



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**SANITÁRIA**

**HUGO MOZER BARROS EUSTÁQUIO**

**ENSAIOS DE TRATABILIDADE APLICADOS A DETERMINAÇÃO DE  
PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DE PROCESSOS DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA DE MANANCIAL EUTROFIZADO**

**Natal**  
**2010**

Hugo Mozer Barros Eustáquio

**ENSAIOS DE TRATABILIDADE APLICADOS A DETERMINAÇÃO DE  
PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DE PROCESSOS DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA DE MANANCIAL EUTROFIZADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Calado Araújo  
Co-orientador: Prof. Dr. Cícero Onofre de Andrade Neto

Natal

2010

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central  
Zila Mamede. Divisão de Serviços Técnicos

Eustáquio, H. M. B..

Ensaio de tratabilidade aplicados a determinação de parâmetros para dimensionamento de processos de tratamento de água de manancial eutrofizado/ Hugo Mozer Barros Eustáquio. – Natal, 2010.

Orientador : André Luis Calado Araújo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.  
Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

HUGO MOZER BARROS EUSTÁQUIO

**ENSAIOS DE TRATABILIDADE APLICADOS A DETERMINAÇÃO DE  
PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DE PROCESSOS DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA DE MANANCIAL EUTROFIZADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. André Luis Calado Araújo – Orientador

---

Dr. Cícero Onofre de Andrade Neto – Co-Orientador

---

Dr. Luiz Pereira de Brito – Examinador UFRN

---

Dr. José Capelo Neto – Examinador Externo UFC

Natal, 17 de Dezembro de 2010.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida a qual possibilitou a dedicação exclusiva aos estudos.

Ao CNPQ que através de um projeto de pesquisa possibilitou o custeio das diárias em campo e a compra de equipamentos.

À CAERN por gentilmente ter concedido a utilização das dependências da ETA de Gargalheiras.

Ao programa de pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela oportunidade de fazer parte deste seletivo grupo de discentes.

A todos os funcionários e professores do programa que se empenharam em fornecer o suporte de conteúdo e de estrutura para a minha formação.

Ao Professor André Luis Calado Araújo pelas orientações e companheirismo desde os tempos da graduação. Ao professor Cícero Onofre de Andrade Neto pelas suas contribuições sempre presentes em suas aulas.

Ao Professor Marco Calazans companheiro de pesquisa, professor pessoal e grande amigo em todas as horas.

Aos amigos do IFRN, Rinaldo Fernandes, Larissa Caroline e Mayra Bezerra pela contribuição em campo e laboratório.

A minha família: meus pais, Maria da Glória e Moisés Caetano e minha irmã, Hígia Mara, compreensíveis me direcionaram sempre a colocar os estudos em primeiro plano.

Em especial a minha noiva, Daniella Lago, a quem devo o meu amor, em todo tempo foi minha inspiração e motivação, com seu exemplo de perseverança nos estudos e prazer em ensinar.

E a Deus, o autor de tudo, fonte de toda a força e sempre fiel as suas promessas....

*“Onde estão escondidos os  
tesouros da natureza de cada  
um dos seres humanos se não  
no seu próprio interior?”*

## RESUMO

A eutrofização é um processo cada vez mais presente nos mananciais situados no nordeste brasileiro. Entre as principais conseqüências destas alterações nos níveis tróficos da água de um manancial destaca-se o acréscimo de complexidade ao tratamento para potabilização. Mediante a estas considerações, este trabalho teve como objetivo definir, em escala de laboratório, produtos e condições operacionais a serem empregadas em etapas de tratamento utilizando água bruta do açude Gargalheira, RN, Brasil. O açude em questão demonstra um número de cianobactérias elevado, apresentando uma concentração de células/ml superior aos níveis estabelecidos pela Portaria MS nº 518/04. O mesmo, ainda foi considerado pelo órgão ambiental do estado no ano de 2009 como hipereutrófico. Os ensaios estáticos desenvolvidos neste trabalho simularam filtração direta (filtros de laboratório), préoxidação com cloro e adsorção por carvão ativado pulverizado. Foram avaliados os coagulantes hidróxicloreto de alumínio (HCA) e sulfato de alumínio granulado (SA). O desenvolvimento da pesquisa buscou otimização das condições de mistura rápida, das dosagens de coagulantes e pHs de coagulação com a construção de diagramas. As interferências da taxa de filtração e a granulometria do meio filtrante foram avaliadas e testaram-se dosagens e tempos de contato com cloro e com o carvão ativado. Com os resultados da caracterização da água bruta foi possível identificar no manancial a presença de um pH elevado (7,34). A cor verdadeira foi significativa (29 uH) em relação à cor aparente e turbidez (66 uH e 13,60 uNT), refletindo-se nas medidas de matéria orgânica: MON (8,41 mg.L<sup>-1</sup>) e Abs254 (0,065 cm<sup>-1</sup>). A otimização da mistura rápida definiu o tempo de 17", gradiente de velocidade de 700 s<sup>-1</sup> na coagulação com HCA e tempo de 20", gradiente de velocidade de 800 s<sup>-1</sup> para o SA. Granulometrias menores da areia do meio filtrante favoreceram o tratamento e a variação na taxa de filtração não interferiu de forma significativa na eficiência do processo. A avaliação das etapas de tratamento verificou a adequação aos padrões de cor aparente e turbidez da Portaria MS 518/2004 tomando como base os valores médios encontrados na água bruta. No tratamento utilizando o HCA por filtração direta, a potabilidade para a cor aparente pode ser atingida com uma dosagem de 25 mg.L<sup>-1</sup>. Adicionando a etapa de préoxidação o padrão foi atingido com dosagem reduzida para 12 mgHCA.L<sup>-1</sup>. Para a turbidez a potabilidade foi obtida na filtração direta quando a dosagem supera 25 mg.L<sup>-1</sup> de HCA. Com etapa de préoxidação há a possibilidade de redução da dosagem para 20 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante. O acréscimo da adsorção em CAP, promoveu a potabilidade para os dois parâmetros, com dosagem ainda menor, 13 mg.L<sup>-1</sup> de HCA. Coagulando com SA a remoção necessária para o parâmetro de cor aparente foi atingida com préoxidação e dosagem de 22 mgSA.L<sup>-1</sup>. Apesar de apresentar bons resultados o tratamento com o sulfato de alumínio não foi capaz de fornecer água com turbidez menor que 1,00 uNT mesmo com a utilização de todas as etapas de tratamento.

**Palavras chave:** Jarreste, preoxidação, adsorção e tratamento de água.

## ABSTRACT

Eutrophication is a growing process present in the water sources located in the northeast of Brazil. Among the main consequences of these changes in trophic levels of a water source, stands out adding complexity to the treatment to achieve water standards. By these considerations, this study aimed to define, on a laboratory scale, products and operational conditions to be applied in the processing steps using raw water from Gargalheiras dam, RN, Brazil. The dam mentioned shows a high number of cyanobacteria, with a concentration of cells / ml higher than that established by Decree No. 518/04 MS. The same source was also considered by the state environmental agency in 2009 as hypereutrophic. The static tests developed in this research simulated direct filtration (laboratory filters) and pre-oxidation with chlorine and powdered activated carbon adsorption. The research included the evaluation of the coagulants aluminum hydrochloride (HCA) and alum (SA). The development of the research investigated the conditions for rapid mixing, the dosages of coagulants and pHs of coagulation by the drawing of diagrams. The interference of filtration rate and particle size of filtering means were evaluated as samples and the time of contact were tested with chlorine and activated carbon. By the results of the characterization of the raw water source it was possible to identify the presence of a high pH (7.34). The true color was significant (29 uH) in relation to the apparent color and turbidity (66 uH and 13.60 NTU), reflecting in the measurement of organic matter: MON (8.41 mg.L<sup>-1</sup>) and Abs254 (0.065 cm<sup>-1</sup>). The optimization of quick mix set time of 17", the speed gradient of 700 s<sup>-1</sup> in the coagulation with HCA and the time of 20" with speed gradient of 800 s<sup>-1</sup> for SA. The smaller particle sizes of sand filtering means helped the treatment and the variation in filtration rate did not affect significantly the efficiency of the process. The evaluation of the processing steps found adjustment in standard color and turbidity of the Decree nº 518/04 MS, taking in consideration the average values found in raw water. In the treatment using the HCA for direct filtration the palatable pattern based on the apparent color can be achieved with a dose of 25 mg L<sup>-1</sup>. With the addition of pre-oxidation step, the standard result was achieved with a reduced dose for 12 mgHCA.L<sup>-1</sup>. The turbidity standard for water was obtained by direct filtration when the dose exceeds 25 mg L<sup>-1</sup> of HCA. With pre-oxidation step there is the possibility of reducing the dose to 20 mg L<sup>-1</sup>. The addition of CAP adsorption, promoted drinking water for both parameters, with even lower dosage, 13 mg L<sup>-1</sup> of HCA. With coagulation using SA removal required for the parameter of apparent color it was achieved with pre-oxidation and 22 mgSA.L<sup>-1</sup>. Despite the satisfactory results of treatment with the alum, it was not possible to provide water with turbidity less than 1.00 NTU even with the use of all stages of treatment.

**Keywords:** Jar test, pre-oxidation, adsorption and water treatment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio desenvolvido por Armirtharajah e Mills, (DI BERNARDO et al. 2002).....	26
Figura 2 - Localização geográfica do Açude Gargalheira, Acari/RN. ....	34
Figura 3 - Açude Marechal Dutra, Gargalheira, Acari/RN. ....	35
Figura 4 - Estação de Tratamento de Água de Gargalheira-RN.....	37
Figura 5 - Eutrofização visivelmente detectada nas margens do Açude Gargalheira. ....	39
Figura 6 - Instalação piloto dotada das etapas de préoxidação, adsorção com CAP, inter-oxidação, dupla filtração e adsorção em carvão ativado granular.....	40
Figura 7 - Torneira utilizada para captação de água bruta.....	41
Figura 8 - Jarteste Nova Ética modelo 218/1. ....	43
Figura 9 - (a) Adaptação para os filtros de laboratório, (b) Filtro de laboratório e meio filtrante. ....	44
Figura 10 - Fluxograma dos ensaios de tratabilidade dividido por tipo de coagulante. ....	48
Figura 11 - Utilização de Béqueres e proveta para homogeneização da água bruta durante os ensaios. ....	49
Figura 12 - Equipamentos utilizados durante a pesquisa no laboratório da CAERN em Acari/RN.....	51
Figura 13 - (a) Determinação da matéria orgânica natural, (b) espectrofotômetro de UV-VIS .....	52
Figura 14 - Comportamento do pH da água bruta utilizada nos ensaios de tratabilidade.....	65
Figura 15 - Comportamento da Cor aparente da água bruta utilizada nos ensaios de tratabilidade.....	66
Figura 16 - Comportamento da turbidez da água bruta utilizada nos ensaios de tratabilidade.....	66
Figura 17 - Influência do TMR e do GMR na remoção de turbidez para a coagulação com Hidroxi-cloreto de alumínio. ....	77
Figura 18 - Influência do TMR e do GMR na remoção de cor aparente para a coagulação com Hidroxi-cloreto de alumínio.....	78
Figura 19 - Influência do TMR e do GMR na remoção de turbidez para a coagulação com sulfato de alumínio. ....	81
Figura 20 - Influência do TMR e do GMR na remoção de cor aparente para a coagulação com sulfato de alumínio. ....	81
Figura 21 - Diagrama de coagulação com hidróxi-cloreto de alumínio para a água do açude Gargalheira.....	88
Figura 22 - Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio para a água do açude Gargalheira.....	91
Figura 23 - Coagulações usando HCA e as respectivas faixas de coagulação determinadas pelo diagrama. ....	110
Figura 24 - Coagulações usando SA e as respectivas faixas de coagulação determinadas pelo diagrama. ....	116
Figura 25 - Comportamento dos percentuais de remoção de cor aparente, durante as etapas de tratamento, com o uso de HCA como coagulante. ....	130
Figura 26 - Comportamento dos percentuais de remoção de cor aparente, durante as etapas de tratamento, com o uso de SA como coagulante. ....	130
Figura 27 - Comportamento dos percentuais de remoção de turbidez, durante as etapas de tratamento, com o uso de HCA como coagulante. ....	132

Figura 28 - Comportamento dos percentuais de remoção de turbidez, durante as etapas de tratamento, com o uso de SA como coagulante. ....	132
Figura 29 - Comportamento dos percentuais de remoção de Matéria Orgânica Natural durante as etapas de tratamento, com o uso de HCA como coagulante. ...	134
Figura 30 - Comportamento dos percentuais de remoção de Matéria Orgânica Natural durante as etapas de tratamento, com o uso de SA como coagulante. ....	134
Figura 31 - Comportamento dos percentuais de remoção de absorbância a 254 nm durante as etapas de tratamento, com o uso de HCA como coagulante. ....	135
Figura 32 - Comportamento dos percentuais de remoção de absorbância a 254 nm durante as etapas de tratamento, com o uso de SA como coagulante. ....	136

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões de turbidez para água pós-filtração ou pré-desinfecção estabelecidos pela portaria 518 de 2004 do Ministério da Saúde. ....	21
Tabela 2 - Comportamento da situação volumétrica do Açude Gargalheira durante o ano de 2009. ....	35
Tabela 3 - Análises quantitativas e qualitativas das cianobactérias presentes na água do açude Gargalheiras. ....	38
Tabela 4 - Análises realizadas para a caracterização da água bruta. ....	42
Tabela 5 - Fases da pesquisa no jarreste, subdivisões e tipos de ensaios realizados. ....	45
Tabela 6 - Distribuição dos ensaios de tratabilidade nas fases e séries da pesquisa. ....	46
Tabela 7 - Vazões adotadas na filtração e respectivas taxas de filtração. ....	55
Tabela 8 - Planejamento de um ensaio de tratabilidade fictício com préoxidação, adsorção e filtração direta. ....	60
Tabela 9 - Características da água bruta do açude Gargalheira. ....	64
Tabela 10 - Ensaio 1: Determinação da dosagem do coagulante HCA. ....	69
Tabela 11 - Ensaio 2: Determinação da dosagem do coagulante HCA. ....	69
Tabela 12 - Ensaio 3: Determinação do pH de coagulação para o coagulante HCA. ....	70
Tabela 13 - Ensaio 4: Determinação do pH de coagulação para o coagulante HCA. ....	72
Tabela 14 - Ensaio 5: Determinação da dosagem para o coagulante SA. ....	73
Tabela 15 - Ensaio 6: Determinação do pH de coagulação para o coagulante SA. ....	74
Tabela 16 - Ensaio 7: Determinação do tempo de mistura rápida para o HCA. ....	75
Tabela 17 - Ensaio 8: Determinação do tempo de mistura rápida para o HCA. ....	75
Tabela 18 - Ensaio 9: Determinação do tempo de mistura rápida para o HCA. ....	76
Tabela 19 - Ensaio 10: Determinação do tempo de mistura rápida para o HCA. ....	76
Tabela 20 - Ensaio 11: Determinação do tempo de mistura rápida para o SA. ....	79
Tabela 21 - Ensaio 12: Determinação do tempo de mistura rápida para o SA. ....	79
Tabela 22 - Ensaio 13: Determinação do tempo de mistura rápida para o SA. ....	80
Tabela 23 - Ensaio 14: Determinação do tempo de mistura rápida para o SA. ....	80
Tabela 24 - Ensaio 15: Determinação da influência da granulometria do meio filtrante para o tratamento com HCA. ....	83
Tabela 25 - Ensaio 16: Determinação da influência da granulometria do meio filtrante para o tratamento com HCA. ....	83
Tabela 26 - Ensaio 17: Determinação da influência da granulometria do meio filtrante para o tratamento com SA. ....	84
Tabela 27 - Ensaio 18: Determinação da influência da granulometria do meio filtrante para o tratamento com SA. ....	84
Tabela 28 - Ensaio 19: Determinação da influência da taxa de filtração para o tratamento com HCA. ....	85
Tabela 29 - Ensaio 20: Determinação da influência da taxa de filtração para o tratamento com SA. ....	86
Tabela 30 – Ensaio 70: Determinação da dosagem do coagulante HCA antecedendo a pesquisa de préoxidação. ....	92
Tabela 31 – Ensaio 71: Determinação do pH de coagulação para o HCA antecedendo a pesquisa de préoxidação. ....	93
Tabela 32 - Ensaio 72: Determinação da dosagem de cloro na pré-oxidação. ....	94
Tabela 33 - Ensaio 73: determinação do tempo de oxidação com cloro. ....	95

Tabela 34 - Ensaio 74: Determinação da dosagem de cloro pós otimização do tempo de oxidação.....	97
Tabela 35 - Ensaio 75: determinação da dosagem de cloro e dosagem de coagulante pós otimização do tempo de oxidação.....	98
Tabela 36 - Ensaio 76: determinação da dosagem de carvão ativado pulverizado.....	100
Tabela 37 - Ensaio 77: determinação da dosagem de carvão ativado pulverizado.....	102
Tabela 38 - Ensaio 78: determinação do tempo de adsorção com carvão ativado pulverizado.....	104
Tabela 39 - Ensaio 79: determinação do tempo de adsorção com carvão ativado pulverizado.....	106
Tabela 40 - Ensaio 80: determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o HCA.....	108
Tabela 41 - Ensaio 81: determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o HCA.....	108
Tabela 42 - Ensaio 82: determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o HCA.....	109
Tabela 43 - pHs de coagulação e eficiências de remoção na filtração direta com o HCA e auxílio do diagrama de coagulação.....	112
Tabela 44 - Ensaio 83: Determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o SA.....	114
Tabela 45 - Ensaio 84: determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o SA.....	114
Tabela 46 - Ensaio 85: determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o SA.....	115
Tabela 47 - pHs de coagulação e eficiências de remoção na filtração direta com o sulfato de alumínio e auxílio do diagrama de coagulação.....	117
Tabela 48 - Comparação entre o pH de coagulação nos ensaios com préoxidação e as faixas de pH encontradas nos diagramas de coagulação.....	118
Tabela 49 - Ensaio 86: determinação das eficiências de remoção usando préoxidação e filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o HCA.....	120
Tabela 50 - Ensaio 87: determinação das eficiências de remoção usando pré-oxidação e filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o SA.....	122
Tabela 51 - Ensaio 88: determinação das eficiências de remoção usando pré-oxidação, adsorção com CAP e filtração direta para o HCA.....	124
Tabela 52 - Ensaio 89: determinação das eficiências de remoção usando pré-oxidação, adsorção com CAP e filtração direta para o SA.....	126
Tabela 53 - Comportamento dos percentuais de remoção durante o tratamento com diversas etapas, usando o HCA como coagulante.....	128
Tabela 54 - Comportamento dos percentuais de remoção durante o tratamento com diversas etapas, usando o SA como coagulante.....	128

**LISTA DE ABREVIações, FóRMULAS SIGLAS E SÍMBOLOS**

Abs254	Absorbância a 254 nm
C	Concentração
CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
CAG	Carvão Ativado Granular
CAP	Carvão Ativado Pulverizado
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRL	Cloro residual livre
CV	Cor verdadeira
ETAs	Estações de Tratamento de Água
FDA	Filtração direta ascendente
FRD	Filtração rápida descendente
FLA	Filtros de laboratórios
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GMR	Gradiente de Mistura Rápida
Gox	Gradiente de Mistura na Oxidação
HCA	Hidróxi-cloreto de alumínio com 23% de alumina
IAM	Índice de Azul de Metileno
IP	Instalação piloto
IFRN	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio grande do Norte
mg/l	Miligramas por Litro
µm	Micronmetros
MON	Matéria Orgânica Natural
MF	Meio Filtrante
NBR	Norma Brasileira
N.C.	Valor não considerado
QF	Vazão de Filtração
rpm	Rotações por minuto
SEMARH	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SA	Sulfato de Alumínio
SDT	Sólidos Totais Dissolvidos

SVS	Secretaria em Vigilância e Saúde
SDF	Sistema de Dupla Filtração
THM	Trihalometanos
Turx	Turbidez do efluente
Tur	Turbidez da água bruta
TMR	Tempo de Mistura Rápida
Tox	Tempo de Oxidação
TX	Taxa de Filtração
USP	Universidade de São Paulo
USEPA	United States Environmental Protection Agency
VMP	Valor Máximo Permitido
uNT	Unidades Nefelométricas de Turbidez
µg/L	Microgramas por Litro
VC	Volume coletado de efluente

## SUMÁRIO

<b>1- INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1 Objetivos .....	18
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	20
2.1 Padrões de potabilidade.....	20
2.2 Tecnologias de tratamento de água .....	22
<b>2.3 Coagulação-floculação</b> .....	23
<b>2.3.1 Mecanismos de coagulação e fatores que a influenciam.</b> .....	24
<b>2.3.2 Diagramas de coagulação</b> .....	26
<b>2.4 Filtração</b> .....	28
<b>2.5 Oxidação com uso do cloro</b> .....	29
<b>2.6 Adsorção com carvão ativado</b> .....	31
<b>2.7 Ensaio de tratabilidade</b> .....	32
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	34
3.1 Caracterização da área de estudo .....	34
3.2 Situação Atual do Açude Gargalheira .....	37
3.3 Caracterização da água bruta. ....	41
3.4 Ensaio de tratabilidade .....	43
3.4.1 Fases da pesquisa no Jarteste.....	52
<b>3.4.1.1 Fase I - Determinação dos parâmetros da mistura rápida</b> .....	52
<b>3.4.1.2 Fase II - Avaliação dos parâmetros da filtração.</b> .....	54
<b>3.4.1.3 Fase III - Diagramas de coagulação</b> .....	56
<b>3.4.1.4 Fase IV - Préoxidação</b> .....	57
<b>3.4.1.5 Fase V - Adsorção com CAP</b> .....	58
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	64
4.1 Caracterização da água bruta. ....	64
4.2 Ensaio de Tratabilidade.....	68
4.2.1 Fase I	
Determinação dos parâmetros da mistura rápida. ....	68
<b>4.2.1.1 Série I.1: Determinação de dosagens iniciais dos coagulantes e do pH de coagulação.</b> .....	68
<b>4.2.1.2 Série I.2 - Otimização da mistura rápida com determinação dos gradientes e tempos.</b> .....	74
<b>4.2.2 Fase II - Avaliação dos parâmetros da filtração.</b> .....	82
<b>4.2.2.1 Série II.1 – Avaliação da granulometria do meio filtrante</b> .....	82
<b>4.2.2.2 Série II.2 – Avaliação da taxa de filtração.</b> .....	85
<b>4.2.3 Fase III - Diagramas de coagulação</b> .....	86
<b>4.2.3.1 Série III.1 - Diagrama de coagulação para o HCA.</b> .....	86
<b>4.2.3.2 Série III.2 - Diagrama de coagulação para o Sulfato de Alumínio</b> .....	89
<b>4.2.4 Fase IV - Préoxidação</b> .....	92
<b>4.2.4.1 Série IV.1 - Determinação de dosagem de cloro.</b> .....	93
<b>4.2.4.2 Série IV.2 - Determinação do tempo de oxidação.</b> .....	95
<b>4.2.4.3 - Influência da préoxidação na coagulação.</b> .....	96
<b>4.2.5 Fase V - Adsorção com CAP</b> .....	99
<b>4.2.5.1 Série V.1 - Determinação de dosagem de CAP.</b> .....	99
<b>4.2.5.2 Série V.2 - Determinação do tempo de adsorção.</b> .....	103
<b>4.2.6 Fase VI - Ensaio com préoxidação, adsorção e filtração.</b> .....	107
4.2.6.1 Série VI.1 - Determinação das eficiências da filtração direta. ....	107
4.2.6.2 Série VI.2 - Determinação das eficiências da préoxidação seguida de filtração direta.....	118

4.2.6.3 Série VI.3 - Determinação das eficiências da préoxidação, adsorção com CAP e filtração direta.....	123
4.2.7 Análise do tratamento com préoxidação, adsorção e filtração direta. ....	127
<b>5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>137</b>
6 REFERÊNCIAS.....	141

## 1- INTRODUÇÃO

O Saneamento Ambiental está fundamentado na execução de serviços básicos necessários a saúde pública. A própria definição do Manual da FUNASA (Fundação Nacional de Saúde) publicado em 2006, considera entre outros conceitos que o Saneamento Ambiental tem por objetivo alcançar a salubridade ambiental, por meio do abastecimento de água potável, coleta e disposição sanitária de resíduos sólidos, líquidos e gasosos.

Porém, no Brasil, o saneamento sempre foi marcado pela diferença nas ações que envolviam o serviço básico às populações. O fornecimento de água sempre atingiu maiores níveis de abrangência que o serviço de esgotamento sanitário.

As conseqüências desse desequilíbrio contribuem para graves problemas na saúde pública. Sobretudo, nas cidades que possuem açudes ou lagos, o efeito da inconstância do tratamento de forma adequada dos resíduos contribuiu para instalação de problemas que, conseqüentemente, também atingem o abastecimento de água.

Uma das principais problemáticas presente em mananciais, por exemplo a eutrofização artificial, pode ser desencadeada com a contribuição de efluentes. Isso ocorre quando corpos aquáticos recebem cargas orgânicas com alta concentração de nutrientes, ao longo de um tempo elevado, e acabam por desencadear um desequilíbrio. As águas eutrofizadas ficam super-povoadas de algas que, na maioria das vezes possuem a capacidade de expelir substâncias tóxicas. O aporte de nutrientes, em especial o nitrogênio e o fósforo, aliado a outros fatores como: desmatamento da mata ciliar e escoamento superficial; uso de agrotóxico na agricultura e criação de animais pelas comunidades ribeirinhas, são características presente na maioria dos ecossistemas com florações excessivas de algas.

Como toda e qualquer alteração na água presente em mananciais gera dificuldades no tratamento, essas modificações nos corpos aquáticos podem afetar além da balneabilidade às atividades necessárias para a potabilização da água para o consumo humano. Dessa forma, esse fenômeno provoca uma dificuldade, a tecnologia utilizada no tratamento não é suficiente para tornar a água potável diante desta nova realidade.

A forma mais imediata de combater esse problema envolve uma análise mais aprofundada das operações e processos utilizados em Estações de Tratamento de Água, adequando-as a realidade atual da água a ser tratada. Por isso, o

monitoramento das águas de abastecimento e o das Estações de Tratamento de Água (ETAs) deve ser uma atividade constante e permanente. Os estudos desenvolvidos in loco devem adaptar e readaptar a tipologia dos produtos químicos e seus respectivos métodos de utilização.

Com a presença de pesquisas que buscam encontrar as tecnologias corretas, melhores produtos, e formas de utilização, será possível contribuir com a distribuição de água potável para a população.

Assim como acontece em mananciais presentes em todas as partes do país, os açudes do Rio Grande do Norte também estão submetidos de forma constante a mudanças nas características de suas águas e, principalmente, nos seus graus de trofia.

Dentro dessa perspectiva, esta pesquisa buscou através de ensaios em escala de laboratório investigar formas possíveis de tratamento para a água do açude Gargalheira situado em Acari (RN), um dos principais açudes do estado do Rio Grande do Norte, que atualmente possui processo de eutrofização artificial desencadeado em suas águas.

A pesquisa está inserida em um projeto maior que propõe através de uma instalação piloto testar diferentes configurações de tratamento envolvendo oxidação, adsorção e dupla filtração. Com apoio financeiro da CAERN (Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte) e em parceria com a USP – São Carlos, o experimento foi montado nas dependências da Estação de Tratamento de Gargalheira. Nesse sentido, os ensaios no equipamento *jarteste* auxiliaram também ao emprego da tipologia dos produtos químicos e suas variáveis de funcionamento em escala piloto.

## 1.1 Objetivos

Objetivo geral:

Determinar através de ensaios em escala de bancada de laboratório, os parâmetros envolvidos nas possíveis etapas de tratamento utilizadas para a água do açude Gargalheira, em Acari (RN).

Objetivos específicos:

- ✓ Caracterizar a água bruta;
- ✓ Determinar os parâmetros que envolvem a coagulação: coagulante e a sua dosagem mais eficiente; pH de coagulação e as dosagens de acidificante ou basificante necessárias;

- ✓ Determinar os parâmetros de mistura rápida: tempo de mistura rápida e gradiente de mistura rápida;
- ✓ Avaliar a influência dos parâmetros que envolvem a filtração: taxa de filtração e granulometria do meio filtrante (areia);
- ✓ Determinar os parâmetros que envolvem a oxidação: dosagem de oxidante e tempo de oxidação.
- ✓ Determinar os parâmetros que envolvem a adsorção: dosagem do carvão ativado pulverizado e tempo de adsorção.
- ✓ Fornecer informações para a instalação piloto sobre os métodos de utilização dos produtos envolvidos nas etapas de tratamento.
- ✓ Efetuar uma comparação entre tratamento com configurações que envolvem a préoxidação, adsorção e filtração.

Todos estes objetivos a serem alcançados buscam a confirmação da hipótese:

*A eficiência do tratamento de água depende, em sua maioria, da forma como as etapas da tecnologia e os produtos químicos são utilizados. E, os ensaios em escala de bancada, configuram-se uma ferramenta adequada para a escolha de determinados métodos.*

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Padrões de potabilidade

Desde tempos mais remotos associava-se a concentração de partículas à presença de organismos patogênicos na água, mas cientificamente essa busca iniciou-se com as constatações de John Snow e Luis Pasteur, relacionadas com a cólera em Londres. Na ocasião, identificou-se que a população que estava doente se abastecia de um poço contaminado.

Nos EUA, onde a água é monitorada pela USEPA (United States Environmental Protection Agency), desde 1925 o limite de cor aparente adotado é 10 uC, padrão ainda hoje vigente. Os padrões da turbidez, primeiramente regulados em 1974 pela Safe Drink Water Act, evoluíram de 1 uT nesta dada, para os limites de 0,5 uT, hoje considerada um dos padrões mais rigorosos.

De acordo com LIBÂNEO (2008) em nosso país, o primeiro padrão de potabilidade somente surgiu em 1977, inspirado no modelo do serviço norte-americano de saúde pública. A Portaria 56 do Ministério da Saúde estabelecia limites máximos para diversos parâmetros relacionados às características físicas, químicas e biológicas da água.

Em 1990, o Ministério da Saúde publicou a Portaria 36, aumentando o número de parâmetros e tornando alguns mais restritivos. A referida portaria, gerou o apelo das prefeituras e companhias estaduais de abastecimento para o adiamento da implementação que, entrou em vigor somente em janeiro de 1992.

Decorrente de um extenso processo de revisão da Portaria 36, em dezembro de 2000 foi publicada a Portaria 1469 e efetivamente implementada em 2003. Porém, ainda nesse mesmo ano, foi criada a Secretaria em Vigilância e Saúde (SVS) que incorporou diversas funções relacionadas à proteção epidemiológica. Em virtude disso, foi revogada a Portaria 1469, passando a vigorar a Portaria 518 em março de 2004. Os parâmetros abordados na Portaria 1469 não foram alterados. A mudança ocorreu nas atribuições destinadas antes à FUNASA (Fundação Nacional de Saúde) e agora sobre a responsabilidade da SVS.

O prazo máximo de 12 meses, a partir da data de publicação da 518, foi estabelecido para que as instituições promovam adequações para o cumprimento de: filtração de água para o consumo humano oriunda de manancial superficial e

distribuída por meio de canalização e a obrigação do monitoramento de cianobactérias e cianotoxinas.

Notoriamente, como a Portaria 518 tornou-se mais restritiva que as anteriores alguns limites de seus padrões relacionados com as características da água tornaram-se mais rigorosos. Em geral, de um total de 24 substâncias químicas presentes na Portaria 36, e mantidas na Portaria 518, 14 ficaram mais restritivas, tendo seus valores máximos reduzidos e cinco delas seus valores aumentados.

A turbidez, parâmetro de relevância importância dentro do tratamento de água, eram atribuídos nas portarias 56 e 36 os limites máximos fixados em 5,0 e 1,0 uT respectivamente. A tabela 1 apresenta os limites estabelecidos para este parâmetro pela legislação vigente, Portaria 518, de 2004.

**Tabela 1** - Padrões de turbidez para água pós-filtração ou pré-desinfecção estabelecidos pela portaria 518 de 2004 do Ministério da Saúde.

TRATAMENTO DE ÁGUA	VMP <sup>(1)</sup>
Desinfecção (água subterrânea)	1,0 uNT <sup>(2)</sup> em 95% das amostras
Filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta)	1,0 uNT <sup>(2)</sup>
Filtração lenta	2,0 uNT <sup>(2)</sup> em 95% das amostras

**Notas:** (1) Valor máximo permitido

(2) Unidade de turbidez

**Fonte:** Portaria 518 de 25 de março de 2004.

Assim sobre este parâmetro, há o incentivo do Ministério da Saúde através da portaria que as companhias produzam água com turbidez inferior a 0,5 uNT em 95% dos dados mensais para maximizar a remoção de protozoários.

Uma das grandes novidades da Portaria 518 é o monitoramento das cianobactérias e suas principais toxinas. Segundo a própria portaria, as principais cianotoxinas e seus efeitos no homem são:

*Microcistinas* - hepatotoxinas heptapeptídicas cíclicas produzidas por cianobactérias, com efeito potente de inibição de proteínas fosfatases dos tipos 1 e 2A e promotoras de tumores;

*Cilindrospermopsina* - alcaloide guanidínico cíclico produzido por cianobactérias, inibidor de síntese proteica, predominantemente hepatotóxico, apresentando também efeitos citotóxicos nos rins, baço, coração e outros órgãos;

*Saxitoxinas* - grupo de alcaloides carbamatos neurotóxicos produzido por cianobactérias, não sulfatados (saxitoxinas) ou sulfatados (goniautoxinas e C-

toxinas) e derivados decarbamil, apresentando efeitos de inibição da condução nervosa por bloqueio dos canais de sódio.

As cianobactérias na água bruta devem ser monitoradas de forma mensal quando o número de células for menor que 10000 células/ml e semanalmente se for superior. Caso o número seja superior a 20000 células/ml, o monitoramento deve se estender para o efluente da estação e na entrada de clínicas de hemodiálises e indústrias de fabricação de injetáveis.

A concentração máxima de microcistinas não pode exceder 1,0 µg/L (microgramas por litro), sendo aceitável 10 µg/L em amostras em período de 12 meses. A portaria também estabelece o veto ao uso de algicidas para o controle do crescimento de cianobactérias.

Para os parâmetros referentes à etapa de desinfecção, a água, após esse processo, deve conter um teor mínimo de cloro residual livre de 0,5 mg/l e máximo em qualquer ponto do sistema de 2,0 mg/l. A cloração deve ser realizada em pH inferior a 8,0 e o tempo de contato mínimo de 30 minutos.

## 2.2 Tecnologias de tratamento de água

A busca pela potabilidade da água de mananciais, visando atender os parâmetros estabelecidos pela portaria 518 de 25 de março de 2004, do Ministério da Saúde, proporciona a utilização de várias técnicas em estações de tratamento

De acordo com as etapas utilizadas no tratamento as tecnologias podem obter configurações diferentes. Uma das mais difundidas tecnologias é o tratamento *de Ciclo Completo* que envolve as etapas de coagulação, floculação, decantação ou flotação e filtração. Segundo Libânio (2008), tal denominação surgiu em Ohio (EUA) em 1890 e hoje consiste na tecnologia adotada em 10 estados americanos. De acordo com Ferreira Filho e Marchetto (2006), está tecnologia também é a mais utilizada no Brasil, diante dos 30 anos de vida útil dos sistemas de abastecimento.

Apesar de ser bastante utilizada, algumas desvantagens são constantemente comentadas quando se discute a utilização dessa tecnologia. Kuroda e colaboradores (2003) colocaram em evidência que a necessidade de mão de obra especializada, e a mecanização de processos nessa tecnologia podem vim acarretar sérios prejuízos à qualidade da água produzida, sobretudo, em cidades pequenas com recursos limitados.

A *filtração direta*, outra tecnologia bastante difundida, se configura por um tipo de tecnologia que dispensa unidades de floculação e decantação. Isto só é possível com utilização de dosagens menores de coagulantes e a formação de flocos de menor tamanho.

O emprego da filtração direta apresenta vantagens relacionadas a diminuição dos custos para o tratamento. Santos e colaboradores (2007) ao fazerem referência a Kawamura (1991) comentam que em comparação com a tecnologia de ciclo completo, a filtração direta pode economizar 50% da área utilizada e 70% de volume de lodo gerado. Este tipo de técnica de tratamento é classificada pelo sentido do fluxo de água dentro do filtro (ascendente ou descendente).

O uso da filtração direta ascendente (FDA) nos últimos anos apresenta-se bastante comum. Porém, de acordo com Kuroda et al. (2003), apesar de algumas vantagens a técnica apresenta limitações da ordem qualitativa, principalmente quando há ocorrências de valores altos de turbidez e cor verdadeira. Neste caso, aconselha-se o tratamento complementar com a filtração rápida descendente (FRD) compondo um sistema de dupla filtração (SDF). Este último, segundo os mesmos autores, permite o tratamento de águas de pior qualidade, possibilita o uso de taxas de filtração mais elevadas e oferece maior segurança diante de variações bruscas da qualidade da água bruta.

### 2.3 Coagulação-floculação

O processo de coagulação consiste na adição de coagulantes ao meio líquido para que estes provoquem através de ações físicas e químicas, a desestabilização das partículas em suspensão e de natureza coloidal presentes na água. As partículas desestabilizadas juntamente com o coagulante, formam partículas maiores capazes de serem removidas mais facilmente nas etapas posteriores, sedimentação e filtração.

Os tipos de coagulantes mais usados em ETA's são: sulfato de alumínio, sulfato férrico, sulfato ferroso clorado, cloreto férrico e cloreto de polialumínio (hidróxi-cloreto de alumínio). Pode-se ainda utilizar auxiliares na coagulação: ácidos, basificantes, polímeros sintéticos ou naturais.

As fases que constituem a coagulação envolvem a formação de espécies hidrolizadas, desestabilização das partículas coloidais e suspensas dispersas na massa líquida e agregação das partículas para a formação de flocos (SANTOS et

al., 2007). Pode-se dizer então que até mesmo em estações de tratamento por filtração direta, onde não existem flocculadores, ocorre a floculação. Tal operação ocorre instantaneamente após a coagulação, porém, com a formação de flocos consideravelmente menores aos formados em ETA's de ciclo completo.

As espécies hidrolizadas se formam mediante as fortes ligações entre os íons metálicos (carregados positivamente) com os átomos de oxigênio. Esta ligação libera íons de hidrogênio (íon  $H^+$ ) capazes de reduzir o pH da solução.

Essas espécies durante a agitação da mistura rápida (gradientes de rotação rápidos e tempos muito curtos) aderem às impurezas presentes, partículas suspensas e coloidais formando os flocos.

Leal e Libânio (2002) comentam que a coagulação com sais de alumínio e ferro destaca-se em ser bastante usual no emprego de remoção dos compostos causadores de cor em águas de abastecimento. Esses são basicamente substâncias coloidais resultantes de matéria orgânica, ácidos húmicos e fúlvicos. No trabalho em questão, os autores utilizaram uma metodologia para escolha de coagulante e condições de coagulação levando em consideração as características da água bruta e parâmetros hidráulicos. Assim, foi possível identificar aplicabilidade do uso da metodologia em jarrestes para obtenção das condições de coagulação em escala real.

### 2.3.1 Mecanismos e fatores que a influenciam na coagulação.

Atualmente considera-se a coagulação como resultado da ação de quatro mecanismos distintos que atuam individualmente ou combinados, são eles: (i) compressão da camada dupla elétrica; (ii) adsorção e neutralização; (iv) varredura e adsorção e (v) formação de pontes (DI BERNARDO, 2002).

Entretanto, Fernandes (2007) citando Armirtharajah e Mills (1982) ressalta que no processo de tratamento de águas de abastecimento ocorre com maior frequência, seja de forma combinada ou não, os mecanismos de varredura e adsorção/neutralização.

O mecanismo de varredura é caracterizado pelo uso de dosagens maiores de coagulante e é utilizado em estações que possuem a tecnologia de ciclo completo, ou seja, estações que incluem em suas etapas a floculação e a decantação.

Durante a coagulação, a medida que se eleva a dosagem do coagulante na mistura rápida, as partículas presentes na água começam a serem adsorvidas pelo

precipitado do sais de alumínio ou ferro e passa a predominar o mecanismo de varredura. O objetivo é promover a coagulação com a adição de uma dosagem que seja capaz, na etapa de floculação, de formar flocos com densidades que permitam a sua deposição nos decantadores.

Quando a opção tecnológica da ETA não possui etapas de decantação (filtração lenta, filtração direta, dupla filtração, etc) o mecanismo ideal de coagulação é o adsorção/ neutralização de cargas.

Nesse mecanismo, as ligações das partículas com a água são desestabilizadas ocorrendo a neutralização das cargas das impurezas. Não há a formação flocos grandes, dispensando assim etapas de crescimento de floco (floculação) e de decantação. A remoção dos flocos devem ocorre eficientemente na filtração. Assim, as dosagens de coagulante utilizadas tendem a serem inferiores às necessárias no mecanismo de coagulação por varredura.

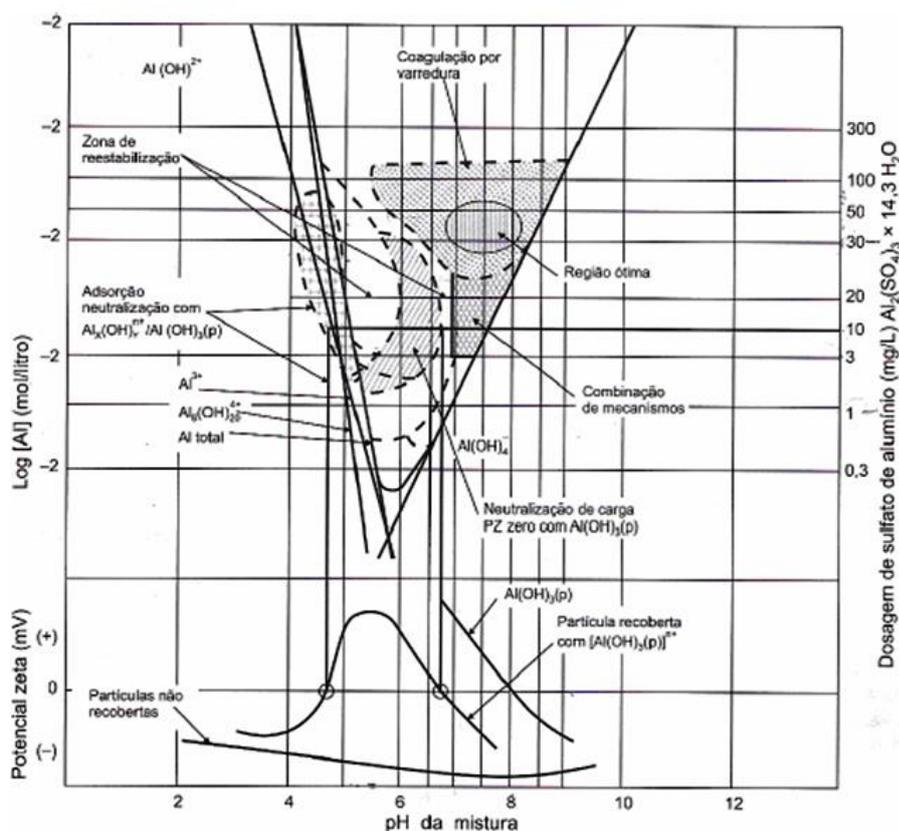
Ribeiro e Junior (1998) comentam que os principais mecanismos de coagulação sofrem influência do gradiente de mistura principalmente porque as reações de hidrolise do sulfato de alumínio, por exemplo, no mecanismo de adsorção são muito rápidas enquanto que no mecanismo de varredura são mais lentas.

Sabe-se, porém que o gradiente de mistura juntamente com temperatura e tempo de agitação influenciam em menor grau na coagulação. Destaca-se então, dependendo do tipo de mecanismo utilizado na coagulação, algumas variáveis no processo: pH e a alcalinidade da água bruta, a natureza das partículas coloidais, o tamanho das partículas, o tipo e a dosagem dos produtos químicos aplicados.

Wagner e Hudson Jr. (1982) citados por Santos et al. (2007) estudaram o desempenho de coagulantes no tratamento por filtração direta com escoamento descendente, no qual ficou constatado que dosagens menores de coagulante favorecem a tecnologia de filtração direta. Assim sendo, uma dosagem inferior a 6 mg/l do coagulante recomenda-se a utilização da filtração direta. Se a dosagem estiver entre 6 e 15 mg/l, a água estaria em uma faixa intermediária e a tecnologia de tratamento por filtração direta deve ser avaliada. Por último, se a dosagem superar 20 mg/l, questiona-se o uso da filtração direta a menos que se preveja o emprego da dupla filtração.

### 2.3.2 Diagramas de coagulação

Segundo Libâneo (2008) Armirtharajah e Mills em 1982 foram os primeiros a desenvolver um diagrama para representar a variação do mecanismo de coagulação em relação a dosagem e o pH de coagulação. O diagrama de coagulação construído pelos pesquisadores (figura 1) enfoca a coagulação com o sulfato de alumínio de águas de turbidez moderada e cor verdadeira baixa.



**Figura 1** - Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio desenvolvido por Armirtharajah e Mills, (DI BERNARDO et al. 2002).

Nesse diagrama, além das curvas das espécies hidrolisadas de alumínio, há delimitações das regiões as quais predominam os diferentes mecanismos de coagulação (DI BERNARDO et al. 2002). É representada ainda a variação do potencial zeta, resultante da interação entre as impurezas e as espécies hidrolisadas do alumínio.

Basicamente o diagrama consiste em uma representação da correlação de cada dosagem aplicada e a variação do pH de coagulação. Esse tipo de representação permite a escolha das condições de melhor eficiência de tratamento, de acordo com o mecanismo, isso porque a coagulação depende de um par de condições (dosagem do coagulante e pH de coagulação).

O uso de representações gráficas que demonstram o comportamento da coagulação em diversas condições de pH e dosagem possuem uma grande vantagem principalmente no que diz respeito ao ganho de eficiência, com a maior economia possível de produtos químicos. Desta forma, torna-se essencial o uso de ensaios em escala de laboratório em antecedência às operações em escala maiores como piloto e real. A construção de um diagrama de coagulação mediante o uso de jarrestes tem sido parte integrante de alguns estudos encontrados na literatura.

Fagundes (2006) ao estudar a remoção de Oocistos de *Cryptosporidium* por filtração direta avaliou a influência de alguns aspectos operacionais. O estudo foi desenvolvido em escala piloto, porém, os experimentos foram precedidos de estudos em escala de bancada (jarrestes) para definição da faixa de pH e dosagem de coagulante a serem empregados. No estudo em questão, optou-se por trabalhar com subdosagens, dosagens ótimas e superdosagens de sulfato de alumínio. Os resultados obtidos indicaram que, independente da origem da água bruta e taxa de filtração, ao se adotar dosagens “ótimas” e superdosagens de coagulante os efluentes apresentaram turbidez inferiores a 0,5 uNT. Dessa forma, a autora concluiu que um dos fatores de risco importante é a possível falha na dosagem de coagulante com a aplicação de subdosagem.

Pereira (2005) durante a pesquisa de remoção de células de *Microcystis sp* construiu diagramas de coagulação-filtração com sulfato de alumínio para escolher dosagem e pH de coagulação mais adequado para remoção de células por filtração direta.

Até mesmo quando não são usados coagulantes convencionais no tratamento de água para o abastecimento público, o uso de diagramas de coagulação torna-se uma ferramenta indispensável. Carvalho (2008) ao estudar o uso de quitosana para produção de água potável, a partir da água superficial do Rio Pirapó em Maringá, construiu diagramas de coagulação para variações percentuais das associações de quitosana e sulfato de alumínio. Na ocasião, a autora optou por construir diagramas que definiram regiões otimizadas de remoções de cor, turbidez e compostos com absorção em UV-254 nm.

## 2.4 Filtração

As tecnologias de filtração direta surgiram, em estações de ciclo completo que possuíam dificuldade do tratamento de águas com turbidez e cor verdadeira relativamente baixa. Nesta situação os flocos formados pelo mecanismo de coagulação por varredura não obtiam velocidade de sedimentação suficiente para a decantação.

Por ser a filtração responsável pela remoção de partículas que possuem uma forte relação com a presença de micro-organismos patogênicos, a eficiência da filtração pode influenciar diretamente na eficiência da desinfecção. Por isso, a utilização de filtração é sempre aconselhável antes de água a ser desinfetada.

A escolha da tecnologia de tratamento e a forma como a filtração será usada baseia-se no estudo da qualidade da água bruta. Pádua e colaboradores (2006) comentam que em geral, águas que tenham predominância de partículas menores que 5  $\mu\text{m}$  requerem a floculação; enquanto águas com predominância de partículas maiores que 5  $\mu\text{m}$  podem, geralmente, ser coaguladas e submetidas à filtração direta, sem necessidade da floculação.

De acordo com Dalsasso e Sens (2006) a dinâmica do processo de filtração consiste na ação conjunta de três mecanismos: (i) o transporte, (ii) aderência e (iii) desprendimento das partículas em suspensão que se pretende remover. O regime de escoamento em geral é laminar e para que as partículas sejam removidas é necessário que as mesmas sejam desviadas das suas trajetórias e conduzidas à superfície dos grãos. Em seguida as forças responsáveis pela aderência devem ser superiores às que agem para o desprendimento das partículas.

Dentro do mecanismo de transporte destacam-se os mecanismos:

- Coagem: retenção de partículas maiores que os espaços presentes entre os grãos do meio filtrante.

- Sedimentação: ocorre com partículas que possuem densidade maior que a da água (densidade entre 1,01 -1,05). Estas partículas são capazes de desviar-se dessa trajetória percorrida, sedimentando-se nos grãos do meio filtrante.

- Interceptação: Consiste no choque da partícula e posterior deposição nos grãos do meio filtrante. Ocorre principalmente durante a passagem da água de

forma tangencial pelos grãos e sempre que a distância da linha da corrente de água para a superfície do grão for inferior à metade do diâmetro da partícula.

- Difusão: Desprendimento das partículas da massa líquida decorrente do movimento Browniano gerado em decorrência da agitação.

- Impacto inercial: ocorre em partículas que, além de possuírem uma grande dimensão, possuem também uma densidade suficiente para manter a sua trajetória durante a filtração, não seguindo o sentido das correntes.

- Forças hidrodinâmicas: ocorre principalmente em partículas grandes, mas com densidade e com dimensões que impedem a remoção por outros mecanismos.

Para os mecanismos de aderência enuncia-se:

- Forças de Van der Waals: devido à presença de cargas desestabilizadas no processo de coagulação, as forças de van der Waals tendem a agir promovendo a aderência dessas partículas desestabilizadas à parede superficial do meio filtrante.

- Forças eletrostáticas: ocorrem principalmente devido à ação das cargas presentes nos grãos do meio filtrante (areia ou antracito).

- Pontes químicas: podem ocorrer quando auxiliares à coagulação (polímeros) permanecem aderidos às partículas após a coagulação, porém com ramificações estendidas capazes de continuar ligações.

Segundo Di Bernardo et al. (2002) é possível, com o uso de filtros de laboratório acoplados a equipamento de jarreste ou filtro piloto com escoamento contínuo a reprodução real destes mecanismos que envolvem o processo de filtração. A utilização de filtros de laboratório (FLA) é capaz de estimar a tipologia (dosagens mais eficientes) de produtos químicos para otimizar a filtração.

## 2.5 Oxidação com uso do cloro

O uso de cloro no tratamento de água pode ter como objetivos principais a desinfecção (eliminação dos microorganismos patogênicos) e a oxidação (alteração de características da água em consequência da oxidação de compostos presentes).

A pré-oxidação é um processo caracterizado pelo uso de oxidante (cloro, permanganato de potássio, ozônio, etc) antecedendo a coagulação química.

Alguns autores relatam que a pré-oxidação tem sido empregada principalmente devido a filtração apresentar uma baixa eficiência na remoção de cor

verdadeira associada ao carbono orgânico dissolvido e as substâncias húmicas (TANGERINO, 2005).

Os processos convencionais de tratamento não são capazes de remover traços de micropoluentes, de origem química ou biológica, que podem causar diversas doenças crônicas se ingeridas por longo tempo (MONDARDO et al. 2006).

Na oxidação de qualquer substância, ocorre a alteração das suas características químicas devido ao aumento do número de oxidação do composto oxidado e conseqüentemente a redução do número de oxidação do oxidante. De um modo geral a oxidação em tratamentos de água, objetivam a conversão de substâncias indesejáveis em substâncias não prejudiciais e não objetáveis (ROSA, 2008).

O agente oxidante mais empregado tem sido o cloro, na forma gasosa ( $\text{Cl}_2$ ), hipoclorito de sódio ( $\text{NaOCl}$ ) e hipoclorito de cálcio ( $\text{Ca(OCl)}_2$ ). Porém, a ação do cloro com a matéria orgânica pode formar subprodutos que possuem efeitos crônicos nocivos aos seres humanos. Dentre os principais compostos destacam-se os Trialometanos (THM) e o ácido haloacético. A portaria 518 do Ministério da Saúde limita em  $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$  a concentração de THM em águas de abastecimento público porém, a referida portaria não estabelece limites para o ácido haloacético.

De acordo com Pereira (2009), os THM são formados através da reação de compostos halogenados e a matéria orgânica, ácidos húmicos e fúlvicos. Dentre os principais THM é possível destacar: clorofórmio ( $\text{CHCl}_3$ ), bromodiclorometano ( $\text{CHBrCl}_2$ ), dibromodiclorometano ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) e bromofórmio ( $\text{CHBr}_3$ ). O cloro também pode formar THM diante da presença de substâncias de algas, clorofila em especial, e produtos extracelulares com uma variedade de substâncias aromáticas (PASCHOALATO et al. 2008).

O grau de degradação de um composto orgânico pela ação de oxidantes depende de fatores como: força e tipo de oxidante, tempo de contato, tipos de organismos presentes na água, pH, temperatura, matéria orgânica dissolvida entre outros (ROSA, 2008). Da mesma forma, a formação de subprodutos da oxidação também pode ser função de tais variáveis.

## 2.6 Adsorção com carvão ativado

Uma das principais conseqüências da má qualidade das águas de mananciais usados para o consumo humano é a presença de algas. A eutrofização altera o meio principalmente pela presença de toxinas e compostos orgânicos responsáveis por gerar gosto e odor. Algumas destas toxinas podem estar presentes na água bruta e outras podem ser liberadas durante a evolução do tratamento devido à lise celular de algas (MOUCHET e BONNÉLYE, 1998 citados por OLIVEIRA, 2009).

De acordo com Müller et al. (2009) o tratamento de ciclo completo composto, por exemplo, por coagulação, floculação, decantação, filtração e cloração é eficiente para remoção de células intactas de cianobactérias e demais algas. Porém, após a lise celular que provoca a solubilização de toxinas na água, este tipo de tratamento torna-se menos eficaz. De forma semelhante, os subprodutos formados pela interação do cloro com a matéria orgânica presente na água, oferecem a mesma dificuldade de remoção.

A alternativa mais amplamente utilizada para remoção de cianotoxinas, eliminação de gosto e odor e remoção de subprodutos da oxidação é a adsorção com carvão ativado em pó (CAP).

Carvão ativado é nome dado ao grupo de carvões porosos manufaturados pelo tratamento com queima de gases ou por carbonização de materiais carbonáceos com ativação química simultânea (MARSH et al., 1997 citado por ROSA, 2008). Tal procedimento torna o material um forte adsorvente com alta porosidade e elevada área superficial.

Os índices mais utilizados para a caracterização do carvão ativado são o número de iodo e o índice de azul de metileno. Estes índices são indicações indiretas das quantidades de microporos e mesoporos respectivamente. Isso porque, os diâmetros das moléculas de iodo são facilmente adsorvidas por microporos (diâmetro menores 2 nm) e a molécula azul do metileno é preferencialmente adsorvida por poros com aberturas próximas de 2,0 nm (BACAOUI et al. 2001 citado por ROSA, 2008).

A adsorção é um processo que ocorre devido as interações dipolo-dipolo, pontes de hidrogênio e principalmente por forças de Van der Waals entre os compostos e os adsorventes.

Marchetto & Ferreira Filho (2005) estudaram o comportamento do processo de adsorção em carvão ativado em pó combinado com o processo de coagulação

em escala de jarreste. No trabalho em questão, buscava-se avaliar a remoção de compostos orgânicos causadores de gosto e odor em águas de abastecimento. Os resultados para um carvão de origem vegetal demonstraram uma eficiência de remoção entre 50 a 60% das substâncias responsáveis pelo gosto e odor da água, com uma dosagem de 20 mg.L<sup>-1</sup>. Os autores verificaram que alguns tipos de carvões (origem mineral) possuem sua atividade influenciada por alterações no pH de coagulação, sendo atribuída a variação à natureza do material adsorvente.

É evidenciado que a ação do carvão ativado não é seletiva e pode vir a ter o seu potencial de adsorção reduzido diante da presença de compostos orgânicos naturais sendo essencial a remoção destes durante o tratamento (FERREIRA FILHO e MARCHETTO, 2006). Por isso, torna-se importante a utilização de técnicas avaliativas que esbocem a melhor forma metodológica e as dosagens necessárias para a otimização da utilização do CAP, assim como, dos demais produtos químicos envolvidos no tratamento de água para o consumo humano.

## 2.7 Ensaio de tratabilidade

Ensaio em reatores estáticos (equipamento jarreste) são utilizados constantemente como ferramenta auxiliar para o tratamento de água em estações por ciclo completo. Recentemente, o equipamento tem sido utilizado para obter parâmetros de operação em estações de tratamento e instalações piloto ou ainda para avaliar e identificar em menor escala fenômenos que ocorrem em escalas reais.

Voltan (2005) utilizou reatores estáticos para avaliar os efeitos da ruptura e refloculação de flocos em água preparada com caulinita e coagulada com sulfato de alumínio. Constantino (2008) também utilizou reatores estáticos para avaliar a ruptura e refloculação de flocos usando em seus testes água preparada com substâncias húmicas e coagulação com sulfato de alumínio e cloreto férrico.

Mesmo quando a pesquisa se configura em escala piloto, faz-se a necessidade de etapas em reatores estáticos para estabelecimento de condições operacionais.

Kuroda (2006) estudando a remoção de células e subprodutos por dupla filtração, oxidação e adsorção utilizou reatores estáticos para dar subsídios para as condições de coagulação, filtração e adsorção da instalação piloto. No referido trabalho, também foram executados ensaios no jarreste para obtenção de valores de

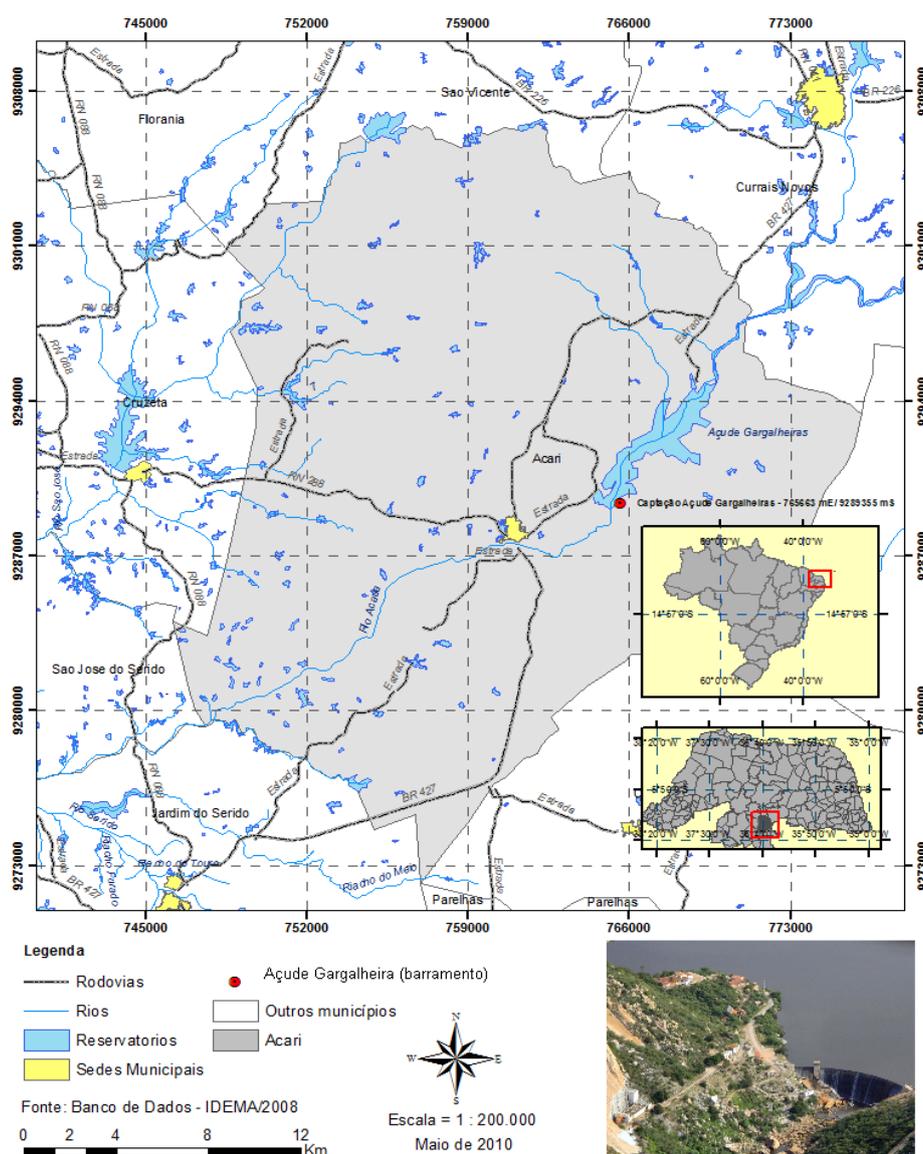
demanda de oxidantes considerando os ensaios em escala piloto e o atendimento aos valores limites residuais estabelecidos pela portaria MS 518/2004.

Atualmente mediante a novos desafios tecnológicos para o tratamento, como por exemplo a presença de eutrofização e micro-contaminantes em mananciais de captação de água, torna-se mais que necessário a utilização de técnicas, que possam subsidiar a tecnologia adotada em uma estação de tratamento de água. Seja otimizando processos já existentes, ou adaptando etapas mais eficientes a diferentes realidades locais, os ensaios em escala de laboratório (reatores estáticos) configuram o ponto inicial para determinação de variáveis e formas operacionais adotadas nas técnicas de tratamento de água.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O nome do manancial em estudo é Açude Marechal Dutra, popularmente conhecido como Açude Gargalheira (figura 2). Construído em 1959, está situado na região do Seridó norte rio-grandense, na zona rural do município de Acari, 220 km de Natal. A barragem (figura 3) está a uma altitude de 296 metros, represa o rio Acauã, parte integrante da bacia do rio Piranhas/Assu.



**Figura 2** - Localização geográfica do Açude Gargalheira, Acari/RN.  
Fonte: Duarte<sup>1</sup> - Banco de Dados Cartográficos do IDEMA (2008)

<sup>1</sup>DUARTE, Marco Antônio Calazans. **Tratamento de água para consumo humano de manancial eutrofizado através de pré e inter oxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração.** Tese de Doutorado a ser editada pela USP, 2010.

De acordo com a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH), a área do manancial abrange 780 hectares e o seu volume de armazenamento é de  $40 \times 10^6 \text{ m}^3$ . A barragem tem a altura máxima de 25 metros e a extensão de 250 metros.



**Figura 3** - Açude Marechal Dutra, Gargalheira, Acari/RN.

A bacia hidrográfica a qual pertence o açude abrange  $2.400 \text{ km}^2$  com precipitação média anual de  $700 \text{ mm}$ . A tabela 2 demonstra a situação volumétrica no ano de 2009. Percebe-se um comportamento de sangria ocorrido nos meses de maio, junho e julho, conhecido como a estação chuvosa. Esta situação ocorreu nos anos de 2008 e 2009.

**Tabela 2** - Comportamento da situação volumétrica do Açude Gargalheira durante o ano de 2009.

Data	Volume (m <sup>3</sup> )	Percentual (%)
dez/09	31.522.233	78,81
nov/09	33.088.293	82,72
out/09	35.496.298	88,74
set/09	37.640.482	94,1
ago/09	39.201.110	98
jul/09	40.000.000	100
jun/09	40.000.000	100
mai/09	40.000.000	100
abr/09	38.211.373	95,53
mar/09	28.392.292	70,98
fev/09	27.206.775	68,02
jan/09	27.358.783	68,4

Fonte: SEMARH (Secretaria do Estado do Rio Grande do Norte de Meio Ambiente e Recursos Hídricos).

De acordo a CAERN (Companhia de Água e Esgotos do Rio Grande do Norte) a água de Gargalheira é responsável pelo abastecimento de 50.000 habitantes, nas cidades de Acari, Currais Novos, Bulhões, Baixa Verde e Brejuí.

A ETA (Estação de Tratamento de Água) na região foi dimensionada para uma vazão de  $90,00 \text{ L.s}^{-1}$ . Inaugurada em fevereiro de 1969 com uma estrutura construída em concreto armado, hoje a ETA está sob a responsabilidade da CAERN.

O tratamento consiste na utilização da tecnologia de ciclo completo. A mistura rápida ocorre no Medidor Parshall, onde a água é coagulada com Hidróxi-cloreto de alumínio ou Sulfato de alumínio. O tratamento segue com uma floculação hidráulica de fluxo horizontal por um floculador com um grupo de 24 chicanas e em seguida, ocorre a decantação de fluxo horizontal, em dois decantadores retangulares.

A filtração rápida constitui-se da ação de três filtros com fluxo descendente em meio filtrante de areia. Os filtros foram projetados e construídos para operar com taxa e carga hidráulica constantes, mas atualmente funcionam com taxa declinante. Com base no volume tratado diário de  $7.200 \text{ m}^3$ , verifica-se que a taxa de filtração situa-se inferior a  $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ . Porém, a carga hidráulica é pequena e a duração das carreiras de filtração não ultrapassa às 24 horas. A camada filtrante é constituída de leito simples de areia e o sistema drenante formado por blocos cerâmicos LEOPOLD. O sistema de lavagem dos filtros é efetuado por contrafluxo de água tratada. Após a filtração, a água é encaminhada para o poço de reunião, onde é efetuada a etapa de desinfecção com aplicação de cloro gasoso.

A figura 4 destaca os decantadores e filtros utilizados na ETA Gargalheira. Nas dependências da estação existe um laboratório que serviu de suporte durante a pesquisa para o monitoramento da água bruta e os ensaios de tratabilidade.



**Figura 4** - Estação de Tratamento de Água de Gargalheira-RN.

### 3.2 Situação atual do Açude Gargalheira

No espelho de água do manancial, níveis bastante elevados de floração de algas são visivelmente detectados. Em algumas partes, devido a ação do vento, uma camada espessa de algas é direcionada às margens tornando inseguro o banho em áreas antes utilizadas (figura 5). Por esse motivo, a população não possui mais a confiança de utilizar a água para os mais diversos usos. A pesca está comprometida e a comunidade sente a necessidade de obter água para consumo de outras localidades.

Dados publicados pelo órgão ambiental do estado, IDEMA, referentes ao ano de 2009 podem confirmar as constatações visuais. Segundo o órgão ambiental, no primeiro semestre de 2009, o IET (Índice de Estado Trófico, considerando a ponderação do fósforo total e clorofila) no açude atingiu um valor de 69,3 caracterizando o manancial como hipereutrófico. No referido documento técnico o IDEMA comenta que as elevadas concentrações de oxigênio dissolvido (10,1 mg/L) e de DBO (12,5 mg/L) pode ser evidência de elevada produtividade fitoplactônica provavelmente associada a elevados teores de nutrientes eutrofizantes. Ainda há

comentários sobre o valor medido de fósforo total (0,164 mg/L) que encontra-se bem acima do limite estabelecido para ambientes lênticos ( $\leq 0,03$  mg/L).

Dados mais recentes fornecidos pela CAERN a respeito da análise quantitativa e qualitativa de cianobactérias presentes na água do açude coletada na chegada da ETA revelam um número de células/ml superior ao limite estabelecido pela Portaria nº 518/04 do ministério da Saúde. O resultado demonstra que nestas condições o monitoramento de cianobactérias deve obedecer à freqüência semanal. A tabela 3 expõe os resultados quantitativos e qualitativos encontrados no período de maio de 2009 a abril de 2010.

**Tabela 3** - Análises quantitativas e qualitativas das cianobactérias presentes na água do açude Gargalheiras.

Data da coleta	Táxons Identificados e células/ml	Total de células/ml
15/05/2009	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	1.520
	<i>Merismopedia sp.</i>	760
	<i>Microcystis sp.</i>	116.280
05/10/2009	<i>Chroococcus sp.</i>	24.464
	<i>Anabaena sp.</i>	20.016
06/04/2010	<i>Chroococcus sp.</i>	91.440
	<i>Anabaena planctônica</i>	7.128

Fonte: CAERN (Companhia de água e esgotos do RN).

Há efetivamente um perigo na utilização da água do Gargalheira para o consumo humano. Principalmente porque, nestas condições de eutrofização, é possível a presença de toxinas liberadas por cianobactérias.

Apesar do monitoramento da qualidade da água tratada não fazer parte dos objetivos desta pesquisa, a presença desse fenômeno sugere que em pouco tempo o tratamento empregado não será capaz de distribuir uma água potável.



**Figura 5** - Eutrofização visivelmente detectada nas margens do Açude Gargalheira.

A instalação piloto (figura 6) foi construída nas dependências da ETA Gargalheira, com o auxílio financeiro da CAERN e do CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e, propõe a avaliação de etapas mais eficientes na remoção de cianobactérias<sup>2</sup>. A configuração da instalação permite a presença das seguintes etapas: pré-oxidação, adsorção em Carvão Ativado Pulverizado (CAP) através do uso de bombas dosadoras, coagulação, filtração em filtros ascendentes em pedregulho, inter-oxidação, uma segunda filtração com filtros descendentes de areia e por fim uma adsorção em Carvão Ativado Granular (CAG). Todas estas etapas podem ser testadas de forma modular possibilitando executar diferentes combinações de tecnologias.

A pesquisa em escala de laboratório, como descrito nos objetivos expostos neste trabalho, foi responsável pelo fornecimento de parâmetros de funcionamento e tipologia de produtos usados na instalação piloto (IP). Dados de pH de coagulação, dosagem do coagulante, dosagem do oxidante, dosagem do adsorvente e de

---

<sup>2</sup>DUARTE, Marco Antônio Calazans. **Tratamento de água para consumo humano de manancial eutrofizado através de pré e inter oxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração**. Tese de Doutorado a ser editada pela USP, 2010.

dispersão dos mesmos na água bruta foram sistematicamente fornecidos pelos resultados obtidos em escala de bancada à instalação piloto.

A presença do experimento na região motivou o desenvolvimento de outras pesquisas de estudantes do IFRN (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio grande do Norte). Dentre outros trabalhos foram desenvolvidos: a caracterização físico-química e microbiológica da água bruta, o estudo do potencial de formação de Thrialometanos e a avaliação da eficiência de oxidantes na pré e inter-oxidação.



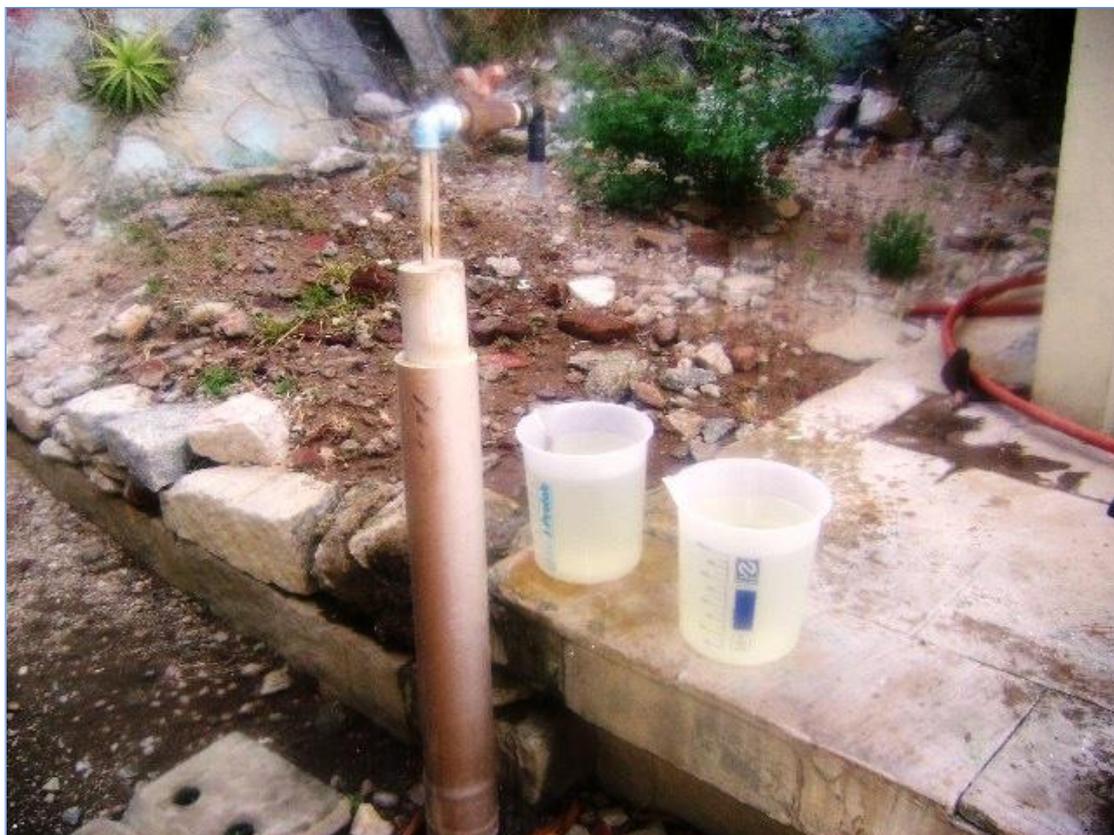
**Figura 6** - Instalação piloto dotada das etapas de préoxidação, adsorção com CAP, inter-oxidação, dupla filtração e adsorção em carvão ativado granular.

Com a união de pesquisas com objeto de estudo em comum, foi elaborado um projeto de pesquisa intitulado de *Cianobactérias e Dupla filtração*. O mesmo foi aprovado pelo CNPQ e forneceu suporte financeiro para deslocamento a campo, serviços de manutenção e compra de equipamentos de laboratório.

Juntos, os ensaios na instalação piloto e em escala de bancada de laboratório se complementaram na busca para determinar de modo técnico as etapas de tratamento e suas respectivas tipologias de produtos químicos necessários para um tratamento mais adequado à realidade da água do manancial.

### 3.3 Caracterização da água bruta.

As coletas utilizadas para a caracterização da água bruta foram realizadas com uma periodicidade semanal (quarta-feira). Para que as amostras analisadas representassem fielmente a água captada para o tratamento na estação, as coletas foram efetuadas em uma torneira situada na entrada da ETA Gargalheira (figura 7). Sendo assim, tanto na caracterização da água como nos ensaios em escala de bancada, a água bruta utilizada foi a mesma que se encaminhava para o tratamento na ETA Gargalheira.



**Figura 7** - Torneira utilizada para captação de água bruta.

Em campo, foram efetuadas as medições de temperatura, pH, cor aparente, turbidez e a filtração em filtro de fibra de vidro. A água filtrada foi utilizada para a medição de cor verdadeira e o filtro era imediatamente acondicionado em papel alumínio para posterior medição de clorofila a.

Em cada campanha foi coletado para execução das análises um recipiente com 5 litros de água para medição de parâmetros físico-químicos. Durante o transporte, esse recipiente e o filtro de fibra de vidro foram mantidos refrigerados até chegarem aos laboratórios em Natal.

A tabela 4 apresenta as análises físico-químicas efetuadas e seus respectivos métodos utilizados com a finalidade de obter as características da água bruta do manancial.

**Tabela 4** - Análises realizadas para a caracterização da água bruta.

PARÂMETRO	MÉTODO	REFERÊNCIA
Cor aparente e verdadeira	Colorimétrico – DM Cor (Digimed)	APHA 2005
Turbidez	Nefelométrico – DM TU (Digimed)	APHA 2005
Alcalinidade	Método titulométrico usando $H_2SO_4$	APHA 2005
Sólidos totais dissolvidos	Método gravimétrico	APHA 2005
Matéria orgânica natural – oxigênio consumido.	Método da oxidação com permanganato de potássio.	NBR 10739/1989
Clorofila a	Extração com metanol a quente	JONES 1979
Fósforo total	Colorimetria com previa digestão	APHA 2005
Nitrato	Método Rodhier	APHA 2005
Nitrogênio amoniacal	Colorimétrico (nessler)	APHA 2005
Absorbância a 254 nm	Espectrofotometria com luz abaixo do visível	

Os parâmetros físico-químicos: alcalinidade, sólidos totais dissolvidos, oxigênio consumido, clorofila a, fósforo total, nitrato, nitrogênio amoniacal e a medição da absorbância a 254 nm foram mensurados no laboratório do IFRN (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN) em Natal.

### 3.4 Ensaios de tratabilidade

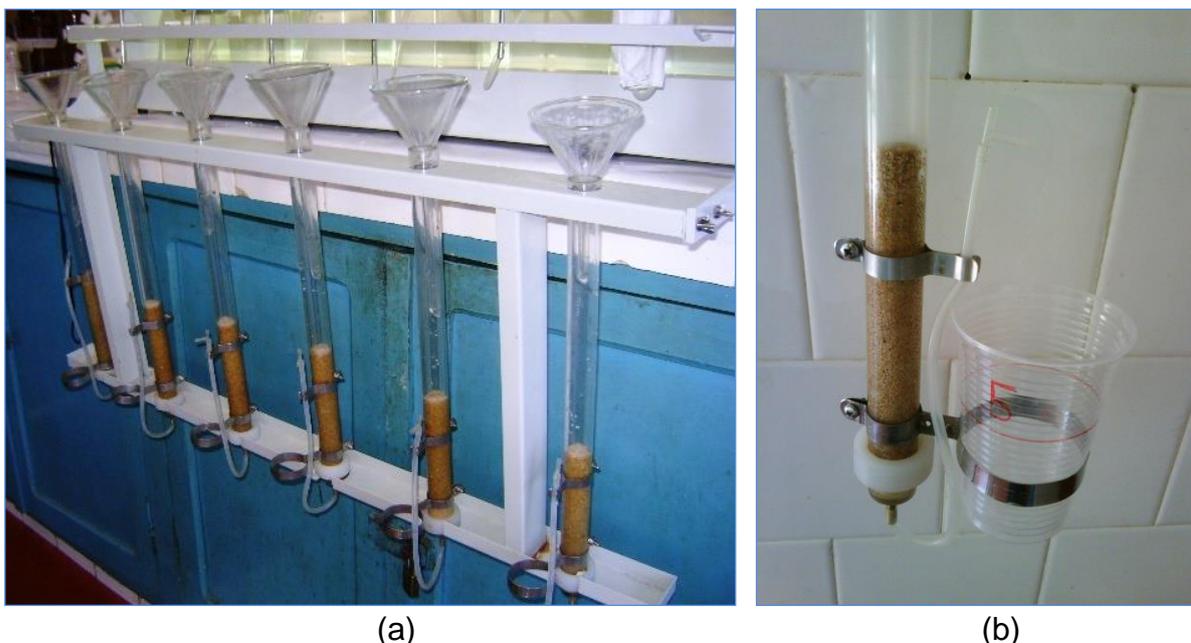
Para os ensaios de tratabilidade em bancada de laboratório, o equipamento utilizado foi o agitador jarreste de marca Nova Ética modelo 218/1 (figura 8). O equipamento possui seis jarros com o volume de 2 litros cada.



**Figura 8** - Jarreste Nova Ética modelo 218/1.

Para cada reator há uma palheta metálica interligada ao misturador com mostrador digital que, de acordo com o fabricante, é capaz de empregar uma rotação que varia entre 21,3 a 550 rpm (rotações por minuto). Essa rotação em rpm pode ser convertida em gradiente de mistura ( $s^{-1}$ ) utilizando as dimensões do jarro e da palheta metálica.

Para os ensaios de filtração direta, foram adaptados seis filtros de acrílico com diâmetro fixo de 19 mm (figuras 9, (a) e (b)), os mesmos, após cada etapa de mistura rápida recebiam a massa de água coagulada através de tubos curvados de metal para a execução da filtração descendente. Em todos os ensaios desta pesquisa foram utilizados este tipo de filtração. A espessura do meio filtrante utilizada foi de 15 cm.



**Figura 9** - (a) Adaptação para os filtros de laboratório, (b) Filtro de laboratório e meio filtrante.

Os ensaios no jarteste objetivaram determinar as eficiências de dois coagulantes a base de alumínio, o HCA (Hidróxi-cloreto de alumínio com 23% de alumina) com fórmula  $Al_x(H_2O)_{(6x-2y)}(OH)_yCl_{(3x-y)}$  e SA (Sulfato de alumínio) de fórmula  $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ , em que  $n=14,3$  ou  $18$ .

Os dois coagulantes testados são os mesmos usados na estação de tratamento de Gargalheira e foram fornecidos comercialmente a CAERN. O HCA possui a forma líquida e o SA é granulado.

Durante a pesquisa, foram preparadas soluções com diferentes concentrações utilizando água destilada para ambos os coagulantes. Para simular a real utilização destes produtos químicos seria importante que fossem preparadas soluções com água tratada pela própria ETA, porém, como as condições de eficiência de tratamento da ETA gargalheiras também estão sendo questionadas, optou-se pelo uso de água destilada. Em cada solução preparada tinha-se a finalidade de gerar dentro do jarro uma dosagem do coagulante por litro. Tomando como exemplo uma solução de 4 gramas de sulfato de alumínio por litro ou 4 mgSA/ml. Como em cada mililitro há 4 miligramas, com a adição de 10 ml no jarro, ou seja, 40 mg em dois litros de água bruta, o resultado é uma dosagem de 20 miligramas por litro.

As soluções de coagulantes foram produzidas com a adoção de concentrações que adéqüem às dosagens necessárias com volumes situados entre três e quarenta mililitros. A justificativa para a adoção dessa faixa de volumes reside nas limitações dos recipientes de adição do equipamento, que comporta apenas 45

mililitros. Outro motivo para a não utilização de soluções com altas concentrações, é que essas induziriam ao uso de volumes pequenos que podem provocar perdas nas paredes do recipiente de adição. Soluções com concentrações baixas também foram evitadas, principalmente porque, grandes volumes de solução adicionados poderiam interferir no volume de água bruta contido no jarro.

Nos ensaios com pré-oxidação, adotou-se o cloro fornecido à CAERN na forma de pastilhas de Hipoclorito de Cálcio como oxidante. Uma massa da pastilha era retirada e macerada antes de formar a solução. Para a determinação das concentrações das soluções formadas do oxidante foi utilizado o equipamento Aqua-color para determinação de cloro, de marca Policontrol. O equipamento foi calibrado com soluções com concentrações pré-determinadas pelo método titulométrico da determinação de Cloro, segundo APHA (2005).

Os ensaios no jarreste foram de forma esquemática divididos em seis fases subdivididas em series. A tabela 5 descreve cada fase com suas respectivas séries.

Na primeira fase da pesquisa (determinação dos parâmetros de mistura rápida) os ensaios tiveram como base a metodologia proposta por Di Bernardo et al. (2002). Porém, os demais ensaios foram executados com métodos criados e adaptados para a pesquisa. Estes novos métodos fundamentaram a construção dos diagramas de coagulação, os ensaios das etapas de oxidação, adsorção e ensaios que compararam o uso do HCA e o SA.

**Tabela 5** - Fases da pesquisa no jarreste, subdivisões e tipos de ensaios realizados.

FASE DA PESQUISA	SÉRIE	OBJETIVO
I (Mistura rápida).	I.1	Dosagens de coagulantes e pH de coagulação.
	I.2	Gradientes e tempos de mistura.
II (Filtração direta).	II.1	Avaliação do meio filtrante.
	II.2	Avaliação da taxa de filtração.
III (Diagramas de coagulação)	III.1	Diagrama de coagulação para o HCA.
	III.2	Diagrama de coagulação para o SA
IV (Pré-oxidação)	IV.1	Dosagem de cloro.
	IV.2	Tempo de oxidação.
V (Adsorção)	V.1	Dosagem de CAP.
	V.2	Tempo de adsorção.
VI (Ensaio com pré-oxidação, adsorção e filtração).	VI.1	Eficiências da filtração direta.
	VI.2	Eficiências da pré-oxidação/filtração direta.
	VI.3	Eficiências da pré-oxidação/adsorção/ filtração direta.

Nas fases I, II e III os ensaios foram efetuados inicialmente para determinação dos parâmetros para o HCA e posteriormente para o sulfato de alumínio.

Para as fases IV e V, ensaios de oxidação e adsorção, o coagulante utilizado foi o HCA com a dosagem escolhida nas etapas anteriores. Após determinada a dosagem de oxidante, tempo de oxidação, dosagem de adsorvente e tempo de adsorção, os mesmos valores encontrados para o HCA foram adotados nas etapas posteriores também para o sulfato de alumínio.

Em resumo, a determinação de todos os parâmetros necessários em todas as etapas demandou um total de 89 ensaios. A distribuição dos mesmos nas fases e séries e o número de ensaios para cada coagulante esta discriminada na tabela 6.

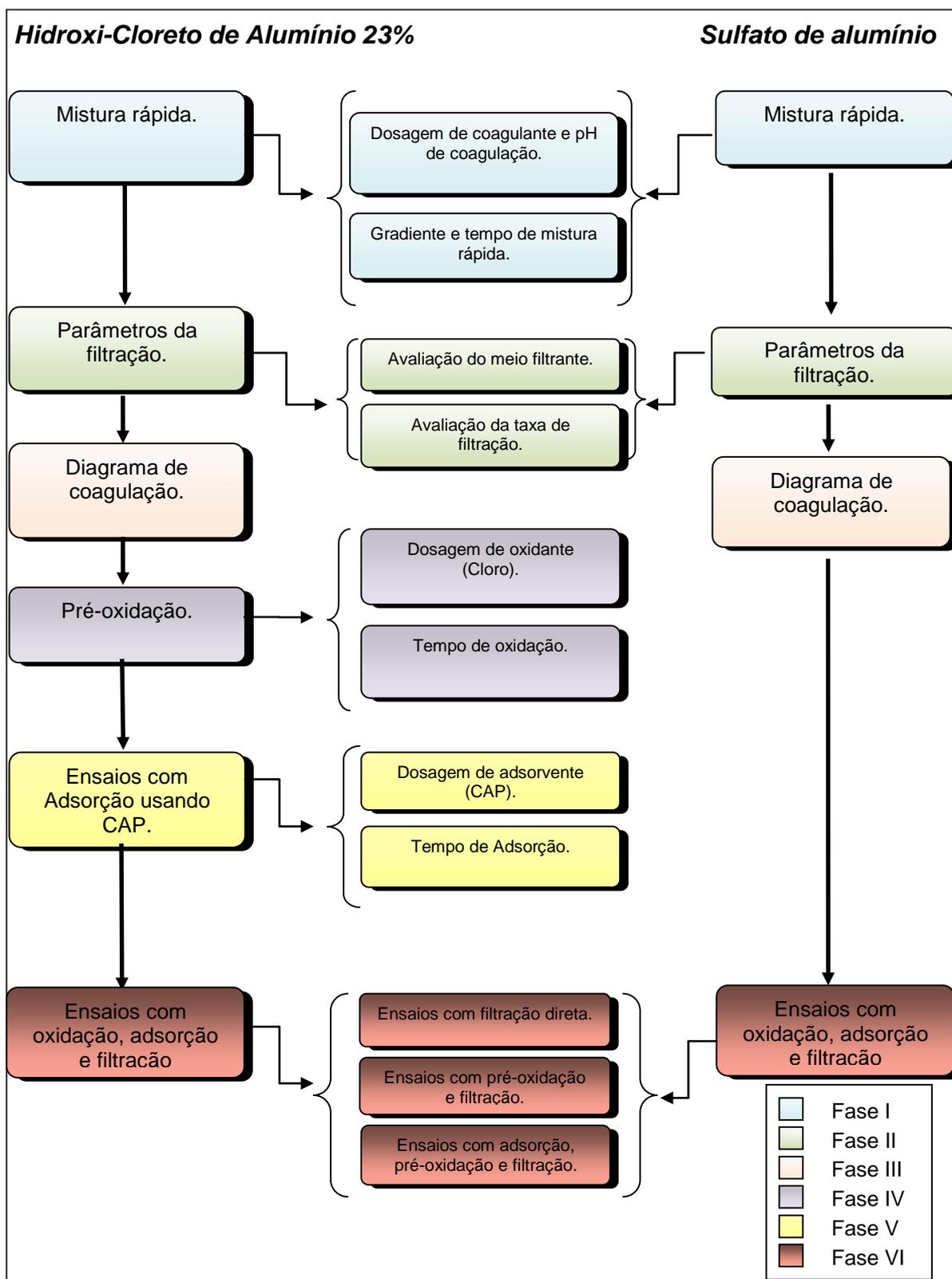
**Tabela 6** - Distribuição dos ensaios de tratabilidade nas fases e séries da pesquisa.

FASE DA PESQUISA	SÉRIE	ENSAIOS			
		HCA		SA	
		Número	Quantidade	Número	Quantidade
Mistura rápida	I.1	1, 2, 3, 4, 70 e 71.	6	5 e 6	2
	I.2	7, 8, 9, 10.	4	11, 12, 13 e 14.	4
Filtração direta	II.1	15 e 16	2	17 e 18	2
	II.2	19	1	20	1
Diagramas de coagulação	III.1	21 a 51	31	xxxx	xxxx
	III.2	xxxx	xxxx	52 a 69	18
Pré-oxidação	IV.1	72, 74 e 75.	3	xxxx	xxxx
	IV.2	73	1	xxxx	xxxx
Adsorção com CAP	V.1	76 e 77	2	xxxx	xxxx
	V.2	78 e 79	2	xxxx	xxxx
Ensaio com pré-oxidação, adsorção e filtração	VI.1	80, 81, 82	3	83, 84 e 85	3
	VI.2	86	1	87	1
	VI.3	88	1	89	1
TOTAL	xxxx	xxxx	57	xxxx	32

As seqüências dos ensaios seguiram ordens iguais para os dois coagulantes. Inicialmente buscou obter uma dosagem, o pH de coagulação, gradiente e tempo ótimos de mistura. Com os parâmetros da mistura rápida determinados, a próxima etapa foi a avaliação da influência dos parâmetros da filtração para os dois coagulantes. Em seguida foram construídos os diagramas de coagulação e posteriormente, a determinação dos parâmetros envolvidos nas etapas de pré-oxidação e adsorção. Ao final, com todos os parâmetros das etapas de tratamento determinados, foram executados ensaios com filtração direta, com pré-oxidação e

adsorção para identificar a influência de cada etapa de tratamento nas eficiências das remoções.

A figura 10 esboça um fluxograma que demonstra de forma gráfica a seqüência dos ensaios executados durante a metodologia.



**Figura 10** - Fluxograma dos ensaios de tratabilidade dividido por tipo de coagulante.

Os ensaios efetuados conforme a figura 10 foram realizados exclusivamente para a água do açude Gargalheira. Por isso, para retratar de forma mais real as características da água, após o segundo ensaio optou-se pela realização dos testes no próprio campo.

O laboratório da CAERN na estação de tratamento de água situada em Gargalheira-RN foi o local da realização dos demais testes. Com o jarreste próximo a tomada de captação de água do açude, um número maior de ensaios foi possível de ser efetuado em espaços menores de tempo.

Durante a realização dos ensaios o ponto inicial foi sempre a uniformização em todos os jarros das características da água a ser tratada dentro de um único teste. Sendo assim, ao iniciar um ensaio os jarros eram preenchidos gradativamente e simultaneamente com volumes iguais (500 mililitros medidos com auxílio de proveta) da mesma água coletada (figura 11). A medida que os reatores eram preenchidos, um béquer de mesma capacidade volumétrica (2 litros) também recebia a água da mesma forma.



**Figura 11** - Utilização de Béqueres e proveta para homogeneização da água bruta durante os ensaios.

Assim, ao final de quatro adições, seis jarros e um béquer estavam preenchidos com dois litros de água bruta cada um. A amostra de água contida no

béquer era utilizada para as medições dos parâmetros iniciais da água bruta: pH, cor aparente e verdadeira, turbidez e quando necessário, matéria orgânica. Em todos os ensaios este método de preenchimento foi adotado garantindo a homogeneidade da água contida em cada um dos jarros.

Depois de conseguir a homogeneidade da água bruta em todos os jarros do ensaio a ser realizado, o segundo passo foi a fixação de parâmetros durante o decorrer do ensaio. Para a determinação da influência real do parâmetro pesquisado (parâmetro de variação), somente ele deve se alterar durante o teste. Exemplificando, na determinação do tempo de mistura rápida, todos demais parâmetros: dosagem de coagulante e pH de coagulação, gradiente de mistura rápida, meio filtrante e taxa de filtração, permaneceram constantes para todos os jarros, ficando somente o tempo de mistura rápida como parâmetro de variação.

A taxa de filtração recebeu uma forma peculiar de monitoramento, adotada somente após o terceiro ensaio. Foi utilizada a correspondência da taxa escolhida por uma determinada vazão expressa em mililitros por minuto. Por exemplo, a adoção da taxa de  $81 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ , equivale a vazão de 16 ml/min. Quando utilizada a filtração por dez minutos resulta em um volume de 160 ml de efluente.

Embora pareça ser bastante prático, observou-se durante toda a pesquisa uma dificuldade em manter, para todos os jarros, de forma exatamente uniforme essa vazão, e conseqüentemente a taxa.

A eficiência do tratamento para cada variável monitorada em cada ensaio foi calculada através das análises laboratoriais realizadas com a água bruta e com os efluentes dos jarros. As fases I, II, III da pesquisa no teste de jarros, necessitaram de respostas imediatas para a continuidade das demais fases. Sendo assim, foram adotadas as variáveis passíveis de mensuração no próprio laboratório de campo. Foram elas, cor aparente, pH, temperatura e turbidez.

A medição das variáveis escolhidas para campo contaram com um pH-metro que pertence CAERN (Companhia de água e esgotos do RN), e os equipamentos para cor (DM Cor) e turbidez (DM TU) de marca Digimed, adquiridos junto ao fabricante com recursos do CNPQ através do projeto de pesquisa.

Para a determinação da turbidez e cor, as calibrações dos equipamentos foram realizadas com os padrões fornecidos pelo fabricante, sendo tomado como referência o valor mínimo de turbidez de 0,12 UNT para uma água destilada, bifiltrada em membrana de celulose com  $0,45 \mu\text{m}$ .

A calibração do colorímetro seguiu o método disposto na NBR 13798/1997. Esse consiste na utilização do cloroplatinato de potássio e o cloreto cobaltoso como reagentes.

A figura 12 retrata os equipamentos utilizados em campo: PH-metro, turbidímetro, colorímetro assim como, o Aqua-color para cloro usado nos ensaios de bancada com pré-oxidação.



**Figura 12** - Equipamentos utilizados durante a pesquisa no laboratório da CAERN em Acari/RN.

Posteriormente, com a adoção de ensaios mais completos, onde se fez necessária a determinação da eficiência de remoção de matéria orgânica, foram coletadas amostras da água bruta utilizada nos ensaios e dos efluentes de cada jarro. Todas foram acondicionadas em recipiente refrigerado e levadas para o Laboratório de tratamento de águas e efluentes no IFRN em Natal, onde foram desenvolvidos os métodos de determinação de Matéria orgânica natural de acordo com a NBR 10739/1989 (figura 13 (a)) e medição da Absorbância a 254 nm (figura 13 (b)).



**Figura 13** - (a) Determinação da matéria orgânica natural, (b) espectrofotômetro de UV-VIS

### 3.4.1 Fases da pesquisa no Jarteste

#### 3.4.1.1 Fase I - Determinação dos parâmetros da mistura rápida

Nessa fase foram determinadas as variáveis de dosagem de coagulante, pH de coagulação e as variáveis de dispersão do coagulante na massa líquida, gradiente e tempo de mistura. Os métodos foram desenvolvidos inteiramente para o HCA e posteriormente para SA, obtendo assim os parâmetros mais adequados da mistura rápida para os dois coagulantes.

- Série I.1 - Determinação de dosagens iniciais dos coagulantes e do pH de coagulação

Essa série da primeira etapa objetivou determinar as dosagens dos coagulantes e seus respectivos pHs de coagulação. O intuito principal foi encontrar uma dosagem e pH que demonstrasse mais eficiência na remoção de cor aparente e turbidez.

Os testes que objetivavam a determinação da dosagem foram realizados com a fixação em cada jarro do coagulante (HCA ou SA), dos parâmetros tempo e gradiente de mistura, taxa de filtração e meio filtrante. Assim, o parâmetro de variação foi apenas a dosagem do coagulante usada nos jarros.

Após definida uma dosagem de coagulante, o próximo parâmetro pesquisado foi o pH de coagulação. Adotando agora a fixação em todos os jarros da dosagem do coagulante encontrada no ensaio anterior. Assim, a variável foi somente o pH de coagulação, alterado com a utilização dos ácidos sulfúrico, e hidróxido de sódio.

Foram realizados nesta série, conforme o descrito na tabela 5, um número maior de ensaios para o HCA, em virtude do mesmo coagulante está sendo utilizado paralelamente na instalação piloto e assim necessitar de adequações de dosagens mediante as variações temporais na qualidade da água bruta.

Quatro ensaios com o HCA foram realizados antes da determinação do gradiente de mistura rápida, os outros dois foram executados mediante as primeiras determinações do gradiente e tempo de mistura rápida e antecedendo as etapas de pré-oxidação e adsorção.

- Série I.2 - Otimização da mistura rápida com determinação dos gradientes e tempos de mistura.

Com a dosagem dos coagulantes determinada e os seus respectivos pHs de coagulação, a próxima série objetivou a otimização da mistura rápida com a determinação dos parâmetros tempo e gradiente para cada coagulante.

Durante a realização desta verificou-se uma limitação no equipamento jarreste utilizado. Apesar das especificações do fabricante indicar a possibilidade do emprego de rotações até 550 rpm que resultariam em gradientes máximos de  $1400 \text{ s}^{-1}$ , os testes demonstraram que somente com rotações de até 350 rpm (gradiente de mistura de  $800 \text{ s}^{-1}$ ) era possível operar o equipamento com confiança. Valores acima 350 rpm causaram instabilidade, provocando instantes de rotações mais rápidas e instantes de rotações mais baixas, diferenciando-se da rotação escolhida no mostrador digital.

Diante destas observações, os ensaios seguiram com o objetivo de encontrar as condições de mistura rápida mais favoráveis para os dois coagulantes, com a limitação máxima de GMR fixado em  $800 \text{ s}^{-1}$ .

Objetivando o aperfeiçoamento da mistura rápida determinando a melhor combinação tempo e gradiente, os ensaios procederam com a fixação do gradiente e com variações do tempo de mistura entre os jarros.

Assim, ao usar o HCA, para cada um dos gradientes pesquisados 400, 600, 700 e  $800 \text{ s}^{-1}$  (rotações 234, 300, 317, 350 rpm respectivamente) foram obtidos

resultados para os tempos de 3, 6, 9, 12, 17 e 22 segundos. Desta forma foi possível, não somente determinar o melhor gradiente e o melhor tempo, mas, a combinação entre os dois parâmetros que mais contribui para remoção de cor e turbidez.

Para o sulfato de alumínio foram realizados quatro ensaios nesta etapa, utilizando os mesmos gradientes pesquisados para o HCA, os tempos 3, 7, 11, 17, 20 e 30 segundos na mistura rápida e o mesmo método de obtenção da melhor combinação.

O uso de diferentes tempos nos jarros 1 a 6 durante um mesmo ensaio seguiu o seguinte método: A mistura rápida no jarro com o maior tempo (jarro 1) iniciava-se primeiro. Logo em seguida adicionava-se nos jarros subsequentes o coagulante e o auxiliar (ácido ou base para correção do pH) de forma decrescente nos tempos de mistura. O instante para a adição em cada jarro é dado pela diferença ( $T_o - T_i$ ), onde  $T_o$  é o tempo de mistura do jarro 1 e  $T_i$  o tempo de mistura a ser testado no jarro subsequente.

Ao final dos ensaios, após a filtração da água de todos os jarros, realizava-se a análise dos efluentes e identificava-se a eficiência de remoção de cor aparente e turbidez dos tempos pesquisados em cada gradiente de mistura. A melhor combinação foi escolhida com o auxílio de um gráfico demonstrando os diferentes comportamentos das variáveis analisadas.

#### 3.4.1.2 Fase II - Avaliação dos parâmetros da filtração.

- Série II.1 - Avaliação da granulometria do meio filtrante

A próxima série objetivou a avaliação da influência da granulometria do meio filtrante empregada na filtração direta. As areias utilizadas foram adquiridas comercialmente junto a Aquatrat do Nordeste.

As granulometrias pesquisadas seguiram a os valores propostos por Di Bernardo et al. (2002): Areia tipo 1 (Filtro de Laboratório - FLA 1) - grãos entre 0,297 e 0,420 mm, areia tipo 2 (Filtro de Laboratório - FLA 2) - grãos entre 0,42 e 0,84 mm e areia tipo 3 (Filtro de Laboratório - FLA 3) - grãos entre 0,59 e 1,41 mm.

Em cada ensaio realizado nesta etapa, um tipo de areia foi destinado para cada jarro. Como o equipamento possui seis filtros e são três as quantidades de areias testadas, cada meio filtrante foi testado em duplicata em cada ensaio.

Assim em cada ensaio desta série a configuração dos jarros foram Jarro 1 - FLA 1, Jarro 2 - FLA 2, Jarro 3 - FLA 3, Jarro 4 - FLA 1, Jarro 5 - FLA 2 e Jarro 6 - FLA 3.

Novamente a escolha do meio filtrante foi baseada na eficiência de remoção de cor e turbidez determinada com a análise da água bruta e dos efluentes. Agora, com a utilização do meio filtrante com o único parâmetro de variação. Para cada coagulante foram realizados dois ensaios um antes e um depois da pesquisa da taxa de filtração.

- Série II.2 - Avaliação da taxa de filtração.

Com a escolha do melhor tipo de areia a ser empregada na filtração, foi efetuada a pesquisa da influência da taxa de filtração no tratamento. As taxas testadas também foram baseadas na proposta de Di Bernardo et al. (2002). Os valores teóricos utilizados estão dispostos na tabela 7.

**Tabela 7** - Vazões adotadas na filtração e respectivas taxas de filtração.

Vazões (ml/min)	Taxas (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d)
12	61
14	71
16	81
18	91
20	102

**FONTE:** Di Bernardo et al. 2002.

Como se pode observar a taxa pode ser medida pela vazão do efluente do filtro. Desta forma, procurou-se durante um único ensaio variar as vazões entre 12 a 20 ml/min entre os seis jarros. Mesmo realizando a mensuração da taxa pela vazão filtrada, esse parâmetro apresentou dificuldades de fixação durante os testes, provocando assim diferenças entre as taxas teóricas a pesquisar e as taxas de filtração reais encontradas. Sendo assim, foi utilizada a seguinte estratégia: após a filtração o volume filtrado era medido, calculada a vazão real e a taxa de filtração correspondente. Exemplificando, para uma vazão média encontrada igual a 12,5 ml/min então taxa correspondente é igual a:

$TF = Q/Af$  , onde TF = taxa de filtração

Q= vazão

Af = área de filtração.

Cálculo de Af : diâmetro = 19 mm

$$A_f = \pi D^2/4 = 3,1416 \times (19 \times 10^{-3})^2 / 4 \text{ m} = 2,835 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Para Q=12,5 ml/min ou cm<sup>3</sup> / min:

$$TF = Q/A_f = 12,5 / 2,835 \times 10^{-4} = 12,5 \times 10^{-6} \times 1440 / 2,835 \times 10^{-4} \Rightarrow$$

$$T_f = 63,49 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

As taxas de filtração médias variaram entre 46,2 a 114,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Para cada coagulante foi realizado um ensaio após a determinação da melhor granulometria do meio filtrante. Os testes seguiram a mesma metodologia, com a utilização da taxa de filtração (vazão) como o único parâmetro de variação. Para diferenciar os jarros com diferentes taxas de filtração, foram adaptados recipientes de 300 mililitros com diferentes marcações para facilitar a coleta de diferentes volumes dos efluentes em um mesmo espaço de tempo.

### 3.4.1.3 Fase III - Diagramas de coagulação

Nesta fase da pesquisa foram construídos dois diagramas de coagulação, um para o HCA (Hidroxi-cloreto de alumínio a 23%) e outro para o sulfato de alumínio. A construção foi feita variando o pH de coagulação de 6,00 e 9,00 para cada dosagem fixa de coagulante. Assim, foi possível identificar o comportamento do tratamento com a variação do par, dosagem de coagulante e pH de coagulação.

A elaboração do diagrama para o HCA (série III.1) foi desenvolvida com 31 ensaios e as dosagens do coagulante testadas variaram entre 2 mg.L<sup>-1</sup> a 25 mg.L<sup>-1</sup>. Para o sulfato foram realizados 18 ensaios (série III.2) e a variação foi de 2 mg.L<sup>-1</sup> a 36 mg.L<sup>-1</sup>, visto que, de acordo com os ensaios anteriores, são necessárias dosagens maiores para o sulfato.

Os ensaios seguiram com a adoção da mesma metodologia, utilização do pH de coagulação como único parâmetro de variação. Os demais parâmetros adotados foram os determinados nas fases I e II.

As construções dos gráficos tomaram com base a medição turbidez remanescente. A adoção da variável deve-se principalmente a presença do turbidímetro em campo. O software *Surfer* foi utilizado para tratamento de dados e confecção dos gráficos de forma digital.

Devido as variações das características da água bruta, com valores de turbidez iniciais diferentes durante a construção de um único diagrama, foram utilizadas na construção do gráfico as frações de turbidez remanescentes  $Tur_x/Tur$  onde,  $Tur_x$  = turbidez do efluente e  $Tur$  = turbidez da água bruta.

Os diagramas permitiram, para cada coagulante, identificar as regiões com os maiores percentuais de remoção de turbidez. Tais regiões foram escolhidas para a realização dos testes da fase VI. Também foi possível supor pelas dosagens empregadas e pela remoção, faixas de atuação dos mecanismos de coagulação por neutralização de cargas e por varredura.

As regiões foram escolhidas por demonstrarem as melhores remoções de turbidez, independentemente se o par, dosagem do coagulante e pH de coagulação, promoveu mecanismo de neutralização de cargas ou varredura. Embora o mecanismo de neutralização de cargas seja mais indicado, devido ao uso da tecnologia de filtração direta, somente nas conclusões do trabalho encontradas depois da Fase VI será possível propor dosagens e pH de coagulação.

#### 3.4.1.4 Fase IV – Pré-oxidação

A fase IV foi realizada para encontrar os parâmetros da pré-oxidação usando o cloro como oxidante na forma de hipoclorito de cálcio. O passo inicial dos ensaios consistiu em produzir uma solução com uma massa de hipoclorito e água destilada.

A solução era sempre produzida na hora dos ensaios e a sua concentração determinada através do método colorimétrico e medição no equipamento de cloro da Policontrol.

Após a determinação da concentração da solução em miligramas de cloro por litro, a dosagem foi efetuada adicionando um determinado volume da solução no jarro. Exemplificando, se a solução tem uma concentração de  $980 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  cada mililitro terá 0,980 mg. A adição de 10 ml no jarro 1 resulta em uma dosagem de  $4,9 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ .

- Série IV.1 - Determinação de dosagem de cloro.

Com a solução de cloro preparada e identificada a sua concentração, os primeiros ensaios nesta etapa visaram a determinação da dosagem de cloro mais

eficiente durante o tratamento com pré-oxidação e filtração. Sendo assim, nesses testes somente a dosagem do oxidante era adotada como parâmetro de variação.

Os demais parâmetros da mistura rápida (GMR e TMR), e da filtração (taxa de filtração e meio filtrante) foram adotados conforme os valores encontrados nas etapas anteriores.

As dosagens testadas variaram entre 1 e 4 mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> e para a dispersão do oxidante foi adotado em todos os ensaios a rotação de 90 rpm (gradiente de mistura de 100 s<sup>-1</sup>). Nessa série três ensaios foram realizados. O primeiro com a adoção de um tempo aleatório para oxidação (dez minutos) e os dois últimos realizados com o tempo de oxidação já otimizado.

Às medições de cor aparente e turbidez dos efluentes foram acrescentadas as medições do cloro residual livre (CRL). Nos ensaios dessa série foi testada a possibilidade do não uso de correções de pH em ensaios com pré-oxidação.

- Série IV.2 - Determinação do tempo de oxidação.

Após o primeiro ensaio para determinação da dosagem de cloro, efetuou-se a pesquisa do tempo de oxidação. Para a execução desta série foram mantidos constantes a dosagem do cloro (encontrada no ensaio anterior), a dosagem do coagulante (HCA), os parâmetros da mistura rápida (GMR e TMR) e os parâmetros relacionados com a filtração (meio filtrante e taxa). Apenas o tempo de oxidação era mantido como parâmetro de variação. Os tempos de contato testados foram 10, 15, 20, 25 e 30 minutos.

Semelhante a determinação do tempo de mistura rápida, a metodologia consistiu em iniciar com a oxidação de maior tempo de contato (jarro 1) seguindo nos jarros subseqüentes a adição do cloro de forma decrescente de tempos de oxidação. O instante para a adição em cada jarro será sempre dada pela diferença (To – Ti), onde To é o tempo de oxidação do jarro 1 e Ti o tempo de oxidação a ser testado no jarro subseqüente.

#### 3.4.1.5 Fase V - Adsorção com CAP

A adsorção testada nestes ensaios foi realizada depois da oxidação, por isso, os testes com CAP (carvão ativado pulverizado) iniciaram com a execução da pré-oxidação com os parâmetros de dosagem e tempo encontrados na fase anterior. O

adsorvente utilizado foi o CAP de madeira tipo 6 com número de iodo NI = 1.019 mg.g<sup>-1</sup> e índice de azul de metileno IAM = 171 mg.g<sup>-1</sup>.

Assim como a preparação das soluções de cloro, a suspensão com uma determinada massa do carvão e água destilada sempre era preparada com no máximo 1 hora de antecedência aos ensaios. Em todos os testes para dispersão do adsorvente foi adotada a rotação de 90 rpm (gradiente de mistura de 100 s<sup>-1</sup>).

- Série V.1 - Determinação de dosagem de CAP.

Nos ensaios para a determinação de dosagem de CAP, após a pré-oxidação cada jarro recebeu uma dosagem diferente tornando assim esse parâmetro o único de variação. Dois ensaios foram executados e as dosagens utilizadas foram 10, 15, 20, 25, 30 e 40 mg de CAP por litro. Como os ensaios antecedem a determinação do tempo de adsorção, foi adotado um tempo aleatório (vinte minutos) para a ação do CAP. Os demais parâmetros da mistura rápida (GMR e TMR), e da filtração (taxa de filtração e meio filtrante) foram adotados conforme os valores encontrados nas etapas anteriores. O coagulante utilizado nestes testes foi o HCA, agora sem a utilização de correção de pH de coagulação.

A determinação da dosagem de CAP foi baseada nas análises dos efluentes e dos percentuais de remoção para os parâmetros de cor aparente, cor verdadeira, turbidez, absorvância a 254 nm, cloro residual e matéria orgânica através da mensuração do oxigênio consumido.

- Série V.2 - Determinação do tempo de adsorção.

Nesta série foi determinado o tempo de adsorção com CAP que influenciou de forma mais positiva a eficiência do tratamento por pré-oxidação, adsorção e filtração seguindo essa ordem de etapas. Os tempos testados foram 90, 60, 45, 30, 20 e 15 minutos.

O ensaio iniciou sempre com a adição do oxidante no jarro de maior tempo de contato com o CAP. O instante de adição do CAP é resultado da combinação do tempo de pré-oxidação e do instante de adição do coagulante, visto que, a adsorção deve sempre iniciar após a pré-oxidação e as coagulações em todos os jarros devem ocorrer simultaneamente.

A adição do oxidante nos jarros adotou o tempo e a dosagem definida na fase anterior. A primeira adição de cloro ocorreu no jarro com o maior tempo de adsorção. O instante de adição de cloro no jarro subsequente será dado por:

$$T = T_0 + T_a$$

onde,

$T_0$  = instante de adição do oxidante no primeiro jarro

$T_a$  = tempo de adsorção do primeiro jarro menos o tempo de adsorção do jarro subsequente.

A adição do CAP aconteceu após a oxidação em cada jarro. Seguindo desta forma até o último jarro, o tempo de oxidação foi mantido fixo para todos, ocorreu a variação no tempo de adsorção e a coagulação iniciará em todos os jarros no mesmo instante.

Exemplificando a metodologia adotada com a utilização hipotética de 20 minutos como tempo de oxidação foi construída a tabela 8.

Se o ensaio iniciar às 8:00 horas com a adição do oxidante no jarro 1 (maior tempo de adsorção – 90 min), o CAP deve ser dosado após 20 minutos às 8:20 e o coagulante após 90 minutos às 9:50. Neste caso 9:50 deve ser o horário comum de coagulação para os demais jarros.

Seguindo o proposto pela metodologia, o instante de adição do oxidante no jarro 2 será:

$$T_2 = T_0 + T_a = 8:00 \text{ horas} + (90 - 60) = 8:30 \text{ horas.}$$

Para  $T_3$ :

$$T_3 = T_0 + T_a = 8:00 \text{ horas} + (90 - 45) = 8:45 \text{ horas.}$$

E assim por diante até o tempo  $T_6$ . Como o tempo de oxidação é 20 minutos,  $T_n + 20$  será o instante de adição da dosagem de CAP.

**Tabela 8** - Planejamento de um ensaio de tratabilidade fictício com préoxidação, adsorção e filtração direta.

Jarro	Tempos oxidante		Tempos CAP		Tempos coagulante		Filtração
	adição	contato	adição	contato	adição	contato	
1	8:00	20'	8:20	90'	9:50	15"	9:00:15
2	8:30		8:50	60'			
3	8:45		9:05	45'			
4	9:00		9:20	30'			
5	9:10		9:30	20'			
6	9:15		9:35	15'			

Após o término da adsorção, o gradiente de rotação é alterado para o correspondente ao GMR e a adição do coagulante é iniciada em todos os jarros ao mesmo tempo. Decorrido o TMR, interrompe-se a coagulação e inicia-se de imediato a filtração.

#### 3.4.1.6 Fase VI - Ensaio com pré-oxidação, adsorção e filtração.

A última fase dos ensaios no jarreste foi realizada para comparar as eficiências das remoções usando somente a filtração direta; usando pré-oxidação e filtração e ensaios com pré-oxidação e adsorção antes da filtração.

Para a realização desses testes foram escolhidas para cada coagulante seis dosagens. Todas elas demonstraram nos diagramas de coagulação percentuais significativos de remoção de turbidez.

Essa fase, efetuada para o HCA e para o Sulfato de alumínio, contou com a utilização das variáveis cor aparente, turbidez, oxigênio consumido, e absorvância a 254 nm.

##### Série VI.1 - Determinação das eficiências da filtração direta.

Para esta série foram efetuados três ensaios para cada coagulante. Novamente foram fixados os parâmetros de mistura rápida e filtração encontrados nas etapas anteriores. O parâmetro de variação adotado desta vez foi o par, dosagem de coagulante e pH de coagulação.

Para o HCA as dosagens testadas foram 12, 13, 15, 18, 20 e 25 mg.L<sup>-1</sup>. Os pHs de coagulação foram devidamente corrigidos para que a coagulação ocorresse de acordo com o digrama.

Para o sulfato de alumínio as dosagens testadas foram 18, 22, 25, 27, 30 e 35 mg.L<sup>-1</sup> também com as devidas correções necessárias para coagular dentro das respectivas regiões indicadas pelo diagrama.

Ao final dos ensaios uma quantidade maior de efluente foi coletada, utilizando a filtração por aproximadamente 40 minutos. Depois de medir cor aparente, cor verdadeira e turbidez, as amostras com os efluentes eram acondicionadas para o transporte em baixas temperaturas até o IFRN em Natal. Nos laboratórios especializados eram executadas as análises de oxigênio consumido e absorvância a 254 nm.

Série VI.2 - Determinação das eficiências da pré-oxidação seguida de filtração direta.

Nesta série os ensaios foram desenvolvidos com intuito de analisar a influência da pré-oxidação no tratamento. Para isso, as mesmas condições da série anterior foram adotadas, diferenciando somente pela adição de cloro, na pré-oxidação. As dosagens do oxidante e o tempo de contato adotados foram os encontrados nas etapas da fase IV, estes usados agora para os dois coagulantes.

Para cada coagulante foi executado um ensaio nesta série. Inicialmente o teste procedia com a pré-oxidação. Após o tempo de oxidação, as mesmas dosagens de HCA ou de SA e as mesmas dosagens para corrigir os pHs de coagulação da série anterior foram utilizadas. O parâmetro de variação entre os jarros nesses ensaios continuaram a ser os pares, dosagem de coagulante e pH de coagulação. Significando que os demais parâmetros encontrados no decorrer das fases foram mantidos constantes.

Novamente um volume maior de efluente foi coletado, a taxa de filtração foi calculada e foram analisadas a cor aparente, cor verdadeira e turbidez remanescente e o cloro residual livre. Após as medições, os efluentes eram devidamente acondicionados para o transporte para os laboratórios especializados. Assim, como na série anterior, foram executadas as análises de oxigênio consumido e absorvância a 254 nm para a identificação do comportamento do tratamento para diferentes variáveis.

Série VI.3 - Determinação das eficiências da pré-oxidação, adsorção com CAP e filtração direta.

A última série realizada seguiu com o objetivo de introduzir a adsorção nos ensaios realizados na fase VI. O objetivo era avaliar o efeito dessa operação no tratamento. Para isso, mais uma vez foram repetidas as condições adotadas nos ensaios anteriores (série VI.1 e VI.2). Porém, nesta série não foi utilizada a correção de pH de coagulação. A justificativa reside no fato que após a adição do CAP (carvão ativado pulverizado) as condições da água bruta alteram consideravelmente, tornando incorreta a utilização de um diagrama construído para um tipo inicial de água.

Após o tempo de oxidação era iniciada a adsorção usando os valores de tempo e dosagem de adsorvente encontradas na fase V. Para viabilizar a comparação entre as series dessa fase as mesmas análises foram feitas com os efluentes.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Caracterização da água bruta.

As análises físico-químicas da água bruta foram executadas do período de outubro de 2007 a janeiro de 2010. Um resumo estatístico de variáveis físico-químicas da água bruta do Açude Gargalheira, durante o período de análise está exposto na tabela 9.

**Tabela 9 - Características da água bruta do açude Gargalheira.**

Par.	MON	NO <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>	PT	pH	STD	Alc	ABS <sub>254</sub>	CA	CV	Cl "a"	Tur
<b>Média</b>	8,41	577	332	254	7,64	248	77	0,065	66	29	30	13,60
<b>Desv Pad.</b>	1,87	660	141	152	0,53	112	276	0,070	27	20	48	11,87
<b>Coef. de Variação</b>	22,2	114,4	42,5	59,8	6,9	45,2	358,4	107,7	40,9	69,0	160,0	87,3
<b>Mediana</b>	8,6	321	287	250	7,52	231	69	0,033	57	22	13	7,88
<b>Mín</b>	3,1	68	100	18	6,71	32	46	0,009	25	7	2,5	3,59
<b>Máx</b>	13,4	2930	700	630	9,11	639	182	0,222	148	99	230	91
<b>Nº de dados</b>	251	46	29	43	302	55	198	217	307	57	53	299

**FONTE:** Adaptada e resumida de DUARTE (2010)<sup>3</sup>

**LEGENDA/UNIDADES:** Alc – alcalinidade total (mg CaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>); ABS<sub>254</sub> – absorvância em 254 nm (cm<sup>-1</sup>); CA - cor aparente (uH); CV - cor verdadeira (uH); Cl "a" – clorofila "a" (µg.L<sup>-1</sup>); MON – matéria orgânica natural (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); NO<sub>3</sub> – nitratos (µg N.L<sup>-1</sup>); NH<sub>3</sub> – nitrogênio amoniacal (µg N.L<sup>-1</sup>); PT – fósforo total (µg PO<sub>4</sub>.L<sup>-1</sup>); STD – sólidos dissolvidos totais (mg.L<sup>-1</sup>); Tur – turbidez (uNT).

Apesar da caracterização da água bruta utilizar apenas as análises no ponto de captação de água da ETA, algumas evidências podem ser constatadas mediante os resultados. Os valores médios de nitratos (0,577 mg.l<sup>-1</sup>), nitrogênio amoniacal (0,332 mg.l<sup>-1</sup>) e STD (248 mg.l<sup>-1</sup>) mantiveram o corpo aquático dentro dos padrões da classe 1 estabelecido pela resolução 357/05 do CONAMA (Conselho nacional do meio ambiente). A referida classe exige somente tratamento simplificado para o consumo humano. Porém, os valores médios de fósforo total (0,254 mg.l<sup>-1</sup>) excedem os limites estabelecidos pela mesma resolução para a classe 2, enquadrando o manancial na classe 3 (consumo humano após tratamento avançado). Tais níveis de fósforo na água influenciam diretamente na massa de algas expressa através dos valores médios de clorofila "a" (30 ug.l<sup>-1</sup>) que também enquadram o açude na classe 3 do CONAMA.

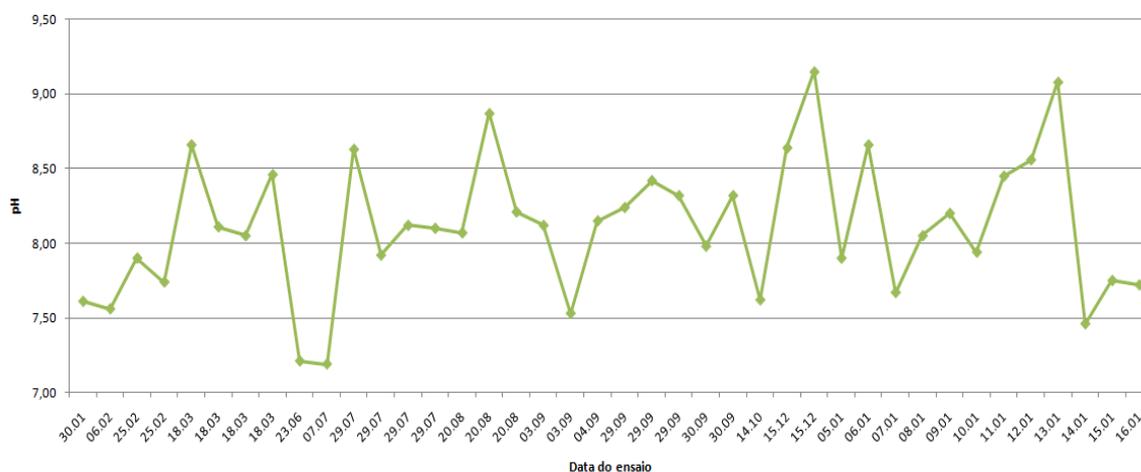
A água bruta do manancial mostrou pH elevado (7,64 em média com valor máximo de 9,11), fato possivelmente decorrente do nível trófico do açude. O aumento do pH em corpos de água eutrofizados ocorre devido a atividade das algas que consomem demasiadamente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) dissolvido. Esse é

<sup>3</sup> DUARTE, Marco Antônio Calazans. **Tratamento de água para consumo humano de manancial eutrofizado através de pré e inter oxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração.** Tese de Doutorado a ser editada pela USP, 2010.

responsável pela acidez do meio ao ligar-se com o hidrogênio, formando o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ).

Valores altos de pH sugerem correção na coagulação no mecanismo de adsorção/neutralização de cargas. A coagulação com sulfato de alumínio para esse mecanismo por exemplo, geralmente ocorre com pH menor que 6,00 (ARMIRAJAD et al 1982 citado por DI BERNARDO et al. 2002).

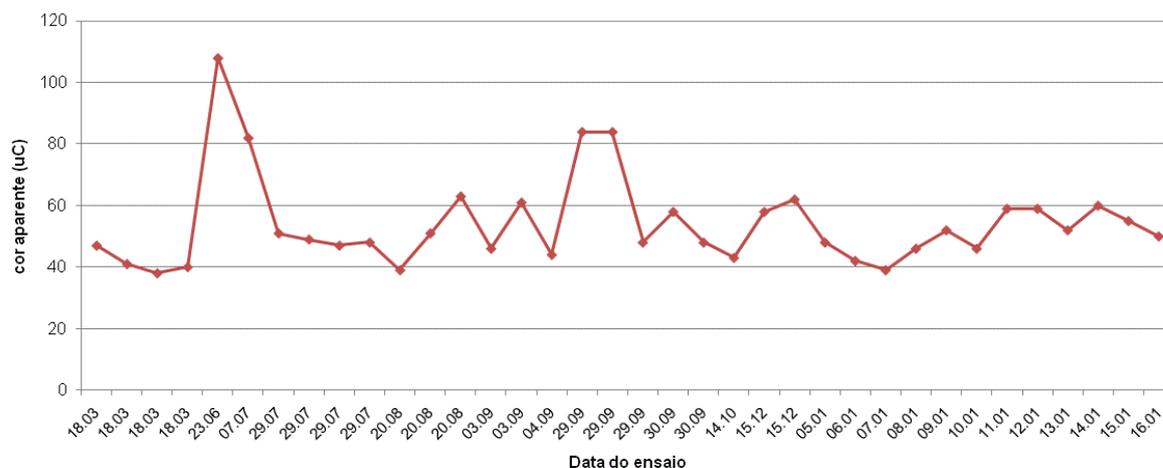
O comportamento do pH da água bruta durante os ensaios de tratabilidade está exposto na figura 14. Confirmando as observações ocorridas no monitoramento da água bruta, o pH durante todo o ano de 2009 não apresentou valores mais baixos que 7,19. Uma comprovação que o pH está relacionado com a ação das algas no meio é observada quando se compara as variações do pH durante a pesquisa com a variação climática. Os valores de pH mais altos (9,15 e 9,08) ocorreram justamente no período do ano onde é registrado maior atividade solar (meses de dezembro e janeiro). A disponibilidade de luz aumenta a ação fotossintética e conseqüentemente o consumo de  $\text{CO}_2$ . Outro fator a considerar é a baixa variação do pH no decorrer do ano representada pelo menor valor de coeficiente de variação (6,9%) encontrado dentre todos os parâmetros monitorados.



**Figura 14** - Comportamento do pH da água bruta utilizada nos ensaios de tratabilidade.

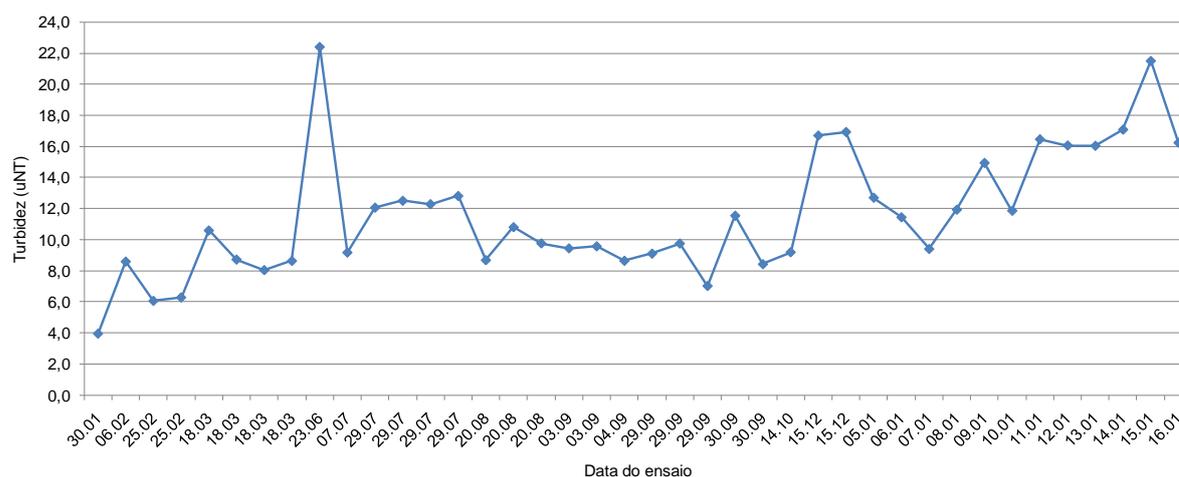
A cor verdadeira foi significativa (29 uH) em relação à cor aparente e turbidez (66 uH e 13,60 uNT), refletindo-se nas medidas de matéria orgânica: MON, 8,41  $\text{mg.L}^{-1}$ , Abs<sub>254</sub> 0,065  $\text{cm}^{-1}$ . Na tabela 8 também é possível observar que a cor aparente e a cor verdadeira apresentaram um coeficiente de variação menor que a turbidez. Isto demonstra que a cor possui menor sensibilidade a variações temporais na água bruta que a turbidez.

A análise da variável de cor aparente durante os ensaios no jarteste é representada graficamente na figura 15. Com a análise dos dados é possível notar uma constância dos valores entre 110 e 40 uH.



**Figura 15** - Comportamento da Cor aparente da água bruta utilizada nos ensaios de tratabilidade.

Dentre as variáveis de monitoramento mais comumente utilizadas em ETA's a turbidez apresentou durante o monitoramento da água bruta e durante os ensaios de tratabilidade uma maior dispersão, com uma maior variação do desvio padrão em relação a média, representado pelo coeficiente de variação. Estas evidências demonstram a necessidade de uma análise constante dos processos de tratamento mediante as variações da água bruta do manancial. A figura 16 demonstra a análise da variável durante os ensaios no jarteste.



**Figura 16** - Comportamento da turbidez da água bruta utilizada nos ensaios de tratabilidade.

Guimarães et al. (2005) estudaram o açude Epitácio Pessoa (PB) e a variação da qualidade da água bruta. Na ocasião verificou-se que as chuvas alteraram significativamente os valores de turbidez. Durante um evento chuvoso (2004) o açude em questão atingiu um máximo de 90 uNT. Os valores médios encontravam-se em torno de 6,5 uNT, períodos prolongados de seca apresentaram também picos de turbidez com valores de 40 uNT.

Apesar das condições climáticas se assemelharem em todos os reservatórios do nordeste brasileiro e os valores observados de turbidez no açude estudado por Guimarães coincidirem com os encontrados em Gargalheira, somente um estudo evolutivo, com o acompanhamento dos índices pluviométricos poderá descrever com clareza os fatores responsáveis pelas variações da turbidez da água bruta do açude.

## 4.2 Ensaio de Tratabilidade

### 4.2.1 Fase I: Determinação dos parâmetros da mistura rápida.

Seguindo o proposto pela metodologia, a fase I objetivou a determinação dos parâmetros de mistura rápida para os dois coagulantes utilizados. Inicialmente determinou-se a dosagem de coagulante e posteriormente, avaliou-se a influência do pH de coagulação.

#### 4.2.1.1 Série I.1: Determinação de dosagens iniciais dos coagulantes e do pH de coagulação.

Com o Hidroxi-cloreto de alumínio foram realizados os ensaios um e dois (tabelas 10 e 11) para a determinação da dosagem inicial de coagulante. Nesta série não foram utilizadas correções de pH de coagulação e foram adotados valores arbitrários de tempo, gradiente de mistura rápida e taxa de filtração. Na análise dos dois ensaios foi possível identificar as melhores remoções de turbidez e cor aparente com as dosagens de 11, 13 e 17 mg.L<sup>-1</sup>.

A eficiência da dosagem de 13 mg.L<sup>-1</sup> que, demonstrou maior remoção de turbidez, foi identificada em uma análise conjunta dos dois ensaios. A dinâmica de remoção de cor aparente não seguiu essa tendência, sendo superada a dosagem de 13 pela dosagem de 17 mg.L<sup>-1</sup>. Mesmo diante deste comportamento, a dosagem de 13 mg.L<sup>-1</sup> de HCA foi adotada para os ensaios posteriores, mediante a perspectiva de economia de produto químico.

Estes dois ensaios iniciais tiveram uma particularidade, foram os únicos durante toda a pesquisa que não foram efetuados em campo, e sim, no laboratório do IFRN com 24 horas após a coleta da água bruta. Nessa etapa da pesquisa também não foi utilizada a caracterização da água coagulada (CA e Tur) e mensuração da vazão de filtração (QF).

**Tabela 10** - Ensaio1: Determinação da dosagem do coagulante HCA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
7,61	3,95	217	27,1	30	350	81	0,59 e 1,41

J	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	6,0	0,0	7,63			66	1,39	69,6	64,8	
2	11,0	0,0	7,62			44	0,73	79,7	81,5	
3	13,0	0,0	7,63			40	0,58	81,6	85,3	
4	17,0	0,0	7,63			36	0,69	83,4	82,5	

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); QF – Vazão (ml/min); HCA – Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

**Tabela 11** - Ensaio 2: Determinação da dosagem do coagulante HCA

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
7,56	8,59	269	27,1	30	350	81	0,59 e 1,41

J	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	6,0	0,0	7,63			110	3,62	59,0	57,9	
2	7,0	0,0	7,62			118	3,71	56,3	56,8	
3	8,0	0,0	7,63			103	3,54	61,8	58,8	
4	9,0	0,0	7,63			95	3,03	64,5	64,7	
5	10,0	0,0	7,64			95	3,41	64,5	60,3	
6	11,0	0,0	7,61			81	2,70	70,0	68,6	

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); QF – Vazão (ml/min); HCA – Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

Os ensaios 3 e 4 (tabelas 12 e 13) foram executados visando avaliar a influência da variação do pH de coagulação no tratamento com a dosagem encontrada de 13 mg.L<sup>-1</sup> de HCA. Inicialmente com a observação da água bruta identificou-se uma leve basicidade no pH da água bruta, comportamento esperado em mananciais eutrofizados. A presença de organismos fitoplanctônicos aumenta o pH e as suas flutuações diárias (Kuroda, 2006). Essa afirmação está baseada na ação das algas que interagem com CO<sub>2</sub>, responsável pela acidificação do meio ao formar o ácido carboxílico. Partindo destas observações, foi testado o efeito do abaixamento do pH de coagulação com a introdução de ácido sulfúrico a 0,1%.

O intuito foi encontrar valores de pH que influenciassem no mecanismo de coagulação, tornando-o o mais adequado para a técnica de filtração direta.

No primeiro ensaio (tabela 12) a faixa de variação do pH foi de 7,58 a 7,76. Observou-se que o pH de 7,59 com 13 mg.L<sup>-1</sup> de HCA obteve as melhores remoções de turbidez e de cor aparente. Porém, as variações entre as remoções das diferentes coagulações (jarro 1 a 6) não foram significativamente expressivas. Valores de pH acima de 7,59 (jarro 1 e 2) diminuíram as eficiências do tratamento. O jarro 5 coagulou com 7,58 e também obteve boas remoções, porém um pouco inferior as remoções da coagulação com 7,59.

Um comportamento incoerente ocorreu na coagulação do jarro 4, apesar de ter coagulado com o pH de 7,60, a remoção de turbidez foi menor significativamente. A eficiência para esse parâmetro foi inferior inclusive às coagulações com pHs mais distantes do valor referencial (jarros 1 e 2).

A justificativa desse comportamento anômalo pode está baseada em algum erro experimental, ou na introdução de alguma partícula estranha na medição da turbidez. Essa hipótese está reforçada pela remoção de cor aparente no mesmo jarro que demonstrou mais coerência aos outros jarros. O tratamento com melhor remoção de cor aparente e turbidez foi conseguido com adição de 13 mg.L<sup>-1</sup> do coagulante e 5,0 ml.L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 0,1%.

**Tabela 12** - Ensaio 3: Determinação do pH de coagulação para o coagulante HCA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
7,9	6,06	151	27,7	30	350	81	0,59 e 1,41

Jarro	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	13	1,5	7,76		6,08	62	1,02	58,7	83,2	16,8
2	13	3,0	7,67		6,42	62	0,85	58,7	86,0	19,6
3	13	5,0	7,59		6,48	51	0,79	66,1	87,0	16,3
4	13	6,0	7,60		6,51	51	1,26	66,1	79,2	16,7
5	13	7,5	7,58		5,85	59	0,89	61,1	85,3	16,0

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); HCA - Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

O segundo ensaio para a avaliação da alteração do pH de coagulação para o HCA (tabela 13), variou o pH de 7,57 a 7,66. A primeira conclusão que foi possível identificar foi a otimização do tratamento após a diminuição do pH de coagulação. Quaisquer dos valores de pH de coagulação com adição de ácido sulfúrico (jarros 2 a 6) apresentaram melhor remoção de cor aparente e turbidez que o jarro que coagulou com o pH sem a correção (jarro 1 – pH de 7,66). Uma adição de apenas  $2,5 \text{ ml.L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 0,1% foi responsável pela obtenção de turbidez remanescente de 0,83 uNT. Em comparação com o jarro 1 que coagulou sem a adição de ácido e obteve uma turbidez remanescente de 1,74 a diferença foi de 52,3%.

Ao avaliar a coagulação com sulfato de alumínio e HCA, Medeiros et al. (2010) que Marañón et al. (2008) observaram que o decréscimo do pH, muitas vezes provocado pelo próprio coagulante aumenta a solubilidade do metal, favorecendo o processo e reduzindo as concentrações de alumínio residual.

O pH de coagulação de 7,59 foi atingido desta vez com a dosagem de  $3,0 \text{ ml.L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 0,1%. Porém, a melhor remoção de cor aparente e turbidez não ocorreu com essa dosagem mas novamente com a dosagem de  $5,0 \text{ ml.L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 0,1%, que gerou uma coagulação a 7,57 de pH. O que está evidenciado é que não há um valor específico e fixo para o pH de coagulação e sim, uma faixa de pH que possui melhor desempenho. Tal afirmativa confirma a necessidade de construção de um diagrama de coagulação.

De acordo com Fernandez (2007) o diagrama de coagulação configura uma ferramenta utilizada no prognóstico das condições favoráveis para desestabilização das partículas e conseqüentemente melhor eficiência dos processos de separação, a escolha das condições adequadas de coagulação permitem a otimização do processo e a economia de custos.

As variações das características da água bruta, variações na turbidez, nos tipos de matéria orgânica, na alcalinidade influenciam na coagulação. Este fato pode justificar as diferentes eficiências de tratamento ocorridas em duas coagulações com mesmo pH de coagulação. Demonstra-se que é prudente realizar ensaios para avaliar o par, dosagem de coagulante e pH de coagulação, com mais freqüência, principalmente, quando ocorrer variações nas condições ambientais que a água está submetida.

**Tabela 13** - Ensaio 4: Determinação do pH de coagulação para o coagulante HCA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
7,74	6,28	151	27,7	30	350	81	0,59 e 1,41

Jarro	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	13	0,0	7,66		6,11	88	1,74	41,6	72,3	15,7
2	13	2,5	7,60		6,11	59	0,83	61,2	86,8	15,5
3	13	3,0	7,59		6,03	51	0,85	66,1	86,5	15,4
4	13	3,5	7,54		6,03	51	0,85	66,1	86,5	16,7
5	13	4,0	7,58		5,91	55	0,94	63,7	85,0	15,7
6	13	5,0	7,57		5,87	51	0,81	66,1	87,1	15,5

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); HCA - Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

Para o sulfato de alumínio foi realizado o ensaio 5 (tabela 14) para a determinação da dosagem de coagulante. Devido as características do coagulante, as dosagens testadas (15 e 40 mg.L<sup>-1</sup>) abrangeram valores maiores que as testadas para o HCA.

Di Bernardo et al. (2003), comentam que o melhor desempenho do HCA em relação ao sulfato de alumínio demonstrados em alguns estudos, está relacionado com a maior estabilidade das espécies hidrolisadas, o que favorece menor tempo de agregação de partículas e possibilita menores dosagens de HCA para obter a mesma qualidade de água.

O sulfato de alumínio demonstrou um comportamento característico. A medida que a sua dosagem aumenta, menor é o pH de coagulação. Isso ocorre porque em solução aquosa, os íons metálicos do coagulante após as ligações com os átomos de oxigênio, liberam íons de hidrogênio (íon H<sup>+</sup>) capazes de reduzir o pH da solução.

Uma desvantagem provocada por esse comportamento foi observada quando houve a necessidade de corrigir o pH de coagulação. O sulfato de alumínio contribui significativamente para a quebra do efeito tampão interferindo nas interações dos ácidos ou bases adicionados para correções do pH.

Os valores adotados na mistura rápida (TMR e GMR) foram atribuídos inicialmente de forma aleatória sendo os mesmos valores adotados para o HCA. A taxa de filtração também foi adotada aleatoriamente e as vazões de cada jarro foram registradas.

Todas as dosagens testadas durante o ensaio demonstraram-se com baixíssimas remoções. Com  $40 \text{ mg.L}^{-1}$  obteve-se desempenho maior porém, o alto valor da dosagem de coagulante pode levar a mudança do mecanismo de coagulação de neutralização de cargas para o mecanismo de varredura, o que não é adequado para a tecnologia de tratamento por filtração direta. Sendo assim, para os ensaios posteriores decidiu-se adotar a dosagem de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$ .

Uma particularidade deste teste foram as características da água bruta que apresentaram alta turbidez e cor aparente. Este fator pode ter influenciado na coagulação gerando baixas remoções. Apesar da cinética de remoção de matéria orgânica indicar que quanto maior a quantidade mais fácil a remoção, algumas alterações no tipo de matéria orgânica pode provocar interferências na coagulação.

**Tabela 14** - Ensaio 5: Determinação da dosagem para o coagulante SA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
7,21	22,4	108	26,5	17	700	81	0,59 e 1,41

Jarro	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
	SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	15	0	6,87	121	27,0	95	21,0	12,04	6,25	16,00
2	20	0	6,77	119	27,5	92	22,4	14,81	0,00	13,90
3	25	0	6,70	130	27,5	93	19,8	13,89	11,61	16,10
4	30	0	6,64	117	29,4	89	19,9	17,59	11,16	12,00
5	35	0	6,60	117	30,3	98	21,0	9,26	6,25	13,70
6	40	0	6,54	122	31,3	89	18,5	17,59	17,41	17,00

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); SA - Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

Após ser escolhida a dosagem do coagulante sulfato de alumínio o próximo teste (tabela 15) objetivou avaliar a influência do pH de coagulação no processo de tratamento. A faixa de pH de coagulação testada variou de 6,29 a 7,71 e assim como para o HCA, valores mais baixos do pH favoreceram o processo. Neste caso, a dosagem de  $5,0 \text{ ml.L}^{-1}$  de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1% favoreceu de forma mais eficiente o tratamento.

Os valores de remoção de cor aparente e turbidez foram bem maiores neste ensaio que os encontrados no ensaio anterior. Para a mesma dosagem de SA  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  foi possível, por exemplo, aumentar a remoção de turbidez de 11,61% para

63,79% apenas com a adição de 5,0 mL.L<sup>-1</sup> de ácido sulfúrico a 0,1%. Novamente é possível associar este efeito a solubilidade dos íons de alumínio e os tipos de espécies hidrolizadas formadas.

Apesar de demonstrar-se bastante satisfatório, essa discrepância entre o primeiro e segundo ensaio para uma mesma dosagem é elevada para influência apenas da correção de pH. Por isso, é reforçada a hipótese que as remoções de turbidez e cor aparente foram influenciadas por características da água bruta que diferenciaram entre os ensaios 5 e 6.

**Tabela 15** - Ensaio 6: Determinação do pH de coagulação para o coagulante SA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
7,19	9,17	82	25,6	17	700	81	0,59 e 1,41

Jarro	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
	SA	Aux	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	25	5,0 (A)	6,29	82	10,11	35	3,32	57,32	63,79	15,8
2	25	2,5 (A)	6,65	79	10,63	39	4,24	52,44	53,76	16,9
3	25	1,5 (A)	6,83	80	9,75	44	4,35	46,34	52,56	17,0
4	25	0,0	7,02	81	9,51	73	7,12	10,98	22,36	16,7
5	25	2,0 (B)	7,35	83	10,10	71	6,31	13,41	31,19	18,1
6	25	3,0 (B)	7,71	91	10,13	71	7,72	13,41	15,81	17,4

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); SA - Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); Aux - auxiliar da coagulação, (A) - ácido sulfúrico 0,1% (mL.L<sup>-1</sup>) (B) - Hidróxido de sódio 0,1 N.

#### 4.2.1.2 Série I.2 - Otimização da mistura rápida com determinação dos gradientes e tempos.

Com a dosagem de coagulante determinada e o pH de coagulação apropriado, foram executados nesta segunda série ensaios visando avaliar a influência das condições de mistura para os dois coagulantes. Como disposto no capítulo de métodos, valores de gradientes acima de 800 (s<sup>-1</sup>) não puderam ser testados devido a inconsistências no equipamento jarreste que, não manteve um comportamento adequado para garantir que o resultado àquela rotação fosse real.

O gradiente e o tempo de mistura são as componentes que determinam a dispersão do coagulante na massa líquida e por conseqüente sua interação com as partículas. Cada parâmetro influencia no processo de forma peculiar. Porém, para a mistura rápida tais parâmetros são determinantes não somente pela influência

individual e sim por combinações entre as duas variáveis, tempo e gradiente, que direcionam a mistura. A combinação ideal pode ser encontrada com algumas possibilidades.

Observando esta realidade, os ensaios 7 a 10 (tabelas 16 a 19) foram realizados com o uso de HCA como coagulante. Neles, os tempos de 3, 6, 9, 12, 17 e 22 segundos foram testados para os gradientes de 400, 600, 700 e 800 s<sup>-1</sup>, os resultados foram demonstrados nas figuras 17 e 18.

**Tabela 16** - Ensaio 7: Determinação do tempo de mistura rápida para o HCA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,46	8,63	40	26,5	Variável	400	81	0,59 e 1,41

Jarro	TMR	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	3	13	5,0	8,19	32	8,60	11	1,38	72,5	84,0	17,7
2	6	13	5,0	8,27	32	8,94	10	1,24	75,0	85,6	15,6
3	9	13	5,0	8,30	30	8,73	11	1,39	72,5	83,9	16,2
4	12	13	5,0	8,23	30	8,53	12	1,50	70,0	82,6	15,9
5	17	13	5,0	8,21	32	8,56	10	1,21	75,0	86,0	16,5
6	22	13	5,0	8,24	32	8,69	10	1,00	75,0	88,4	17,3

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); HCA - Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

**Tabela 17** - Ensaio 8: Determinação do tempo de mistura rápida para o HCA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,05	8,04	38	26,5	Variável	600	81	0,59 e 1,41

Jarro	TMR	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	3	13	5,0	7,98	31	9,11	11	1,41	71,1	82,5	17,7
2	6	13	5,0	8,16	29	8,08	12	1,72	68,4	78,6	15,6
3	9	13	5,0	8,25	34	8,18	16	1,33	57,9	83,5	16,2
4	12	13	5,0	8,21	32	8,51	10	1,27	73,7	84,2	15,9
5	17	13	5,0	8,17	32	8,65	10	0,98	73,7	87,8	16,5
6	22	13	5,0	8,18	30	8,51	10	1,08	73,7	86,6	17,3

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); HCA - Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

**Tabela 18** - Ensaio 9: Determinação do tempo de mistura rápida para o HCA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,66	10,59	47	27,1	Variável	700	81	0,59 e 1,41

Jarro	TMR	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	3	13	5,0	8,44	37	10,78	16	2,25	66,0	78,8	17,9
2	6	13	5,0	8,55	38	11,02	16	2,40	66,0	77,3	17,0
3	9	13	5,0	8,59	35	10,48	14	2,10	70,2	80,2	16,3
4	12	13	5,0	8,59	35	9,08	15	2,00	68,1	81,1	17,3
5	17	13	5,0	8,53	36	10,36	12	1,20	74,5	88,7	17,1
6	22	13	5,0	8,58	35	10,69	12	1,30	74,5	87,7	17,0

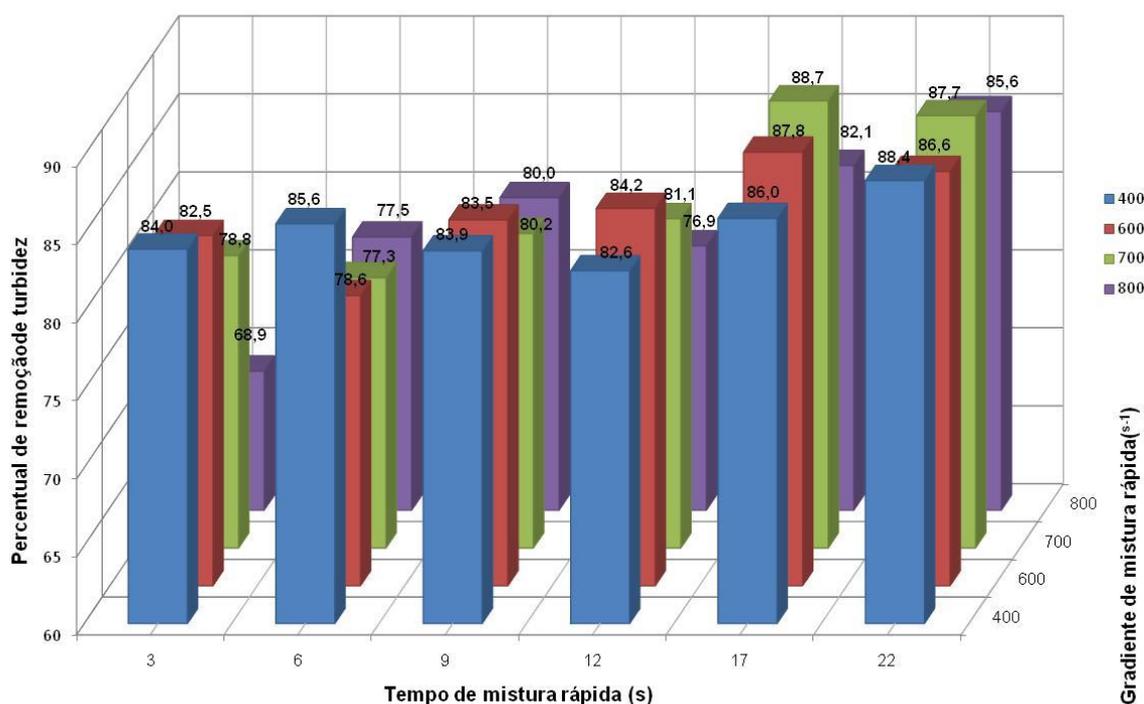
**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); HCA - Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

**Tabela 19** - Ensaio 10: Determinação do tempo de mistura rápida para o HCA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,11	8,72	41	26,8	Variável	800	81	0,59 e 1,41

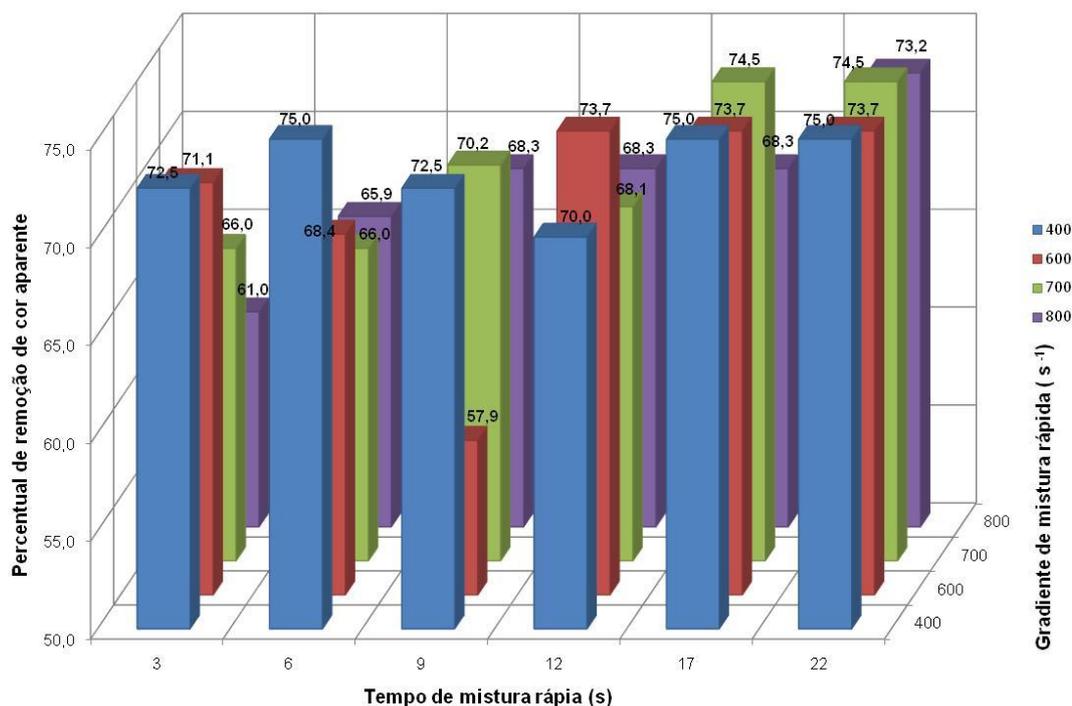
Jarro	TMR	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	3	13	5,0	8,09	33	8,75	16	2,71	61,0	68,9	16,7
2	6	13	5,0	8,14	31	8,83	14	1,96	65,9	77,5	16,2
3	9	13	5,0	8,21	31	8,91	13	1,74	68,3	80,0	16,6
4	12	13	5,0	8,21	31	8,61	13	2,01	68,3	76,9	17,3
5	17	13	5,0	8,16	32	8,94	13	1,56	68,3	82,1	17,3
6	22	13	5,0	8,15	31	8,44	11	1,26	73,2	85,6	16,7

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); HCA - Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)



**Figura 17** - Influência do TMR e do GMR na remoção de turbidez para a coagulação com Hidroxi-cloreto de alumínio.

Para a turbidez, gradientes mais baixos demonstraram percentuais de remoção mais aproximados mediante as alterações no tempo de mistura. Gradientes mais elevados exigiram tempos mais elevados. Em todos os gradientes testados, os tempos de 17 e 22 segundos se destacaram em relação aos demais. Os gradientes que demonstraram mais eficientes foram 400, 600 e 700 s<sup>-1</sup> justamente nos tempos citados. A maior remoção de turbidez ocorreu com a utilização de um gradiente de 700 s<sup>-1</sup> e um tempo de mistura rápida de 17 segundos.



**Figura 18** - Influência do TMR e do GMR na remoção de cor aparente para a coagulação com Hidroxi-cloreto de alumínio.

De forma semelhante a turbidez, a remoção de cor aparente demonstrou mais eficiência com os tempos de 17 e 22 segundos em todos os gradientes. Nestes tempos novamente, os gradientes 400, 600 e 700 s<sup>-1</sup> se destacaram. É possível observar que as diferenças entre os percentuais de remoção entre os dois tempos para esse parâmetro diminuíram, obtendo em algumas situações percentuais iguais. Acredita-se que em decorrência da cor aparente oferecer maior estabilidade de remoção, intervalos entre 17 e 22 segundos possuem o mesmo comportamento para a remoção deste parâmetro. Sendo assim, a utilização de um gradiente de 700 s<sup>-1</sup> e um tempo de mistura rápida de 17 segundos foi adotada para as fases posteriores.

Os mesmos métodos para a determinação da influência do gradiente e tempo de mistura rápida foram utilizados na coagulação com o sulfato de alumínio.

As dosagens de coagulante e acidificante foram as encontradas nos ensaios da série anterior. Os tempos testados foram 3, 7, 11, 17, 20 e 30 segundos, para os gradientes de 400, 600, 700 e 800 s<sup>-1</sup>. Os ensaios 11 a 14 (tabelas 20 a 23) objetivaram estas determinações e as figuras 19 e 20 foram construídas com os resultados das remoções de turbidez e cor aparente, respectivamente.

**Tabela 20** - Ensaio 11: Determinação do tempo de mistura rápida para o SA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,63	12,06	51	26,6	Variável	400	71	0,59 e 1,41

Jarro	TMR	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	3	25	5,0	6,89	65	19,12	24	5,32	52,94	55,89	15
2	7	25	5,0	6,83	64	15,64	25	5,69	50,98	52,82	14,3
3	11	25	5,0	6,72	65	18,73	24	5,25	52,94	56,47	14,9
4	17	25	5,0	6,79	61	16,86	25	5,78	50,98	52,07	14,5
5	20	25	5,0	6,7	61	18,26	24	4,90	52,94	59,37	15,9
6	30	25	5,0	6,83	62	17,59	23	4,75	54,90	60,61	16,3

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); SA - Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

**Tabela 21** - Ensaio 12: Determinação do tempo de mistura rápida para o SA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
7,92	12,5	49	26	Variável	600	71	0,59 e 1,41

Jarro	TMR	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	3	25	5,0	6,23	66	20,09	20	4,25	59,2	66,0	15,5
2	7	25	5,0	6,25	67	18,52	20	4,26	59,2	65,9	16,2
3	11	25	5,0	6,13	65	17,73	19	4,06	61,2	67,5	14,4
4	17	25	5,0	6,18	65	18,03	19	3,89	61,2	68,9	17
5	20	25	5,0	6,20	68	17,43	19	4,18	61,2	66,6	15,5
6	30	25	5,0	6,25	65	19,40	19	3,76	61,2	69,9	15,3

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); SA - Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

**Tabela 22** - Ensaio 13: Determinação do tempo de mistura rápida para o SA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,12	12,28	47	26,2	Variável	700	71	0,59 e 1,41

Jarro	TMR	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	3	25	5,0	6,24	63	15,19	20	4,40	57,4	64,2	15
2	7	25	5,0	6,32	62	15,20	19	4,31	59,6	64,9	15,1
3	11	25	5,0	6,29	62	15,50	18	4,36	61,7	64,5	14,6
4	17	25	5,0	6,30	61	15,28	18	3,78	61,7	69,2	15,6
5	20	25	5,0	6,23	43	15,37	19	4,19	59,6	65,9	14,8
6	30	25	5,0	6,22	55	15,40	20	4,11	57,4	66,5	15,1

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); SA - Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

**Tabela 23** - Ensaio 14: Determinação do tempo de mistura rápida para o SA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,10	12,81	48	26,3	Variável	800	71	0,59 e 1,41

Jarro	TMR	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	3	25	5,0	6,25	67	17,31	22	3,90	54,2	69,6	15
2	7	25	5,0	6,31	66	16,94	22	3,84	54,2	70,0	15,3
3	11	25	5,0	6,28	67	16,55	25	4,96	47,9	61,3	14,5
4	17	25	5,0	6,32	67	17,20	21	3,85	56,3	69,9	14,9
5	20	25	5,0	6,24	68	18,23	21	3,46	56,3	73,0	15,1
6	30	25	5,0	6,20	66	17,55	23	3,86	52,1	69,9	14,9

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); SA - Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

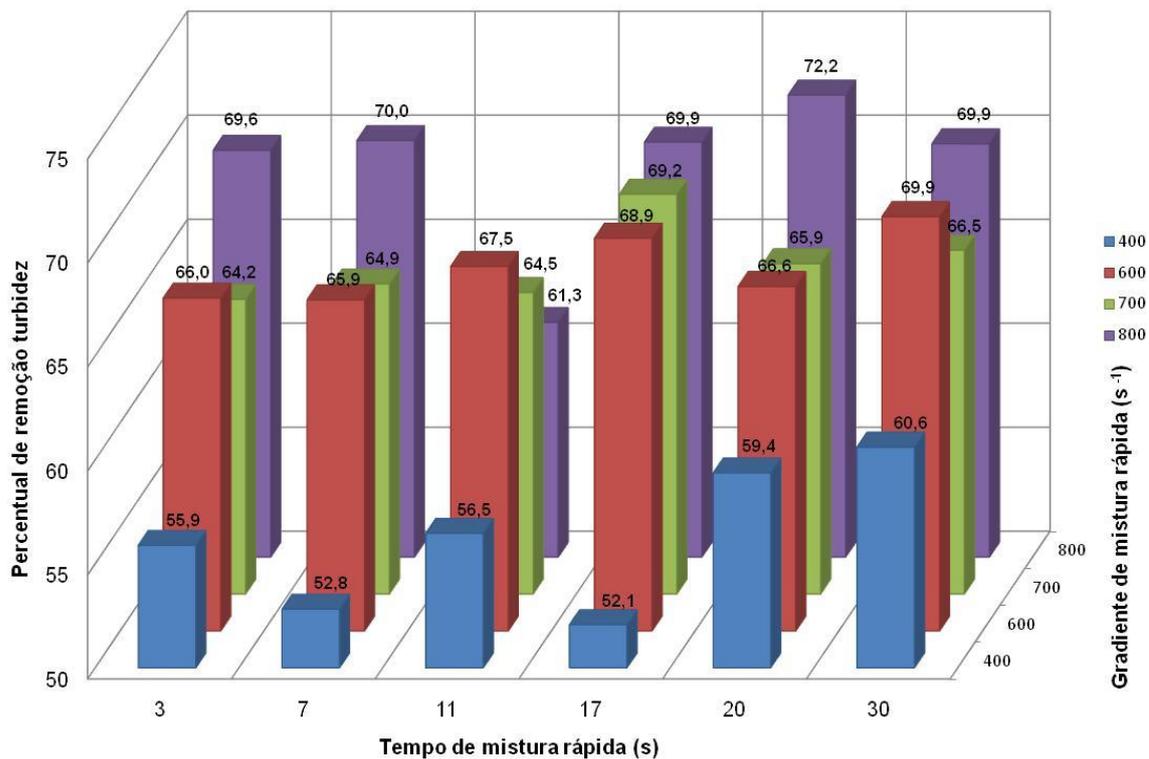


Figura 19 - Influência do TMR e do GMR na remoção de turbidez para a coagulação com sulfato de alumínio.

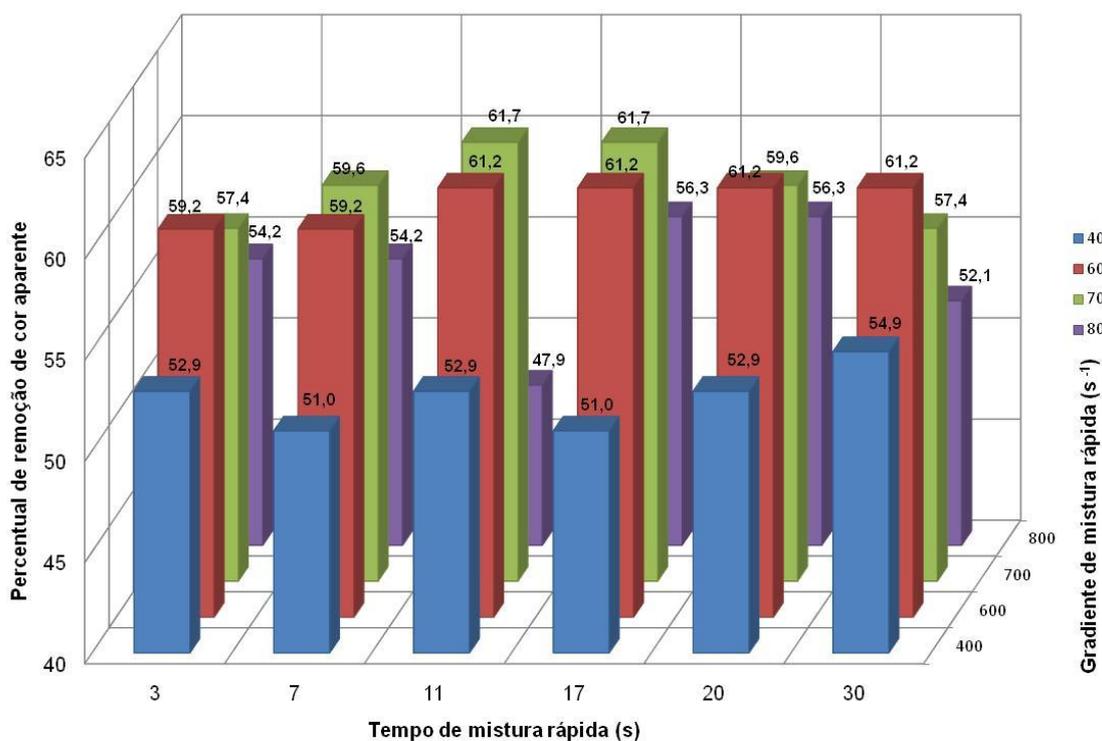


Figura 20 - Influência do TMR e do GMR na remoção de cor aparente para a coagulação com sulfato de alumínio.

Para o sulfato de alumínio as maiores remoções de turbidez foram encontradas com gradientes de rotação maiores, destacando-se o  $800 \text{ s}^{-1}$ . Para todos os tempos, excetuando 11 segundos, este gradiente gerou maiores remoções que todos os outros gradientes testados. O melhor tempo de mistura para este gradiente em relação ao parâmetro de turbidez foi o tempo de 20 segundos, obtendo 72,2% de remoção.

O parâmetro de cor aparente, não obteve os mesmos comportamentos em suas remoções. O gradiente de  $700 \text{ s}^{-1}$  em conjunto com os tempos de 11 e 17 segundos obtiveram os maiores percentuais (61,7 %). A identificação que a remoção de cor aparente é menos sensível a variação do tempo de mistura rápida ficou mais evidente para o uso do sulfato de alumínio como coagulante. Os tempos de 11, 17, 22 e 30 segundos para  $800 \text{ s}^{-1}$ , por exemplo, obtiveram exatamente o mesmo valor em percentual de remoção de cor aparente.

#### 4.2.2 Fase II - Avaliação dos parâmetros da filtração.

Os parâmetros relacionados com a filtração avaliados nesta fase foram a granulometria do meio filtrante e a taxa que ocorre a filtração. Os valores predefinidos para os testes foram baseados nos valores sugeridos por Di Bernardo et al. 2005.

##### 4.2.2.1 Série II.1 – Avaliação da granulometria do meio filtrante

Os ensaios desta série objetivaram determinar a influência da granulometria do meio filtrante na remoção de cor aparente e turbidez nos ensaios de filtração direta. Como mencionado na metodologia os ensaios procederam com o teste em duplicata de cada faixa de granulometria.

Os resultados demonstraram um aumento linear na remoção de cor aparente, com a diminuição da granulometria do meio. Este resultado foi evidenciado tanto no uso do HCA (tabelas 24 e 25) como na utilização do SA (tabelas 26 e 27) como coagulante. Este fato leva a conclusão que para o tamanho do floco formado o ideal é a utilização de uma menor granulometria no meio filtrante. Esta assertiva está em conformidade com a utilização da tecnologia de tratamento por filtração direta, que exige flocos menores não necessitando que estes decantem, pois serão removidos no filtro.

**Tabela 24 - Ensaio 15: Determinação da influência da granulometria do meio filtrante para o tratamento com HCA.**

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,07	8,68	39	26,5	17	700	81	Variável

Jarro	MF	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	FLA 1	13	5	6,84	41	9,14	19	2,51	51,3	71,1	15,6
2	FLA 2	13	5	7,08	42	9,17	20	3,53	48,7	59,3	16,7
3	FLA 3	13	5	7,00	42	9,37	22	3,87	43,6	55,4	16,0
4	FLA 1	13	5	7,04	42	9,29	17	2,47	56,4	71,5	17,0
5	FLA 2	13	5	7,12	39	8,96	21	3,35	46,2	61,4	16,4
6	FLA 3	13	5	7,10	42	9,46	21	3,69	46,2	57,5	16,1

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); HCA - Hidroxi-cloreto de alumínio a 23%; FLA 1 - Filtro de laboratório 1 com grãos entre 0,297 e 0,420 mm; FLA 2 - Filtro de Laboratório 2 com grãos entre 0,42 e 0,84 mm; FLA 3 - Filtro de Laboratório 3 com grãos entre 0,59 e 1,41 mm e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>).

**Tabela 25 - Ensaio 16: Determinação da influência da granulometria do meio filtrante para o tratamento com HCA.**

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,12	9,44	46	26,6	17	700	81	Variável

Jarro	MF	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	FLA 1	13	5	6,97	45	10,29	15	2,91	67,4	69,2	15,2
2	FLA 2	13	5	7,18	45	10,57	23	3,87	50,0	59,0	15,7
3	FLA 3	13	5	7,07	45	10,52	22	4,34	52,2	54,0	16,1
4	FLA 1	13	5	7,23	43	10,03	20	3,26	56,5	65,5	16,1
5	FLA 2	13	5	7,25	43	10,16	22	4,11	52,2	56,5	15,7
6	FLA 3	13	5	7,12	44	10,02	27	4,97	41,3	47,4	16,1

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); HCA - Hidroxi-cloreto de alumínio a 23%; FLA 1 - Filtro de laboratório 1 com grãos entre 0,297 e 0,420 mm; FLA 2 - Filtro de Laboratório 2 com grãos entre 0,42 e 0,84 mm; FLA 3 - Filtro de Laboratório 3 com grãos entre 0,59 e 1,41 mm e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>).

**Tabela 26 - Ensaio 17: Determinação da influência da granulometria do meio filtrante para o tratamento com SA.**

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,21	9,76	63	25,5	20	800	91	Variável

Jarro	MF	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	FLA 1	25	5,0	6,92	69	14,85	19	2,45	69,8	74,9	17
2	FLA 2	25	5,0	6,87	70	15,67	21	2,78	66,7	71,5	18
3	FLA 3	25	5,0	6,89	67	14,47	21	2,90	66,7	70,3	19,2
4	FLA 1	25	5,0	6,91	67	15,40	20	2,40	68,3	75,4	17,9
5	FLA 2	25	5,0	6,87	67	13,81	21	2,83	66,7	71,0	16,7
6	FLA 3	25	5,0	6,94	69	14,55	22	2,87	65,1	70,6	18

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); QF – Vazão (ml/min); SA– Sulfato de alumínio; FLA 1 - Filtro de laboratório 1 com grãos entre 0,297 e 0,420 mm; FLA 2 - Filtro de Laboratório 2 com grãos entre 0,42 e 0,84 mm; FLA 3 - Filtro de Laboratório 3 com grãos entre 0,59 e 1,41 mm e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>).

**Tabela 27 - Ensaio 18: Determinação da influência da granulometria do meio filtrante para o tratamento com SA.**

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,2	8,64	44	25	20	800	81	Variável

Jarro	MF	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	FLA 1	25	5,0	6,89	50	13,49	15	2,20	65,9	74,5	16
2	FLA 2	25	5,0	6,83	49	12,95	15	2,29	65,9	73,5	17,3
3	FLA 3	25	5,0	6,72	49	13,06	15	2,32	65,9	73,1	17,3
4	FLA 1	25	5,0	6,79	48	13,29	13	1,74	70,5	79,9	17,2
5	FLA 2	25	5,0	6,70	49	13,11	14	2,24	68,2	74,1	17,4
6	FLA 3	25	5,0	6,83	48	13,20	15	2,25	65,9	74,0	16,5

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); QF – Vazão (ml/min); SA – Sulfato de alumínio; FLA 1 - Filtro de laboratório 1 com grãos entre 0,297 e 0,420 mm; FLA 2 - Filtro de Laboratório 2 com grãos entre 0,42 e 0,84 mm; FLA 3 - Filtro de Laboratório 3 com grãos entre 0,59 e 1,41 mm e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>).

#### 4.2.2.2 Série II.2 – Avaliação da taxa de filtração.

A taxa de filtração é responsável por cadenciar os movimentos das substâncias coaguladas por dentro do filtro, para que ocorram todos os mecanismos presentes na filtração.

Como mencionado no capítulo de métodos, as taxas foram determinadas através das medidas das vazões dos efluentes dos filtros. Para cada coagulante foi executado um ensaio utilizando sempre os parâmetros encontrados nas fases e séries anteriores.

Para o HCA as vazões variaram entre 10,2 a 19 ml/min resultando em uma variação de taxa de filtração de 51,8 a 103,1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. A tabela 28 demonstra o ensaio 19 realizado para a avaliação da taxa de filtração com o HCA como coagulante. Analisando os resultados é perceptível que menores taxas de filtração favorecem a dinâmica de remoção. Porém, a influência da taxa na variação dos percentuais de remoção não se demonstrou ser muito significativa. Com o aumento de 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d houve apenas uma diminuição de 1% na remoção de turbidez, como é possível com a comparação dos tratamentos realizado no jarro 1 e jarro 2.

**Tabela 28** - Ensaio 19: Determinação da influência da taxa de filtração para o tratamento com HCA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,87	10,8	51	26,8	17	700	Variável	0,297 e 0,420

Jarro	TX	Dosagem		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	51,8	13	5	7,30	50	11,99	18	2,54	64,7	76,5	10,2
2	63,0	13	5	7,40	48	11,89	18	2,65	64,7	75,5	12,4
3	70,1	13	5	7,45	49	13,92	17	2,72	66,7	74,8	13,8
4	77,2	13	5	7,48	48	12,00	18	2,99	64,7	72,3	15,2
5	96,5	13	5	7,48	50	12,02	17	3,00	66,7	72,2	19
6	103,1	13	5	7,53	50	12,28	18	3,30	64,7	69,4	20,3

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); QF – Vazão (ml/min); HCA – Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

No ensaio tomando como coagulante o sulfato de alumínio (tabela 29) as vazões variaram entre 10,5 e 22,5 ml/min, provocando taxas entre 53,3 e 114,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. A variação das taxas de filtração demonstraram um comportamento anômalo não seguindo nenhum padrão de comportamento linear nas remoções de turbidez e de cor aparente.

**Tabela 29** - Ensaio 20: Determinação da influência da taxa de filtração para o tratamento com SA.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
7,53	9,57	61	26,9	20	800	Variável	0,297 e 0,420

Jarro	TX	Dosagem		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
		SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur	
1	53,3	25	5,0	6,50	63	15,55	53	2,90	13,11	69,70	10,5
2	78,7	25	5,0	6,53	64	16,15	49	3,57	19,67	62,70	15,5
3	84,3	25	5,0	6,52	64	15,30	49	3,42	19,67	64,26	16,6
4	101,6	25	5,0	6,49	65	17,07	49	2,78	19,67	70,95	20
5	110,2	25	5,0	6,57	64	15,97	50	3,60	18,03	62,38	21,7
6	114,3	25	5,0	6,46	64	15,21	51	3,78	16,39	60,50	22,5

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); SA - Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

#### 4.2.3 Fase III - Diagramas de coagulação

Após a determinação dos parâmetros relacionados com a mistura rápida e avaliação influência das variáveis da filtração, em fases anteriores, o próximo passo foi o desenvolvimento dos dois diagramas de coagulação.

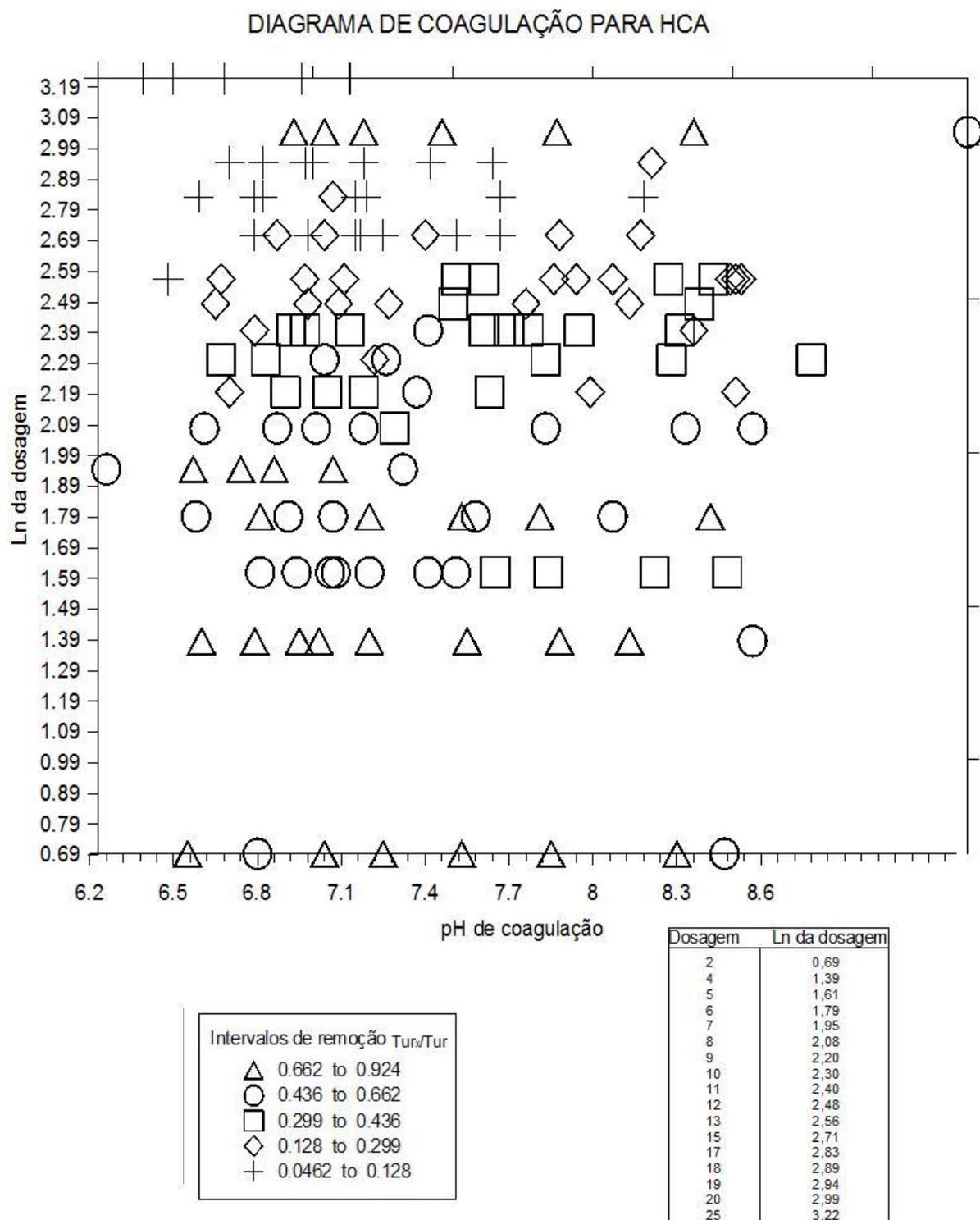
##### 4.2.3.1 Série III.1 - Diagrama de coagulação para o HCA.

Depois de construído o diagrama de coagulação conforme o exposto na metodologia foram identificados alguns comportamentos. A figura 21 expõe o diagrama de coagulação construído para o HCA como coagulante. A princípio foi identificado que o aumento das dosagens de coagulante demonstrou uma maior eficiência no tratamento. As remoções mais significativas ocorreram em pHs de coagulação mais baixos. Provavelmente este comportamento está relacionado com a presença de algas e o efeito no pH que elas provocam, necessitando assim, um abaixamento deste parâmetro na coagulação, fato comentado anteriormente neste trabalho.

Para a escolha de dosagens e pHs de coagulação com base no diagrama foi evitada a escolha de um ponto específico no gráfico que representassem apenas uma combinação do par. A análise do diagrama buscou, ao fixar a dosagem e deslocar-se no eixo do pH, a escolha de regiões que demonstrassem uma eficiência

significativa de remoção de turbidez. Para o HCA, a primeira região identificada abrangeu a dosagem de  $12 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $\ln = 2,42$ ) e a faixa de pH 6,90 a 7,00. Os valores relativos da turbidez remanescente ( $Tur_x/Tur$ ) nesta região variaram entre 0,436 e 0,128 representando percentuais de remoção de turbidez de 56,64 a 87,2%. Na segunda região, as remoções variaram entre 70,1 a 87,2%, a dosagem foi  $13 \text{ mg.L}^{-1}$  e o pH de coagulação esteve entre 7,80 e 8,00. Em relação a turbidez relativa remanescente, a região apresentou-se bastante definida no diagrama, identificando-se em sua maioria por losângulos e intervalo de 0,128 a 0,299. Um pouco acima desta faixa fora identificado com percentuais mais elevados de remoção (87,2 a 95,3%) a terceira região, com a dosagem de  $15 \text{ mg.L}^{-1}$  e pH entre 7,50 e 7,80. A presença desta dosagem entre as regiões que apresentaram melhor desempenho foi importante para a confirmação dos ensaios que buscavam determinar a dosagem de coagulante, realizados em fases anteriores.

Com a dosagem de  $18 \text{ mg.L}^{-1}$  e com o pH um pouco menor (6,90 a 7,20) a quarta região apresentou remoções semelhantes a região anterior, o que sugere uma incerteza se há uma separação entre as duas, visto que as dosagens são próximas ( $15$  e  $18 \text{ mg.L}^{-1}$ ). É possível notar que as frações remanescentes de turbidez nesta parte do diagrama são delimitadas, apresentando valores maiores com dosagens inferiores a  $15 \text{ mg.L}^{-1}$ . A próxima região escolhida foi com utilização de  $20 \text{ mg.L}^{-1}$  e faixa de pH de 7,84 a 8,10. Esta dosagem demonstrou-se como o topo superior daquela área iniciada com dosagens a partir de  $15 \text{ mg.L}^{-1}$ . Acima de deste limite a turbidez relativa remanescente aumenta drasticamente. Este aumento pode está relacionado com uma possível reversão de carga das partículas coaguladas, fenômeno que só poderia ser efetivamente comprovado com a utilização de um equipamento de medição do potencial zeta. A turbidez relativa torna a descer e as remoções tornam a aumentar na última região, com  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  e 7,00 a 7,50. Porém, devido a dosagem elevada, está coagulação possivelmente não deve ter ocorrido com o mecanismo de neutralização de cargas.



**Figura 21** - Diagrama de coagulação com hidróxi-cloreto de alumínio para a água do açude Gargalheira.

#### 4.2.3.2 Série III.2 - Diagrama de coagulação para o Sulfato de Alumínio

A figura 22 retrata o diagrama de coagulação construído para o sulfato de alumínio e a água do açude Gargalheira-RN. De forma semelhante ao HCA, na escolha das regiões a serem estudadas, fixou-se a dosagem de coagulante e deslocou-se no eixo do pH, caracterizando assim uma faixa que foi escolhida conforme a eficiência de remoção de turbidez.

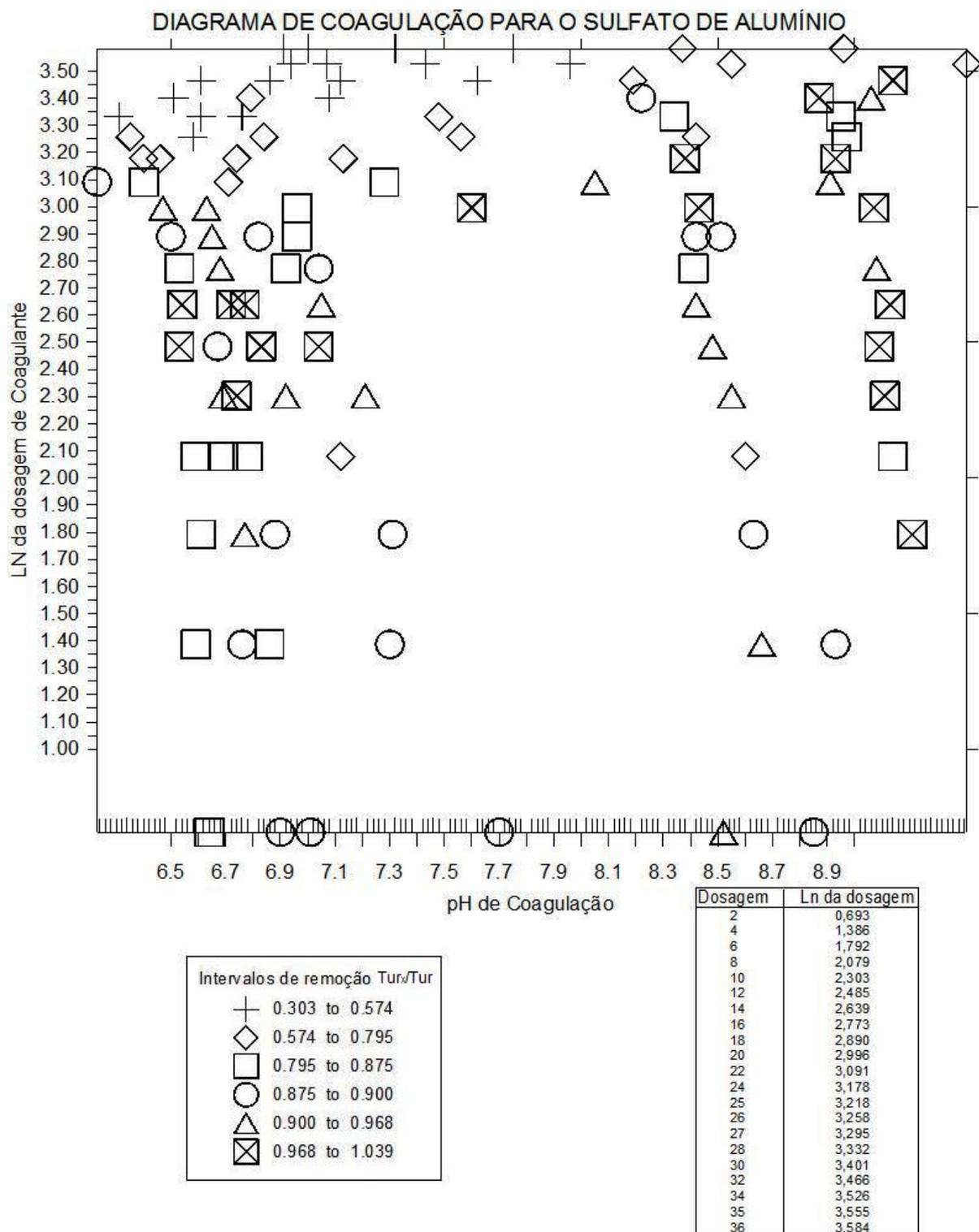
Na primeira região identificada a dosagem de coagulante foi  $18 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $\ln=2,89$ ) e a variação de pH entre 6,90 a 7,30. Os valores relativos da turbidez remanescente nesta região variaram entre 0,875 a 0,574 representando remoções de turbidez entre 12,5% e 42,6%.

As frações de turbidez remanescentes na segunda região apresentaram menores valores (0,795 a 0,574) significando um percentual de remoção de turbidez (20,5 a 42,6%) maior para essa região. A dosagem de coagulante utilizada foi  $22 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $\ln=3,091$ ) e a variação de pH entre 6,70 a 7,00. A terceira região escolhida para o SA envolveu a dosagem de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $\ln=3,218$ ) com variações de pH entre 6,00 e 6,80. A turbidez remanescente nesta região comportou-se de forma semelhante a região anterior. Este fato denota a presença de uma macro área onde é possível o tratamento com variações de pH entre 6,00 a 7,00 e dosagens entre 22 e  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  com remoções de turbidez situados entre 20,5 e 42,6 %.

A terceira região escolhida para o SA envolveu a dosagem de  $27 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $\ln=3,295$ ) com variações de pH entre 7,30 e 7,90. Esta faixa no diagrama demonstrou com valores similares as duas últimas regiões, porém, a similaridade demonstra limitada por essa dosagem com pH mais alto. De acordo com o diagrama, o aumento da dosagem do coagulante ou abaixamento do pH a essa dosagem provoca mudanças significativas na turbidez remanescente relativa. A finalização desta região é simbolizada com o fim da pequena região com losangulos.

A quinta região foi delimitada pela dosagem de  $30 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $\ln=3,401$ ) e faixa de pH de 6,80 a 7,30. Notoriamente essa região no diagrama caracterizou-se por uma diminuição na turbidez remanescente relativa em relação as duas últimas regiões escolhidas. Com o abaixamento do pH e aumento da dosagem os percentuais de remoção de turbidez concentraram-se entre 42,6 a 69,7% (0,574 a 0,303).

A última região escolhida no diagrama do sulfato de alumínio teve a dosagem de  $35 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $\ln=3,555$ ) e a faixa de pH entre 7,40 e 8,00. Apesar de possuir um valor alto, esta dosagem é importante, pois esta faixa de pH pode ocorrer facilmente em coagulações sem uso de correções. Embora a turbidez remanescente relativa tenha demonstrado valores 0,574 a 0,303 não houve como confirmar se o mecanismo de coagulação ocorrido nesta posição do diagrama é o mais adequado para a tecnologia de filtração direta.



**Figura 22** - Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio para a água do açude Gargalheira.

#### 4.2.4 Fase IV - Préoxidação

A escolha da dosagem do oxidante e tempo de oxidação baseou-se nos maiores valores de remoção de cor aparente e turbidez. Como os resultados também subsidiaram a instalação piloto (IP), os valores pesquisados levaram em consideração as condições operacionais (Dosagem máxima e tempo máximo possíveis na oxidação) da IP. Em todos os ensaios com préoxidação os valores de residuais de cloro livre se encontraram dentro do limite permitido pela MS 518/2004, por isso este parâmetro, diferentemente da pesquisa de KURODA (2006) não foi utilizado como parâmetro de escolha de demanda, tão pouco como de escolha de tempo de contato.

Antecedendo os ensaios desta etapa, foram executados os ensaios 70 e 71 (tabelas 30 e 31) a fim de confirmar a dosagens de HCA e de ácido sulfúrico a serem adicionadas. A verificação das condições de coagulação merece uma pesquisa constante em vista das alterações temporais que ocorrem nas características da água bruta.

**Tabela 30** – Ensaio 70: Determinação da dosagem do coagulante HCA antecedendo a pesquisa de préoxidação.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,2 4	9,10	84	26,6	17	700	81	0,297 e 0,420

J	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Turb	CA	Turb	CA	Turb	
1	5	0,0	8,15	86	9,25	69	7,61	9,5	16,4	18,9
2	8	0,0	8,21	86	9,78	62	6,66	15,5	26,8	18,5
3	10	0,0	8,34	89	10,56	62	6,59	15,5	27,6	20,8
4	13	0,0	8,28	90	11,27	50	4,48	32,1	50,8	17,4
5	15	0,0	8,32	82	10,82	40	3,31	44,0	63,6	18,5
6	18	0,0	8,37	90	11,41	39	3,05	45,2	66,5	16,5

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (ml/min); HCA - Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

**Tabela 31** – Ensaio 71: Determinação do pH de coagulação para o HCA antecedendo a pesquisa de préoxidação.

ÁGUA BRUTA				MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	TMR	GMR	TX	MF
8,42	9,75	84	26,1	17	700	81	0,297 e 0,420

J	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF
	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Turb	CA	Turb	CA	Turb	
1	15	0,0	8,37	86	11,12	44	3,73	47,6	61,7	15,9
2	15	1,5	7,79	85	11,32	40	2,70	52,4	72,3	16,7
3	15	3,0	7,63	84	11,12	38	3,00	54,8	69,2	16,9
4	15	5,0	7,57	85	11,03	37	2,36	56,0	75,8	16,7
5	15	6,0	7,52	84	11,06	35	2,17	58,3	77,7	17,0
6	15	7,0	6,85	85	10,36	42	3,16	50,0	67,6	17,0

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); QF – Vazão (ml/min); HCA – Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (ml.L<sup>-1</sup>)

No primeiro teste destacaram-se as dosagens de 15 e 18 mg.L<sup>-1</sup> obtendo as maiores remoções para os dois parâmetros de monitoramento, cor aparente e turbidez. Partindo do princípio da economia de produtos químicos, a dosagem de 15 mg de HCA foi adotada para o segundo ensaio. Os resultados demonstraram a eficiência da dosagem de 15 de HCA em conjunto com 6,0 ml.L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1%, se destacando também a dosagem de 5,0 ml.L<sup>-1</sup>. Este resultado entra em conformidade com o diagrama desenvolvido na fase V, o qual demonstrou melhores percentuais de remoção para a dosagem de 15 mg HCA, dentro da faixa de pH de 7,50 a 7,80.

#### 4.2.4.1 Série IV.1 - Determinação de dosagem de cloro.

A tabela 32 apresenta as características do ensaio realizado para a determinação da demanda de cloro. O coagulante utilizado nesta fase foi o HCA e as condições de sua aplicação (dosagem, pH de coagulação, GMR e TMR) foram baseadas nos valores encontrados em ensaios anteriores. Como este ensaio antecede a determinação do tempo de oxidação, o valor adotado para está variável foi 10 minutos. O gradiente de mistura na oxidação foi de 100 s<sup>-1</sup> o que equivale para o jarreste utilizado uma rotação de 90 rpm.

É evidenciada a ação do cloro nesta etapa, ao comparar o jarro 1 (sem pré-oxidação) com os demais. (Nota-se que parte da remoção de cor aparente ocorre somente com ação do cloro). Este comportamento é visível ao observar a água

coagulada. A medida que aumenta a dosagem de oxidante a cor aparente diminui e mesmo depois da coagulação os valores são menores que o encontrado na água bruta.

Outro ponto importante identificado foi o deslocamento do pH de coagulação da faixa mais apropriada para a dosagem de 15 mg.L<sup>-1</sup>. A dosagem de ácido sulfúrico não foi apropriada para corrigir o pH, fenômeno ocorrido principalmente pela mudança das características da água bruta após ser submetida a uma oxidação (hipoclorito de cálcio eleva o pH).

As dosagens dos jarros 4 e 5 (2,39 e 2,97 mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> respectivamente) obtiveram as maiores remoção de turbidez e cor, inclusive obtendo turbidez menor que 1,00 uNT e cor aparente 16 uC, valores próximos aos estabelecidos pela norma MS para potabilidade. Apesar do destaque destas dosagens foi possível observar com os resultados, evidências de boas remoções com dosagens entre 2,00 e 3,00 mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>, faixa de dosagens na qual os percentuais de remoção de turbidez foram bastante próximos.

**Tabela 32** - Ensaio 72: Determinação da dosagem de cloro na pré-oxidação.

ÁGUA BRUTA				OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	C	Tox	Gox	TMR	GMR	TX	MF
8,32	7,02	48	26,2	197,5	10	100	17	700	81	0,297 e 0,420

J	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF	CRL
	Cl <sub>2</sub>	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur		
1	0,00	15	6,00	7,53	49	8,71	21	1,35	56,3	80,8	15,5	0
2	1,03	15	6,00	7,50	47	8,10	19	1,29	60,4	81,6	17,0	0,01
3	2,00	15	6,00	7,54	45	7,85	17	1,02	64,6	85,5	16,5	0,1
4	2,39	15	6,00	7,57	40	7,87	16	0,92	66,7	86,9	18,2	0,06
5	2,97	15	6,00	7,60	39	8,11	16	0,91	66,7	87,0	15,5	0,06
6	3,23	15	6,00	7,58	38	8,14	16	1,11	66,7	84,2	18,9	0,07

**LEGENDA e UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); C - concentração da solução (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Tox - Tempo de oxidação (min); Gox - Gradiente de mistura (s<sup>-1</sup>); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TF - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (mL/min); Cl<sub>2</sub> - Cloro (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); HCA - hidróxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (mL.L<sup>-1</sup>); CRL - cloro residual livre (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>).

## 4.2.4.2 Série IV.2 - Determinação do tempo de oxidação.

Para a determinação do tempo mais adequado para oxidação foi realizado o ensaio 73 (tabela 33) após a determinação da demanda do oxidante. A dosagem de  $2,24 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  e as mesmas condições do ensaio anterior para coagulação foram adotadas. Os resultados baseados na remoção de cor aparente e turbidez demonstraram que entre os valores pesquisados, o tempo de 20 minutos resulta em maiores percentuais de remoção, atingindo para cor aparente e turbidez, respectivamente eficiências de 72,4 e 87%. Os valores de 16 uC e 1,50 uNT foram encontrados no efluente desse jarro para a água bruta com 58 uC e 11,54 uNT.

Nos jarros 5 e 6 neste mesmo ensaio foi efetuada uma comparação entre a coagulação com e sem correção de pH usando um tempo de 10 minutos para oxidação. O intuito principal foi avaliar o processo de coagulação após uma pré-oxidação, visto que, como comentado anteriormente as dosagens de ácidos apresentaram os seus desempenhos alterados diante de uma água oxidada.

Constatou-se que para estas condições de oxidação (tempo e dosagem) a presença de uma etapa de pré-oxidação não contribui para a uma coagulação sem o uso de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para correção do pH de coagulação. Tal afirmativa foi evidenciada, ao observar que os piores percentuais de remoção de cor aparente e turbidez (63,8 e 83,2 respectivamente) foram encontrados na utilização de 10 minutos para a pré-oxidação com o uso de coagulação sem correção de pH (jarro 6).

Tabela 33 - Ensaio 73: determinação do tempo de oxidação com cloro.

ÁGUA BRUTA				OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	C	Tox	Gox	TMR	GMR	TX	MF
7,98	11,54	58	25,4	128	Variável	100	17	700	81	0,297 e 0,420

J	Tox	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção		QF	CRL
		$\text{Cl}_2$	HCA	$\text{H}_2\text{SO}_4$	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur		
1	30	2,24	15,0	6,00	7,10	51	12,09	19	1,53	67,2	86,7	17,0	0,06
2	25	2,24	15,0	6,00	7,13	50	11,66	18	1,57	69,0	86,4	16,5	0,02
3	20	2,24	15,0	6,00	7,23	50	11,00	16	1,50	72,4	87,0	17,1	0,1
4	15	2,24	15,0	6,00	7,28	51	12,42	17	1,52	70,7	86,8	16,7	0,03
5	10	2,24	15,0	6,00	7,47	54	12,91	17	1,80	70,7	84,4	17,1	0,09
6	10	2,24	15,0	0,00	8,11	53	12,98	21	1,94	63,8	83,2	15,5	0,04

**LEGENDA e UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ); C - concentração da solução ( $\text{mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ); Tox - Tempo de oxidação (min); Gox - Gradiente de mistura ( $\text{s}^{-1}$ ); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida ( $\text{s}^{-1}$ ); TF - Taxa de filtração ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão ( $\text{mL}/\text{min}$ );  $\text{Cl}_2$  - Cloro ( $\text{mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ); HCA - hidróxicloreto de alumínio ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $\text{H}_2\text{SO}_4$  - ácido sulfúrico 0,1% ( $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$ ); CRL - cloro residual livre ( $\text{mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ).

#### 4.2.4.3 - Influência da pré-oxidação na coagulação.

Após determinado o tempo de oxidação foram realizados ensaios visando avaliar dosagens de cloro e a correção do pH de coagulação. O desenvolvimento desta verificação é motivado principalmente pelas mudanças que a água bruta sofre após a oxidação descaracterizando as informações obtidas com os diagramas, visto que os mesmos foram desenvolvidos para outras características de água.

Outro fator importante está relacionado com a necessidade de adequar os testes ao mais próximo possível de uma situação reproduzível em escala real. O uso de ácido a qualquer concentração em ETAs exige o acréscimo de cuidados operacionais e treinamento aos responsáveis pela operação.

Sendo assim, no ensaio 74 (tabela 34) as dosagens de cloro (1,55; 2,32 e 3,09  $\text{mgCl}_2\cdot\text{L}^{-1}$ ) foram testadas com repetições em dois jarros, um com a devida correção de pH para a coagulação e outro somente com a dosagem de coagulante. Os jarros 2, 4 e 6 receberam as dosagens de 15  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de HCA e 6,00  $\text{ml}\cdot\text{L}^{-1}$  de ácido sulfúrico 0,1% e os jarros 1, 3 e 5 não receberam correção de pH, coagulando somente com 15 mg de HCA por litro.

Analisando os resultados foi possível identificar que os dois últimos jarros que não receberam a correção, coagularam fora da faixa indicada no diagrama de coagulação para 15 mg de HCA por litro. Porém, a turbidez remanescente nestes dois jarros foi menor que as remoções ocorridas nos jarros com as respectivas dosagens de cloro que receberam correção de pH.

Duas importantes constatações podem ser evidenciadas com esse comportamento. A primeira relativa ao diagrama de coagulação e as dosagens necessárias para atingir as melhores remoções. O cloro ao ser adicionado a água antes da coagulação, através da oxidação modifica as características físico-químicas e organolépticas da água bruta, por exemplo, alterando a matéria orgânica presente. De acordo com FERREIRA FILHO (2008), por ser um oxidante, o cloro pode reagir com compostos sintéticos e naturais, oxidando-os ao atacar os grupos funcionais e as ligações duplas e triplas presentes nos compostos orgânicos.

Esse efeito altera o comportamento das dosagens de coagulante e os seus pHs de coagulação necessários. Em outras palavras, o diagrama não retrata mais as melhores regiões de coagulação, simplesmente porque após a oxidação a água a ser tratada difere da água bruta inicial.

**Tabela 34** - Ensaio 74: Determinação da dosagem de cloro pós otimização do tempo de oxidação.

ÁGUA BRUTA				OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	C	Tox	Gox	TMR	GMR	TX	MF
8,32	8,42	48	26,2	309	20	100	17	700	81	0,297 e 0,420

J	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF	CRL
	Cl <sub>2</sub>	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur		
1	1,55	15,0	0,00	7,79	49	10,38	19	0,99	60,4	88,2	16,4	0,27
2	1,55	15,0	6,00	7,50	46	10,40	18	0,85	62,5	89,9	17,3	0,18
3	2,32	15,0	0,00	8,12	44	9,49	18	0,94	62,5	88,8	17,3	0,2
4	2,32	15,0	6,00	7,57	45	9,53	18	1,02	62,5	87,9	17,4	0,2
5	3,09	15,0	0,00	7,98	41	9,60	17	0,70	64,6	91,7	16,2	0,18
6	3,09	15,0	6,00	7,60	43	9,49	17	0,86	64,6	89,8	17,0	0,24

**LEGENDA e UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); C - concentração da solução (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Tox - Tempo de oxidação (min); Gox - Gradiente de mistura (s<sup>-1</sup>); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TF - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); QF - Vazão (mL/min); Cl<sub>2</sub> - Cloro (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); HCA - hidróxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (mL.L<sup>-1</sup>); CRL - cloro residual livre (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>).

A segunda conclusão está na importância desse fenômeno para as tecnologias de tratamento em escala piloto ou real. Os ensaios demonstraram que é possível utilizar o tratamento com filtração direta para a água do manancial em estudo sem correção de pH e obter valores consideráveis de remoção de cor aparente e turbidez desde que, seja adotada a préoxidação com a devida dosagem de oxidante e tempo de oxidação.

Com a evidência que a préoxidação pode auxiliar na redução do consumo de coagulante necessário, o ensaio 75 (tabela 35) foi executado buscando avaliar as dosagens de coagulante e de oxidante. As dosagens de 1,12 ; 2,80; 3,92 mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> foram utilizadas em duplicata com a dosagem de 13 e 15 mg.L<sup>-1</sup> de HCA cada uma. O intuito era verificar a possibilidade de diminuir o uso de coagulante quando a etapa de préoxidação é adicionada ao tratamento.

Os resultados demonstraram uma remoção considerável de cor aparente e turbidez com a dosagem de 3,92 mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> e 13 mg.L<sup>-1</sup> com valores de turbidez menores que 1,00 uNT e cor aparente menor que 10 uH. Sendo assim, configura-se uma alternativa tecnológica a utilização de dosagens menores de coagulante quando a etapa de préoxidação é adicionada ao tratamento, desde que sejam respeitadas as condições adequadas para oxidação.

**Tabela 35** - Ensaio 75: determinação da dosagem de cloro e dosagem de coagulante pós otimização do tempo de oxidação.

ÁGUA BRUTA				OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	C	Tox	Gox	TMR	GMR	TX	MF
7,62	9,19	43	26,9	223,71	20	100	17	700	81	0,297 e 0,420

J	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente		Percentual de remoção (%)		QF	CRL
	Cl <sub>2</sub>	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	CA	Tur		
1	1,12	13,0	0,00	7,98	37	9,39	18	4,08	58,1	55,6	16,4	0,02
2	1,12	15,0	0,00	8,08	38	9,64	14	2,78	67,4	69,7	17,3	0,023
3	2,80	13,0	0,00	7,92	33	9,77	15	2,19	65,1	76,2	17,3	0,17
4	2,80	15,0	0,00	7,85	35	9,67	9	1,54	79,1	83,2	17,4	0,19
5	3,92	13,0	0,00	7,76	30	10,11	8	0,89	81,4	90,3	16,2	0,18
6	3,92	15,0	0,00	7,70	30	9,81	7	0,48	83,7	94,8	17,0	0,24

**LEGENDA e UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); C – concentração da solução (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Tox – Tempo de oxidação (min); Gox – Gradiente de mistura (s<sup>-1</sup>); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TF – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); QF – Vazão (mL/min); Cl<sub>2</sub> – Cloro (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); HCA – hidróxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - ácido sulfúrico 0,1% (mL.L<sup>-1</sup>); CRL – cloro residual livre (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>).

#### 4.2.5 Fase V - Adsorção com CAP

A quinta fase da pesquisa no jarreste visou a determinação dos parâmetros relacionados com a adsorção em carvão ativado. Inicialmente foram efetuados os ensaios buscando a determinação da dosagem de CAP e em seguida os ensaios para a determinação do tempo de adsorção. Esta etapa de tratamento está diretamente relacionada com a presença de matéria orgânica na água e as características destas cargas orgânicas. Por isso, adotou-se nesta fase a mensuração da remoção de matéria orgânica através da análise de oxigênio consumido e absorvância a 254nm.

##### 4.2.5.1 Série V.1 - Determinação de dosagem de CAP.

As tabelas 36 e 37 (ensaio 76 e 77) apresentam os resultados dos ensaios que buscaram a determinação da dosagem de carvão ativado. A adsorção ocorreu nos dois ensaios sempre após a pré-oxidação. Esta ordem foi estabelecida porque o emprego do CAP está relacionado com a remoção ou adsorção de possíveis subprodutos halogenados formados a partir da interação do cloro com a matéria orgânica. As variáveis da mistura rápida, da filtração, da pré-oxidação utilizadas basearam-se nos ensaios realizados nas etapas anteriores. As dosagens de cloro na pré-oxidação para os dois ensaios permaneceram em torno de  $4,00 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  com o tempo de oxidação otimizado na fase anterior (20 minutos).

No primeiro ensaio (tabela 36) as dosagens de CAP testadas foram 10,15, 20, 25, 30 e 40  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Com a uniformização das demais variáveis a avaliação seguiu tornando a dosagem de CAP o único parâmetro de variação. Como nestes ensaios foram realizadas análises do teor de matéria orgânica remanescente, um volume maior dos efluentes foi coletado para que após as medições de cor aparente, verdadeira e turbidez ainda houvesse um volume suficiente para a execução da determinação de oxigênio consumido. Sendo assim, nas tabelas que apresentam os ensaios há uma coluna intitulada VC significando o volume em mililitros coletado de efluente após a filtração para cada jarro. As vazões foram medidas a partir do volume coletado e o espaço de tempo da filtração, os valores encontrados em  $\text{ml/min}$  para cada filtro de cada jarro não variaram significativamente, e conforme as considerações descritas na fase II as influências destas variações para o tratamento foram consideradas desprezíveis.

**Tabela 36 - Ensaio 76: determinação da dosagem de carvão ativado pulverizado**

ÁGUA BRUTA							OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		ADSORÇÃO	FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	CV	Temp	MON	Abs. 254	C	Tox	Gox	TMR	GMR	Tad	TX	MF
8,64	16,7	58	13	27,1	6,5	0,016	207,5	20	100	17	700	20	71	0,297 e 0,420

J	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente					Percentual de remoção (%)					QF	VC	CRL
	Cl <sub>2</sub>	CAP	HCA	pH	CA	Tur	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254			
1	4,15	10	15	8,57	44	23,6	15	8	3,90	4,9	0,009	74,14	38,46	76,58	24,6	42,7	15,67	470	0,32
2	4,15	15	15	8,70	47	24,0	14	7	3,72	4,2	0,009	75,86	46,15	77,66	35,4	42,7	15,07	452	0,21
3	4,15	20	15	8,83	42	36,4	12	5	3,05	3,5	0,013	79,31	61,54	81,68	45,5	17,2	14,17	425	0,17
4	4,15	25	15	8,81	43	37,3	12	4	4,76	4,5	0,008	79,31	69,23	71,41	30,3	49,0	16,33	490	0,26
5	4,15	30	15	8,82	37	36,5	13	5	5,37	4,0	0,007	77,59	61,54	67,75	37,9	55,4	15,00	450	0,25
6	4,15	40	15	8,81	40	34,9	14	6	4,00	4,2	0,004	75,86	53,85	75,98	34,8	74,5	15,00	450	0,23

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); CV - cor verdadeira (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON – Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Abs. 254 – Absorbância a 254 nm; C – concentração da solução (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Tox – Tempo de oxidação (min); Grad – Gradiente de mistura (s<sup>-1</sup>); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); Tad – Tempo de adsorção (min); Cl<sub>2</sub> – Cloro (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); CAP – Carvão ativado pulverizado (mg.L<sup>-1</sup>); HCA – Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF – Vazão (ml/min); VC – volume coletado (ml) e CRL (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>).

Os resultados demonstraram que a dosagem de 20 mg.L<sup>-1</sup> obteve para turbidez e matéria orgânica natural maiores percentuais de remoção. Embora os percentuais de remoção de cor aparente para a dosagem de 20 tenham se igualado aos percentuais 25 mg, a remoção de cor verdadeira comportou-se com maior eficiência com uma dosagem de 25 mg.L<sup>-1</sup>. Apesar deste bom desempenho da dosagem de coagulante de 25 mg.L<sup>-1</sup>, em relação a remoção de turbidez a dosagem de 15 mg.L<sup>-1</sup> também atingiu o segundo maior percentual.

Desta forma, fica inviável a definição da dosagem de CAP com apenas esse resultado. Por isso, destaca-se a importância da execução do teste em duplicata. Sendo assim, para escolha da dosagem foram comparados os resultados do ensaio 76 com o 77 (tabela 37), neste último, foram testadas as mesmas dosagens de CAP. As condições foram semelhantes entre os dois ensaios e os parâmetros de monitoramento também coincidiram.

No segundo ensaio para determinação da dosagem de CAP destacou-se a dosagem de 15 mg.L<sup>-1</sup> (jarro 2) com remoções significativas para os parâmetros de cor aparente, verdadeira, matéria orgânica natural e turbidez. O tratamento com essa dosagem de CAP atingiu para os três primeiros parâmetros citados o segundo maior percentual de remoção, e para turbidez o terceiro maior.

Em vista destes fatores e tendo como base a economia de produtos em uma ETA, a dosagem de 15 mg.L<sup>-1</sup> foi sugerida como a dosagem a ser utilizada para ensaios posteriores como também para testes em instalações piloto.

**Tabela 37 - Ensaio 77: determinação da dosagem de carvão ativado pulverizado.**

ÁGUA BRUTA							OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		ADSORÇÃO	FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	CV	Temp	MON	Abs. 254	C	Tox	Gox	TMR	GMR	Tad	TX	MF
9,15	16,93	62	27	27,2	6,5	0,016	261,3	20	100	17	700	20	71	0,297 e 0,420

J	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente					Percentual de remoção (%)					QF	VC	CRL
	Cl <sub>2</sub>	CAP	HCA	pH	CA	Tur	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254			
1	3,92	10	15	8,88	44	31,6	13	6	3,60	4,1	0,013	79,03	77,78	78,74	36,36	17,20	525	13,12	0,19
2	3,92	15	15	8,93	43	31,2	12	6	3,89	3,4	0,006	80,65	77,78	77,02	46,97	61,78	550	13,75	0,21
3	3,92	20	15	8,94	42	33,4	13	6	4,40	4,3	0,002	79,03	77,78	74,01	33,33	87,26	615	15,37	0,17
4	3,92	25	15	8,92	44	51,7	9	5	5,25	4,5	0,004	85,48	81,48	68,99	30,30	74,52	595	14,87	0,33
5	3,92	30	15	9,00	45	36,3	11	6	3,64	3,2	0,008	82,26	77,78	78,50	50,00	49,04	550	13,75	0,25
6	3,92	40	15	8,93	48	43,2	10	7	4,43	3,2	0,007	83,87	74,07	73,83	50,00	55,41	575	14,37	0,30

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); CV - cor verdadeira (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON - Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Abs. 254 - Absorbância a 254 nm; C - concentração da solução (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Tox - Tempo de oxidação (min); Grad - Gradiente de mistura (s<sup>-1</sup>); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); Tad - Tempo de adsorção (min); Cl<sub>2</sub> - Cloro (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); CAP - Carvão ativado pulverizado (mg.L<sup>-1</sup>); HCA - Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF - Vazão (ml/min); VC - volume coletado (ml) e CRL (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>).

#### 4.2.5.2 Série V.2 - Determinação do tempo de adsorção.

O mesmo método da série anterior foi utilizado para a determinação do tempo de adsorção, ou seja, foram adotados dois ensaios para maior confiabilidade nos resultados. Desta vez foi mantida fixa a dosagem de CAP, juntamente com os outros parâmetros determinados nas fases anteriores, tornando agora o tempo de adsorção o parâmetro de variação. Novamente a dosagem de cloro ficou em torno de 4,00 mg.L<sup>-1</sup>, após o tempo de oxidação foram adicionados nos jarros, de acordo com o método descrito no capítulo anterior, a dosagem de CAP determinada. As variáveis monitoradas para identificação das remoções foram as mesmas utilizadas na determinação da dosagem.

No primeiro ensaio (tabela 38) os tempos testados foram 90, 60, 45, 30, 20 e 15 minutos. Para todos os jarros a cor aparente apresentou-se nos efluentes com valores menores de 10 uC, e a turbidez apresentou-se com valores bastante próximos, todos, com valores aproximados de 1,50 uNT. Em destaque o tempo de 30 minutos que obteve as maiores remoções de turbidez (88,7%), de cor aparente (85,4%) e de absorvância a 254 nm (80,9%). Para os parâmetros de cor verdadeira e MON este tempo de adsorção configurou-se com os segundos melhores percentuais de remoção.

**Tabela 38 - Ensaio 78: determinação do tempo de adsorção com carvão ativado pulverizado**

ÁGUA BRUTA							OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	CV	Temp	MON	Abs. 254	C	Tox	Gox	TMR	GMR	TX	MF
7,90	12,70	48	20	27,6	6,6	0,0157	286,66	20	100	17	700	71	0,297 e 0,420

J	Tad	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente					Percentual de remoção (%)					QF	VC	CRL
		Cl <sub>2</sub>	CAP	HCA	pH	CA	Tur	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254			
1	90	4,30	15	15	7,50	32	19,69	8	8	1,57	4,15	0,0073	83,3	60,0	87,6	37,1	53,2	12,63	505	0,28
2	60	4,30	15	15	8,00	33	22,70	8	7	1,48	4,36	0,0037	83,3	65,0	88,3	33,9	76,6	10,75	430	0,21
3	45	4,30	15	15	8,32	31	23,60	7	6	1,54	4,47	0,0047	85,4	70,0	87,9	32,3	70,2	12,38	495	0,29
4	30	4,30	15	15	8,21	33	20,90	7	7	1,43	4,15	0,0030	85,4	65,0	88,7	37,1	80,9	11,63	465	0,20
5	20	4,30	15	15	8,16	33	25,90	7	7	1,48	3,94	0,0053	85,4	65,0	88,3	40,4	66,0	10,63	425	0,15
6	15	4,30	15	15	8,11	28	31,50	6	9	1,50	4,68	0,0043	87,5	55,0	88,2	29,1	72,3	12,33	493	0,22

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); CV - cor verdadeira (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON - Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Abs. 254 - Absorbância a 254 nm; C - concentração da solução (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Tox - Tempo de oxidação (min); Grad - Gradiente de mistura (s<sup>-1</sup>); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); Tad - Tempo de adsorção (min); Cl<sub>2</sub> - Cloro (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); CAP - Carvão ativado pulverizado (mg.L<sup>-1</sup>); HCA - Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF - Vazão (ml/min); VC - volume coletado (ml) e CRL (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>).

No segundo ensaio desta série (tabela 39) os tempos testados foram 5, 10, 15, 20, 30 e 45 minutos. Novamente, o tempo de 30 minutos apresentou os maiores remoções de turbidez, de cor aparente, absorvância a 254nm e remoções significativas nos parâmetros de matéria orgânica natural e cor verdadeira. Sendo assim, o tempo de 30 minutos foi escolhido como o tempo que favorece mais a ação do adsorvente durante esta etapa de tratamento.

**Tabela 39 - Ensaio 79: determinação do tempo de adsorção com carvão ativado pulverizado**

ÁGUA BRUTA							OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO		
pH	Tur	CA	CV	Temp	MON	Abs. 254	C	Tox	Gox	TMR	GMR	TX	MF	
8,66	11,44	42	21	27,6	6,6	0,0157	286,66	20	100	17	700	71	0,297 e 0,420	

J	Tad	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente					Percentual de remoção (%)					QF	VC	CRL
		Cl <sub>2</sub>	CAP	HCA	pH	CA	Tur	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254			
1	45	4,30	15	15	8,05	30	29,7	7	5	1,58	3,9	0,0040	83,3	76,2	86,2	40,4	74,5	12,50	625	0,24
2	30	4,30	15	15	8,25	29	31,6	6	5	1,49	3,6	0,0027	85,7	76,2	87,0	45,2	83,0	13,34	667	0,22
3	20	4,30	15	15	8,33	27	23,4	9	6	1,69	4,4	0,0060	78,6	71,4	85,2	33,9	61,7	12,76	638	0,36
4	15	4,30	15	15	8,41	28	32,0	7	4	1,68	3,4	0,0050	83,3	81,0	85,3	48,4	68,1	11,64	582	0,23
5	10	4,30	15	15	8,47	34	30,1	8	4	1,66	3,9	0,0060	81,0	81,0	85,5	40,4	61,7	12,54	627	0,28
6	5	4,30	15	15	8,38	31	34,9	6	6	1,49	3,8	0,0050	85,7	71,4	87,0	42,0	68,1	13,00	650	0,29

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); CV - cor verdadeira (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON – Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Abs. 254 – Absorbância a 254 nm; C – concentração da solução (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Tox – Tempo de oxidação (min); Grad – Gradiente de mistura (s<sup>-1</sup>); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); Tad – Tempo de adsorção (min); Cl<sub>2</sub> – Cloro (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); CAP – Carvão ativado pulverizado (mg.L<sup>-1</sup>); HCA – Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF – Vazão (ml/min); VC – volume coletado (ml) e CRL (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>).

#### 4.2.6 Fase VI - Ensaios com pré-oxidação, adsorção e filtração.

##### 4.2.6.1 Série VI.1 - Determinação das eficiências da filtração direta.

- Análise das eficiências de remoção com filtração direta para o Hidroxi-cloreto de alumínio.

Objetivando diminuir possíveis inconstâncias no tratamento provocadas pelas variações nas características da água bruta e erros experimentais, os ensaios nesta série foram efetuados em triplicata. O intuito principal era a representação fiel do par dosagem de coagulante e pH de coagulação encontrados com a utilização dos diagramas construídos na série IV.

As dosagens de 12, 13, 15, 18, 20 e 25 mg.L<sup>-1</sup> foram utilizadas com as dosagens de acidificantes para atingir seus respectivos pHs de coagulação. As tabelas 40, 41 e 42 apresentam os resultados destes ensaios.

Assim, como na fase anterior, foram acrescentadas as análises de oxigênio consumido e absorvância a 254 nm, das águas brutas e remanescentes para avaliar a eficiência do tratamento na remoção de matéria orgânica.

As maiores remoções em todos os ensaios para parâmetros monitorados ocorreram em sua maioria com dosagens elevadas do coagulante. Esta realidade reforça ainda mais a necessidade da utilização de um medidor do potencial zeta, pois haverá sempre a incerteza do mecanismo de coagulação ocorrido nestas dosagens elevadas.

As remoções de turbidez nos três ensaios foram bastante relevantes, chegando a atingir valores superiores 90% para algumas dosagens. Os percentuais de remoção de cor aparente também apresentaram valores consideráveis com mais de 80% em alguns casos. Para a matéria orgânica natural as remoções giraram em torno de 30%. O parâmetro de absorvância a 254 nm teve a sua mensuração somente no ensaio 82 sendo assim não houve média para esse parâmetro.

**Tabela 40** - Ensaio 80: determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o HCA

ÁGUA BRUTA					MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	MON	TMR	GMR	TX	MF
7,67	9,40	39	27,3	5,9	17	700	71	0,297 e 0,420

J	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente			Percentual de remoção (%)			QF	VC
	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	MON	CA	Tur	MON		
1	12	7,0	6,98	40	10,03	15	1,71	5,00	61,5	81,8	15,3	12,1	485
2	13	2,0	7,53	40	10,34	13	1,11	4,40	66,7	88,2	25,4	12,2	488
3	15	0,0	7,69	40	9,73	13	1,14	4,30	66,7	87,9	27,1	12,5	500
4	18	6,0	6,90	41	10,35	10	0,76	4,20	74,4	91,9	28,8	11,9	477
5	20	0,0	7,72	40	9,99	12	0,69	4,20	69,2	92,7	28,8	12,0	480
6	25	6,0	7,07	40	10,18	9	0,69	3,50	76,9	92,7	40,7	11,5	460

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON – Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); HCA – Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF – Vazão (ml/min) e VC – volume coletado (ml)

**Tabela 41** - Ensaio 81: determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o HCA.

ÁGUA BRUTA					MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	MON	TMR	GMR	TX	MF
8,05	11,93	46	26,1	6,3	17	700	71	0,297 e 0,420

J	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente			Percentual de remoção (%)			QF	VC
	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	MON	CA	Tur	MON		
1	12	6,0	6,94	47	12,83	16	2,16	4,70	65,2	81,9	25,4	13,7	485
2	13	1,0	7,61	45	12,58	16	2,26	4,90	65,2	81,1	22,2	12,2	488
3	15	0,0	7,91	45	13,02	15	1,92	4,50	67,4	83,9	28,6	14,5	500
4	18	6,0	7,12	45	12,96	12	1,75	4,50	73,9	85,3	28,6	14,0	477
5	20	0,0	7,84	46	14,30	13	1,48	4,50	71,7	87,6	28,6	14,2	480
6	25	6,0	7,18	47	14,31	10	1,22	4,10	78,3	89,8	34,9	13,3	460

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON – Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); HCA – Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF – Vazão (ml/min) e VC – volume coletado (ml)

**Tabela 42 - Ensaio 82: determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o HCA**

ÁGUA BRUTA						MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	MON	ABS. 254	TMR	GMR	TX	MF
8,2	14,94	52	27,2	5,8	0,017	17	700	71	0,297 e 0,420

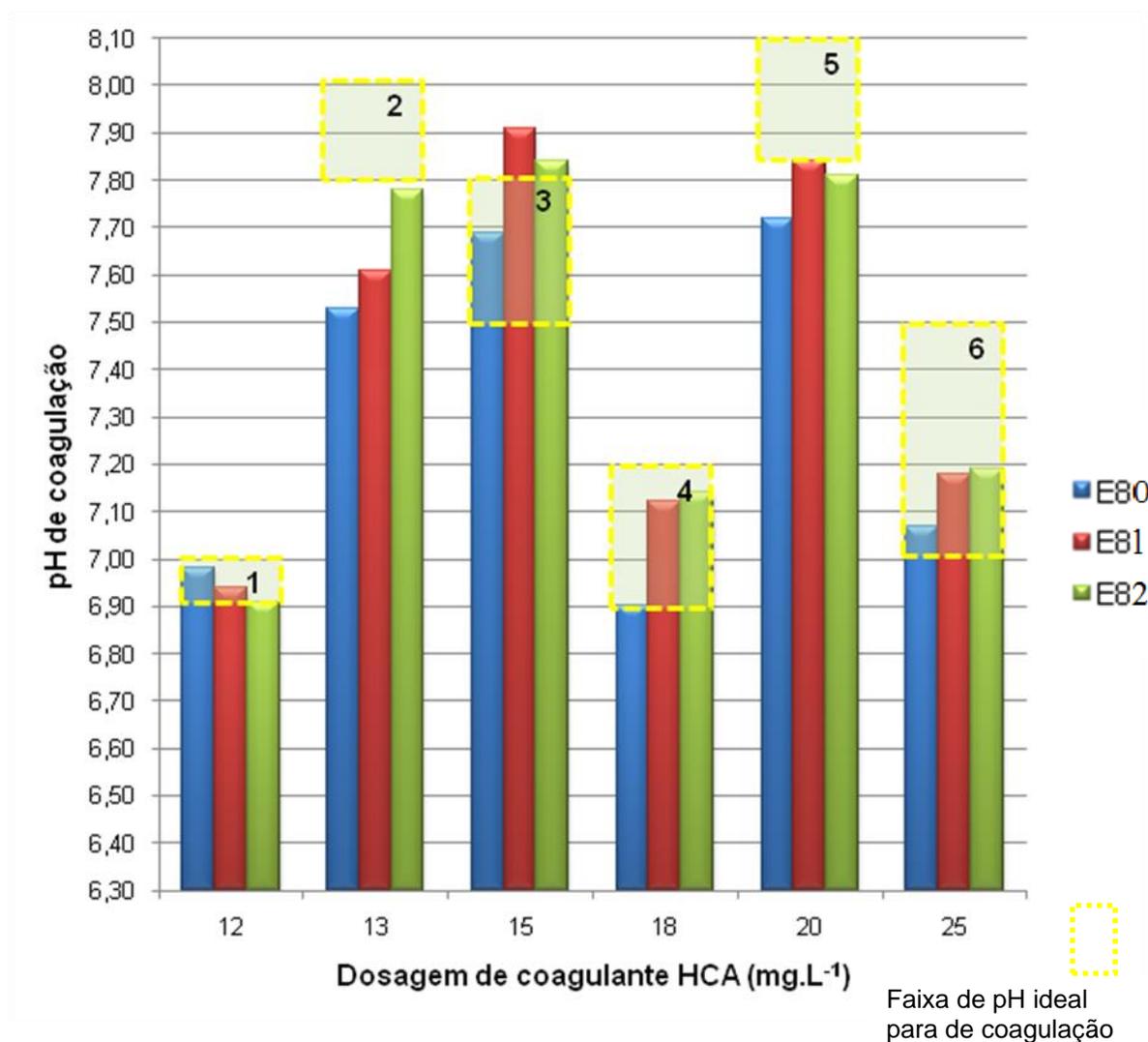
  

J	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente				Percentual de remoção (%)				QF	VC
	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	MON	ABS.254	CA	Tur	MON	ABS 254		
1	12	7,0	6,91	54	15,94	18	2,80	4,40	0,005	65,4	81,3	24,1	70,6	14,6	437
2	13	3,0	7,78	52	15,76	19	2,52	4,20	0,006	63,5	83,1	27,6	64,7	15,5	465
3	15	2,0	7,84	54	15,95	16	1,96	4,30	0,006	69,2	86,9	25,9	64,7	15,2	455
4	18	7,0	7,14	52	16,35	13	1,67	3,90	0,006	75,0	88,8	32,8	64,7	14,8	445
5	20	1,0	7,81	52	16,22	12	1,12	4,00	0,008	76,9	92,5	31,0	52,9	14,2	425
6	25	6,0	7,19	53	16,94	9	0,78	3,80	0,008	82,7	94,8	34,5	52,9	15,5	465

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON – Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); HCA – Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF – Vazão (ml/min) e VC – volume coletado (ml)

A principal intenção nesta série é a comparação entre etapas de tratamento. Para que está etapa caracterize uma filtração direta com as condições exatas indicadas pelo digrama de coagulação foram avaliadas as coagulações ocorridas nos jarros com as condições dispostas nos três ensaios.

O pH de coagulação de cada jarro de cada ensaio foi comparado com as regiões que necessariamente eles deveriam permanecer dentro do diagrama para coagulação com o HCA. A figura 23 apresenta essa comparação na forma gráfica.



**Figura 23** - Coagulações usando HCA e as respectivas faixas de coagulação determinadas pelo diagrama.

Para está avaliação comparativa de pH de coagulação e regiões de coagulação foi utilizada uma margem de erro de 1% em virtude de possíveis variações do pH-metro. Na dosagem de 12 mg.L<sup>-1</sup> as coagulações ocorridas nos três ensaios permaneceram dentro da faixa indicada pelo diagrama. A dosagem de 13 mg.L<sup>-1</sup> teve em seus resultados apenas o ensaio 82 com coagulação dentro do escopo determinado. A dosagem de 15 mg.L<sup>-1</sup> teve a coagulação fora da região ideal de pH no ensaio 81. A dosagem de 18, teve a coagulação fora da região apenas no ensaio 80. E demais dosagens 20 e 25 coagularam nos três ensaios dentro da região indicada pelo diagrama de coagulação.

A tabela 43 apresenta os resultados desta avaliação de pH, com as faixas de coagulação adequadas, os valores de pH de coagulação atingidos, os ensaios que foram desconsiderados porque não coagularam dentro da faixa de pH indicada e as eficiências de remoção para os parâmetros monitorados com suas respectivas médias. Para a absorvância 254nm não houve média, pois este parâmetro foi utilizado apenas no ensaio 82. As maiores remoções ocorreram para a turbidez, seguidas pela cor aparente, abs e matéria orgânica natural

**Tabela 43** - pHs de coagulação e eficiências de remoção na filtração direta com o HCA e auxílio do diagrama de coagulação.

HCA (mg.L <sup>-1</sup> )	Faixa de pH ideal	pH de Coagulação			Cor aparente				Turbidez				Matéria orgânica natural				Abs. 254
		E80	E81	E82	E80	E81	E82	Média	E80	E81	E82	Média	E80	E81	E82	Média	E82
12	6,90 - 7,00	6,98	6,94	6,91	61,5	65,2	65,4	64,0	81,8	81,9	81,3	81,7	15,3	25,4	24,1	21,60	70,6
13	7,80 - 8,00	7,53*	7,61*	7,78	N.C	N.C	63,5	63,5	N.C	N.C	83,1	83,1	N.C	N.C	27,6	27,59	64,7
15	7,50 - 7,80	7,69	7,98*	7,84	66,7	N.C	69,2	67,9	87,9	N.C	86,9	87,4	27,1	N.C	25,9	26,49	64,7
18	6,90 - 7,20	6,90	7,12	7,14	74,4	73,9	75,0	74,4	91,9	85,3	88,8	88,7	28,8	28,6	32,8	30,05	64,7
20	7,84 - 8,10	7,72*	7,84	7,81	N.C	71,7	76,9	74,3	N.C	87,6	92,5	90,0	N.C	28,6	31,0	29,80	52,9
25	7,00 - 7,50	7,07	7,18	7,19	76,9	78,3	82,7	79,3	92,7	89,8	94,8	92,4	40,7	34,9	34,5	36,69	52,9

**Legenda:** \* Valor de pH fora da faixa de coagulação determinada com o diagrama.  
N.C. – Valor não considerado.

- Análise das eficiências de remoção na filtração direta para o Sulfato de alumínio.

Assim como foi utilizado na coagulação com HCA, para o sulfato de alumínio foram realizados três ensaios (tabela 44, 45 e 46) visando avaliar o tratamento com apenas a filtração direta. Novamente a triplicata dos ensaios objetivou a obtenção de uma maior quantidade de informações sobre os tratamentos que ocorreram com coagulação dentro da região indicada pelo diagrama. Em comparação com os demais ensaios realizados para o uso deste coagulante, os testes nesta série acrescentaram a medição de matéria orgânica natural e da absorvância a 254 nm (ensaios 84 e 85). As condições de mistura rápida, tempo e gradiente, foram as otimizadas nos ensaios anteriores. As dosagens de coagulante utilizadas (18, 22, 25, 27, 30 e 35 mg.L<sup>-1</sup>) foram determinadas através do diagrama de coagulação e representam juntamente com as respectivas faixas de pH de coagulação, regiões onde houve melhor eficiência de tratamento. Em cada ensaio, para a obtenção de uma coagulação dentro da região adequada eram necessárias as adições de dosagens de ácidos ou base para a correção. No ensaio 83, devido ao pH da água bruta, foi necessária na coagulação com 35 mg.L<sup>-1</sup> a adição de NaOH 0,1 N para atingir o valor indicado. Este artifício metodológico não foi comum e nos demais ensaios o aumento do pH de coagulação não foi mais necessário.

De forma semelhante ao identificado para HCA, os resultados demonstraram que dosagens maiores de coagulante, desenvolvem maiores percentuais de remoção para a maioria dos parâmetros de monitoramento. Porém, há possibilidade que estas dosagens elevadas de coagulante levem a mudança do mecanismo de coagulação para o mecanismo de varredura, definitivamente desaconselhável em tratamentos com filtração direta em escalas maiores.

Os percentuais de remoção de turbidez nos três ensaios apresentaram variações significativas mediante o tratamento com diferentes valores de pH e coagulante, com remoções entre 44,3 e 83,5%. A cor aparente comportou-se de forma semelhante, em um único ensaio (84), por exemplo, as variações ocorreram de 35,6 a 71,2 %. Nos ensaios 83 e 85 os valores encontrados para matéria orgânica natural na água remanescente utilizando a dosagem de 18 mg.L<sup>-1</sup> foram bastante altos demonstrando pouca eficiência para este parâmetro com essa dosagem. Semelhantemente a pesquisa com HCA o parâmetro de absorvância a 254 nm mensurado nos ensaios 84 e 85 não seguiu um padrão de remoção

ordenado com o aumento da dosagem de coagulante. Observou-se apenas um destaque nos dois ensaios para a dosagem de 35 mg.L<sup>-1</sup>.

**Tabela 44 - Ensaio 83: Determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o SA.**

ÁGUA BRUTA					MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	MON	TMR	GMR	TX	MF
7,94	11,86	46	26,3	5,81	20	800	71	0,297 e 0,420

J	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente			Percentual de remoção (%)			QF	VC
	SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	MON	CA	Tur	MON		
1	18	5,0	7,10	49	14,86	21	3,88	5,42	54,3	67,3	6,8	13,5	405
2	22	4,0	7,03	49	15,63	19	3,08	5,02	58,7	74,0	13,5	13,8	415
3	25	6,0	6,85	51	16,99	18	2,85	4,83	60,9	76,0	16,9	13,5	405
4	27	0,0	7,24	51	16,88	17	2,40	4,92	63,0	79,8	15,2	14,0	420
5	30	2,0	7,15	52	17,63	14	2,12	4,33	69,6	82,1	25,4	13,0	390
6	35	1,0 (NaOH)	7,47	54	18,17	16	2,14	4,53	65,2	82,0	22,0	12,5	375

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON – Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); SA – Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF – Vazão (ml/min) e VC – volume coletado (ml)

**Tabela 45 - Ensaio 84: determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o SA.**

ÁGUA BRUTA						MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	MON	ABS. 254	TMR	GMR	TX	MF
8,45	16,46	59	27,3	5,8	0,02	20	800	71	0,297 e 0,420

J	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente				Percentuais de remoção %				QF	VC
	SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	MON	Abs 254	CA	Tur	MON	Abs254		
1	18	6,0	6,88	62	19,9	38	9,16	4,9	0,009	35,6	44,3	15,5	47,1	15,7	470
2	22	5,0	6,90	63	20,8	32	7,20	4,8	0,011	45,8	56,3	17,2	35,3	14,5	435
3	25	7,0	6,82	64	20,9	29	6,23	4,2	0,008	50,8	62,2	27,6	52,9	14,3	430
4	27	0,0	7,28	64	22,1	28	5,38	4,1	0,012	52,5	67,3	29,3	29,4	13,9	418
5	30	2,0	7,12	65	22,0	23	4,53	4,5	0,010	61,0	72,5	22,4	41,2	14,6	437
6	35	0,0	7,38	66	24,2	17	2,71	4,1	0,007	71,2	83,5	29,3	58,8	14,8	445

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON – Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); SA – Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF – Vazão (ml/min) e VC – volume coletado (ml)

**Tabela 46 - Ensaio 85: determinação das eficiências de remoção usando filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o SA.**

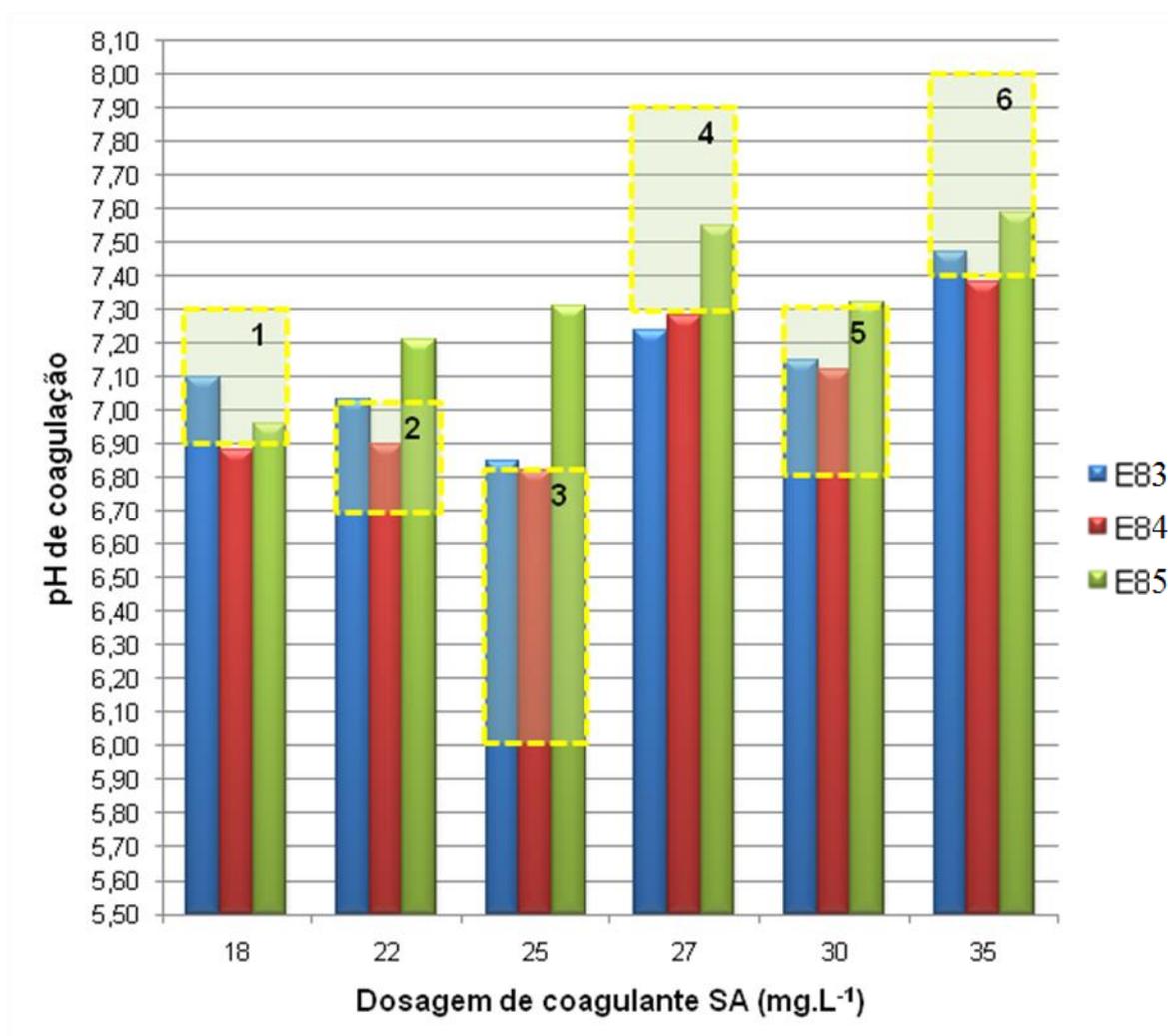
ÁGUA BRUTA						MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	MON	ABS. 254	TMR	GMR	TX	MF
8,56	16,06	59	27,3	6,6	0,0167	20	800	71	0,297 e 0,420 mm

J	Dosagens		Água coagulada			Água remanescente				Percentual de remoção %				QF	V.C.
	SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	MON	Abs 254	CA	Tur	MON	Abs 254		
1	18	6,0	6,96	74	24,2	34	7,74	6,17	0,0097	42,4	51,8	6,5	42,0	11,4	455
2	22	6,0	7,21	75	24,3	25	5,21	5,53	0,0087	57,6	67,6	16,2	48,0	9,8	390
3	25	7,0	7,31	74	25,3	21	4,01	4,89	0,0093	64,4	75,0	25,8	44,0	10,5	418
4	27	1,0	7,55	74	24,6	23	4,57	5,21	0,0093	61,0	71,5	21,0	44,0	10,8	430
5	30	4,0	7,32	75	25,9	16	3,22	5,32	0,0083	72,9	79,9	19,4	50,0	10,3	410
6	35	0,0	7,59	74	26,9	18	2,96	5,11	0,0077	69,5	81,6	22,6	54,0	11,4	455

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON - Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); SA - Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF - Vazão (ml/min) e VC - volume coletado (ml)

Para a validação destes resultados foi utilizada a comparação do pH de coagulação ocorrido em cada jarro com a região de coagulação sugerida através do diagrama de coagulação. A figura 24 apresenta essa comparação na forma gráfica.

A avaliação comparativa utilizou uma margem de erro de 1% para o pH de coagulação. Assim, foi minimizada possíveis variações encontradas no equipamento de medição de pH. As únicas coagulações que ocorreram fora da região determinada no diagrama de coagulação foram as realizadas nos jarros 2 e 3 (dosagens de 22 e 25 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente) durante o ensaio 85, sendo estes valores desconsiderados no cálculo da média das remoções em todos os parâmetros (tabela 47).



**Figura 24** - Coagulações usando SA e as respectivas faixas de coagulação determinadas pelo diagrama.

De forma semelhante aos resultados encontrados no uso do HCA as maiores remoções ocorreram para a turbidez, seguidas pela cor aparente, Abs. 254nm e matéria orgânica natural. Um interessante resultado foi observado no monitoramento da turbidez, quando a dosagem de 30 mg.L<sup>-1</sup> obteve uma maior remoção que a dosagem de 35. De forma semelhante, no monitoramento da absorvância a dosagem de 25 mg demonstrou mais eficiente que dosagens mais elevadas de coagulante.

**Tabela 47** - pHs de coagulação e eficiências de remoção na filtração direta com o sulfato de alumínio e auxílio do diagrama de coagulação.

SA (mg.L <sup>-1</sup> )	Faixa de pH ideal	pH de Coagulação			Cor aparente				Turbidez				Matéria orgânica natural				Abs. 254		
		E83	E84	E85	E83	E84	E85	Média	E83	E84	E85	Média	E83	E84	E85	Média	E84	E85	Média
18	6,90 - 7,30	7,10	6,88	6,96	54,3	35,6	42,4	44,1	67,3	44,3	53,0	54,9	6,8	15,5	6,5	9,59	47,1	42,0	44,5
22	6,70 - 7,00	7,03	6,90	7,21*	58,7	45,8	N.C	52,2	74,0	56,3	N.C	65,1	13,6	17,2	N.C	15,40	35,3	N.C	35,3
25	6,00 - 6,80	6,85	6,82	7,38*	60,9	50,8	N.C	55,9	76,0	62,2	N.C	69,1	16,9	27,6	N.C	22,26	52,9	N.C	52,9
27	7,30 - 7,90	7,24	7,28	7,55	63,0	52,5	61,0	58,9	79,8	67,3	72,2	73,1	15,2	29,3	21,0	21,85	29,4	44,0	36,7
30	6,80 - 7,30	7,15	7,12	7,32	69,6	61,0	72,9	67,8	82,1	72,5	80,4	78,3	25,4	22,4	19,4	22,41	41,2	50,0	45,6
35	7,40 - 8,00	7,47	7,38	7,59	65,2	71,2	69,5	68,6	82,0	83,5	82,0	82,5	22,0	29,3	22,6	24,65	58,8	54,0	56,4

Legenda: \* Valor de pH fora da faixa de coagulação determinada pelo diagrama.  
N.C. – Valor não considerado.

#### 4.2.6.2 Série VI.2 - Determinação das eficiências da pré-oxidação seguida de filtração direta.

A pré-oxidação nesta fase foi avaliada com a utilização dos ensaios 86 e 87, respectivamente para com coagulação com HCA e SA. As dosagens de coagulante foram as escolhidas com o auxílio do diagrama. Para obtenção do pH de coagulação as mesmas dosagens de acidificantes da série anterior foram utilizadas. Porém, foram identificadas na maior parte dos jarros desvios das faixas ideais de coagulação. Esse fato, discutido anteriormente, está relacionado com a mudança das características da água bruta após a ação do oxidante. A tabela 48 demonstra os desvios ocorridos da faixa proposta para coagulação com o uso dos dois coagulantes.

**Tabela 48** - Comparação entre o pH de coagulação nos ensaios com préoxidação e as faixas de pH encontradas nos diagramas de coagulação.

	<b>Dosagem (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Faixa de pH ideal</b>	<b>E86</b>
Hidroxí-cloreto de alumínio	12	6,90 - 7,00	7,79*
	13	7,80 - 8,00	8,31*
	15	7,50 - 7,80	8,57*
	18	6,90 - 7,20	7,77*
	20	7,84 - 8,10	8,33*
	25	7,00 - 7,50	7,75*
	<b>Dosagem (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Faixa de pH ideal</b>	<b>E87</b>
Sulfato de alumínio	18	6,90 - 7,30	7,35
	22	6,70 - 7,00	7,20*
	25	6,00 - 6,80	7,10*
	27	7,30 - 7,90	7,31
	30	6,80 - 7,30	7,15
	35	7,40 - 8,00	7,22*

Legenda: \* Valor de pH fora da faixa de coagulação determinada pelo diagrama.

Apesar da ocorrência deste comportamento e, baseando-se na teoria que os diagramas de coagulação construídos na fase III não são significativos para estes ensaios, nenhum dos resultados foi desconsiderado. Na tabela 49 estão expostos os resultados do primeiro ensaio desta série, os parâmetros de cor aparente, turbidez, matéria orgânica natural e absorvância 254 nm serviram para avaliar o tratamento.

As maiores remoções ocorreram para parâmetro de turbidez, seguindo a tendência de maiores dosagens promoverem maiores percentuais. Apenas o último jarro apresentou uma turbidez remanescente abaixo de 1,00 UNT, valor preconizado pela portaria.

Diferentemente, para a cor aparente todos os efluentes se encontraram dentro dos padrões da portaria (<15uC). A dosagem de 18 mg.L<sup>-1</sup> destacou-se por ter obtido remoção de cor aparente maior que a dosagem de 20 mg.L<sup>-1</sup>. Para o parâmetro de absorbância a 254 nm esta dosagem também se destacou, superando as dosagens de 20 e 25 mg.L<sup>-1</sup>.

**Tabela 49** - Ensaio 86: determinação das eficiências de remoção usando préoxidação e filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o HCA.

ÁGUA BRUTA						OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	MON	Abs. 254	C	Tox	Gox	TMR	GMR	TX	MF
9,08	16,04	52	27,1	5,8	0,011	277	20	100	17	700	71	0,297 e 0,420

J	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente					Percentual de remoção (%)			QF	VC	CRL
	Cl <sub>2</sub>	HCA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	MON	Abs 254	CA	Tur	MON	Abs 254			
1	4,16	12	7,0	7,79	44	16,53	13	2,85	4,6	0,007	75,0	82,2	20,7	36,4	13,33	400	0,31
2	4,16	13	3,0	8,31	45	16,19	13	3,01	4,6	0,009	75,0	81,2	20,7	18,2	13,17	395	0,32
3	4,16	15	2,0	8,57	44	16,72	12	2,39	4,5	0,009	76,9	85,1	22,4	18,2	13,00	390	0,4
4	4,16	18	7,0	7,77	45	16,32	9	1,41	3,9	0,005	82,7	91,2	32,8	54,5	14,50	435	0,29
5	4,16	20	1,0	8,33	45	16,97	10	1,28	4,1	0,009	80,8	92,0	29,3	18,2	13,33	400	0,3
6	4,16	25	6,0	7,75	47	17,99	7	0,59	3,5	0,008	86,5	96,3	39,7	27,3	14,83	445	0,39

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON – Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); TMR – Tempo de mistura rápida (s); GMR – Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX – Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF – meio filtrante (areia - mm); HCA – Hidroxi-cloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF – Vazão (ml/min) e VC – volume coletado (ml)

O ensaio 87 (tabela 50) foi executado para sulfato de alumínio. Assim, como no ensaio anterior os parâmetros pertinentes a cada etapa de tratamento basearam-se nos valores encontrados nas fases anteriores.

Nos efluentes a água remanescente apresentou valores de cor aparente dentro dos valores sugeridos para potabilidade, excetuando-se o jarro 1. Porém, para a turbidez os resultados não permaneceram dentro do limite sugerido pela portaria. Tal comportamento evidencia a ação da oxidação na remoção de cor aparente.

Na comparação entre as dosagens, destacam-se as dosagens de 22 e 30  $\text{mg.L}^{-1}$  que obtiveram maiores remoções de Abs. 254nm e cor aparente respectivamente.

**Tabela 50 - Ensaio 87: determinação das eficiências de remoção usando pré-oxidação e filtração direta com auxílio do diagrama de coagulação para o SA**

ÁGUA BRUTA						OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	Temp	MON	Abs. 254	C	Tox	Gox	TMR	GMR	TX	MF
7,46	17,08	60	27,2	7,41	0,014	234	20	100	20	800	71	0,297 e 0,420

J	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente				Percentual de remoção (%)				QF	VC	CRL
	Cl <sub>2</sub>	SA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	CA	Tur	CA	Tur	MON	Abs 254	CA	Tur	MON	Abs 254			
1	4,26	18	6,0	7,35	46	20,4	17	7,36	5,54	0,010	71,7	56,9	25,3	28,6	0,45	13,25	530
2	4,26	22	6,0	7,2	48	21,7	13	5,06	5,09	0,006	78,3	70,4	31,3	57,1	0,09	12,25	490
3	4,26	25	7,0	7,1	48	22,3	14	4,59	5,09	0,007	76,7	73,1	31,3	50,0	0,11	12,13	485
4	4,26	27	1,0	7,31	43	21,7	12	4,16	5,18	0,009	80,0	75,6	30,1	38,1	0,13	12,13	485
5	4,26	30	4,0	7,15	41	22,3	9	2,83	4,73	0,008	85,0	83,4	36,1	45,2	0,10	12,50	500
6	4,26	35	0,0	7,22	40	22,1	10	2,59	4,64	0,009	83,3	84,8	37,3	38,1	0,04	12,00	480

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON - Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); SA - Sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF - Vazão (ml/min) e VC - volume coletado (ml)

#### 4.2.6.3 Série VI.3 - Determinação das eficiências da pré-oxidação, adsorção com CAP e filtração direta.

Para cada coagulante foi efetuado nesta série um ensaio. Cada teste consistiu nas etapas de pré-oxidação, adsorção com CAP, coagulação e filtração, necessariamente nesta ordem. Os parâmetros de todas as etapas de tratamento utilizadas nestes ensaios foram os determinados em fases anteriores.

As variáveis para avaliação do tratamento foram cor aparente, cor verdadeira, turbidez, o monitoramento da matéria orgânica através da análise de oxigênio consumido e absorvância a 254 nm.

O ensaio 88 (tabela 51) foi realizado com o HCA como coagulante, os resultados obtidos neste ensaio apresentaram as maiores remoções de todos os parâmetros monitorados durante toda a pesquisa. Os máximos de 98,2; 97,8; 85,7 % foram encontrados para a dosagem de 25 mg.L<sup>-1</sup> nos parâmetros de cor aparente, turbidez e abs. 254nm respectivamente.

Porém, como comentado anteriormente, utilizar essa dosagem não é aconselhável devido as mudanças no mecanismo de coagulação. Mesmo assim, o ensaio foi bastante satisfatório em termos de remoção em todos os parâmetros de monitoramento. A dosagem de 15 mg.L<sup>-1</sup>, usada também em testes em escala piloto, obteve em seu efluente cor aparente de 2 uC e turbidez de 0,97 uNT.

**Tabela 51** - Ensaio 88: determinação das eficiências de remoção usando pré-oxidação, adsorção com CAP e filtração direta para o HCA.

ÁGUA BRUTA							OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		ADSORÇÃO		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	CV	Temp	MON	Abs. 254	C	Tox	Gox	TMR	GMR	Gad	Tad	TX	MF
7,75	21,50	55	18	27	7,4	0,0140	128	20	100	17	700	100	30	71	0,297 e 0,420

J	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente					Percentual de remoção					QF	VC	CRL
	Cl <sub>2</sub>	CAP	HCA	pH	CA	Tur	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254			
1	4,20	15	12	8,05	39	36,6	5	3	2,42	3,39	0,0057	90,9	83,3	88,7	54,2	59,5	13,8	550	0,10
2	4,20	15	13	7,96	36	35,6	3	3	1,53	2,95	0,0040	94,5	83,3	92,9	60,2	71,4	12,9	515	0,09
3	4,20	15	15	8,04	34	34,2	2	2	0,97	2,95	0,0037	96,4	88,9	95,5	60,2	73,8	12,8	510	0,10
4	4,20	15	18	8,04	38	34,5	2	2	0,60	2,59	0,0030	96,4	88,9	97,2	65,1	78,6	14,0	560	0,07
5	4,20	15	20	7,94	39	33,9	2	2	0,53	2,68	0,0020	96,4	88,9	97,5	63,9	85,7	14,3	570	0,08
6	4,20	15	25	7,90	40	32,8	1	1	0,48	2,86	0,0020	98,2	94,4	97,8	61,4	85,7	13,3	530	0,08

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); CV - cor verdadeira (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON - Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Abs. 254 - Absorbância a 254 nm; C - concentração da solução (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Tox - Tempo de oxidação (min); Grad - Gradiente de mistura (s<sup>-1</sup>); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); Tad - Tempo de adsorção (min); Cl<sub>2</sub> - Cloro (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); CAP - Carvão ativado pulverizado (mg.L<sup>-1</sup>); HCA - Hidroxicloreto de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF - Vazão (ml/min); VC - volume coletado (ml) e CRL (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>).

Com adoção dos parâmetros encontrados nas fases anteriores para as diferentes etapas, o ensaio 89 (tabela 52) seguiu avaliando as eficiências de remoção para as variáveis de cor aparente e verdadeira, turbidez, oxigênio consumido e Abs 254nm. As dosagens de coagulante escolhidas com o diagrama de coagulação foram utilizadas, agora sem a correção de pH. Para o CAP a dosagem foi a mesma determinada na fase V,  $15 \text{ mg.L}^{-1}$  com um tempo de 20 minutos de adsorção.

O melhor desempenho para o tratamento com sulfato de alumínio, também foi encontrado nesta série. Percentuais de remoção de turbidez chegaram ao máximo de 90,6% ( $35 \text{ mgSA.L}^{-1}$ ) e valores de 83,7% com a dosagem de  $27 \text{ mgSA.L}^{-1}$ , valor de dosagem possivelmente usual para tratamento com filtração direta.

Essa última dosagem destacou-se por apresentar excelentes desempenhos para os parâmetros de Abs. 254 nm e cor aparente, sendo a remoção de cor atingindo percentuais superiores aos encontrados para a remoção de turbidez.

**Tabela 52 - Ensaio 89: determinação das eficiências de remoção usando pré-oxidação, adsorção com CAP e filtração direta para o SA**

ÁGUA BRUTA							OXIDAÇÃO			MISTURA RÁPIDA		ADSORÇÃO		FILTRAÇÃO	
pH	Tur	CA	CV	Temp	MON	Abs. 254	C	Tox	Gox	TMR	GMR	Gad	Tad	TX	MF
7,72	16,24	50	18	27,5	7,410	0,0140	128	20	100	20	800	100	30	71	0,297 e 0,420

J	Dosagens			Água coagulada			Água remanescente					Percentual de remoção (%)					QF	VC	CRL
	Cl <sub>2</sub>	CAP	SA	pH	CA	Tur	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254	CA	CV	Tur	MON	Abs. 254			
1	4,40	15	18	6,96	37	29,5	12	7	5,07	4,73	0,009	76,0	61,1	68,8	36,1	35,7	13,45	538	0,21
2	4,40	15	22	7,33	36	29,8	9	6	4,79	5,18	0,009	82,0	66,7	70,5	30,1	35,7	13,00	520	0,25
3	4,40	15	25	7,28	36	28,9	8	4	3,73	4,29	0,004	84,0	77,8	77,0	42,2	71,4	13,60	544	0,15
4	4,40	15	27	7,34	36	29,4	7	5	2,65	4,20	0,003	86,0	72,2	83,7	43,4	76,2	13,53	541	0,11
5	4,40	15	30	7,21	38	29,3	7	4	2,37	4,11	0,004	86,0	77,8	85,4	44,6	69,0	12,80	512	0,19
6	4,40	15	35	7,23	40	31,2	6	4	1,53	3,57	0,004	88,0	77,8	90,6	51,8	71,4	12,68	507	0,01

**LEGENDA E UNIDADES:** Tur - turbidez (uNT); CA - cor aparente (uH); CV - cor verdadeira (uH); Temp - temperatura da água (°C); MON - Matéria orgânica natural (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Abs. 254 - Absorbância a 254 nm; C - concentração da solução (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); Tox - Tempo de oxidação (min); Grad - Gradiente de mistura (s<sup>-1</sup>); TMR - Tempo de mistura rápida (s); GMR - Gradiente de mistura rápida (s<sup>-1</sup>); TX - Taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); MF - meio filtrante (areia - mm); Tad - Tempo de adsorção (min); Cl<sub>2</sub> - Cloro (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>); CAP - Carvão ativado pulverizado (mg.L<sup>-1</sup>); SA - sulfato de alumínio (mg.L<sup>-1</sup>); QF - Vazão (ml/min); VC - volume coletado (ml) e CRL (mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>).

#### 4.2.7 Análise do tratamento com pré-oxidação, adsorção e filtração direta.

Após os testes envolvendo as etapas de tratamento de pré-oxidação, adsorção e filtração para os dois coagulantes, foi desenvolvida uma avaliação das etapas com base nos valores remoções de cada variável de monitoramento.

O intuito principal foi acompanhar o comportamento do tratamento diante do acréscimo das etapas. Assim, objetiva-se fornecer suporte para pesquisas posteriores que necessitam traçar perfis de escolhas tecnológicas.

Diante dos resultados obtidos com os ensaios foi possível também efetuar uma comparação entre os coagulantes. As tabelas 53 e 54 foram produzidas com os dados das remoções encontradas nas diferentes etapas.

Para a filtração direta, no uso dos dois coagulantes, foram utilizadas as médias dos três ensaios realizados na série VI.1, conforme discutido anteriormente.

**Tabela 53** - Comportamento dos percentuais de remoção durante o tratamento com diversas etapas, usando o HCA como coagulante.

HCA (mg.L <sup>-1</sup> )	Cor aparente			Turbidez			Matéria orgânica natural			Absorbância a 254nm		
	Filtração direta	oxidação + Filtração	oxidação + Adsorção + Filtração	Filtração direta	oxidação + Filtração	oxidação + Adsorção + Filtração	Filtração direta	oxidação + Filtração	oxidação + Adsorção + Filtração	Filtração direta	oxidação + Filtração	oxidação + Adsorção + Filtração
12	64,0	75,0	90,9	81,7	82,2	88,7	21,6	20,7	54,2	70,6	36,4	59,5
13	63,5	75,0	94,5	83,1	81,2	92,9	27,6	20,7	60,2	64,7	18,2	71,4
15	67,9	76,9	96,4	87,4	85,1	95,5	26,5	22,4	60,2	64,7	18,2	73,8
18	74,4	82,7	96,4	88,7	91,2	97,2	30,0	32,8	65,1	64,7	54,5	78,6
20	72,6	80,8	96,4	90,9	92,0	97,5	29,5	29,3	63,9	52,9	18,2	85,7
25	79,3	86,5	98,2	92,4	96,3	97,8	36,7	39,7	61,4	52,9	27,3	85,7

**Tabela 54** - Comportamento dos percentuais de remoção durante o tratamento com diversas etapas, usando o SA como coagulante.

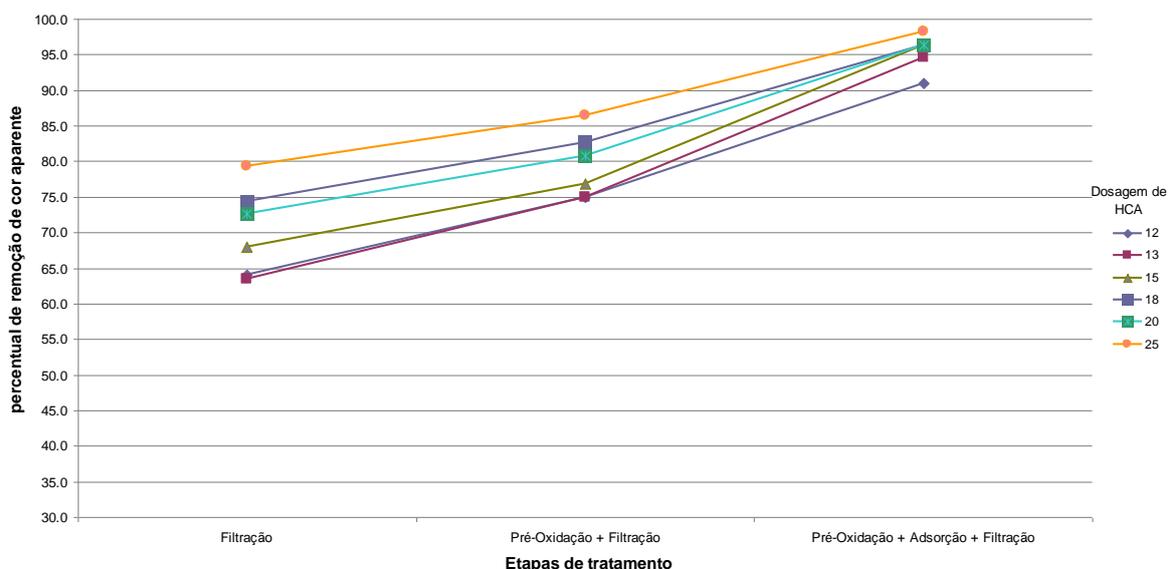
SA (mg.L <sup>-1</sup> )	Cor aparente			Turbidez			Matéria orgânica natural			Absorbância a 254nm		
	Filtração direta	oxidação + Filtração	oxidação + Adsorção + Filtração	Filtração direta	oxidação + Filtração	oxidação + Adsorção + Filtração	Filtração direta	oxidação + Filtração	oxidação + Adsorção + Filtração	Filtração direta	oxidação + Filtração	oxidação + Adsorção + Filtração
18	44,1	71,7	76,0	54,9	56,9	68,8	9,6	25,3	36,1	70,6	28,6	35,7
22	52,2	78,3	82,0	65,1	70,4	70,5	15,4	31,3	30,1	64,7	57,1	35,7
25	55,9	76,7	84,0	69,1	73,1	77,0	22,3	31,3	42,2	64,7	50,0	71,4
27	58,9	80,0	86,0	73,1	75,6	83,7	21,9	30,1	43,4	64,7	38,1	76,2
30	67,8	85,0	86,0	78,3	83,4	85,4	22,4	36,1	44,6	52,9	45,2	69,0
35	68,6	83,3	88,0	82,5	84,8	90,6	24,7	37,3	51,8	52,9	38,1	71,4

Inicialmente é possível observar para a variável cor aparente, que o HCA apresentou um acréscimo de eficiência a medida que foram adicionado as novas etapas no tratamento. Este acréscimo é atribuído principalmente a ação do cloro como oxidante. A dosagem de  $15 \text{ mg.L}^{-1}$  teve um ótimo desempenho para esse parâmetro inclusive se igualando a dosagens mais altas após a introdução da etapa de adsorção no tratamento.

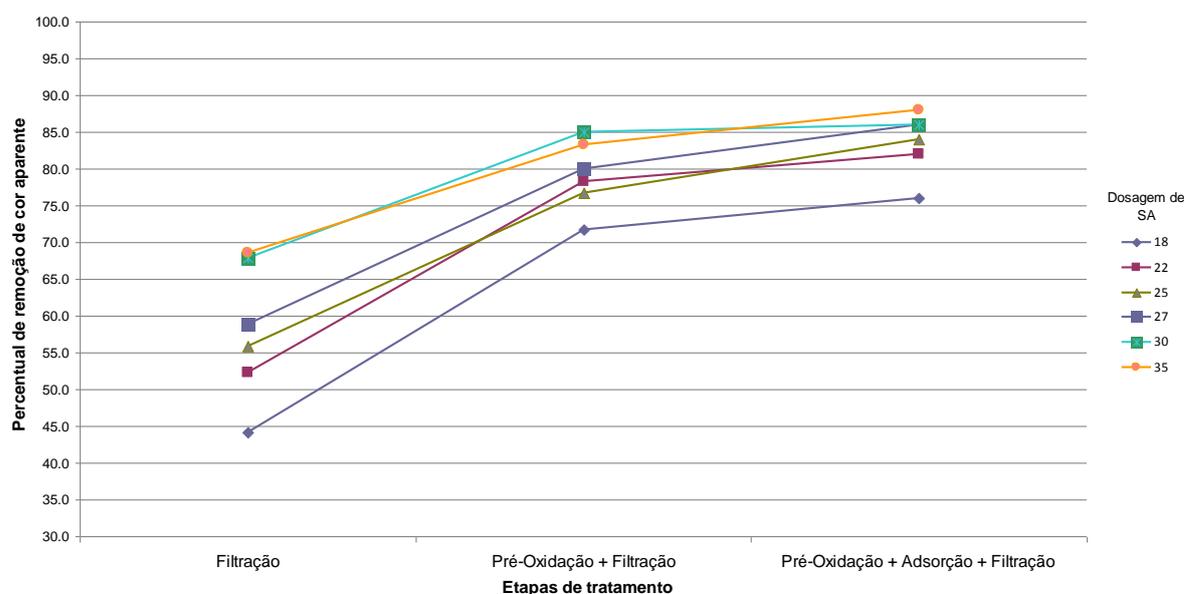
De acordo com a caracterização da água bruta, os valores médios de cor aparente da água bruta giraram em torno de 66 uC. Tomando como base esse resultado para que a portaria 518/2004 seja atendida é necessário um tratamento com pelo menos 77% de remoção para esta variável. Com o HCA este valor só será atingido com o uso de uma dosagem de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  (dosagem desaconselhada para a tecnologia de filtração direta) quando somente a etapa de tratamento por filtração direta é utilizada. Com a introdução da etapa de pré-oxidação a eficiência de remoção de cor necessária é atingida com  $12 \text{ mgHCA.L}^{-1}$ , o que gera uma adequação aos valores de dosagem atribuída a tecnologia adotada (filtração direta) e uma considerável economia de produto químico.

Para o Sulfato, 77% de remoção de cor aparente não foi atingido com tratamento por apenas a filtração direta otimizada pelo diagrama de coagulação. Porém, com a introdução da etapa de pré-oxidação, esse percentual de remoção desejado foi ultrapassado na segunda dosagem de coagulante testada ( $22 \text{ mgSA.L}^{-1}$ ).

Este comportamento, evidenciado no tratamento com os dois coagulantes, demonstra a importância da pré-oxidação para o uso de coagulantes com eficiências não tão altas. É possível facilmente visualizar este efeito com a observação das figuras 25 e 26.



**Figura 25** - Comportamento dos percentuais de remoção de cor aparente, durante as etapas de tratamento, com o uso de HCA como coagulante.



**Figura 26** - Comportamento dos percentuais de remoção de cor aparente, durante as etapas de tratamento, com o uso de SA como coagulante.

As figuras demonstraram que para o SA a inclinação da reta do primeiro patamar para o segundo é maior que no gráfico com o HCA. Este fator denota uma melhora no tratamento, não pela ação do coagulante, mas sim pela presença do oxidante. O deslocamento para o terceiro patamar demonstra que quando a etapa de adsorção é adicionada ao tratamento, há uma maior inclinação para as curvas do HCA, demonstrando um maior aumento de eficiência com a combinação cloro, HCA e CAP.

Em geral o HCA foi mais eficiente para este parâmetro que o sulfato de alumínio, superando-o em todas as etapas de forma isoladas e na combinação, em um tratamento mais completo. Com base nos valores médios de cor aparente encontrados para a água do manancial em estudo, é questionável o uso de um tratamento por somente filtração direta com o coagulante sulfato de alumínio, mesmo que haja a otimização do processo com a construção de diagramas de coagulação.

A avaliação tomando como base a turbidez demonstrou em todas as etapas, sejam isoladas ou combinadas, uma superioridade do HCA ao sulfato. Os percentuais de remoção de turbidez com o uso de HCA atingiram valores bastantes elevados, configurando uma eficaz alternativa de tratamento o uso deste produto químico. Tomando como base a média encontrada para a turbidez da água do açude Gargalheira (13,60 uNT), a obtenção de água remanescente ao tratamento dentro do limite estabelecido de potabilidade para esse parâmetro ( $< 1,00$  uNT), poderá ser atingida com um percentual de remoção de 92,6%.

De acordo com a pesquisa no jarreste, a obtenção desta qualidade de água pode ser encontrada, com um tratamento com apenas filtração direta, quando a dosagem superar  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  de HCA, sendo necessário que a coagulação seja otimizada com base no diagrama de coagulação.

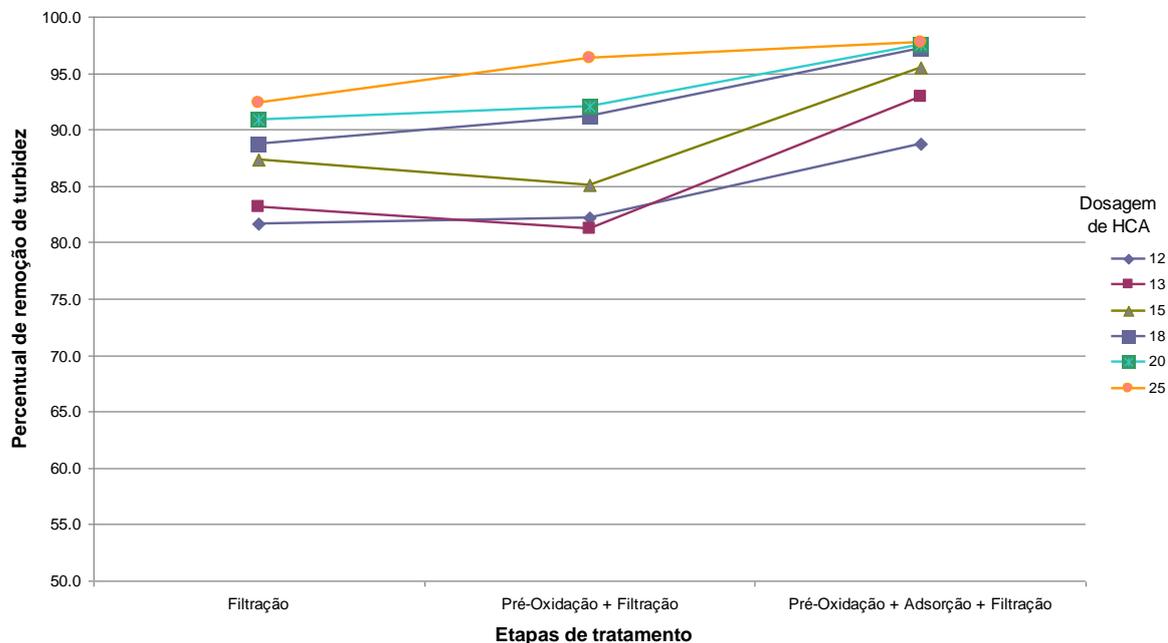
Em tratamentos com etapas de pré-oxidação, a dosagem de coagulante pode ser reduzida para aproximadamente  $20 \text{ mgHCA.L}^{-1}$ , com a vantagem de não necessitar a correção de pH.

Com o acréscimo da adsorção em CAP, dosagens de  $13 \text{ mg.L}^{-1}$  de HCA demonstraram a capacidade de promover eficiência de remoção de turbidez necessária.

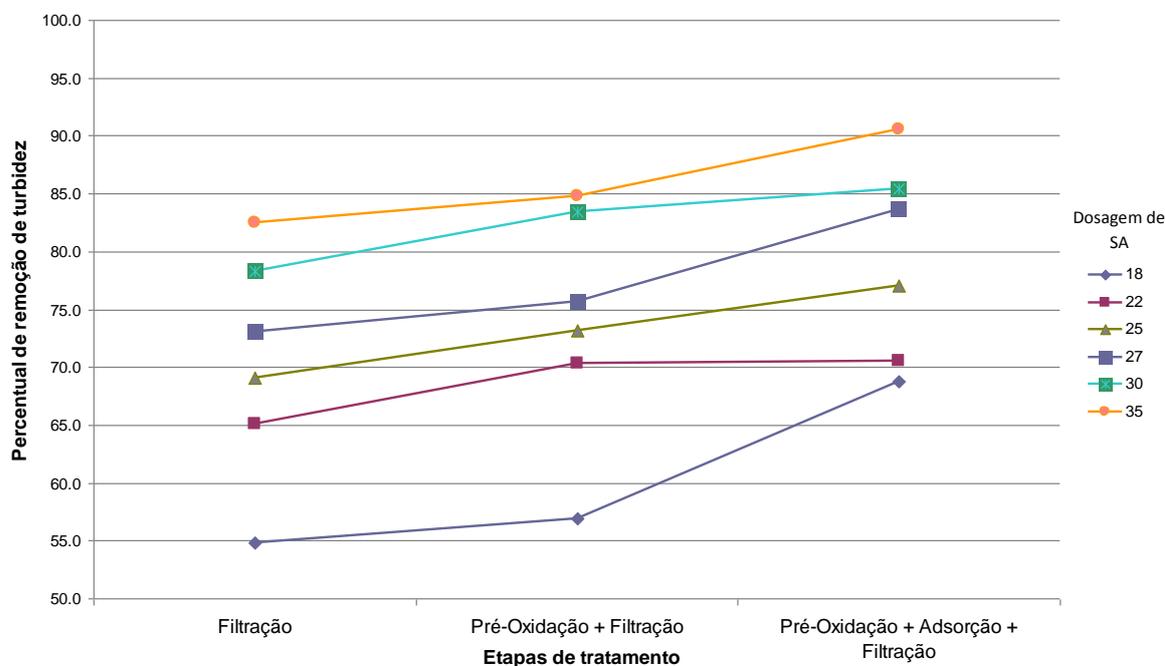
Adotando o limite de 0,5 uNT recomendado pela legislação o percentual necessário subirá para 96,3% e para o HCA a turbidez adequada não será atingida com apenas filtração direta. Sendo assim, haverá a possibilidade de atender esse limite somente com dosagem de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  de HCA e oxidação ou ainda dosagem de  $18 \text{ mg.L}^{-1}$  e etapas de oxidação e adsorção.

Apesar de apresentar bons resultados com dosagens de  $35 \text{ mg.L}^{-1}$ , o sulfato de alumínio, de acordo com os resultados encontrados não seria capaz de fornecer água com turbidez menor que 1,00 uNT. É importante evidenciar que dosagens elevadas de coagulante também são desaconselhadas para tratamento por filtração direta.

As figuras 27 e 28 retratam de forma gráfica o comportamento das remoções de turbidez para os dois coagulantes, a medida que as etapas de tratamento são acrescentadas.



**Figura 27** - Comportamento dos percentuais de remoção de turbidez, durante as etapas de tratamento, com o uso de HCA como coagulante.



**Figura 28** - Comportamento dos percentuais de remoção de turbidez, durante as etapas de tratamento, com o uso de SA como coagulante.

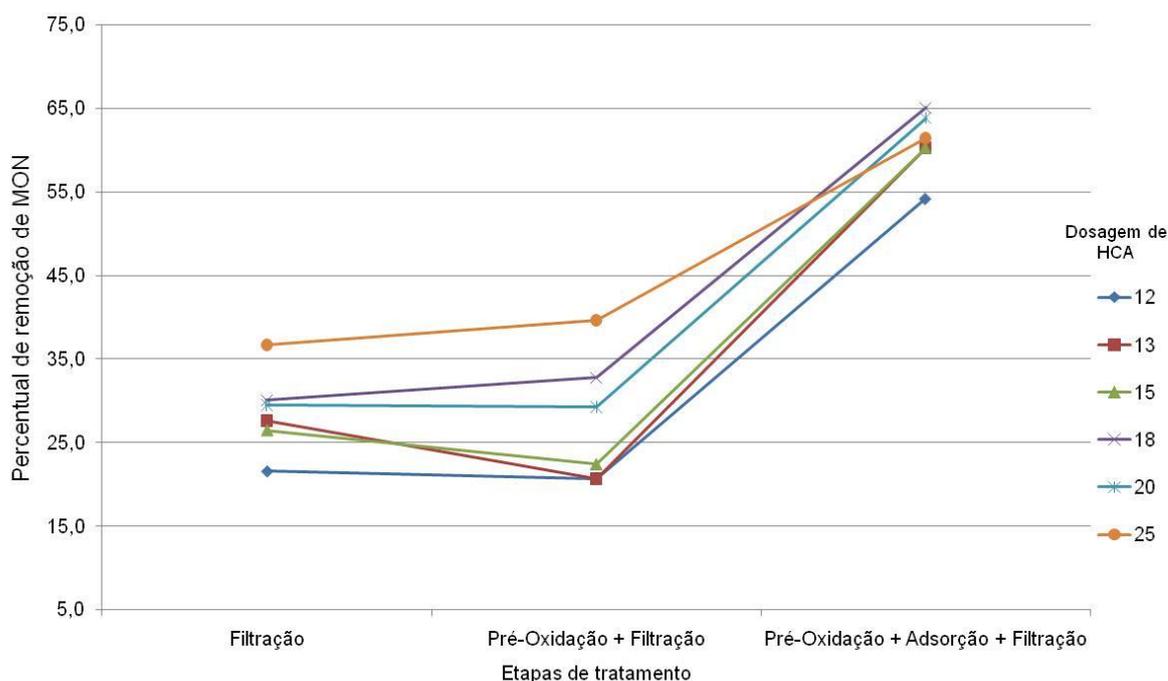
Com relação a variável Matéria orgânica natural, foi possível observar durante os testes, que o tratamento constituído de pré-oxidação, adsorção e filtração para os dois coagulantes obteve maior eficiência.

Na utilização de HCA como coagulante, ensaios com a pré-oxidação e filtração não foram tão eficientes para a remoção deste parâmetro. O comportamento das retas expostas na figura 29 demonstrou em algumas dosagens (12, 13, 15 e 20 mgHCA.L<sup>-1</sup>) uma inflexão, evidenciando que o tratamento com apenas as correções de pH e a filtração direta, nestes casos são mais eficientes que o tratamento com pré-oxidação e filtração para este parâmetro.

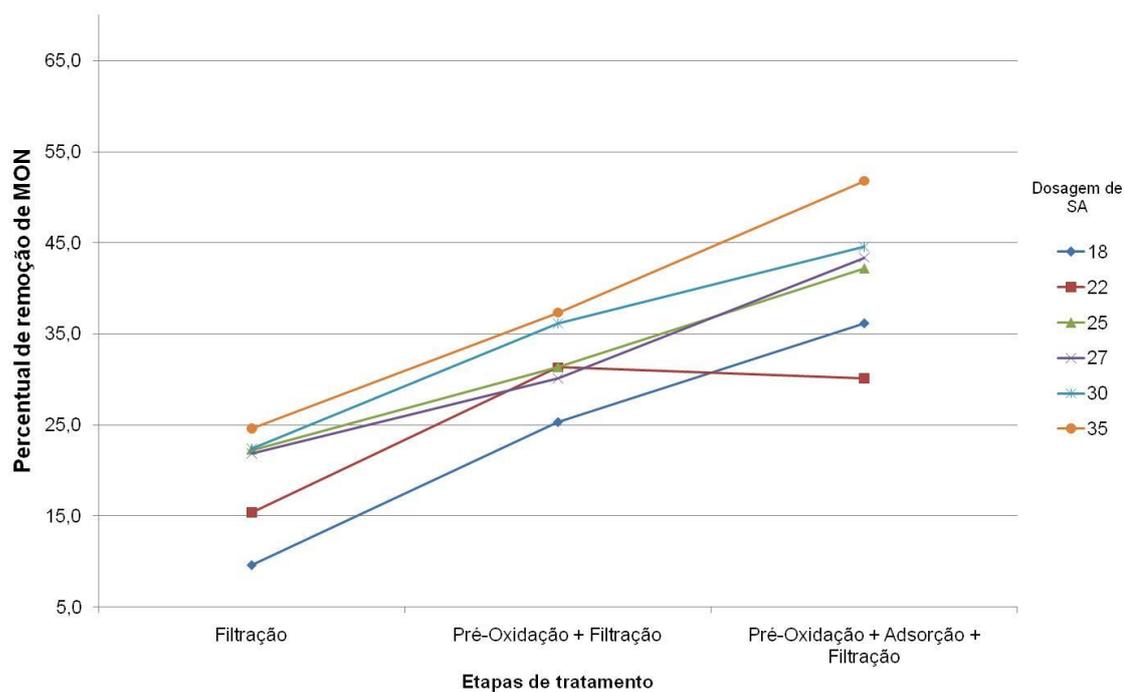
Uma possível justificativa para esse comportamento está na necessidade de ajuste do pH de coagulação após a água ser oxidada. A mudança nas características da água influencia também nas condições ideais para a formação das espécies hidrolizadas. São necessários maiores testes para identificar a influencia do cloro livre no pH da água e na coagulação propriamente dita. Desta forma, tornaria mais prudente a construção de outro diagrama para as condições de coagulação a partir de uma água oxidada.

O uso de correções de pH identificadas para água bruta e o uso delas para a água oxidada contribuíram para duas discussões importantes. Em primeiro lugar foi possível comprovar que as alterações estabelecidas com dosagens de acidificantes para água bruta são inadequadas para ajustar pH de coagulação de água pré-oxidada. E em segundo evidencia-se que é necessário avaliar o uso desta alternativa tecnológica, visto que, há uma tendência em estações de tratamento de adicionar, sem estudo prévio, a etapa de pré-oxidação, com a dosagem de cloro em algum ponto após a captação.

Para o sulfato de alumínio houve a presença de um comportamento anômalo com o tratamento com adsorção e dosagem de 22 mgSA.L<sup>-1</sup>. Como é possível identificar na figura 30, houve um decréscimo na eficiência de remoção, representado pela inflexão da reta. Este fato não está relacionado com algum erro de execução da análise de MON, visto que, o mesmo comportamento também foi observado para os percentuais de remoção de Abs. 254nm (figura 32). É fato que, houve maior presença de matéria orgânica no efluente do jarro tratado com 22 mgSA.L<sup>-1</sup> e etapas de pré-oxidação, adsorção e filtração do que no efluente com a mesma dosagem e apenas pré-oxidação e filtração direta. Pois, as duas variáveis de monitoramento para matéria orgânica (MON e ABS 254 nm) demonstraram esse comportamento através dos resultados.



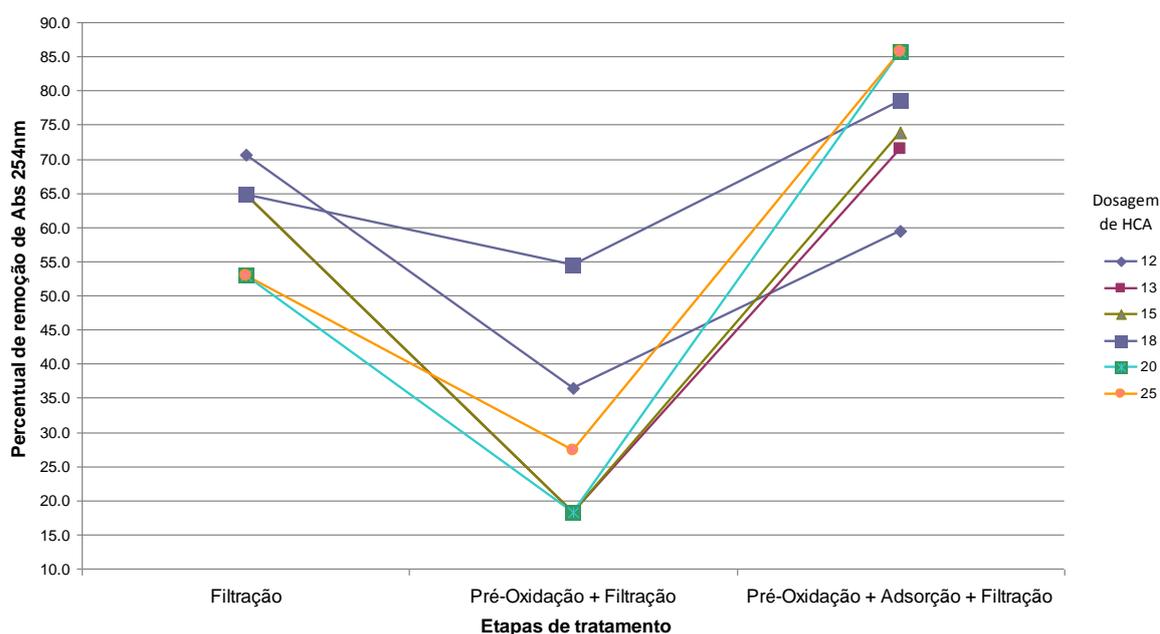
**Figura 29** - Comportamento dos percentuais de remoção de Matéria Orgânica Natural durante as etapas de tratamento, com o uso de HCA como coagulante.



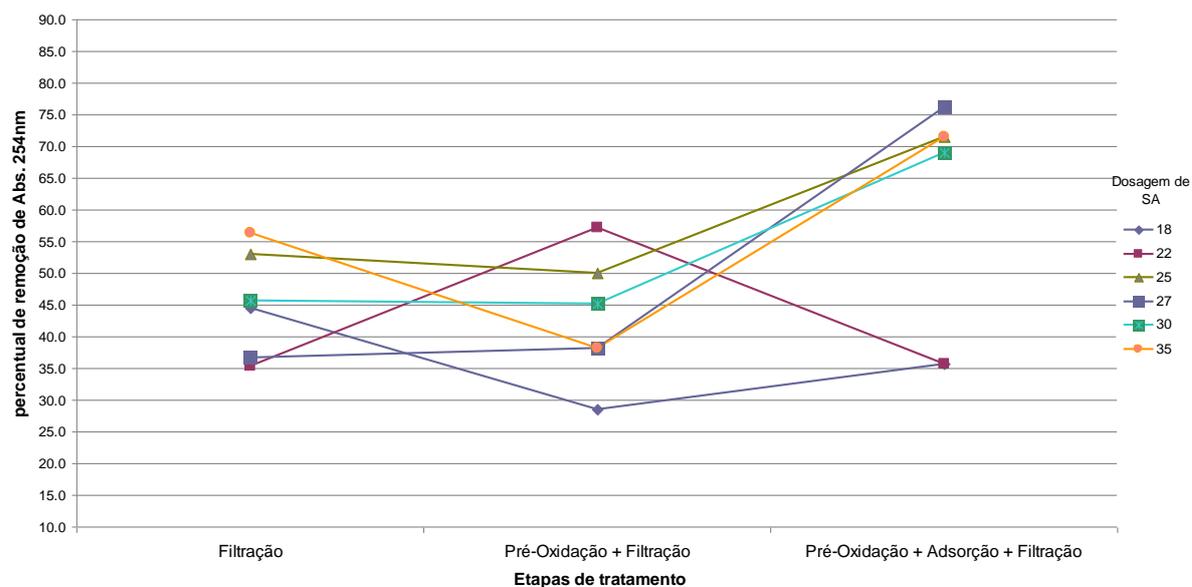
**Figura 30** - Comportamento dos percentuais de remoção de Matéria Orgânica Natural durante as etapas de tratamento, com o uso de SA como coagulante.

As análises do tratamento através do parâmetro de abs. 254nm vieram a comprovar algumas conclusões observadas com análise do parâmetro de MON. As remoções com a presença de adsorção, para os dois coagulantes, foram superiores aos percentuais com apenas as etapas de pré-oxidação e filtração. Tornando somente exceção a dosagem de  $22\text{mgSA.L}^{-1}$ , como comentado anteriormente. Este fato reforça a eficiência do CAP na remoção de matéria orgânica assim como na remoção de cloro residual.

Porém, com a observação das figuras 31 e 32, identificou-se que para o tipo de matéria mensurada pela absorvância a 254nm em alguns casos ( $18$  e  $22\text{mgSA.L}^{-1}$  e  $12\text{mgHCA.L}^{-1}$ ), dosagens mais baixas de coagulante, o tratamento com apenas a filtração direta e correção de pH foi mais eficiente que o tratamento com a presença de CAP. Este comportamento exige que sejam desenvolvidos estudos posteriores, para a verificação da eventual repetição do evento e assim traçar possíveis justificativas.



**Figura 31** - Comportamento dos percentuais de remoção de absorvância a 254 nm durante as etapas de tratamento, com o uso de HCA como coagulante.



**Figura 32** - Comportamento dos percentuais de remoção de absorbância a 254 nm durante as etapas de tratamento, com o uso de SA como coagulante.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no trabalho realizado algumas conclusões e considerações são descritas:

### a) Caracterização da água bruta;

Apesar da caracterização da água bruta utilizar apenas as análises no ponto de captação de água da ETA, os resultados encontrados para o fósforo total e para clorofila “a” enquadraram o manancial na classe 3 da Resolução 357 do CONAMA (consumo humano após tratamento avançado). Tal constatação corrobora com as indicações baseadas no aspecto visual e nas análises efetuadas pelo órgão Ambiental do Estado do RN – IDEMA, que caracterizam a eutrofização no açude. O pH elevado encontrado é fato decorrente do nível trófico. Os pHs mais elevados ocorreram no período do ano onde é registrado maior atividade solar (meses de dezembro e janeiro), comprovando que o parâmetro relaciona-se com a ação das algas. A presença de um maior coeficiente de variação para turbidez demonstra a necessidade de uma análise constante dos processos de tratamento mediante as variações temporais da água bruta do manancial.

### b) Determinação dos parâmetros que envolvem a coagulação:

Mediante a avaliação da eficiência na remoção de cor aparente e turbidez para o HCA, foi demonstrado que a dinâmica de remoção de cor aparente exigiu maiores dosagens de coagulantes. Com a identificação de basicidade no pH da água bruta, foi adotado uso de ácido para correção do pH de coagulação o que demonstrou resultado bastante satisfatório.

O sulfato de alumínio necessitou de dosagens maiores que o HCA. Além disso, à medida que a dosagem de sulfato de alumínio aumentava, ocorreu uma diminuição no pH de coagulação. O tratamento com a utilização deste produto demonstrou maior sensibilidade a diminuição do pH de coagulação que o tratamento com o HCA.

c) Avaliação da influência dos parâmetros que envolvem a mistura rápida;

A observação da influência da mistura rápida para o HCA pode identificar que para a turbidez, gradientes mais baixos demonstraram maior estabilidade na remoção mediante as variações no tempo de mistura. Gradientes mais elevados exigiram tempos mais elevados. O parâmetro de cor aparente apresentou uma menor sensibilidade a variação do tempo de mistura rápida com a utilização de HCA, em algumas situações houve remoções exatamente iguais com diferentes tempos.

Para o sulfato de alumínio as maiores remoções de turbidez foram encontradas com gradientes de rotação maiores. Novamente a cor aparente demonstrou menor sensibilidade a variação no tempo de mistura rápida. Os tempos de 11, 17, 22 e 30 segundos para  $800 \text{ s}^{-1}$ , por exemplo, obtiveram exatamente o mesmo valor em percentual de remoção de cor aparente.

d) Avaliação da influência dos parâmetros que envolvem a filtração;

Os resultados demonstraram um aumento linear na remoção de cor aparente e de turbidez, com a diminuição da granulometria do meio. A partir desta verificação considera-se que o tamanho do floco é adequado, visto que, a tecnologia por filtração direta exige a presença de flocos menores.

Analisando os resultados encontrados com a variação de taxas de filtração é perceptível que menores taxas de filtração favoreceram a dinâmica de remoção de turbidez. Porém, esta influência na remoção não se demonstrou muito significativa. Para o parâmetro de cor aparente, as variações das taxas de filtração demonstraram um comportamento anômalo não seguindo nenhum padrão de comportamento linear nas remoções.

e) Construção dos diagramas de coagulação

Observando os diagramas de coagulação desenvolvidos para o HCA e para o SA foi possível identificar que a evolução das dosagens de coagulante e pHs de coagulação mais baixos favoreceram a eficiência do tratamento com os dois produtos químicos. Dosagens elevadas de coagulantes demonstraram-se eficientes inclusive sem a correção do pH de coagulação. Porém, haverá sempre a necessidade da confirmação do mecanismo de coagulação ocorrido nestas

condições, sobretudo, para que a coagulação se adéqüe a tecnologia de filtração direta.

Foi demonstrado que após alterações na água bruta, com o acréscimo de etapas antecedendo a coagulação (préoxidação ou adsorção), dosagens pré-estabelecidas com base em diagramas de coagulação decrescem sua eficiência no tratamento. Sendo assim, é aconselhável quando houver a incorporação destas etapas, a construção de novos diagramas que agreguem a esta nova realidade as informações adequadas.

f) Determinação dos parâmetros que envolvem a oxidação;

Com condições adequadas de oxidação (tempo e dosagem) a presença de uma etapa de préoxidação possibilitou uma coagulação eficaz sem o uso de  $H_2SO_4$  para correção do pH de coagulação. Este fato torna-se importante, pois estar relacionado com a necessidade de adequar os testes ao mais próximo possível de uma situação reproduzível em escala real. Além da possibilidade da eliminação da correção de pH de coagulação foi demonstrado que a incorporação de uma etapa de préoxidação correta possibilita a diminuição de dosagens de coagulante.

g) Determinação dos parâmetros que envolvem a adsorção;

Embora a determinação dos parâmetros relacionados com a adsorção em carvão ativado tenha utilizado um número maior de variáveis, com o acréscimo das análises de matéria orgânica natural e absorbância a 254nm, foram necessários ensaios em duplicata para definir a dosagem de CAP e tempo de adsorção, tal fator esta relacionado principalmente com a instabilidade da suspensão.

A incorporação da adsorção no tratamento demonstrou-se bastante eficaz, apresentando, com a dosagem correta de CAP, cor aparente com valores menores de 10 uC e turbidez com valores aproximados de 1,50 uNT em todos os tempos de adsorção testados.

h) Fornecimento de informações para a instalação piloto sobre os métodos de utilização dos produtos envolvidos nas etapas de tratamento.

As etapas da pesquisa que visaram a obtenção de dosagens de coagulante, pH de coagulação, obtenção de tempo e gradiente de mistura rápida, forneceram dados para o funcionamento da coagulação na instalação piloto presente na ETA. A dosagem sugerida de coagulante HCA foi  $15 \text{ mg.L}^{-1}$ , o pH de coagulação foi 6,00, o gradiente de mistura foi  $700 \text{ s}^{-1}$  com um tempo de 17 segundos.

A pesquisa para préoxidação forneceu os dados de dosagem de cloro de  $4,00 \text{ mg.L}^{-1}$  e tempo de contato de 20 minutos. A adsorção com CAP também forneceu informações, foram elas: dosagem de CAP e tempo de adsorção, respectivamente,  $15 \text{ mg.L}^{-1}$  e 30 minutos.

- i) Comparação entre tratamento com configurações que envolvem a préoxidação, adsorção e filtração.

A utilização de um monitoramento da qualidade da água bruta e a determinação das remoções geradas pela combinação de etapas de tratamento representaram uma importante ferramenta para a busca da potabilização da água do manancial. Diante das características da água bruta, foi possível adequar o tratamento, alterando dosagens ou etapas, tomando como base os percentuais de remoção necessários para que a água remanescente esteja de acordo com a portaria vigente.

## 6 REFERÊNCIAS

- BRASIL. **Portaria 518 de 25 de março de 2004**. Fundação Nacional de Saúde. Brasília. 2004. 32 p.
- BRASIL. **Resolução 357 de 17 de março de 2005**. Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2005. 23 p.
- BARZAN, P. J.; SARTOR, G. D.. *Avaliação da qualidade do reservatório do Rio São Bento (Siderópolis/SC) quanto aos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos*. In: X Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia sanitária e ambiental. 2010, Maceió - AL.
- CARVALHO, M. J. H.. *Uso de coagulantes naturais no processo de obtenção de água potável*. Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Urbana. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2008.
- CAMPOS, S.X.; DI BERNARDO, L.; VIEIRA, E. M. *Influência das características das substâncias húmicas na eficiência da coagulação com sulfato de alumínio*. Engenharia sanitária e ambiental Vol.10 - Nº 3 - jul/set 2005, 194-199.
- CONSTANTINO, L.T. *Ruptura e recrescimento de flocos em água com substâncias húmicas aquáticas coagulada com sulfato de alumínio e cloreto férrico*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.
- COSTA, I. A. S. da; CUNHA, S. R. de S.; PANOSSO, R.; ARAÚJO, M. F. F.; MELO, J. L. de S.; ESKINAZI-SANT'ANNA, E. M.. *Dinâmica de cianobactérias em reservatórios eutróficos do semi-árido do Rio Grande do Norte*. Oecologia Brasiliensis 13(2): 382-401, 2009.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CEUNTRIONE FILHO, P. L.. *Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. 1ed. São Carlos. Ed. Rima, 2002, 237p.
- DI BERNARDO, L. et al. *Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta*. PROSAB 3. RIMA Editora, 498p. Rio de Janeiro, 2003.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. Sunda Edição. São Carlos: RiMa, 2005. 783 p. Vol. 1.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. Sunda Edição. São Carlos: RiMa, 2005. 792 p. Vol. 2.
- DALSASSO, R. L.; SENS, M. L.. *Filtração direta com pré-floculação e coagulação com sulfato de alumínio e hidroxocloreto de alumínio: Estudo com água de manancial eutrofizado*. Engenharia sanitária e ambiental Vol.11 - Nº 3 - jul/set 2006, 241-249.
- ESTEVEZ, F. de A.. *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro. Editora Interciência.1988. 574p.

FAGUNDES, A. P.. *Remoção de Oocistos de Cryptosporidium por filtração direta – influência de alguns aspectos operacionais*. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. DF, 2006, 143p.

FERNANDES, N. M. G.. *Influência do pH de Coagulação e dosagem de sulfato de alumínio na remoção de oocistos de cryptosporidium por filtração direta descendente*. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. DF, 2007, 144p.

FERREIRA FILHO, S. S.; MARCHETTO, M.. *Otimização multi-objetivo de estações de tratamento de água de abastecimento: Remoção de turbidez, carbono orgânico total e gosto e odor*. Engenharia sanitária e ambiental Vol.11 - Nº 1 - jan/mar 2006, 7-15.

GUIMARÃES, A. O.; MELO, A. D. de.; CEBALLOS, B. S. O. de.; GALVÃO, C. O.; RIBEIRO, M. M. R.. *Aspectos da gestão do açude Epitácio Pessoa (PB) e variação da qualidade de água*. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia sanitária e ambiental. 2005, Campo Grande - RS.

KIM, Y.; BAE, B.. *Design and Evaluation of hydraulic baffled-channel PAC contactor for taste and odor removal from drinking water supplies*. ScienceDirect – Water Research 41/2007. Homepage: [www.elsevier.com/locate/watres](http://www.elsevier.com/locate/watres).

KURODA, E. K.; DI BERNARDO, L.; PAULA, D. de. *Dupla filtração com filtro ascendente em pedregulho e em areia grossa para tratamento de água*. Engenharia sanitária e ambiental Vol. 8 - Nº 4 - out/dez 2003, 221-238.

KURODA, E.K. *Remoção de células e subprodutos de Microcystis spp. Por dupla filtração, oxidação e adsorção*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

LEAL, F. C. T.; LIBÂNIO, M.. *Estudo da remoção de cor por coagulação química no tratamento convencional de águas de abastecimento público*. Engenharia sanitária e ambiental Vol.7 - Nº 4 - jul/set 2002, 117-128.

LIBÂNIO, M.. *Fundamentos de Qualidade e Tratamento de água*. Campinas, São Paulo: Editora Átomo, 2ª Edição, 444p. 2008.

MARCHETTO, M.; FERREIRA FILHO, S. S.. *Interferência do processo de coagulação na remoção de compostos orgânicos causadores de gosto e odor em águas de abastecimento mediante da aplicação de carvão em pó*. Engenharia sanitária e ambiental Vol.10 - Nº 3 - jul/set 2005, 243-252.

MONDARDO, R. I.; SENS, M. L.; MELO FILHO, L. C. de.. *Pré-tratamento com cloro e ozônio para remoção de cianobactérias*. Engenharia sanitária e ambiental Vol.11 - Nº 4 - jul/set 2006, 337-342.

MÜLLER, C. C.; RODRIGUEZ, M.T. R.; CYBIS, Luiz Fernando. *Adsorção em carvão ativado em pó para remoção de microcistina de água de abastecimento público*. Engenharia sanitária e ambiental. vol.14 n.1 | jan/mar 2009 | 29-38.

OLIVEIRA, J. A. de.; *Remoção de Microcistina em águas provenientes de reservatório eutrofizado associando técnicas de clarificação, pré-oxidação com permanganato de potássio, adsorção em carvão ativado e pós-cloração*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

PADUA, V. L. de (coordenador); *Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano*. Rio de Janeiro: ABES, 2006 504 p. : II

PASCHOALATO, C. F. P. R.; TRIMAILOVAS, M. R.; DI BERNARDO, L.. *Formação de subprodutos orgânicos halogenados nas operações de pré-oxidação com cloro, ozônio e peróxido e pós-cloração em água contendo substância húmica*. Engenharia sanitária e ambiental Vol.13 - Nº 3 - jul/set 2008, 313-322.

PEREIRA, G. G.; *Remoção de células de Microcystis sp por pré-cloração, coagulação, filtração direta e pós-cloração em escala de bancada*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

PERNITSKY, D. J.; EDZWALD, J. K.. *Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications*. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 55.2/2006.

ROSA, A. A.. *Pré-cloração associada à adsorção em carvão ativado em pó e flotação por ar dissolvido na remoção de microcistina presentes em três diferente concentrações em águas provenientes de reservatório eutrofizado*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

RIBEIRO, J. T.; BRESAOLA JUNIOR, R.. *Gradiente de velocidade: efeitos na adsorção-desestabilização para remoção de PFTHMs*. In: Asociación Peruana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; AIDIS. Gestión ambiental en el siglo XXI. Lima, APIS, 1998. p.1-6

SANTOS, E. P. C. C. dos; TEIXEIRA, A. R.; ALMEIDA, C. P.; LIBÂNIO, M.; PÁDUA, V. L. de. *Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente*. Engenharia sanitária e ambiental Vol.12 - Nº 4 - out/dez 2007, 361-370.

TANGERINO, E. P.; DI BERNARDO, L.. *Remoção de Substancias húmicas por meio de oxidação com ozônio e peróxido de hidrogênio e FiME*. Engenharia sanitária e ambiental Vol.10 - Nº 4 - jul/set 2005, 290-298.

VON SPERLING, M.. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2 ed. Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais, 243p. 1996.

VOLTAN, P. E. N.. *Avaliação da ruptura e do recrescimento de flocos na eficiência de sedimentação em água com turbidez elevada*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

WIECHETECK, G. K.; BENINI, B. D. da S.; DI BERNARDO, L., *Remoção de substâncias húmicas utilizando dupla filtração com filtro ascendente de areia grossa ou de pedregulho*. Engenharia sanitária e ambiental Vol. 9 - Nº 2 - abr/jun, 156-164.

ZOUBOULIS, A. I; TRASKAS, G.. *Comparable evaluation of various commercially available aluminium-based coagulants for the treatment of surface water and for the post-treatment of urban wastewater* Journal of Chemical Technology and Biotechnology 80:1136–1147 (2005) DOI: 10.1002/jctb.1300 Division of Chemical Technology, Department of Chemistry, Aristotle University of Thessaloniki, GR-54124 Greece.