79	6,20	37	2,90	22	2,00	19
2	16,0	Amido Milho Catiônico: 2,0	6,88	11,9	77	3,52	22	3,30	22	1,22	11
3	16,0	Amido Mand. Catiônico: 1,0	6,90	2,38	17	0,951	10	0,881	8	0,817	9



Tabela G3 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 12 min após o início da floculação (início da terceira câmara hipotética de floculação)  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis;  
 Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

F R A S C O	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de Coagu lação	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)		Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	POLYFLOC : 0,75	-	13,8	75	5,91	40	2,61	19	1,10	13
2	16,0	Amido Milho Catiônico: 2,0	-	12,6	73	4,58	32	2,69	18	1,80	17
3	16,0	Amido Mand. Catiônico: 1,0	-	2,17	16	1,23	12	0,773	10	0,809	10

Tabela G4 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes com a aplicação dos polímeros catiônicos 18 min após o início da floculação (início da quarta câmara hipotética de floculação)  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis;  
 Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

F R A S C O	PRODUTOS QUÍMICOS		pH de Coagu lação	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)		Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	POLYFLOC : 0,75	-	18,1	100	6,83	46	3,55	27	1,30	12
2	16,0	Amido Milho Catiônico: 2,0	-	14,2	88	6,07	39	2,59	18	1,20	15
3	16,0	Amido Mand. Catiônico: 1,0	-	6,48	45	3,50	23	1,56	14	0,902	11

Tabela G5 – Resultados de turbidez e cor aparente remanescentes na condição ótima de aplicação de cada polímero catiônico estudado  
 Ponto B (DSA = 16,0 mg/L); Tmr = 10 s; Gmr = 1000 s<sup>-1</sup>; Tp e Gp variáveis;  
 Tf = 24 min; Gf = 25 s<sup>-1</sup>; Vs<sub>1</sub> = 8,40 cm/min; Vs<sub>2</sub> = 4,60 cm/min; Vs<sub>3</sub> = 2,01 cm/min; Vs<sub>4</sub> = 1,08 cm/min

F R A S C O	PRODUTOS QUÍMICOS		Aplica ção do Polímero	Vs <sub>1</sub> = 8,40 cm/min		Vs <sub>2</sub> = 4,60 cm/min		Vs <sub>3</sub> = 2,01 cm/min		Vs <sub>4</sub> = 1,08 cm/min	
	Sulfato de Alumínio PA (mg/L)	Polímero (mg/L)		Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)	Turbidez (uT)	Cor Apar. (uC)
1	16,0	POLYFLOC : 0,75	3ª câmara	14,1	75	5,87	40	3,77	22	1,30	12
				12,5	70	6,74	43	2,11	21	1,20	11
2	16,0	Amido Milho Catiônico: 2,0	2ª câmara	12,7	73	6,70	42	2,10	13	1,20	13
				11,5	69	4,09	28	2,30	14	1,80	15
3	16,0	Amido Mand. Catiônico: 1,0	2ª câmara	2,96	18	1,20	7	1,09	7	0,564	6
				3,55	23	1,13	9	0,98	6	0,813	7

# ANEXO H

## COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS SÉRIES VI e VII

Gradiente de Velocidade Constante

X

Escalonamento do Gradiente de Velocidade

e Influência do Tempo de Aplicação do Polímero

---

**RESULTADOS OBTIDOS COM O POLÍMERO SINTÉTICO CATIÔNICO  
POLYFLOC CE1163 BETZDEARBORN**

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_1 = 8,40 \text{ cm/min}$

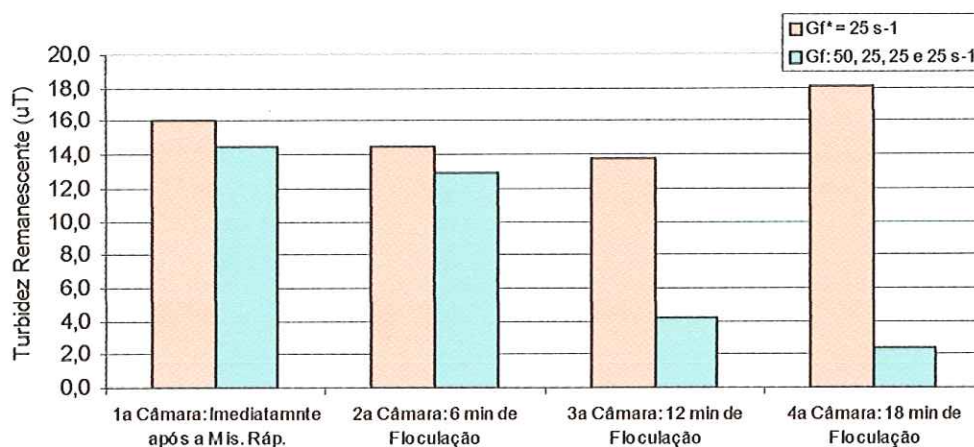


Figura H1 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163)

( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $Tmr = 10 \text{ s}$ ;  $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $Tp$  e  $Gp$  variáveis;  $Tf = 24 \text{ min}$ ;  $Gf$  variável;  $Vs_1 = 8,40 \text{ cm/min}$ )

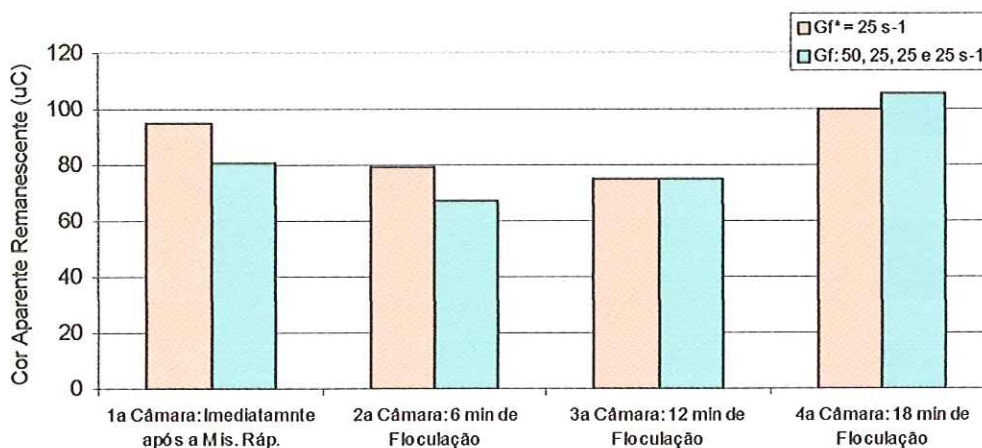


Figura H2 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiônico (Polyfloc CE1163)

( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $Tmr = 10 \text{ s}$ ;  $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $Tp$  e  $Gp$  variáveis;  $Tf = 24 \text{ min}$ ;  $Gf$  variável;  $Vs_1 = 8,40 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_2 = 4,60 \text{ cm/min}$

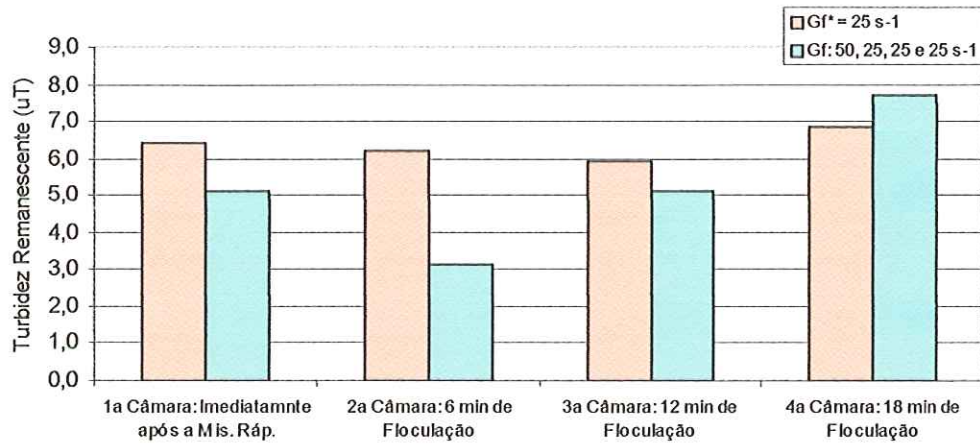


Figura H3 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiónico (Polyfloc CE1163)  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $Tmr = 10 \text{ s}$ ;  $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $Tp$  e  $Gp$  variáveis;  $Tf = 24 \text{ min}$ ;  $Gf$  variável;  $Vs_2 = 4,60 \text{ cm/min}$ )

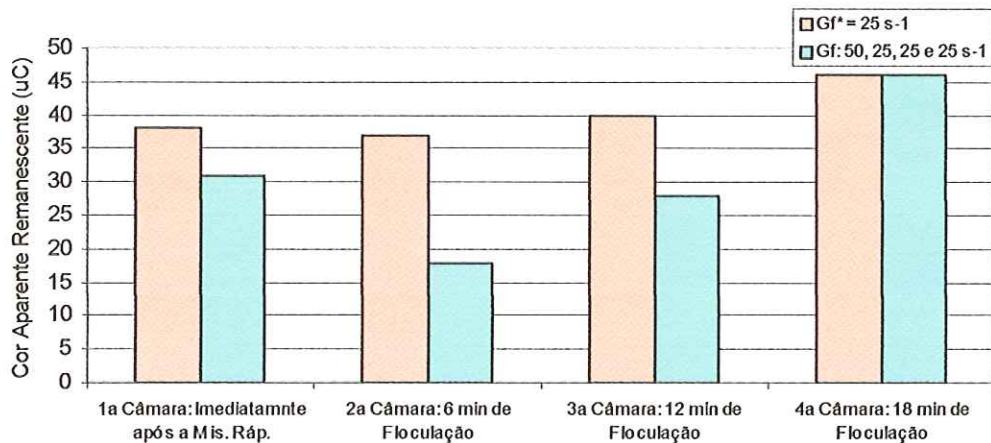


Figura H4 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiónico (Polyfloc CE1163)  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $Tmr = 10 \text{ s}$ ;  $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $Tp$  e  $Gp$  variáveis;  $Tf = 24 \text{ min}$ ;  $Gf$  variável;  $Vs_2 = 4,60 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$

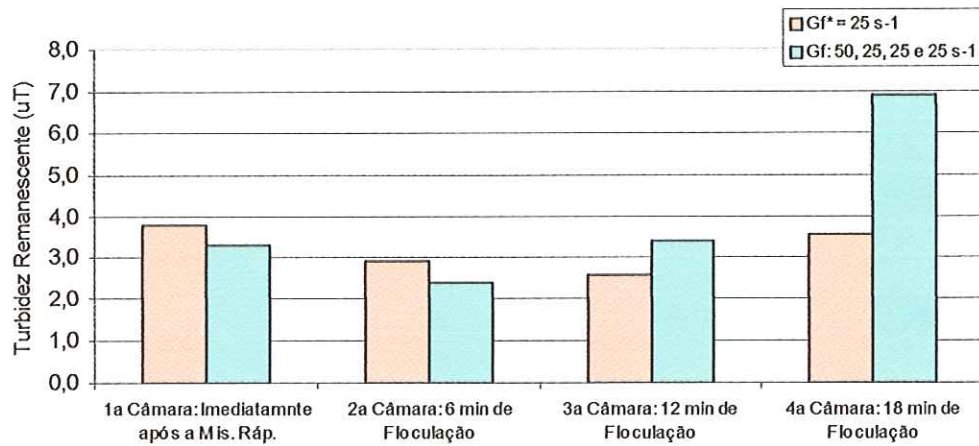


Figura H5 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiónico (Polyfloc CE1163)  
 (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  
 $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$ )

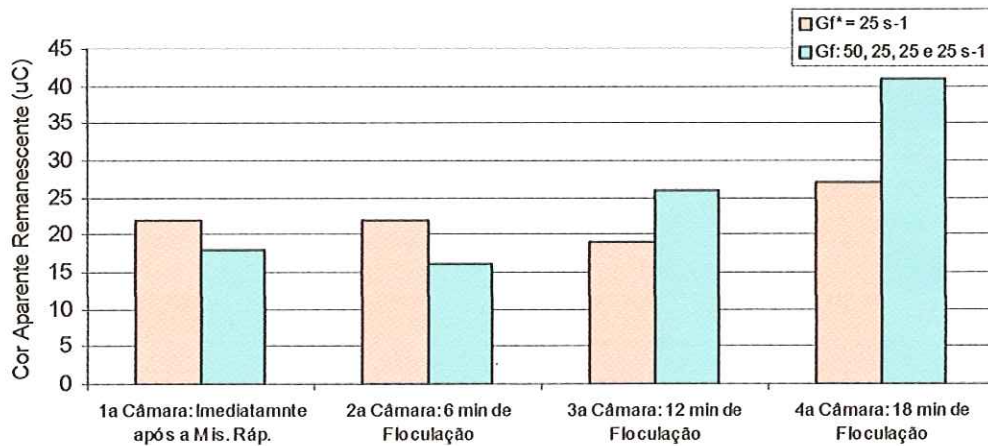


Figura H6 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiónico (Polyfloc CE1163)  
 (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  
 $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$

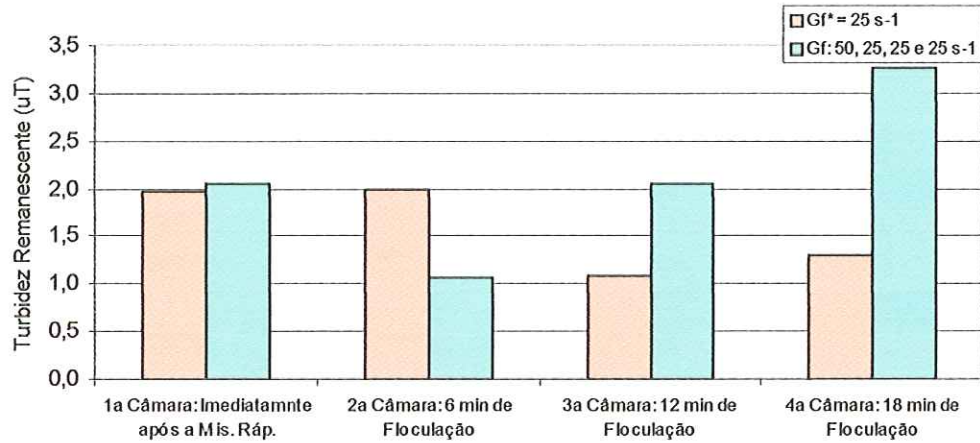


Figura H7 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiónico (Polyfloc CE1163)  
( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  
 $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$ )

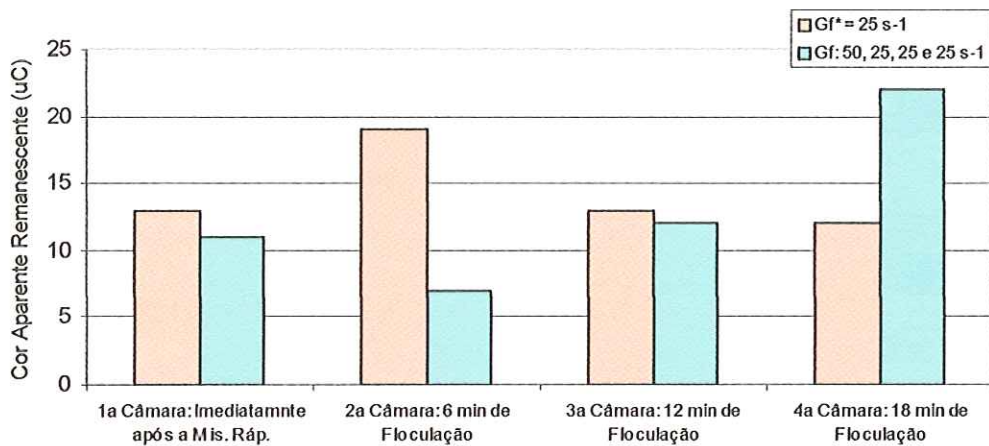


Figura H8 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do polímero sintético catiónico (Polyfloc CE1163)  
( Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  
 $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$ )

**RESULTADOS OBTIDOS COM O AMIDO DE MILHO CATIÔNICO  
(CORN PRODUCTS)**

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_1 = 8,40$  cm/min

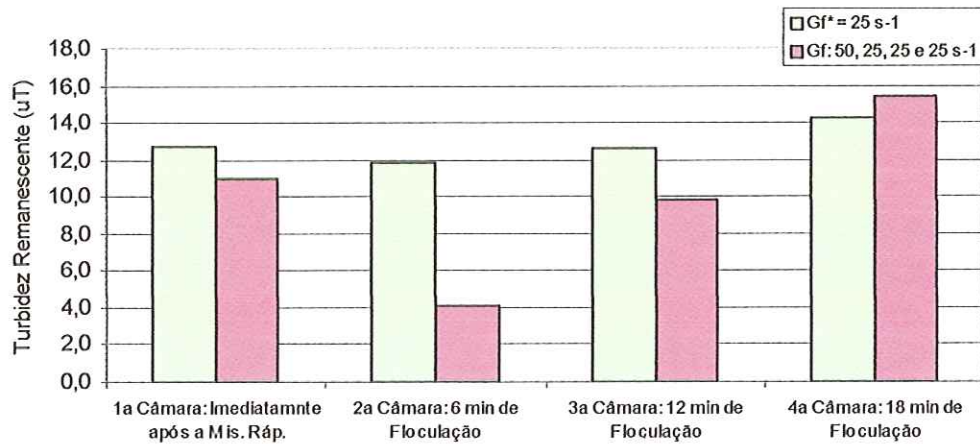


Figura H9 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10$  s;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24$  min;  $G_f$  variável;  $Vs_1 = 8,40$  cm/min)

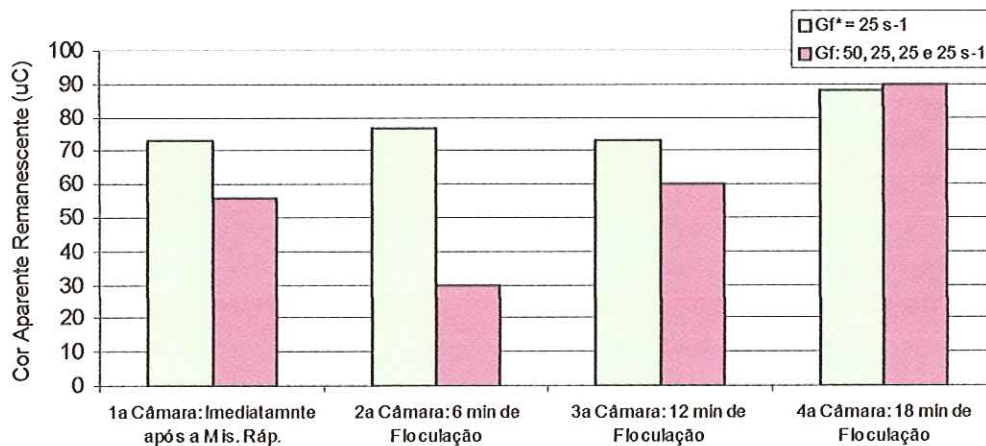


Figura H10 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10$  s;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24$  min;  $G_f$  variável;  $Vs_1 = 8,40$  cm/min)

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_2 = 4,60$  cm/min

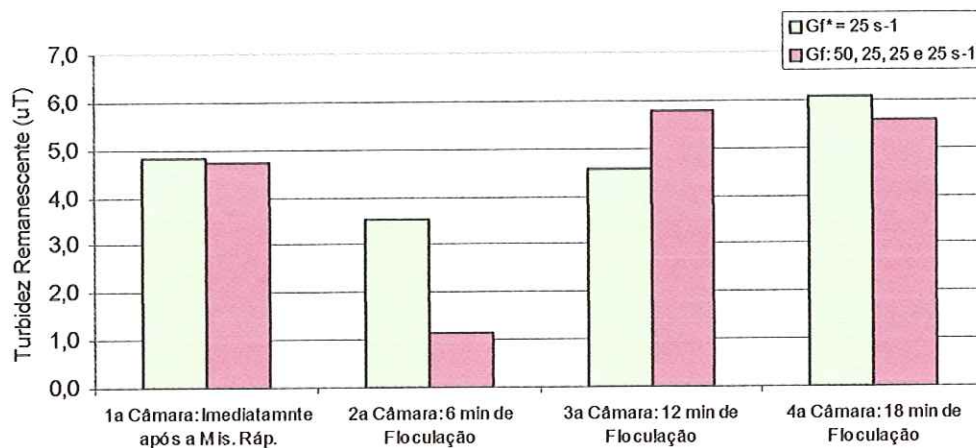


Figura H11 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $Tmr = 10$  s;  $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $Tp$  e  $Gp$  variáveis;  $Tf = 24$  min;  $Gf$  variável;  $Vs_2 = 4,60$  cm/min)

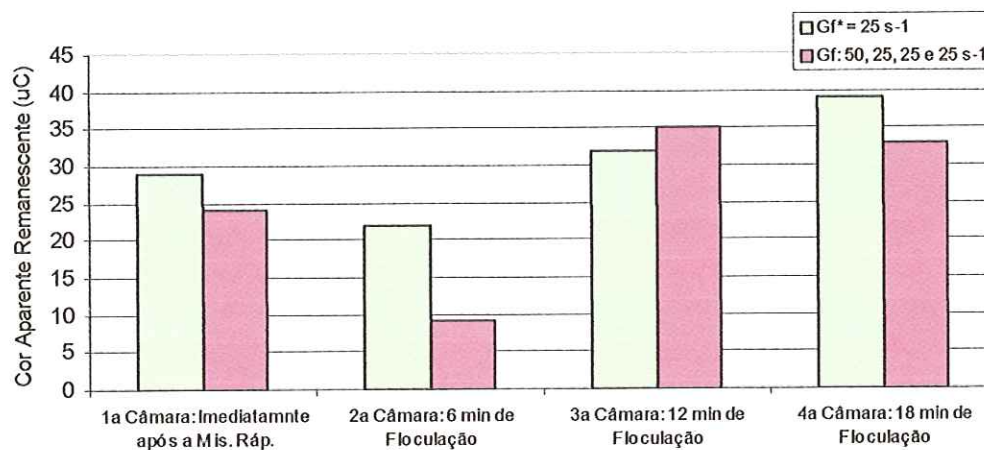


Figura H12 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $Tmr = 10$  s;  $Gmr = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $Tp$  e  $Gp$  variáveis;  $Tf = 24$  min;  $Gf$  variável;  $Vs_2 = 4,60$  cm/min)



Velocidade de Sedimentação:  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$

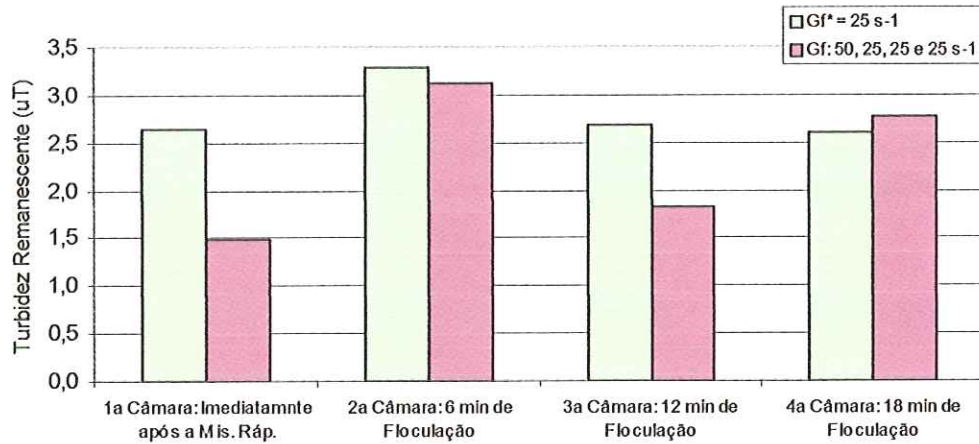


Figura H13 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$ )

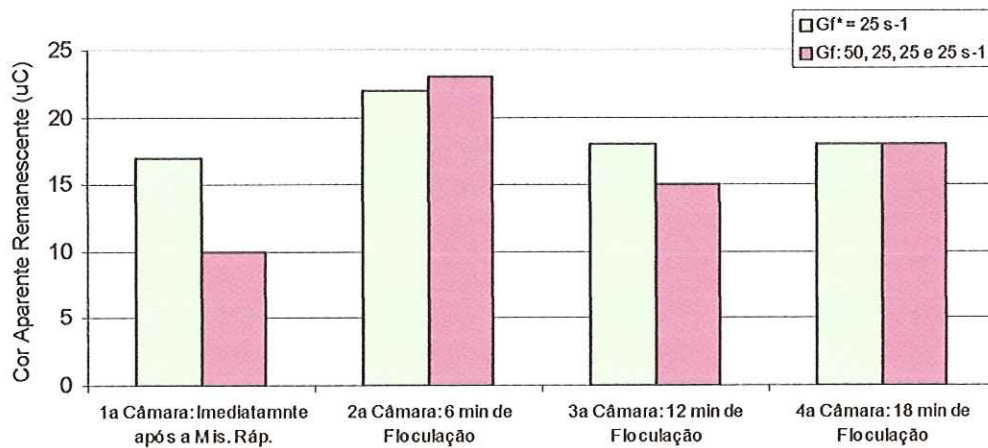


Figura H14 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$

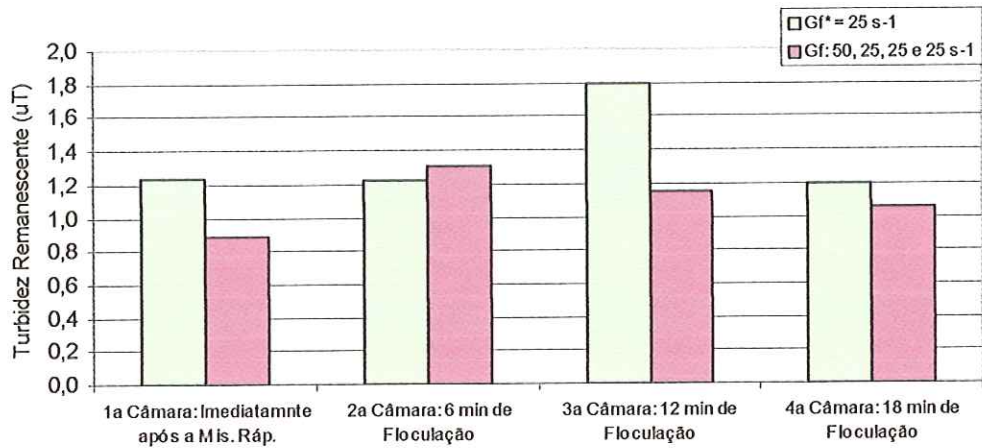


Figura H15 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$ )

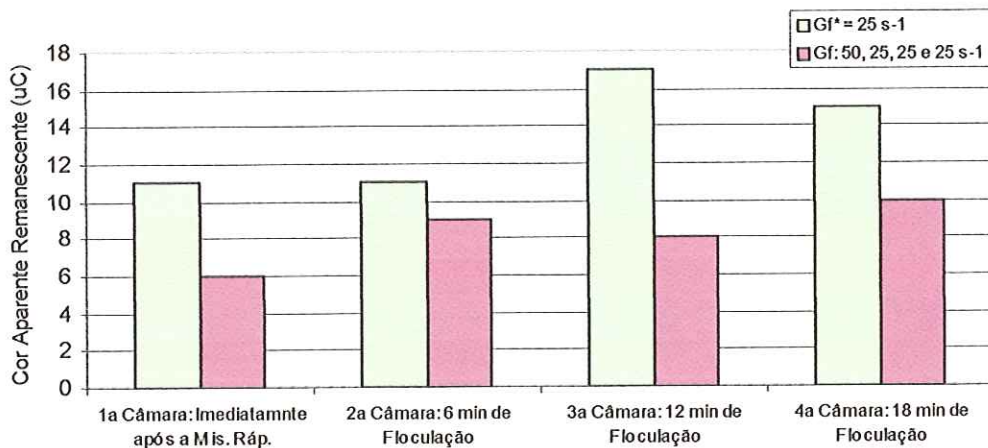


Figura H16 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de milho catiônico (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$ )

## RESULTADOS OBTIDOS COM O AMIDO DE MANDIOCA CATIÔNICO WAXY

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_1 = 8,40 \text{ cm/min}$

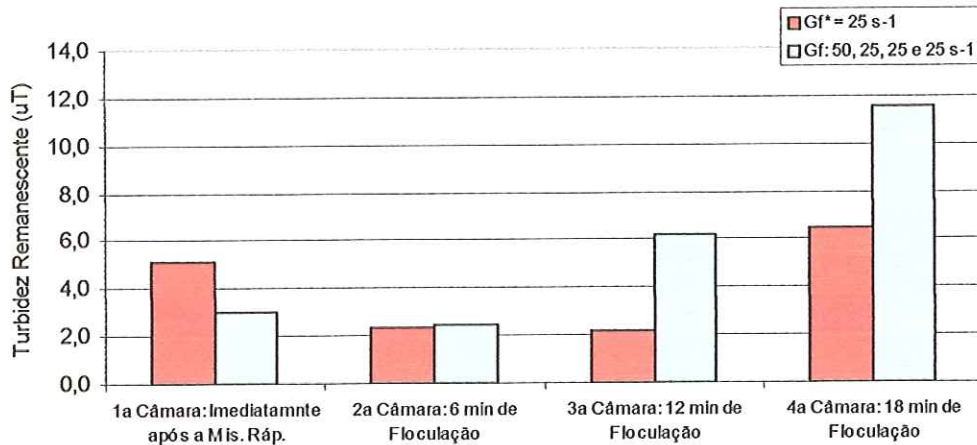


Figura H17 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico

(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_1 = 8,40 \text{ cm/min}$ )

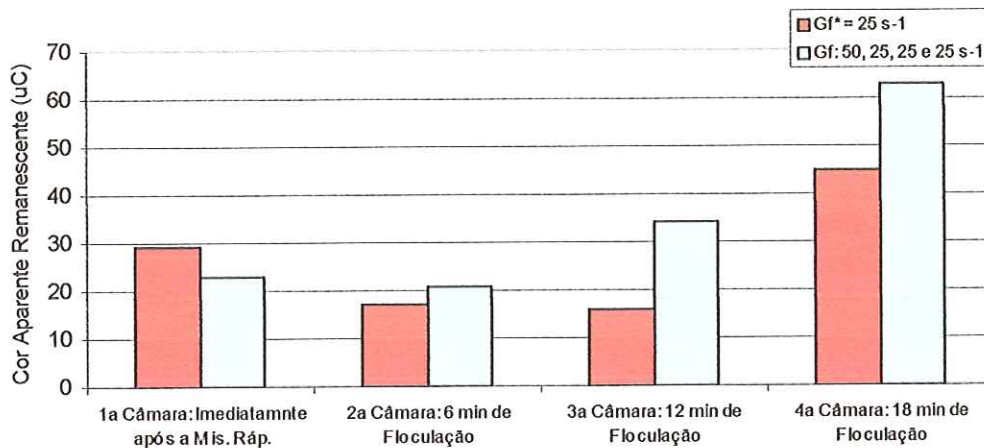


Figura H18 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico

(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_1 = 8,40 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_2 = 4,60 \text{ cm/min}$

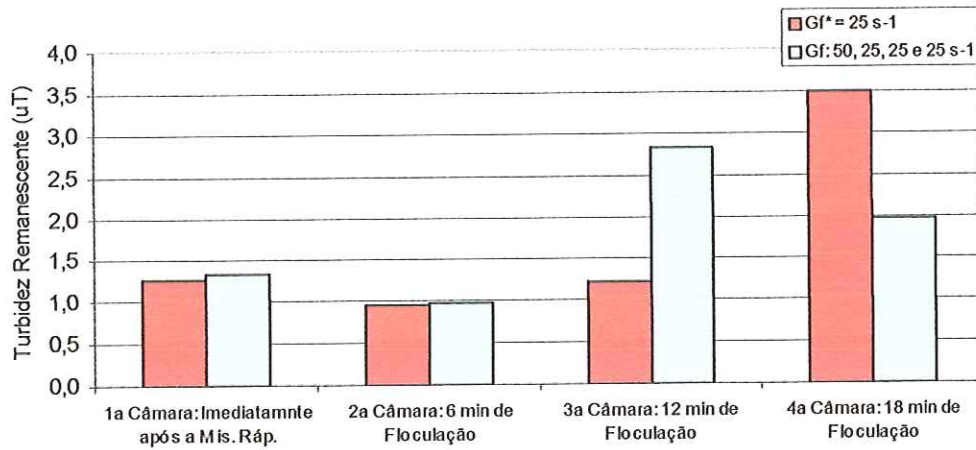


Figura H19 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico

(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_2 = 4,60 \text{ cm/min}$ )

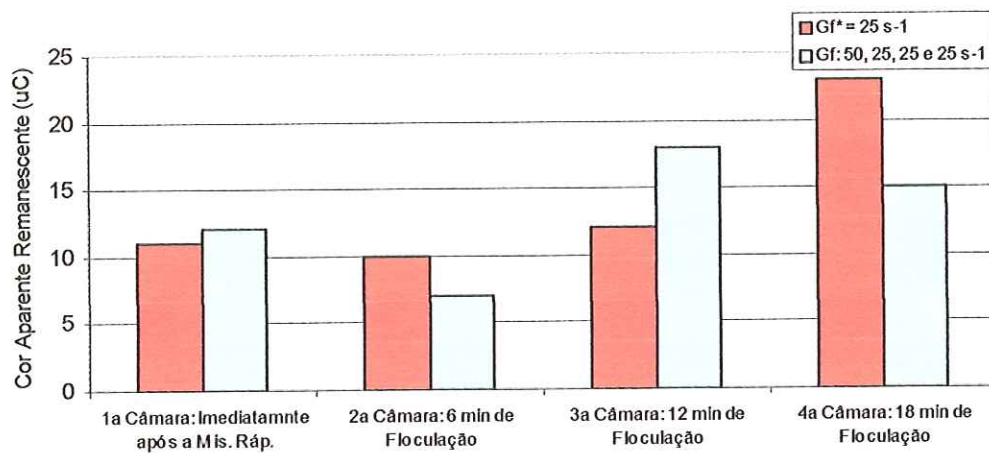


Figura H20 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico

(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_2 = 4,60 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$

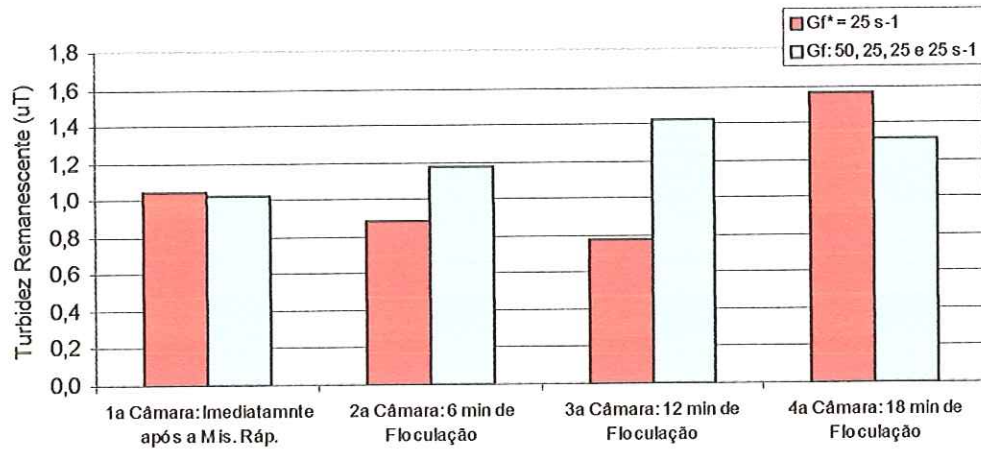


Figura H21 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiónico  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$ )

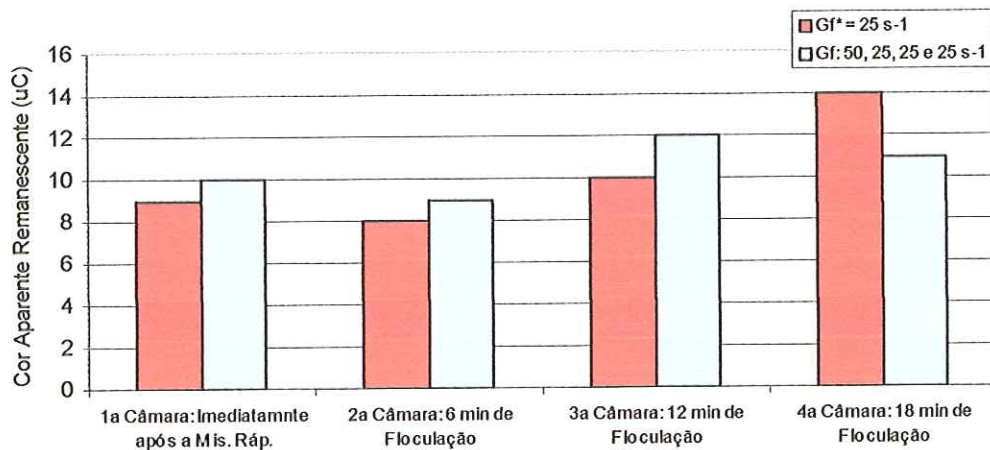


Figura H22 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiónico  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$

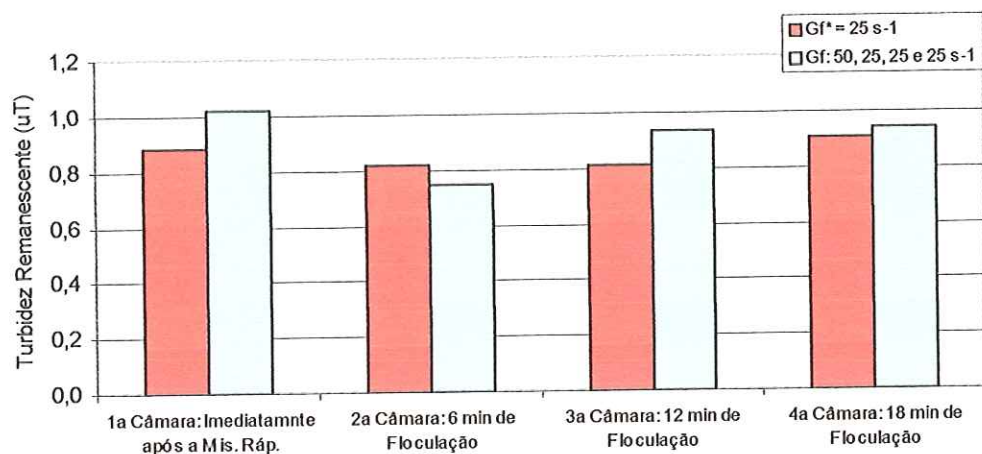


Figura H23 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$ )

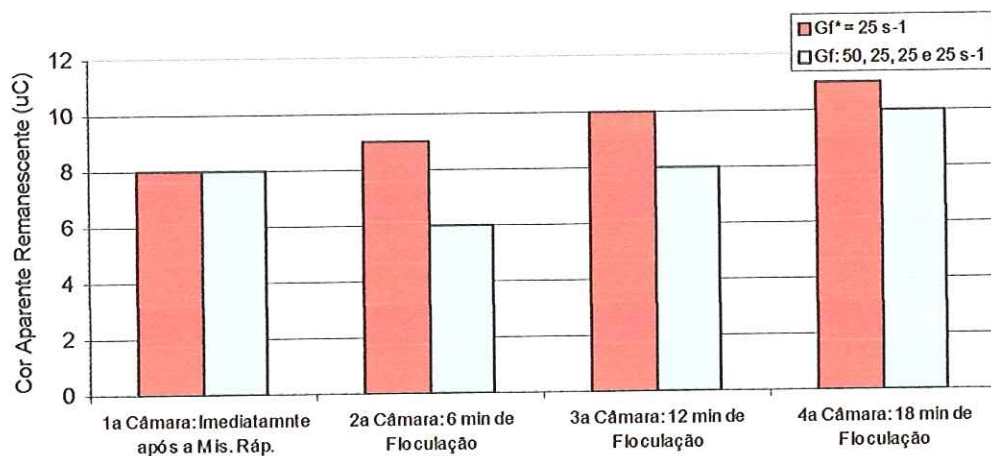


Figura H24 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação do amido de mandioca catiônico  
(Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f$  variável;  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$ )

# ANEXO I

## COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS SÉRIES VI e VII

Polímero Sintético Catiônico

X

Amidos Catiônicos



**RESULTADOS OBTIDOS COM O GRADIENTE DE VELOCIDADE ESCALONADO NA FLOCULAÇÃO ( $Gf$ : 50, 25, 25 e 25  $s^{-1}$ )**

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_1 = 8,40$  cm/min

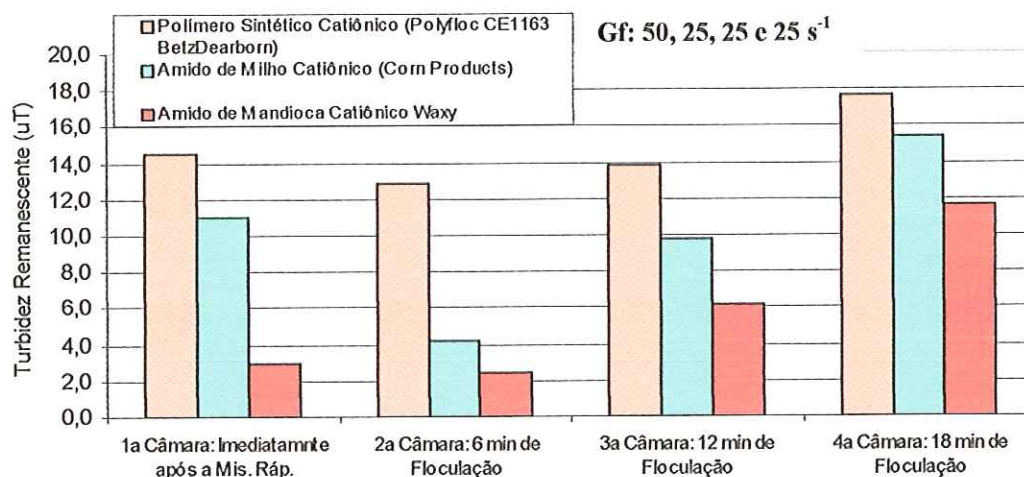


Figura 11 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $Tmr = 10$  s;  $Gmr = 1000$   $s^{-1}$ ;  $Tp$  e  $Gp$  variáveis;  $Tf = 24$  min;  $Gf$ : 50, 25, 25 e 25  $s^{-1}$ ;  $Vs_1 = 8,40$  cm/min)

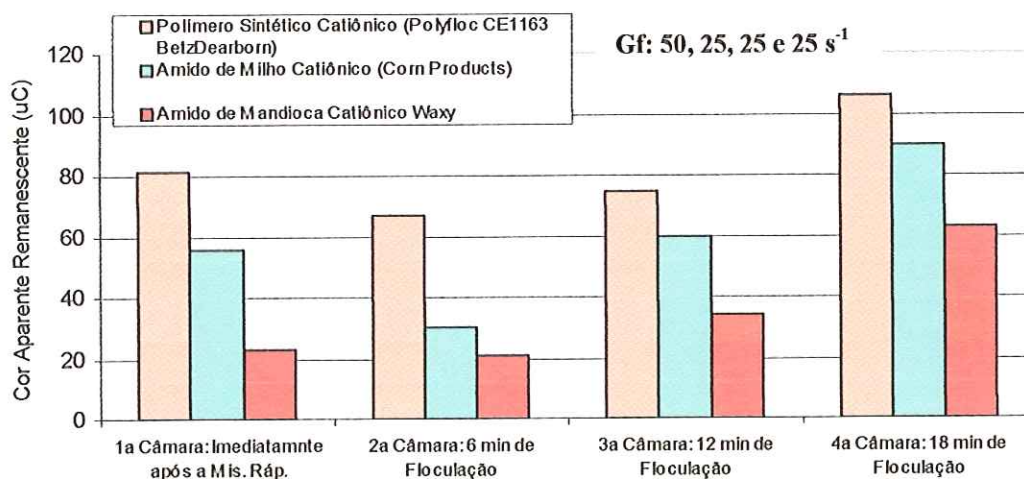


Figura 12 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $Tmr = 10$  s;  $Gmr = 1000$   $s^{-1}$ ;  $Tp$  e  $Gp$  variáveis;  $Tf = 24$  min;  $Gf$ : 50, 25, 25 e 25  $s^{-1}$ ;  $Vs_1 = 8,40$  cm/min)



Velocidade de Sedimentação:  $V_{s_2} = 4,60 \text{ cm/min}$

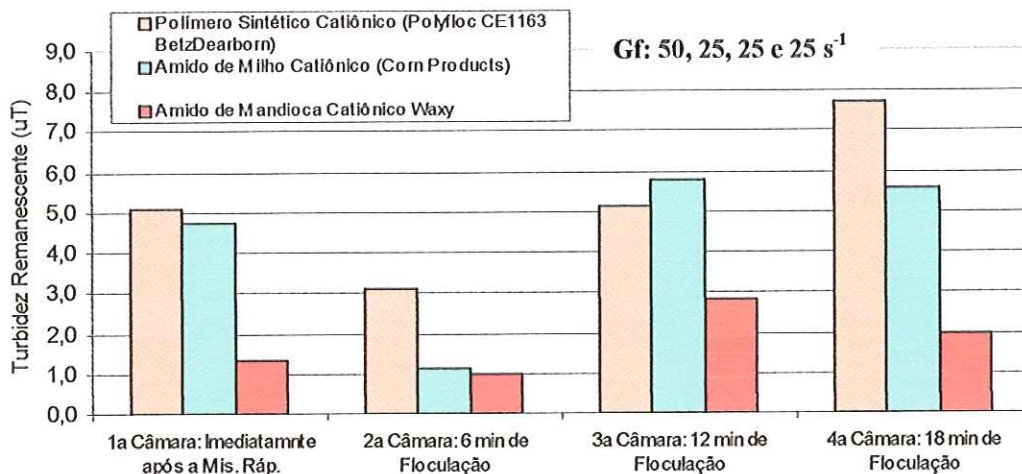


Figura I3 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f : 50, 25, 25 \text{ e } 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s_2} = 4,60 \text{ cm/min}$ )

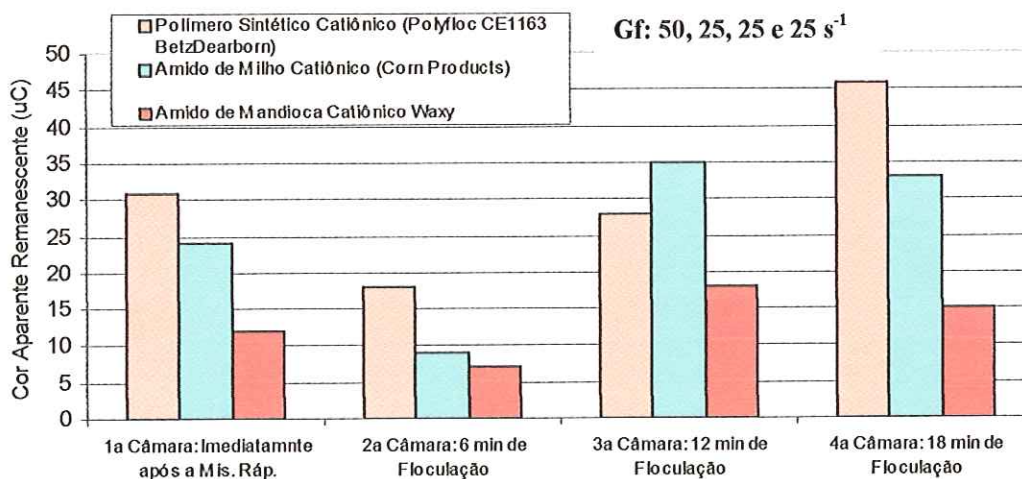


Figura I4 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f : 50, 25, 25 \text{ e } 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s_2} = 4,60 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$

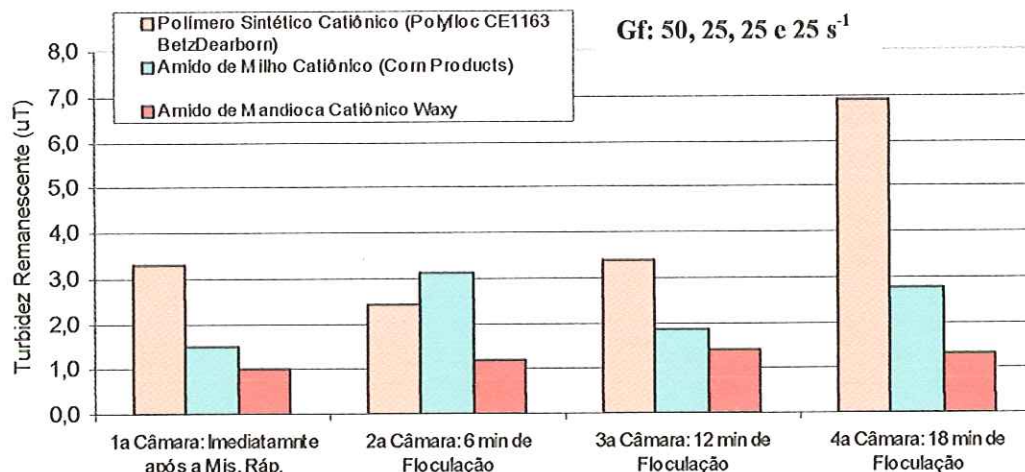


Figura 15 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f : 50, 25, 25 \text{ e } 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$ )

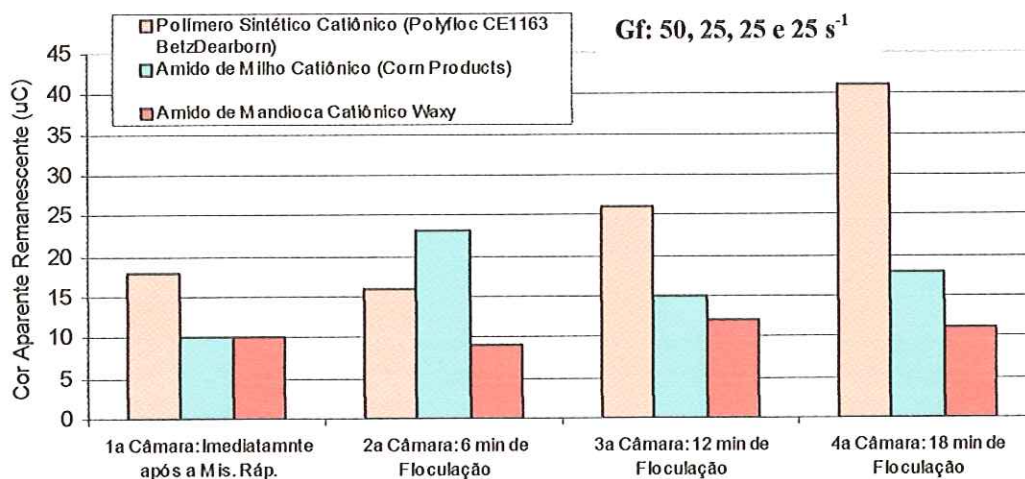


Figura 16 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f : 50, 25, 25 \text{ e } 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $Vs_3 = 2,01 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$

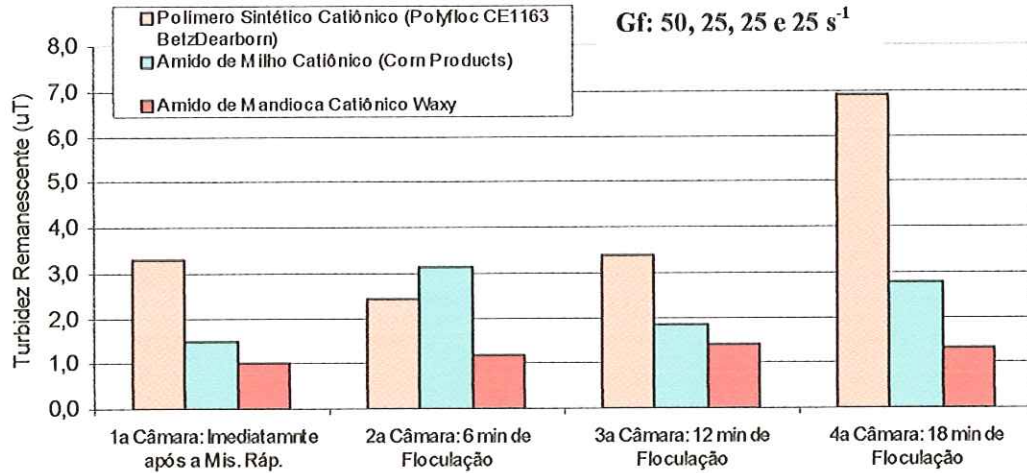


Figura 17 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f : 50, 25, 25 \text{ e } 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$ )

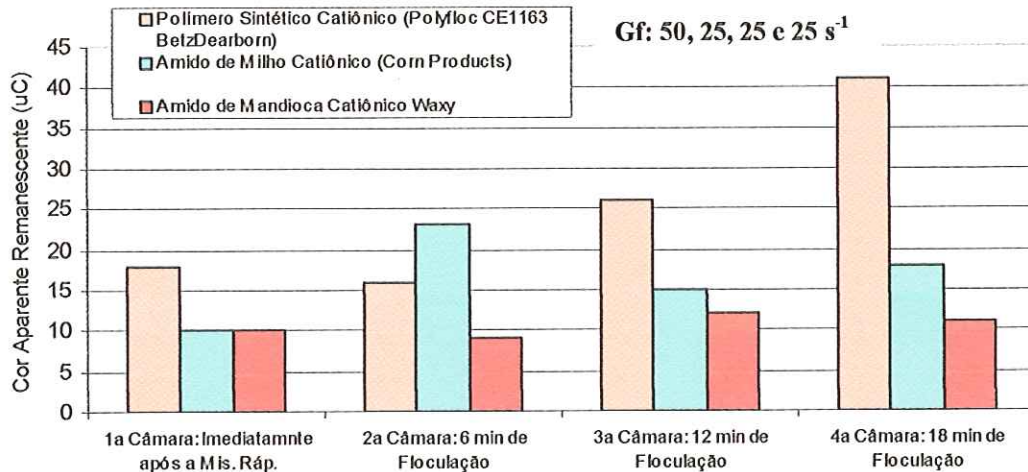


Figura 18 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f : 50, 25, 25 \text{ e } 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $Vs_4 = 1,08 \text{ cm/min}$ )

**RESULTADOS OBTIDOS COM O GRADIENTE DE VELOCIDADE  
CONSTANTE NA FLOCULAÇÃO ( $Gf^* = 25 \text{ s}^{-1}$ )**

Velocidade de Sedimentação:  $Vs_1 = 8,40 \text{ cm/min}$

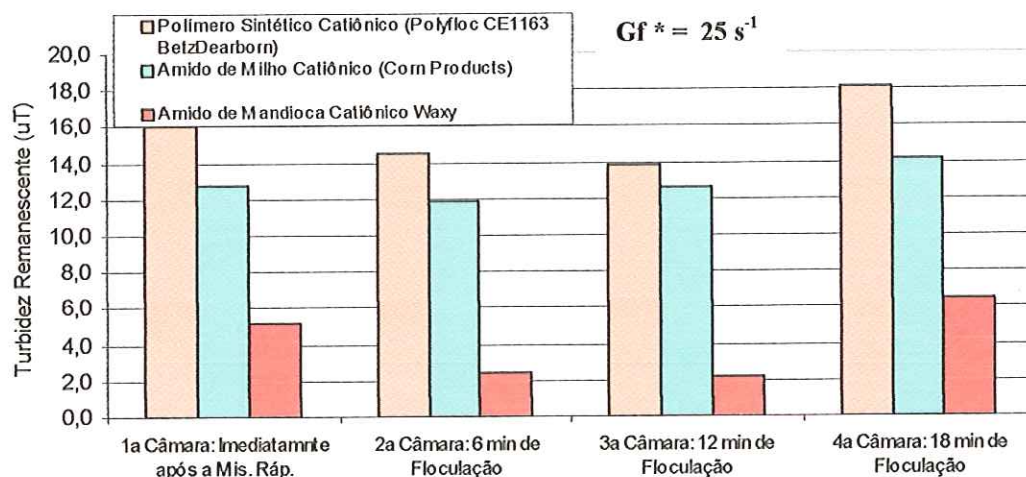


Figura I9 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $Gf^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $Vs_1 = 8,40 \text{ cm/min}$ )

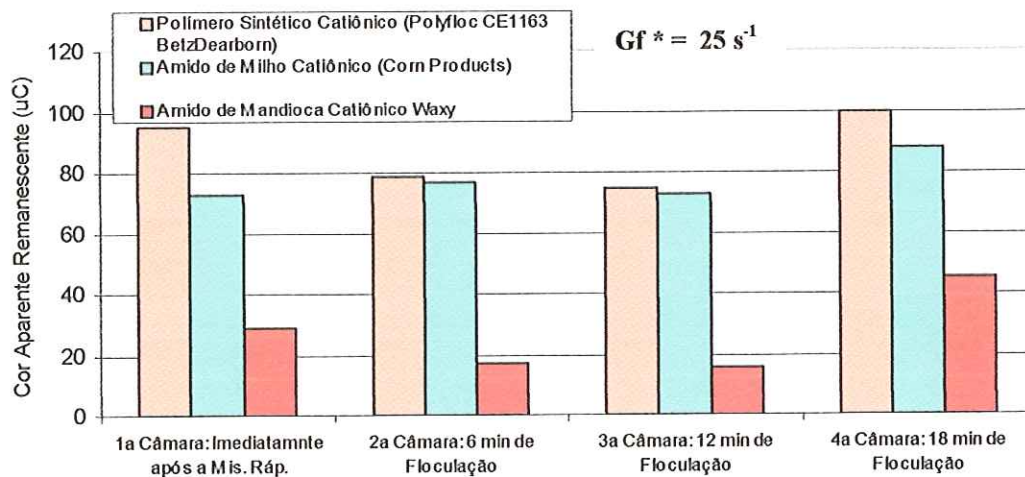


Figura I10 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $Gf^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $Vs_1 = 8,40 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $V_{s2} = 4,60 \text{ cm/min}$

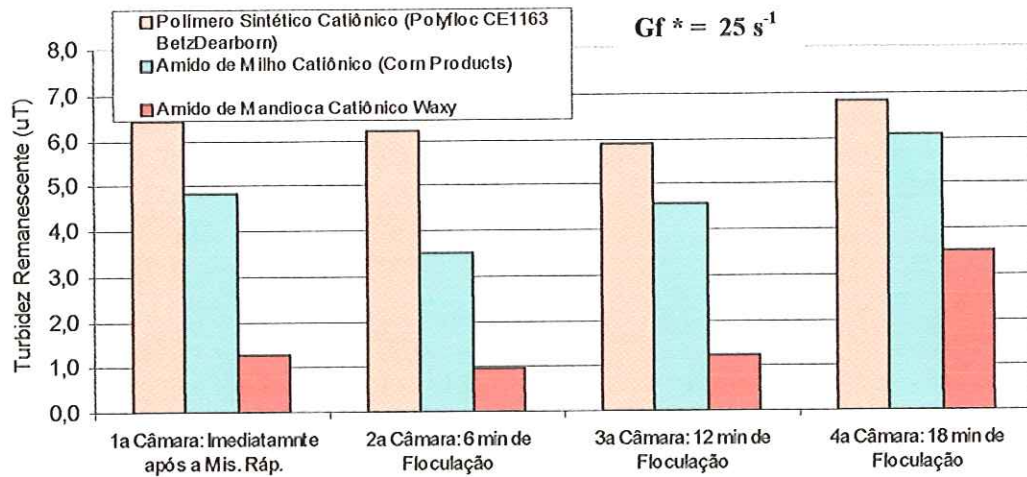


Figura I11 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s2} = 4,60 \text{ cm/min}$ )

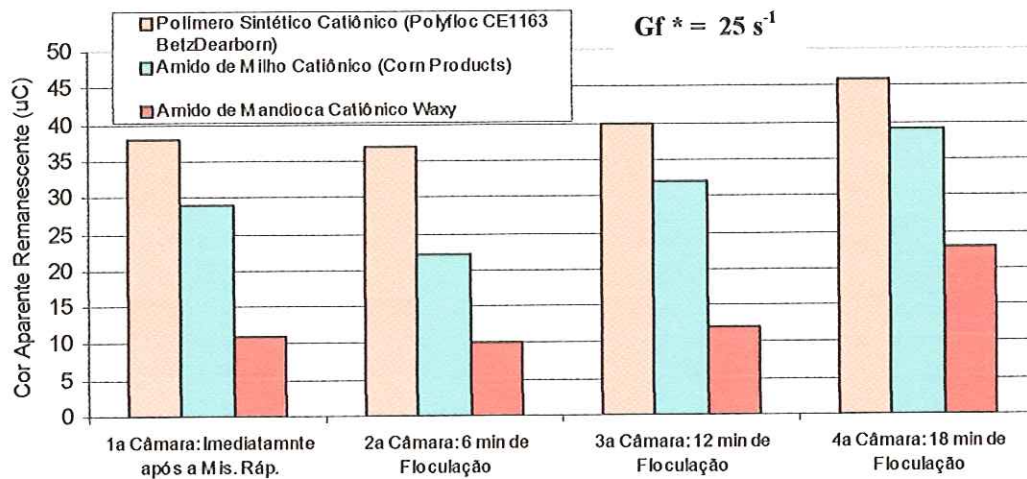


Figura I12 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s2} = 4,60 \text{ cm/min}$ )

Velocidade de Sedimentação:  $V_{S_3} = 2,01 \text{ cm/min}$

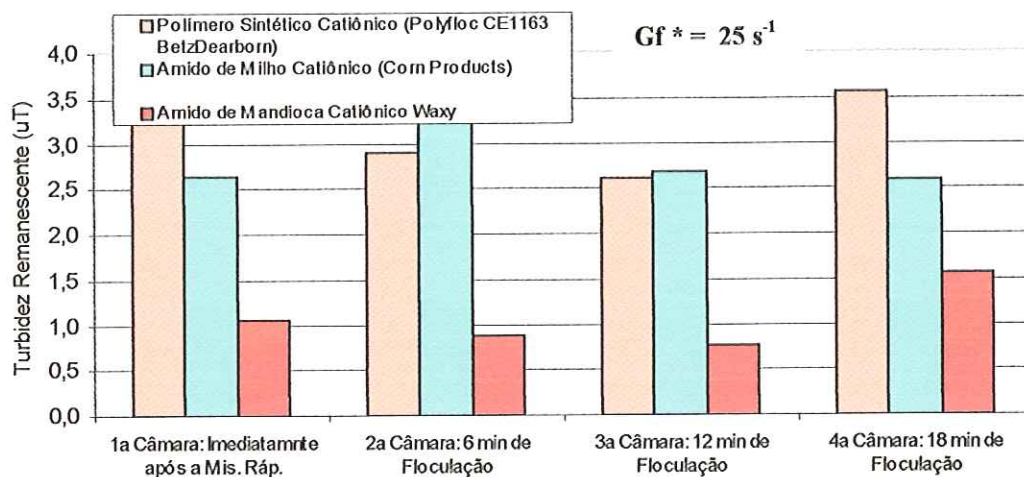


Figura I13 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{S_3} = 2,01 \text{ cm/min}$ )

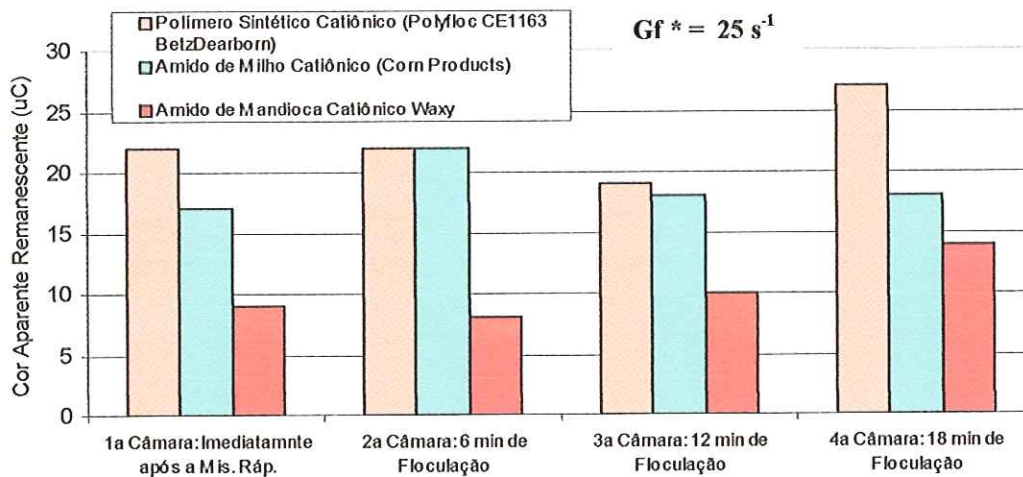


Figura I14 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{S_3} = 2,01 \text{ cm/min}$ )



Velocidade de Sedimentação:  $V_{s_1} = 1,08 \text{ cm/min}$

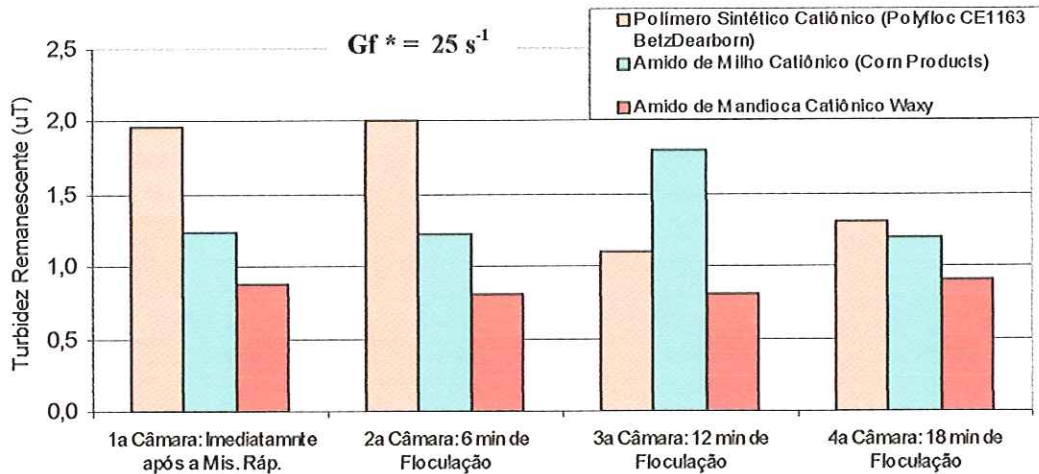


Figura I15 – Turbidez remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s_1} = 1,08 \text{ cm/min}$ )

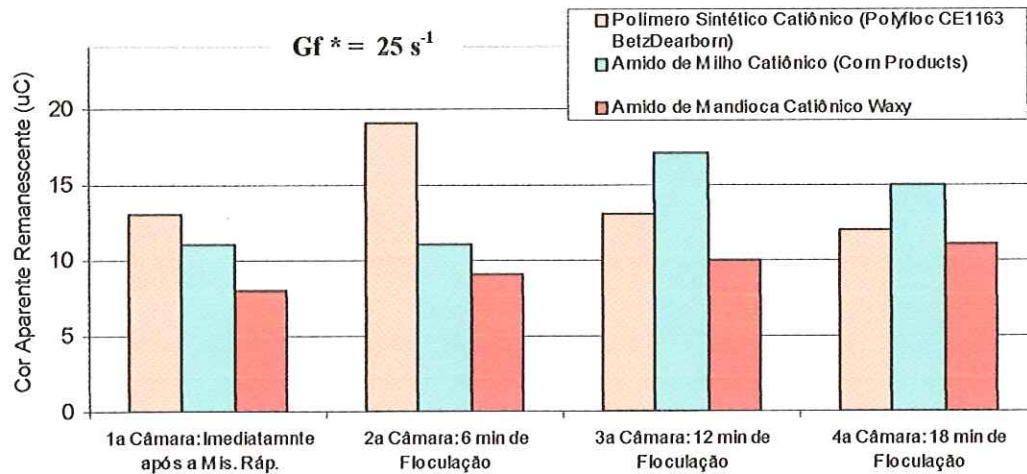


Figura I16 – Cor aparente remanescente em função do tempo de aplicação dos polímeros na flocculação (Ponto B: DSA = 16,0 mg/L;  $T_{mr} = 10 \text{ s}$ ;  $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_p$  e  $G_p$  variáveis;  $T_f = 24 \text{ min}$ ;  $G_f^* = 25 \text{ s}^{-1}$ ;  $V_{s_1} = 1,08 \text{ cm/min}$ )

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (1990). *AWWA – Water Quality and Treatment – A handbook of Community Water Supplies*, 4.ed. , USA, Mcgraw-Hill Inc.
- AMIRTHARAJAH, A. ; MILLS, K.M. (1982) Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. *JAWWA*, v.74, n..4, p.210-216, Apr., USA.
- AMIRTHARAJAH, A. (1989). The Mechanisms os Coagulation. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE COAGULAÇÃO E FILTRAÇÃO DIRETA, 1., São Carlos, 1989. *Anais*.
- ARGAMAN, Y. ; KAUFMAN, W.J. (1970). Turbulence and flocculation. (1970). *Jour. Envir. Engrg. ASCE*, v.96, n.SA2, p.223-241, Apr., USA.
- AWWA Research Foundation Report (1976). Jar-Test Evaluation of Polymers. *JAWWA*, v.68, p. 46-54, Jan., USA.
- BANCHE, D.H., JOHNSON, C.; PAPAVASILOPOULOS, E; RASOOL, E.;McGILLIGAN, F.J. (1999). Sweep Coagulation: Structures, Mechanisms and Practice. *J.Water SRT – AQUA*, v.48, n.5, p. 201-210, Oct., UK.
- BLACK, A .P. ; WILLEMS, D.G. (1961).Eletrophoretic Studies of Coagulation for Removal Organic Color. *JAWWA*. v.53, n..5, p.589-604, May, USA.
- BLACK, A .P. ; HANNAH, S.A. (1961). Eletrophoretic Studies of Turbity Removal by Coagulation with Aluminum Sulphate. *JAWWA*. v.53, n..4, p.439-451, Apr., USA.
- BLACK, A .P. ; CHRISTMAN, R.F. (1963). Characteristics of Colored Surfaces Waters. *JAWWA*. v.55, n.6, p.753-770, Jun., USA.
- BOTARO, V.R. (1992). *Análise e caracterização por métodos físico-químicos da lignina do bagaço de cana-de-açúcar obtida pelo processo de acetossolve*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BRANCO, S. M. (1989). Considerações sobre a nova legislação Brasileira de Águas. *Revista DAE*, v.49, n.157, p. 185-187, out-dez, Brasil.



- BRATBY, J.R.; MILLER, M.W.; MARAIS, G.V.R.(1977). Design of flocculation systems from batch test data. *Water SA*, v.3, n.4, p.173-182, Oct., UK.
- BRATBY, J.R. (1981). Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. *JAWWA*, v. 73, n.6, p.318-325, Jun., USA.
- BRITO, S.A.(1998). *Influência da velocidade de sedimentação na determinação dos coeficientes de agregação e ruptura durante a floculação*. São Carlos. 189p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CAMP, T.R.; STEIN, P.C. (1943). Velocity gradients and internal work in fluid motion. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, v.30, n.4, p.219-237, Oct., USA.
- CAMP, T.R. (1953) - Flocculation and flocculation basins. *ASCE Transactions*, v.120, p.1-16, USA.
- CAMPOS, J.R. (1972). *Ensaio sobre a aplicação de polieletrólitos na floculação de águas para abastecimento*. São Carlos, 97p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CAMPOS, J.R. (1980). *Emprego do amido de batata como auxiliar de floculação de águas de abastecimento*. São Carlos, 179p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CAMPOS, J.R. ; DI BERNARDO, L. (1991). *Uso de polimeros naturales en el tratamiento de aguas para abastecimiento*. Cali, Colombia, CINARA.
- CAMPOS, L.C. (1992). *Influência das características geométricas do agitador mecânico de paletas giratórias paralelas ao eixo vertical na potência introduzida na água*. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- CARR, M.E. ; BAGBY, M.O. (1981) *Preparation of Cationic Starch Ether: A Reaction Efficiency Study*. v.33, p.310-312, *Starch / Stärke*.
- CARR, M.E. (1994). *Preparation of Cationic Starch Containing Quaternary Ammonium Substituents by Reactive Twin-Screw Extrusion Processing*. v.54, n.12, p.1855-1861, *J. Appl. Polym. Sci.*

- CLARK, M.M. (1985). Critique of Camp and Stein's RMS velocity gradient. *Jour. Envir. Engrg.* - ASCE, v.111, n.6, p.741-754, Dec., USA.
- CLEASBY, J.L. (1984). Is velocity gradient a valid turbulent flocculation parameter? *Jour. Envir. Engrg.* - ASCE, v.110, n.5, p.875-897, Oct., USA.
- COSMETIC & TOILETRIES (1999). *Novas Matérias-Primas*, 11, p.52.
- COSTA, E.R.H (1992). *Estudo do uso de polímeros naturais como auxiliares de floculação com base no diagrama de coagulação do sulfato de alumínio*. São Carlos, 208p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DI BERNARDO, A . S. (1997). *Influência do método de preparação da solução de polímeros naturais, amido natural e amido catiônico, na eficiência da floculação quando utilizados como auxiliares*. São Carlos. / Relatório 02 de Iniciação Científica , FAPESP.
- DI BERNARDO, L.; GUIMARÃES, A.F.; MENDES, C.G.N. (1987) Coagulação, Floculação de Água com Turbidez ou Cor Elevada. *Revista DAE*. v.47, n.150, p.227-239, Brasil.
- DI BERNARDO, L. (1993). *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. v.1., 1. ed., Rio de Janeiro, ABES.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.S., BRITO, S. A., MOREIRA, A .N.R. (1998). Optimización de la Mezcla Rápida y Tipo de Coagulantes Químicos. In: SEMINARIO SOBRE OPTIMIZACIÓN DE PLANTAS DE POTABILIZACIÓN. Lima, Peru.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A. (1998). Utilización de Polímeros Sintéticos Y Naturales como ayudantes de Floculación – Una nueva Metodología en base al Diagrama de Coagulación. In: SEMINARIO SOBRE OPTIMIZACIÓN DE PLANTAS DE POTABILIZACIÓN. Lima, Peru.
- FLECHE, G. (1985) Starch: Conversion Technology. In: Chemical Modification and Degradation of Starch. p. 73-97. Illinois, Deci Corporation.
- FROLLINI, E.; REED, W.F.; MILAS, M.; RINAUDO, M. (1995). Polyelectrolytes from polysaccharides: selective oxidation of guar-gum – a revisited reaction. *Carboydr. Polym.*, v.27, p.129-135.
- GREGORY, J. (1978). Effects of Polymers on Colloid Stability. In: IVES, S.K (1978). *The Scientific Basis Of Flocculation*. p. 101-130. The Netherlands, SIJHOFF & NOORDHOFF.

- GREGORY, J. (1985). *Polymeric flocculants*. In: FINCH, C.A. Chemistry and tecnologia of water-soluble polymers. p.307-308. 2.ed. New York, Plenum Press.
- HUDSON, H.E. (1981). *Water Clarification Processes – Practical Design and Evaluation*. Gainesville, Florida, USA, Van Nostrand Reinhold Company.
- JANE, J. (1995). *Starch Properties, Modifications, and Applications*. v.A32, n.4, p.751-757, Pure Appl. Chem.
- LIPATOV, S.Y. (1988). Colloid chemistry of polymers. In: JENKINS, A.D. *Polymer Science Library*. v. 7, New York, Elsevier.
- LYKEMA, J. (1978). Surface Chemistry of Colloids in Connection with Stability . In: IVES, S.K (1978). *The Scientific Basis Of Flocculation*. p.3-36. The Netherlands, SIJHOFF & NOORDHOFF.
- MARINELLI, P. S. (1999). *Aplicação de Amidos Catiônicos de Milho como Auxiliares de Flocculação no Tratamento de Água*. São Carlos, v.1. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, Universidade de São Paulo.
- MENDES, C.G.N. (1989). *Estudo de Coagulação e Flocculação de Águas Sintéticas e Naturais com Turbidez e Cor variáveis*. São Carlos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- OLPHEN, V. H. (1977). *Clay Colloid Chemistry*. 2 ed. USA, Wiley- Interscience Publishers John Wiley & Sons.
- O’MELIA, C.R. (1978). Coagulation in Water Treatment. In: IVES, S.K (1978). *The Scientific Basis Of Flocculation*. p.209-265. The Netherlands, SIJHOFF & NOORDHOFF.
- ORTHOEFER, F.T. (1985). *Corn Starch Modification and Uses*. Illinois, USA, A.E. Staley Manufacturing Co.
- PÁDUA, V.L. (1994). *Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de flocculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de ensaios em reatores estáticos*. São Carlos. 165p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- PÁDUA, V.L.; DI BERNARDO, L.; LIBÂNIO, M. (1998). Optimización de Gradientes de Velocidad en la Floculación. In: SEMINARIO SOBRE OPTIMIZACIÓN DE PLANTAS DE POTABILIZACIÓN. Lima, Peru.
- PAIXÃO, G.C. (1996). *Empregos de polímeros sintéticos como auxiliares de floculação com base no diagrama de coagulação*. São Carlos, v.1. 185p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROBECK, G.G. (1972). *Harzards vs. Public Health Benefits os Polyelectrolytes*. In: AWWA SEMINAR PROCEEDINGS: Polyelectrolytes – Aids to better Water Quality. p.I-01 I-18. Chicago, Illinois, USA.
- RUBIN, A. J. (1974). *Chemistry of Water Supply – Treatment and Distribution, USA*, Ann Arbor Science Publishers Inc.
- RUTEMBERG, M.W. & SOLAREK, D. (1984). *Starch: Chemistry and Technology*. 2.ed., p.313-367, Orlando, USA, Academic Press.
- SINGLEY, J.E. (1972). *Theory and Mecanisms of Polyelectrolytes as Coagulant Aids*. In: AWWA SEMINAR PROCEEDINGS: Polyelectrolytes – Aids to better Water Quality. p.II-01 a II-13. Gainesville, Florida, USA.
- STUMM, W. & O'MELIA, C.R. (1968). Stoichiometry of Coagulation. *JAWWA*. v.60, n..5, p.514-539, May, USA.
- SWIFT, G. (1994). Water-soluble polymers. *Polym. Degrad. Stabil.*, v.45, p.215-231.
- SWINKELS, J.J.M. (1985). *Starch: Converting Technology*. In: Sources of Starch, Its chemistry and physics. The Netherlands, AVEBE.
- TAMBO, N. & WATANABE, Y. (1979a). Physical Characteristics of Floccs I: The Floc Density Function and Alum Floc. *Water Research*, v.13, p.409, England.
- TAMBO, N. & WATANABE, Y. (1979b). Physical Aspects of Flocculation Process I: Fundamental Treatise. *Water Research*, v.13, p.441, England.
- TAMBO, N. & WATANABE, Y. (1979c). Physical Aspects of Flocculation Process II: Contact Flocculation. *Water Research*, v.13, p.441, England.
- TAMBO, N. & HOZUMI, H. (1979). Physical Characteristics of Floccs II: Strength of Flocc. *Water Research*, v.13, p.421, England.

- WEBER, W.J. (1972), *Physicochemical Processes for Water Quality Control*. p. 82 a 89. Canada, John Wiley & Sons Inc.
- WILKE, O.; MISCHNICK, P. (1995). Analysis of cationic starches: determination of substitution pattern of O-(2-hydroxy-3-trimethylammonium) propyl ethers. *Carbohydr. Res.*, v.275, p.309-318.
- WILLIAMS, R.A. (1994). *Characterization of process dispersions*. In: *Colloid and surface engineering: application in the process industries*. 2.ed. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd.
- WURZBURG, O.B. (1986). *Properties and Uses for Modified Starches*. Florida, USA, Crc Press Inc.
- YOKOSAWA, M.M. (1996). *Atuação de polímeros na estabilização de Dispersões de alumina*. São Carlos, 1996. v.1. 109p. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em “Ciência e Engenharia de Materias”, Universidade de São Paulo.