

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE TRIHALOMETANOS EM ÁGUAS
DE ABASTECIMENTO UTILIZANDO PERMANGANATO DE
POTÁSSIO E CARVÃO ATIVADO EM PÓ**

Bruno Vicente de Azevedo Pereira dos Santos

Campinas, SP
2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE TRIHALOMETANOS EM ÁGUAS
DE ABASTECIMENTO UTILIZANDO PERMANGANATO DE
POTÁSSIO E CARVÃO ATIVADO EM PÓ**

Bruno Vicente de Azevedo Pereira dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Ruben Bresaola Júnior

Dissertação de mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Saneamento e Ambiente.

Campinas, SP

2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Sa59f Santos, Bruno Vicente de Azevedo Pereira dos
Formação e remoção de trihalometanos em águas de
abastecimento utilizando permanganato de potássio e
carvão ativado em pó / Bruno Vicente de Azevedo
Pereira dos Santos.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Ruben Bresaola Júnior
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Água – Estações de tratamento. 2. Água –
Purificação - Oxidação. 3. Água – Purificação –
Floculação. 4. Permanganato de potássio. 5. Carvão. I.
Ruben Bresaola Júnior. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Trihalomethane formation and remotion in drinking water using
potassium permanganate and powdered activated carbon.

Palavras-chave em Inglês: Water purification plants, Water-purification-oxidation,
Water-purification-floculation, Potassium permanganate,
Coal

Área de concentração: Saneamento e Ambiente

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Ricardo de Lima Isaac, Pedro Alem Sobrinho

Data da defesa: 27/04/2005

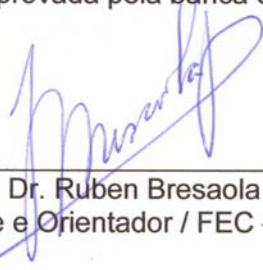
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

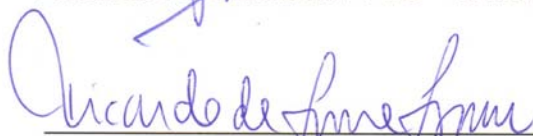
**FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE TRIHALOMETANOS EM ÁGUAS
DE ABASTECIMENTO UTILIZANDO PERMANGANATO DE
POTÁSSIO E CARVÃO ATIVADO EM PÓ**

Autor: Bruno Vicente de Azevedo Pereira dos Santos

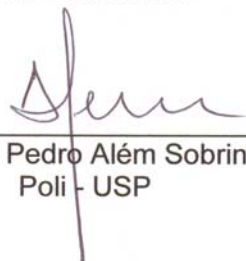
Dissertação de mestrado aprovada pela banca examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Ruben Bresaola Júnior
Presidente e Orientador / FEC – UNICAMP



Prof. Dr. Ricardo de Lima Isaac
FEC – UNICAMP



Prof. Dr. Pedro Além Sobrinho
Poli - USP

Campinas, 27 de abril de 2005

Dedicatória

Aos meus pais José Marinho e Simone, por todo apoio durante a realização deste trabalho.

Agradecimentos

Aos meus pais, José Marinho e Simone, meus irmãos Denise e Mauro e especialmente à minha namorada Danielle pelo apoio e incentivo.

Ao Prof. Dr. Ruben Bresaola Júnior pela orientação e amizade durante a realização deste trabalho. A todos os professores da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP pela minha formação na graduação e agora no mestrado.

Ao amigo, colega de mestrado e companheiro de pesquisa Renato Marmo, pela amizade e dedicação ao projeto.

Aos grandes amigos Piauí, Pati, Massa, Dirce, Jane, David, Mora, Snarf, Melocchi, Nando e Rodrigo por estarem sempre presentes e me apoiando.

À CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

À FAPESP, pelo financiamento da parte experimental, com recursos provenientes do Projeto de Auxílio à Pesquisa.

À Bahia Carbon Ltda, pela doação do carvão ativado em pó utilizado neste trabalho.

A todas as pessoas que, de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

SANTOS, Bruno Vicente de Azevedo Pereira dos. Formação e remoção de trihalometanos em águas de abastecimento utilizando-se o permanganato do potássio e carvão ativado em pó. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 193 páginas. Dissertação de Mestrado.

A presente pesquisa teve por objetivo analisar a formação de THM através do uso de permanganato de potássio, de forma isolada ou associada com o cloro livre, no processo de pré-oxidação, e, numa segunda etapa, avaliar a eficiência de remoção destes subprodutos através da adsorção em carvão ativado em pó seguida de tratamento convencional. Foram realizadas oxidações de soluções contendo ácidos húmicos e brometos, em diversas dosagens, analisando-se a formação de THM por espectrofotometria e cromatografia gasosa. A remoção dos subprodutos formados foi realizada com dosagens de CAP variando de 10,0 a 150,0 mg/L e com dosagem de coagulante e valor de pH determinados experimentalmente para cada uma delas. Os resultados obtidos, pelos dois métodos de detecção, mostraram que não houve formação significativa de THM quando a oxidação foi realizada apenas pelo permanganato de potássio e que, com o uso conjunto dos dois oxidantes, houve uma redução média de 30 % na formação quando comparada ao uso exclusivo de cloro livre. O processo de tratamento se mostrou eficiente para as dosagens mais altas de CAP, adequando a qualidade da água final nas normas vigentes.

Palavras-chave:

Tratamento de água, THM, trihalometanos, substâncias húmicas, permanganato de potássio, carvão ativado em pó.

ABSTRACT

SANTOS, Bruno Vicente de Azevedo Pereira dos. Trihalometane formation and remotion in drinking water using potassium permanganate and powdered activated carbon. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 193 pages. Dissertação de Mestrado.

The present research had for objective to analyze the formation of THM through the use of potassium permanganate, isolated or associate with free chlorine, in the process of pre-oxidation, and, in a second stage, to evaluate the removal efficiency of these by-products through the adsorption in powdered activated carbon followed by conventional treatment. The oxidations of solutions contend humic acids and bromides, in diverse dosages had been carried through, analyzing the formation of THM with spectrofotometric and gas chromatography methods. The removal of by-products was carried through with dosages of PAC between 10,0 and 150,00 mg/L and dosages of coagulant and pH value determined experimentally for each one of them. The gotten results, for the two methods of determination, had shown that there wasn't significant formation of THM when the oxidation was carried through only by the potassium permanganate and that, with the joint use of the two oxidants, it had an average reduction of 30 % in the formation when compared with the exclusive use of free chlorine use. The treatment process showed efficient for the highest dosages of PAC, adjusting the quality of the final water in the effective regulations.

Keywords:

Water Treatment, trihalomethanes, THM, humic substances, potassium permanganate, powdered activated carbon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Proposta de estrutura para substâncias húmicas	11
Figura 3.2: Comparação da formação de THM através da oxidação de ácidos húmicos e fúlvicos com cloro livre, em função do tempo.....	13
Figura 3.3: Estrutura molecular dos trihalometanos mais freqüentes, que podem ocorrer em águas de abastecimento público	15
Figura 3.4: Estrutura molecular dos trihalometanos menos freqüentes, que podem ocorrer em águas de abastecimento público.....	16
Figura 3.5: Efeito da variação do tempo de contato na formação de TTHM	18
Figura 3.6: Efeito da variação do valor de pH na formação de TTHM.....	20
Figura 3.7: Efeito da variação de temperatura na formação de TTHM.....	22
Figura 3.8: Efeito da dosagem de cloro na formação de TTHM.....	24
Figura 3.9: Formação e técnicas de controle de subprodutos da desinfecção.....	26
Figura 3.10: Redução na formação de clorofórmio devido à aplicação de permanganato de potássio anteriormente ao cloro	38
Figura 3.11: Efeito de dosagens baixas de permanganato de potássio na formação de clorofórmio e cloro residual	39
Figura 4.1: Fluxograma esquemático das etapas e fases da parte experimental da pesquisa.....	50
Figura 4.2: Banho quente para aquecimento da cubeta contendo a amostra	55

Figura 4.3: Cubetas contendo o branco e a amostra após o tempo de reação do THM Plus Reagente 4.....	56
Figura 4.4: Foto dos “vials” utilizados para a coleta e preservação das amostras a serem enviadas para laboratório cromatográfico.	67
Figura 4.5: Foto da bombona utilizada para coleta e como reator de oxidação na segunda etapa da pesquisa	69
Figura 4.6: Esquema dos ensaios para escolha do valor pH e dosagem de coagulante.....	71
Figura 4.7: Esquema dos ensaios 26 e 27 para remoção de THM	73
Figura 4.8: Equipamento de “jarteste” (a), pHmetro de bancada (b), o colorímetro e o turbidímetro (c) e o espectrofotômetro DR 2500 da Hach (d)	75
Figura 5.1: Relação entre o valor teórico e o valor medido para soluções de clorofórmio	88
Figura 5.2: Variação da formação de TTHM em função da dosagem permanganato de potássio pelo método espectrofotométrico.....	94
Figura 5.3: Foto dos reatores 7, 8 e 9 após tempos de reação de 2 horas, 1 hora e 10 minutos respectivamente	95
Figura 5.4: Foto dos reatores 7, 8 e 9 após tempos de reação de aproximadamente 14, 13 e 12 horas, respectivamente	96
Figura 5.5: Variação da formação de TTHM em função da concentração de ácidos húmicos pelo método espectrofotométrico.....	97
Figura 5.6: Variação da formação de TTHM em função da concentração brometos, para concentração de ácidos húmicos igual a 1,0 mg/L, pelo método espectrofotométrico	99
Figura 5.7: Variação da formação de TTHM em função da concentração brometos, para concentração de ácidos húmicos igual a 2,5 mg/L, pelo método espectrofotométrico	99
Figura 5.8: Variação da formação de TTHM em função da concentração brometos com tempo de contato de 30 minutos entre a aplicação dos oxidantes, pelo método espectrofotométrico.....	102

Figura 5.9: Variação da formação de TTHM em função da concentração brometos com tempo de contato de 60 minutos entre a aplicação dos oxidantes, pelo método espectrofotométrico.....	102
Figura 5.10: Variação da formação de TTHM em função da concentração brometos com tempo de contato de 30 minutos entre a aplicação dos oxidantes, pelo método cromatográfico	103
Figura 5.11: Variação da formação de TTHM em função da concentração e brometos devido a oxidação com cloro livre, pelo método espectrofotométrico	104
Figura 5.12: Variação da formação de TTHM em função da concentração de brometos devido a oxidação com cloro livre, pelo método cromatográfico	104
Figura 5.13: Variação da formação de TTHM em função do tempo de contato, para concentração de brometos igual a 0,50 mg/L, pelo método cromatográfico	106
Figura 5.14: Variação da formação de TTHM em função do tempo de contato, para concentração de brometos igual a 1,00 mg/L, pelo método cromatográfico	106
Figura 5.15: Variação da formação de TTHM em função do tempo de contato, para concentração de brometos igual a 3,00 mg/L, pelo método cromatográfico	106
Figura 5.16: Especificação dos THM formados nas oxidações com permanganato de potássio seguido de cloro livre após 30 minutos, para os três tempos de amostragem	111
Figura 5.17: Cromatograma da amostra retirada do reator 13 com tempo de contato de 24 horas	113
Figura 5.18: Foto mostrando a correção do pH nas amostras dos jarros de “jarteste” antes da adição de CAP	124
Figura 5.19: Variação dos valores de cor aparente e turbidez em função da dosagem de CAP aplicada	125
Figura 5.20: Foto dos jarros contendo as amostras oxidadas após a adição de CAP, no ensaio 25.....	126
Figura 5.21: Variação da cor aparente e turbidez para a amostra após a adição de CAP e para a amostra final obtidos no ensaio 26.....	130
Figura 5.22: Variação da cor aparente e turbidez para a amostra após a adição de CAP e para a amostra final obtidos no ensaio 27.....	130

Figura 5.23: Variação da remoção de TTHM em função da dosagem de CAP, com os dados obtidos por espectrofotometria, para os ensaios 26 e 27	133
Figura 5.24: Variação da remoção de TTHM em função da dosagem de CAP, com os dados obtidos por cromatografia, para os ensaios 26 e 27.....	133
Figura 5.25: Variação da remoção de THM em função da dosagem de CAP aplicada, pelos dados obtidos por espectrofotometria.....	134
Figura 5.26: Variação da remoção de THM em função da dosagem de CAP aplicada, pelos dados obtidos por cromatografia	135
Figura 5.27: Correlação entre os valores obtidos das análises cromatográficas e espectrofotométrica para os reatores 1 a 12 da primeira etapa	138
Figura 5.28: Correlação entre os valores obtidos das análises cromatográficas e espectrofotométrica para os reatores 13 a 15 da primeira etapa.....	139
Figura 5.29: Correlação entre os valores obtidos das análises cromatográficas e espectrofotométrica nos ensaios 26 e 27 da segunda etapa	140
Figura 5.30: Correlação entre os valores obtidos das análises cromatográficas e espectrofotométrica nas duas etapas do trabalho de pesquisa	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Classificação das substâncias húmicas segundo sua solubilidade	9
Tabela 3.2: Características das substâncias húmicas.....	10
Tabela 3.3: Principais elementos químicos que constituem os ácidos húmicos e fúlvicos	11
Tabela 3.4: Lista dos subprodutos da desinfecção e residuais de desinfetantes	14
Tabela 3.5: Influência do pH, temperatura e dosagem de cloro na formação de THM ..	19
Tabela 3.6: Influência da concentração do íon brometo na formação de THM	25
Tabela 3.7: Classificação das substâncias segundo seu potencial carcinogênico	29
Tabela 3.8: Potencial carcinogênico dos principais THM	29
Tabela 3.9: Principais características dos agentes oxidantes	31
Tabela 3.10: Potencial de oxidação de agentes oxidantes mais utilizados	32
Tabela 3.11: Dosagens típicas de cloro utilizadas no tratamento de água	34
Tabela 3.12: Principais métodos cromatográficos para detecção de THM e suas características	44
Tabela 3.13: Principais interferentes e níveis máximos permitidos para o método THM PLUS	47
Tabela 4.1: Métodos utilizados na caracterização da água bruta.....	52
Tabela 4.2: Características do poço artesiano do Ginásio Multidisciplinar.....	53
Tabela 4.3: Características dos compostos utilizados no preparo de soluções de clorofórmio	57

Tabela 4.4: Dosagens utilizadas para oxidação com permanganato de potássio	64
Tabela 4.5: Dosagens utilizadas para oxidação com permanganato de potássio combinado com cloro livre.....	65
Tabela 4.6: Dosagens utilizadas para oxidação com cloro livre	66
Tabela 4.7: Dosagens utilizadas na segunda etapa da pesquisa.....	68
Tabela 4.8: Parâmetros adotados para ensaio de "jarteste"	70
Tabela 4.9: Equipamentos utilizados no desenvolvimento do trabalho de pesquisa.....	74
Tabela 4.10: Reagentes utilizados na caracterização da água bruta	76
Tabela 4.11: Reagentes utilizados na preparação de soluções de clorofórmio	76
Tabela 4.12: Reagentes utilizados na determinação da concentração de cloro livre no hipoclorito de sódio	77
Tabela 4.13: Reagentes utilizados na determinação de THM pelo método espectrofotométrico.....	77
Tabela 4.14: Reagentes utilizados na preservação das amostras enviadas para análise cromatográfica	77
Tabela 4.15: Reagentes utilizados nas reações de oxidação	77
Tabela 4.16: Reagentes utilizados nos ensaios de "jarteste"	78
Tabela 4.17: Especificações técnicas do carvão ativado Bcarbon FM 125.....	78
Tabela 4.18: Especificações técnicas do papel de filtro faixa branca Schleicher & Schuell	79
Tabela 5.1: Datas de coleta e resultados das análises para escolha do poço	82
Tabela 5.2: Resultados obtidos para as análises de monitoramento da qualidade da água bruta, com as respectivas datas de coleta	84
Tabela 5.3: Resultados obtidos para as análises de monitoramento da qualidade da água bruta, com as respectivas datas de coleta	85
Tabela 5.4: Dados de concentração teórica nas soluções de clorofórmio e valor obtido pelo método espectrofotométrico	87
Tabela 5.5: Concentração de cloro livre no frasco de hipoclorito de sódio	90
Tabela 5.6: Dosagens utilizadas em cada reator na 1° etapa da pesquisa.....	92
Tabela 5.7: Resultados de TTHM para oxidação com diversas dosagens de permanganato de potássio.....	93

Tabela 5.8: Resultados de TTHM para oxidação com permanganato de potássio variando-se a concentração de ácidos húmicos	97
Tabela 5.9: Resultados de TTHM para oxidação com permanganato de potássio variando-se a concentração de brometos	98
Tabela 5.10: Resultados de TTHM para oxidação com permanganato de potássio e cloro livre com tempo de contato de 30 minutos entre a aplicação dos oxidantes	100
Tabela 5.11: Resultados de TTHM para oxidação com permanganato de potássio e cloro livre com tempo de contato de 60 minutos entre a aplicação dos oxidantes	101
Tabela 5.12: Resultados de TTHM para oxidação com cloro livre variando-se a concentração de brometos.....	103
Tabela 5.13: Resultados para os dois métodos de detecção para formação de trihalometanos nas oxidações com permanganato de potássio seguido de cloro livre	105
Tabela 5.14: Diferença percentual da formação de THM com e sem a aplicação de permanganato de potássio anteriormente ao cloro para o método espectrofotométrico.....	108
Tabela 5.15: Diferença percentual da formação de THM com e sem a aplicação de permanganato de potássio anteriormente ao cloro para o método cromatográfico	108
Tabela 5.16: Especificação dos THM formados nas oxidações com permanganato de potássio.....	110
Tabela 5.17: Especificação dos THM formados nas oxidações com permanganato de potássio seguido de cloro livre	111
Tabela 5.18: Porcentagem das espécies formadas em relação à concentração total de THM	112
Tabela 5.19: Parâmetros da reação de oxidação utilizada na segunda etapa da pesquisa.....	114
Tabela 5.20: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 1 a 4, para dosagem de CAP igual a 10 mg/L	116
Tabela 5.21: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 5 a 8, para dosagem de CAP igual a 20 mg/L	117

Tabela 5.22: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 9 a 12, para dosagem de CAP igual a 30 mg/L	118
Tabela 5.23: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 13 a 16, para dosagem de CAP igual a 50 mg/L	119
Tabela 5.24: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 17 a 20, para dosagem de CAP igual a 100 mg/L	120
Tabela 5.25: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 21 a 24, para dosagem de CAP igual a 150 mg/L	121
Tabela 5.26: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 25, sem a utilização de coagulante	122
Tabela 5.27: Valores médios de cor aparente e turbidez para cada dosagem de CAP	125
Tabela 5.28: Parâmetros adotados para os ensaios de remoção de THM	127
Tabela 5.29: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 26 e 27	129
Tabela 5.30: Valores de TTHM para as análises nas amostras iniciais dos ensaios 26 e 27 e para a amostra com 24 horas de tempo de contato reator 18 da etapa de oxidações	131
Tabela 5.31: Resultados para TTHM e remoção nos ensaios 26 e 27	132
Tabela 5.32: Especificação dos THM formados nos ensaios 26 e 27	136
Tabela 5.33: Porcentagem de cada espécie na composição dos TTHM detectados para os ensaios de tratamento	136
Tabela 5.34: Quantificação das análises espectrofotométricas e cromatográficas realizadas no trabalho de pesquisa	137
Tabela 5.35: Resultados das análises espectrofotométricas e cromatográficas para as amostras submetidas aos dois métodos nos reatores de 1 a 12 da primeira etapa	138
Tabela 5.36: Resultados das análises espectrofotométricas e cromatográficas para as amostras submetidas aos dois métodos nos reatores 13 a 15 da primeira etapa.	139
Tabela 5.37: Resultados das análises espectrofotométricas e cromatográficas para as amostras submetidas aos dois métodos nos ensaios 26 e 27 da segunda etapa.	140

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

CAG	Carvão Ativado Granular;
CAP	Carvão Ativado em Pó;
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COD	Carbono Orgânico Dissolvido;
COT	Carbono Orgânico Total;
DCE	Detector de Captura de Elétrons
DSA	Departamento de Saneamento e Ambiente;
EM	Espectrofotometria de Massas
EPA (USEPA)	United States Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos);
ETA	Estação de Tratamento de Água
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FEC	Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo;
G	Gradiente de Velocidade;
GM	Gás Chromatography (Cromatografia Gasosa)
HAA	Ácidos Haloacéticos;
HAN	Haloacetoneitrilas;
HK	Haloacetonas;
IB	Instituto de Biologia;
IMECC	Instituto de Matemática, Estatística e Ciências da Computação;
LABPRO	Laboratório de Protótipos Aplicados ao Tratamento de Água e Efluentes;

LABSAN	Laboratório de Saneamento;
MON	Matéria Orgânica Natural;
POA	Processos Oxidativos Avançados
SM	Standart Methods
SANASA	Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A;
SPD	Subprodutos da Desinfecção;
THM	Trihalometanos;
THMFP	Potencial de Formação de Trihalometanos
TTHM	Trihalometanos Totais;
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas;
USNCI	Instituto Nacional do Câncer dos Estados Unidos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1	SUBPRODUTOS DA DESINFECÇÃO	7
3.1.1	Precusores	7
3.1.2	Formação de subprodutos da desinfecção	14
3.1.3	Fatores que influenciam na formação de THM	17
3.1.3.1	Tempo de contato	17
3.1.3.2	pH.....	19
3.1.3.3	Temperatura.....	21
3.1.3.4	Dosagem e tipo do oxidante	23
3.1.3.5	Quantidade de matéria orgânica	24
3.1.3.6	Concentração do íon brometo	25
3.1.4	Controle da formação de SPD.....	26
3.1.5	Riscos à saúde	28
3.2	PROCESSOS OXIDATIVOS	30
3.2.1	Cloro livre.....	32
3.2.2	Permanganato de potássio.....	34
3.3	TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA	40
3.4	ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO EM PÓ	42
3.5	TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE THM	43
3.5.1	Detecção por cromatografia	44
3.5.2	Detecção por Espectrofotometria	46
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	49
4.1	METODOLOGIA	49
4.1.1	Considerações gerais.....	49
4.1.2	Água bruta	51
4.1.3	Métodos de análise dos THM.....	53
4.1.3.1	Método THM Plus para análise espectrofotométrica.....	54
4.1.4	Análise espectrofotométrica de soluções de clorofórmio	57

4.1.5	Preparação das soluções de reagentes utilizados na pesquisa	58
4.1.5.1	Permanganato de potássio	58
4.1.5.2	Cloro livre	59
4.1.5.3	Ácidos húmicos	60
4.1.5.4	Brometos	60
4.1.5.5	Sulfato de alumínio	61
4.1.5.6	Carvão ativado em pó	61
4.1.6	Primeira etapa – Ensaio de oxidação	62
4.1.6.1	Considerações gerais	62
4.1.6.2	Primeira fase - Oxidações com permanganato de potássio	63
4.1.6.3	Segunda fase - Oxidações com permanganato de potássio seguido de cloro livre	64
4.1.6.4	Coleta e preservação das amostras	66
4.1.7	Segunda etapa - Ensaio de remoção de THM	67
4.1.7.1	Considerações gerais	67
4.1.7.2	Primeira fase - Definição da dosagem de coagulante e do valor de pH	70
4.1.7.3	Segunda Fase - Remoção de trihalometanos	72
4.2	MATERIAL	73
4.2.1	Equipamentos	73
4.2.2	Reagentes e material de laboratório	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA E ESTUDOS INICIAIS	81
5.1.1	Escolha do poço fornecedor de água bruta	82
5.1.2	Monitoramento da qualidade da água bruta	83
5.1.3	Deteção espectrofotométrica de THM em soluções de clorofórmio	86
5.1.4	Determinação da concentração do cloro livre no frasco	88
5.2	PRIMEIRA ETAPA – ENSAIOS DE OXIDAÇÃO	91
5.2.1	Considerações Gerais	91
5.2.2	Primeira fase - Oxidações com permanganato de potássio	92
5.2.2.1	Varição da Dosagem de Oxidante	93
5.2.2.2	Varição da Concentração de Ácidos Húmicos	96
5.2.2.3	Varição da Concentração de Íons Brometo	98
5.2.3	Segunda fase - Oxidações com permanganato de potássio seguido de cloro livre	100
5.2.4	Especiação dos compostos formados	109
5.3	SEGUNDA ETAPA – ENSAIOS DE REMOÇÃO DE THM	114
5.3.1	Considerações gerais	114
5.3.2	Definição da dosagem de coagulante e do valor de pH	115
5.3.3	Segunda fase - Ensaio de remoção de THM	127
5.3.3.1	Considerações gerais	127
5.3.3.2	Resultados em trihalometanos totais	131
5.3.3.3	Especiação dos compostos formados	135
5.4	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE THM	137
6	CONCLUSÕES	143
7	RECOMENDAÇÕES	147
	ANEXOS	149
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	183

1 INTRODUÇÃO

O uso da água para consumo humano é considerado o seu fim mais nobre e prioritário, uma vez que o homem depende de uma oferta adequada desta para a sua sobrevivência e manutenção da qualidade de vida. Para tanto, é fundamental que a água tratada apresente condições físicas, químicas e biológicas adequadas ao seu uso (BRAGA et al., 2002). Segundo BATES (2000), historicamente, as comunidades se desenvolveram junto aos rios, que provinham uma fonte de água e era uma conveniente via para disposição de seus resíduos. Com o aumento da população mundial, os mananciais usados para o abastecimento passaram a receber uma grande carga de substâncias poluidoras provenientes de atividades domésticas, industriais e agrícolas.

Com a degradação qualitativa das águas dos mananciais, tornou-se cada vez mais necessário o incremento de diferentes produtos químicos no tratamento de água, visando a desinfecção e a oxidação de substâncias potencialmente prejudiciais à saúde humana. Houve o desenvolvimento de um procedimento que se costumou chamar de pré-desinfecção, um procedimento que poderia ser descrito como uma oxidação inicial da água bruta, uma vez que, em muitos casos, o mesmo visa não só eliminar microorganismos como principalmente oxidar substâncias indesejáveis presentes na água. Nesta etapa, o produto mais utilizado vem sendo o cloro na forma gasosa, denominando o processo de pré-cloração (USEPA, 1999).

O processo de pré-cloração tem apresentado aspectos negativos, pois, em determinadas condições, pode gerar subprodutos indesejáveis, provenientes das reações entre a matéria orgânica presente na água bruta e o cloro. Os principais subprodutos da desinfecção (SPD) são os trihalometanos (THM), os ácidos haloacéticos (HAA) e as haloacetonitrilas (HAN), entre outros (SÈRODES et al., 2003; YOON et al., 2003; KIM et al., 2002).

Os primeiros estudos sobre a formação de SPD foram apresentados por ROOK, em 1974 na Holanda e por BELLAR et al. nos Estados Unidos, no mesmo ano (GARCIA-VILLANOVA et al., 1997). Estes pesquisadores mostraram que os THM são contaminantes que não aparecem em concentrações significativas na água bruta, mas são formados durante o processo de tratamento de água pela reação de compostos orgânicos, em especial as substâncias húmicas, com derivados clorados.

Em 1976, o Instituto Nacional do Câncer dos Estados Unidos (USNCI) publicou um relatório relacionando a presença de clorofórmio e o aparecimento de câncer em animais de laboratório (GARCIA-VILLANOVA et al., 1997). Desde então, estudos epidemiológicos têm sido realizados para levantar os riscos à população, correlacionando o consumo de água clorada com a incidência de câncer da bexiga, colo e reto (BORGES, 2003).

A Portaria nº 518/GM de 25 de março de 2004, norma nacional vigente para os padrões de potabilidade da água tratada, limita a concentração de 100 µg/L para trihalometanos totais (TTHM) como valor máximo permissível em águas tratadas para abastecimento público (BRASIL, 2004). Nos Estados Unidos, este valor máximo para TTHM é de 80 µg/L (USEPA, 2004).

De acordo com USEPA (1999), estudos indicaram que o pré-tratamento com permanganato de potássio pode reduzir a formação de clorofórmio. Porém a redução é pequena nas dosagens usualmente utilizadas em estações de tratamento. Segundo a mesma fonte, a literatura existente pouco relata sobre os subprodutos formados pelo

emprego do permanganato de potássio em substituição ao cloro livre quando usado na fase de pré-oxidação da água bruta.

Deste modo, torna-se extremamente importante o desenvolvimento de estudos visando identificar e quantificar os subprodutos deste processo de oxidação, buscando alternativas para garantir a qualidade da água distribuída, tanto nas suas características químicas como biológicas, visando a preservação e manutenção da saúde da população. O uso permanganato de potássio, em substituição ao cloro livre na etapa de pré-oxidação, aparece como uma opção na redução da formação de THM. Deve-se, entretanto, estudar este oxidante de uma forma mais ampla, pois, dependendo dos parâmetros envolvidos e dos compostos químicos presentes na água a ser tratada, ele pode também gerar subprodutos indesejáveis á saúde humana.

2 OBJETIVOS

Identificar e quantificar a formação de trihalometanos, gerados a partir da oxidação de soluções contendo ácidos húmicos como precursores de THM e íons brometos, em diversas concentrações, com permanganato de potássio, bem como avaliar a redução na formação dos sub-produtos quando da utilização do permanganato de potássio em associação com o cloro livre, em relação à utilização apenas do cloro livre. Avaliar a eficiência de remoção dos compostos gerados, utilizando-se para isso a adsorção em carvão ativado em pó seguida de processos físico-químicos de coagulação-floculação-filtração, usualmente empregados no tratamento de águas de abastecimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SUBPRODUTOS DA DESINFECÇÃO

3.1.1 Precursores

A formação de trihalometanos durante o processo de cloração ocorre em razão das reações do cloro livre com as substâncias húmicas, naturalmente presentes nas águas dos mananciais (ROOK, 1974 apud BABCOCK e SINGER, 1979). Estas substâncias são originadas da decomposição de vegetais e representam uma parte significativa do carbono orgânico total (COT) das águas naturais. Segundo THURMAN (1985), a matéria orgânica natural (MON) pode ser encontrada em fontes de água subterrânea e superficial e são constituídas de substâncias húmicas, aminoácidos, açúcares, ácidos alifáticos, ácidos aromáticos e um grande número de outras moléculas orgânicas.

O conteúdo orgânico das águas naturais é derivado, em parte, da atividade biológica nos ambientes aquáticos e terrestres e, em parte, pelos resíduos das

atividades humanas. Sua presença nos mananciais é preocupante, pois pode causar cor, contribuir para o gosto e odor, alterar a qualidade biológica e agravar os problemas de corrosão nos sistemas de distribuição, interferir em processos de desmineralização, oxidação e remoção de ferro e manganês, gerar subprodutos de desinfecção e, em alguns casos ser tóxica ou cancerígena (AWWA 1979).

Os compostos orgânicos presentes na composição do solo podem ser classificados como substâncias húmicas e não húmicas. Esta última é formada por carboidratos, proteínas, peptídeos, aminoácidos e gorduras e é facilmente degradada por microrganismos presentes no solo (SPARKS, 1995). As substâncias húmicas ocorrem em praticamente todos os tipos de solos, de águas e de sedimentos da hidrosfera. São provenientes da decomposição de plantas e tecidos animais (GAFFNEY et al., 1996).

A humificação é parte integrante do ciclo do carbono, na qual formas orgânicas desses elementos se acumulam e estabilizam no solo. Segundo CARDOSO et al. (1992), existem pelo menos quatro destacados processos de formação destas substâncias durante a decomposição de resíduos orgânicos presentes no solo. O principal deles é a oxidação de substratos hidrolisados monoméricos para conduzir a polímeros macromoleculares de cor mais ou menos escura. Os primeiros estudos consideravam que o húmus era formado diretamente de produtos de degradação microbiana da lignina. No primeiro processo, os açúcares e os aminoácidos, formados durante o metabolismo microbiano, continuam as reações de polimerização não enzimática para formar polímeros nitrogenados semelhantes ao húmus. No segundo processo, os aldeídos e ácidos fenólicos, liberados pela lignina durante as reações com microrganismos, convergem enzimaticamente para quinonas, as quais se polimerizam na presença de compostos nitrogenados para formar macromoléculas parecidas com o húmus. O terceiro processo é similar ao segundo, exceto que os polifenóis são sintetizados por microrganismos a partir de fontes de carbono não lignínicas, como a celulose. Os polifenóis são então enzimaticamente oxidados a quinonas e convertidos em substâncias húmicas. As modificações na estrutura química da lignina, que perde grupos metoxil (CH_3O) com geração de hidroxifenóis e as reações de oxidação de

cadeias alifáticas para formar grupos COOH são indicadas no quarto processo. Os processos podem acontecer simultaneamente no solo, porém, não com a mesma extensão ou na mesma ordem de importância, de acordo com os autores.

As substâncias húmicas representam uma fração do carbono orgânico total das águas naturais e, geralmente, são responsáveis pela maior parcela de sua cor (MACEDO, 2001). Em 1919, ODEN classificou as substâncias húmicas de acordo com sua solubilidade em diferentes condições, conforme é mostrado na tabela 3.1 (AWWA, 1979).

Tabela 3.1: Classificação das substâncias húmicas segundo sua solubilidade

Fração	Hidróxido de sódio	Álcool	Ácidos minerais
Ácido Húmico	Solúvel	Insolúvel	Insolúvel
Ácido Fúlvico	Solúvel	Insolúvel	Solúvel
Ácido Himatomelânico	Solúvel	Solúvel	Insolúvel
Humina	Insolúvel	Insolúvel	Insolúvel

Fonte: adaptado de ODEN, 1919 apud AWWA, 1979.

As três frações ácidas são estruturalmente similares, mas diferem na massa molecular, e nos grupos funcionais, sendo que o ácido fúlvico apresenta a massa molecular mais baixa (AWWA, 1979). Segundo THURMAN (1985), os ácidos húmicos precipitam em meio ácido e os ácidos fúlvicos permanecem em solução. GAFFNEY et al. (1996) comentam que os ácidos fúlvicos são aqueles compostos orgânicos que são solúveis em água para qualquer valor de pH.

Na tabela 3.2 são mostradas as principais características das substâncias húmicas solúveis em álcalis (hidróxido de sódio), segundo MORAES et al. (1979) apud MACEDO (2001).

Tabela 3.2: Características das substâncias húmicas

Característica	Ácido Fúlvico	Ácido Himatomelânico	Ácido Húmico
Ocorrência e Distribuição	mais predominante	intermediário	predominante
Massa Molecular (daltons)	baixa (200 à 1000)	intermediária	alta (até 2.000.000)
Massa Equivalente	baixa	intermediária	alta
Densidade de Carga	alta	intermediário	baixa
Espalhamento da Luz	baixo	intermediário	alto

Fonte: MORAES et al., 1979 apud MACEDO, 2001.

O tamanho, a massa molecular, a composição elementar, a estrutura química e o número e posição dos grupos funcionais dependem da origem e da idade do material (GAFFNEY et al., 1996). Os principais grupos funcionais das substâncias húmicas são as carboxilas, fenóis, álcoois, cetonas, quinonas e metoxilas.

As substâncias húmicas são estruturas poliméricas que consistem de compostos aromáticos e alifáticos interligados de tal maneira que estes grupos perdem a sua identidade dentro da estrutura complexa. Os ácidos húmicos apresentam grupos fenólicos OH, estruturas de quinonas, unidades de oxigênio como ponte, grupos COOH dispostos de forma variada no anel aromático e o composto nitrogênio como componente estrutural. Ocorre também a presença de carboidratos e proteínas. Os ácidos fúlvicos são constituídos basicamente por ácidos fenólicos e benzocarboxílicos, ligados entre si por pontes de hidrogênio, com abundância de grupos COOH formando uma estrutura polimérica de estabilidade considerável (CARDOSO et al., 1992).

Na tabela 3.3 é mostrada a porcentagem dos principais elementos químicos que constituem os ácidos húmicos e fúlvicos. Os ácidos fúlvicos contêm mais oxigênio e menos carbono e nitrogênio, e têm uma grande quantidade de grupos funcionais com oxigênio por unidade de massa (AWWA, 1979).

Tabela 3.3: Principais elementos químicos que constituem os ácidos húmicos e fúlvicos

Elemento	Ácidos Húmicos (% em massa)	Ácidos Fúlvicos (% em massa)
Carbono	50 - 60	40 - 50
Hidrogênio	4 - 6	4 - 6
Oxigênio	30 - 35	44 - 50
Nitrogênio	2 - 6	< 1 - 3
Enxofre	0 - 2	0 - 2

Fonte: ODEN, 1919 apud AWWA, 1979.

As substâncias húmicas não possuem estruturas bem definidas (MACEDO, 2001). Uma proposta desta estrutura é apresentada na figura 3.1.

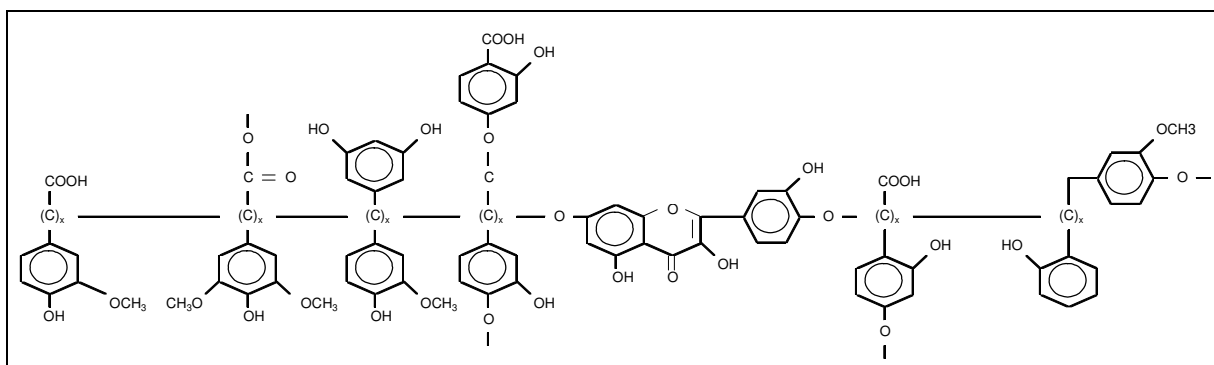


Figura 3.1: Proposta de estrutura para substâncias húmicas

Fonte: Adaptado de CHRISTMAN e GHASSEMI, 1966.

THURMAN (1985) indica que do carbono orgânico dissolvido (COD) em águas naturais é composto de 50 % de ácidos fúlvicos e húmicos e 30 % de ácidos hidrofílicos, enquanto que os carboidratos, os ácidos carboxílicos e os aminoácidos representam, respectivamente, 10, 7 e 3 %. Segundo DE SALVO (2002), as substâncias húmicas representam cerca de 50 % do COD presente em águas superficiais, porém essa porcentagem pode chegar a 80 % em águas muito coloridas. BABCOCK e SINGER (1979), afirmam que os ácidos húmicos e fúlvicos, juntos, constituem mais de 80 % de toda a matéria orgânica natural dissolvida no ambiente aquático.

BLACK e CHRISTMAN (1963) isolaram a MON de águas superficiais coloridas, de diversas fontes, encontrando concentrações na faixa de 15 a 50 mg/L. Estas eram constituídas principalmente de ácidos fúlvicos (87 %), ácidos himatomelânicos (11 %) e ácidos húmicos (2 %). Os resultados obtidos por estes pesquisadores demonstraram uma uniformidade no percentual de cada classe de composto, independente da fonte de onde foi obtido.

Segundo GARCIA-VILLANOVA et al. (1997) o ácido fúlvico representa mais de 90 % das substâncias húmicas em muitos mananciais. MIDWOOD e FELBECK (1968) também demonstraram que a matéria orgânica presente em uma água colorida oriunda da drenagem de um solo de turfa húmica era formada por mais de 80 % de ácidos fúlvicos. Segundo esses autores, a concentração de ácidos húmicos nas águas naturais é, geralmente, muito baixa, oscilando entre de 0,5 a 2 % das substâncias húmicas.

Apesar da presença do ácido fúlvico ser mais abundante em águas naturais, a contribuição do ácido húmico na formação de trihalometanos é maior. Em estudo realizado por BABCOCK e SINGER (1979), os ácidos húmicos reagiram mais ativamente com derivados clorados, formando 79 % mais clorofórmio (principal THM), por unidade de carbono total, do que os ácidos fúlvicos. Na figura 3.2 é mostrado o gráfico com as curvas obtidas pelos pesquisadores, comparando a formação de clorofórmio através da oxidação dos dois precursores com uma dosagem de 10 mg/L de cloro, em função do tempo de contato. OLIVER (1978) apud PETER (1980) não encontrou diferenças na formação de THM devido a cloração dos dois precursores, porém, ele não deixa claro se os ácidos eram originados da mesma fonte, um fator importante para a comparação relativa das taxas de formação.

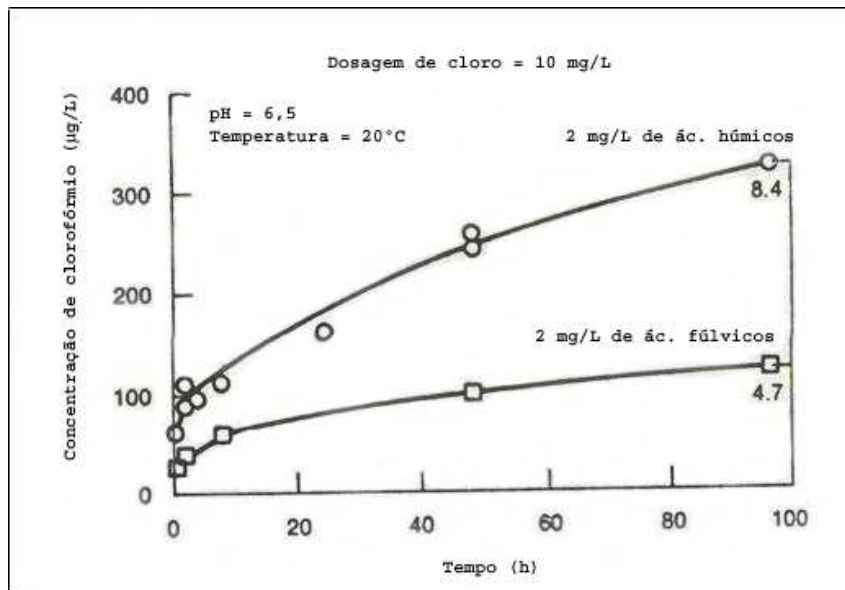


Figura 3.2: Comparação da formação de THM através da oxidação de ácidos húmicos e fúlvicos com cloro livre, em função do tempo

Fonte: Adaptado de BABCOCK e SINGER, 1979.

PETER (1980) aponta, ainda, os compostos acetona, hidroquinona, catecol, resorcinol e pirogalol como precursores de subprodutos da desinfecção (SPD). Estes, porém, raramente são encontrados em concentrações significativas nas águas naturais.

A presença de algas e seus produtos extracelulares podem agir também como precursores de THM, especialmente em corpos de água com alto grau de eutrofização, podendo causar níveis elevados desses organoclorados (BORGES, 2003). KARIMI e SINGER (1991) observaram a correlação entre a aplicação de cloro para controle de algas em um reservatório eutrofizado com a conseqüente formação de THM. Muitos fatores, como a diversidade de espécies das mesmas durante o ano, ou mesmo a diminuição delas em determinados períodos influenciaram na formação dos subprodutos.

Em sua pesquisa, BORGES (2003) sugere a importância de se controlar a formação de algas nos mananciais utilizados para abastecimento público, com o intuito de se reduzir quantidade de precursores de THM.

3.1.2 Formação de subprodutos da desinfecção

Os subprodutos halogenados são formados quando a matéria orgânica natural reage com halogênios, tais como o cloro e o bromo. Pode ocorrer também a formação de subprodutos não halogenados quando poderosos oxidantes reagem com compostos orgânicos da água (USEPA, 1999).

YOON et al. (2003) apontam como principais subprodutos da desinfecção os trihalometanos (THM), os ácidos haloacéticos (HAA), as haloacetoneitrilas (HAN) e as haloacetonas (HK). A tabela 3.4 relaciona os principais subprodutos da desinfecção (SPD), que podem ser formados durante e após o processo de tratamento de água (USEPA, 1999).

Tabela 3.4: Lista dos subprodutos da desinfecção e residuais de desinfetantes

Residuais de Desinfetantes:	Subprodutos Orgânicos Halogenados
Cloro Livre Ácido Hipocloroso Íon Hipoclorito Cloroaminas Monocloroamina Dióxido de Cloro	Trihalometanos Clorofórmio Bromodichlorometano Dibromodichlorometano Bromofórmio Ácidos Haloacéticos Ácido Monocloroacético Ácido Dichloroacético Ácido Trichloroacético Ácido Monobromoacético Ácido Dibromoacético Haloacetoneitrilas Dichloroacetoneitrila Bromodichloroacetoneitrila Dibromoacetoneitrila Trichloroacetoneitrila Haloacetonas 1,1-Dichloropropanona 1,1,1-Trichloropropanona Clorofenóis 2-Clorofenol 2,4-Dichlorofenol 2,4,6-Trichlorofenol Cloropicrina Cloridrato Cloreto de Cianogênio N-Organocloroaminas 3-Cloro-4(dichlorometil)-5-Hidoxi-2(5H)-Furanona
Subprodutos Inorgânicos:	
Íon Clorato Íon Clorito Íon Bromato Íon Iodato Peróxido de Hidrogênio Amônia	
Subprodutos Orgânicos:	
Aldeídos Formaldeído Acetaldeído Glioxol Hexanol Heptanol Ácidos Carboxílicos Ácido Hexanóico Ácido Heptanóico Ácido Oxálico Carbono Orgânico Assimilável	

Fonte: USEPA, 1999.

Segundo estudos relatados por ROOK (1974) e BELLAR et al. (1974) os principais trihalometanos formados pela desinfecção com cloro são o triclorometano (clorofórmio), o bromodiclorometano, o dibromoclorometano e o tribromometano (bromofórmio). A soma destes quatro compostos é chamada de trihalometanos totais (TTHM). A ocorrência de dibromoclorometano e bromofórmio é função da presença de brometos inorgânicos (FAWELL, 2000). A concentração relativa destes compostos depende das condições de cloração e da concentração de brometos na água bruta (PETER, 1980).

Na figura 3.3 são mostradas as estruturas moleculares dos principais THM que podem ser encontrados em águas de abastecimento.

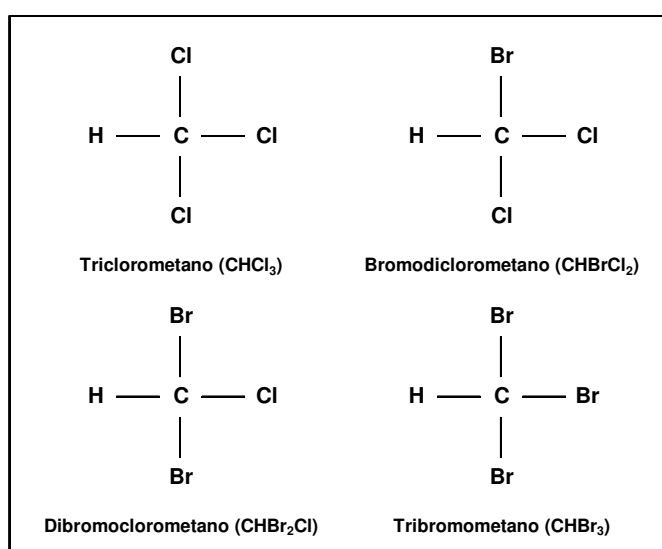


Figura 3.3: Estrutura molecular dos trihalometanos mais freqüentes, que podem ocorrer em águas de abastecimento público

Fonte: Adaptado de KRASNER (1989).

Em estudo realizado por KIM et al. (2002), sem a presença de íons brometos, foram detectadas as porcentagens de 68,5, 24,4, 7,0 e 0,1 % respectivamente para clorofórmio, bromodiclorometano, dibromoclorometano e bromofórmio. Os THM representaram 52,6 % dos subprodutos halogenados, seguidos de 19,6 % de HAA, 16,6 % de HAN e 11,2 % de HK.

Quando ocorre a presença do íon brometo na água bruta, este é oxidado pelo cloro livre, formando o ácido hipobromoso, responsável pela formação dos THM bromados (SINGER, 1999). O iodeto se comporta de maneira similar aos brometos, formando outras espécies de THM. Porém, a concentração deste elemento em águas naturais é muito baixa para ser significativa na formação dos subprodutos (PETER 1980).

AGUILERA (1996) cita outros subprodutos halogenados que podem ser formados pela desinfecção com o uso do cloro, na presença de brometos e/ou iodetos, tais como diiodoclorometano, dibromiodometano, bromocloriodometano, bromodiiodometano, dicloriodometano e triiodometano (iodofórmio). Estes trihalometanos menos freqüentes têm suas fórmulas moleculares apresentadas na figura 3.4.

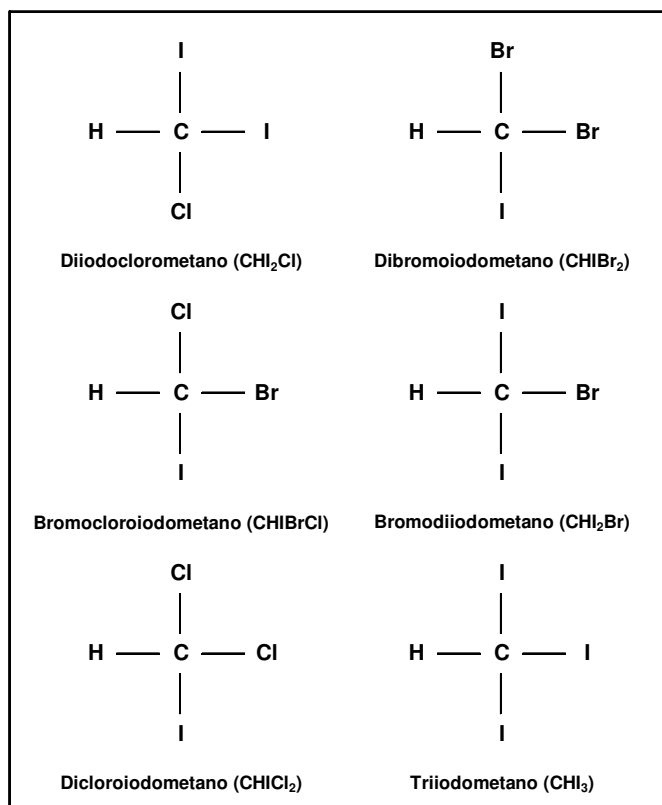


Figura 3.4: Estrutura molecular dos trihalometanos menos freqüentes, que podem ocorrer em águas de abastecimento público

Fonte: Adaptado de MACEDO, 2001.

O cloro não é capaz de oxidar o fluoreto para formar ácido hipofluoroso e, como consequência, não ocorre a formação de trihalometanos com o flúor (KLEOPPER, 1976 apud PETER, 1980).

3.1.3 Fatores que influenciam na formação de THM

A presença, frequência e distribuição na massa de água dos subprodutos da desinfecção halogenados formados depende de vários fatores, tais como o tempo de contato, o valor de pH e temperatura, o tipo e dosagem de oxidante, a quantidade e características de matéria orgânica natural e a concentração de íons brometo (SINGER, 1999; USEPA, 1999). Os sub-itens a seguir descrevem a forma em que cada um desses fatores influencia na formação dos SPD.

3.1.3.1 Tempo de contato

Em condições naturais, a formação dos THM não é instantânea, podendo ocorrer em alguns minutos ou até em dias (BORGES, 2003). De maneira geral, quanto maior for o tempo de contato entre o oxidante e os precursores, maior será a formação de trihalometanos (ISAAC, 1993).

A importância do tempo de contato na formação de trihalometanos foi reconhecida já nos primeiros estudos realizados sobre o tema, por BELLAR et al. (1974), STEVENS et al. (1976) e ROOK (1977).

RATHBUN (1997) pesquisou a influência do tempo de contato na formação de THM, utilizando água dos rios Mississipi, Missouri e Ohio, com amostras coletadas em

diferentes localidades. Os estudos foram realizados em temperatura e valor de pH constantes de 25 °C e 8,2, respectivamente, com uma dosagem de 30 mg/L de cloro. Os tempos de contato adotados foram de 6, 12, 24, 48, 72, 120 e 168 horas. O autor verificou que a concentração de trihalometanos cresceu rapidamente no período inicial de reação, com a taxa de formação decaindo conforme o incremento do tempo de contato. Foi obtido um bom ajuste da formação dos subprodutos pelo tempo de contato em curva logarítmica.

KIM et al. (2002) verificaram incrementos de duas a até quatro vezes na formação de trihalometanos, através da cloração de diversas águas naturais de escoamento superficial, com o aumento do tempo de contato de 6 para 48 horas. Os maiores incrementos ocorreram para valores de pH mais elevados.

Na figura 3.5 são mostrados, de forma gráfica, os resultados para a formação de THM obtidos por MOHAMED e ALI (1995), para a cloração de amostras de água do rio Nilo. A dosagem de cloro utilizada foi de 5,0 mg/L, sendo mantidos constantes os valores de pH (8,0) e a temperatura (20 °C). Foi observado que a concentração de TTHM aumenta progressivamente com o tempo de contato, com a maior formação nas primeiras horas.

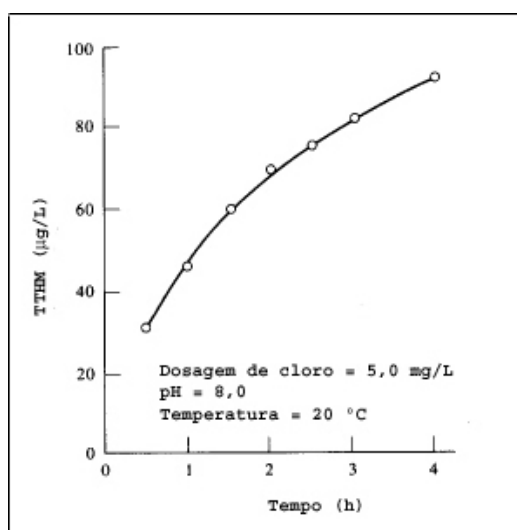


Figura 3.5: Efeito da variação do tempo de contato na formação de TTHM

Fonte: Adaptado de MOHAMED e ALI, 1995.

A influência do tempo de contato é de vital importância, pois demonstra a necessidade de se monitorar a formação dos trihalometanos não apenas na saída da ETA, como também ao longo do sistema de distribuição. Os padrões de potabilidade devem ser atendidos nas pontas de rede, principalmente naquelas que são extremas.

3.1.3.2 pH

ROOK (1974) apud DE SALVO (2002) demonstrou que a formação de THM é maior para valores de pH mais altos, especialmente na faixa de 8,0 a 10,0. O aumento da concentração para valores maiores de pH ocorre, pois a reação halofórmica é catalisada por uma predominância no ambiente de caráter básico (SYMONS et al., 1981 apud MACEDO, 2001; PETER, 1980).

Em estudo realizado por BORGES (2003), utilizando ácidos húmicos comerciais, observou-se maior formação de THM para valores maiores de pH. O autor variou os valores de pH, temperatura e dosagem de oxidante, mantendo a concentração de ácidos húmicos constante em 5,0 mg/L e o tempo de contato de sete dias. Os resultados são mostrados na tabela 3.5. Os dados mostram que houve um incremento médio de 40 % na formação de THM, quando se aumentou o valor de pH de 6,0 para 9,0, variando de 15 a 76 %, do valor mínimo ao máximo.

Tabela 3.5: Influência do pH, temperatura e dosagem de cloro na formação de THM

Dosagem de Cloro (mg/L)	Temperatura (°C)	Concentração de THM (µg/L)	
		pH = 6,0	pH = 9,0
5	20	26	45
	25	72	86
10	20	46	63
	25	117	135
15	20	50	64
	25	90	148

Fonte: Adaptado de BORGES, 2003.

KIM et al. (2002), estudando a cloração da água proveniente de rios coreanos, observaram a mesma correlação entre o pH e formação de THM. Na pesquisa destes autores, o valor de pH foi variado entre 5,5 e 7,0, verificando-se formações de THM entre 55 e 93 % maiores para os valores mais elevados de pH, em relação ao valor de 5,5.

Em sua pesquisa utilizando água do rio Nilo, MOHAMED e ALI (1995) também demonstraram a influência do pH na reação halofórmica. Foram avaliados quatro valores de pH entre 6 e 9, em três tempos de contato, mantendo-se a dosagem de cloro constante em 5,0 mg/L e a temperatura em 20 °C. Os resultados obtidos por estes pesquisadores são mostrados no gráfico da figura 3.6.

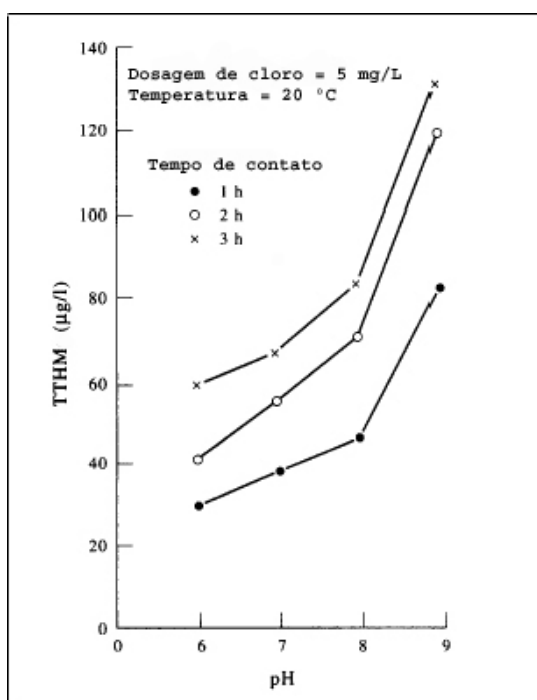


Figura 3.6: Efeito da variação do valor de pH na formação de TTHM

Fonte: Adaptado de MOHAMED e ALI, 1995.

Os resultados obtidos por diferentes pesquisadores permitem concluir que pode haver uma redução superior a 50 % na formação de THM, apenas se alterando o valor do pH. Estudos realizados em ETA que praticavam abrandamento por precipitação em valores de pH entre 9,5 e 10,0, observou-se maior formação dos subprodutos, em

relação à ETA convencionais que tratavam águas superficiais em valores de pH entre 6,0 e 8,0 (SINGER e CHANG, 1989).

Para controlar a produção de THM, pode ser sugerido que a cloração ocorra em valores baixos de pH, aumentando-se depois estes valores com amônia. Deste modo, seriam formadas as cloroaminas, que têm baixo potencial de formação de THM (KATS, 1980 apud MOHAMED e ALI, 1995). MORRIS e BAUM (1978) apud Peter (1980) relataram, porém, que a formação de THM continua com o aumento do pH, mesmo na ausência de cloro. Isso se deve à formação de um organoclorado intermediário que origina clorofórmio com o aumento do pH (ROOK, 1979 apud MOHAMED e ALI, 1995).

3.1.3.3 Temperatura

Assim como ocorre com o tempo de contato e o pH, o aumento da temperatura acarreta uma maior formação de trihalometanos. Este fato é devido ao aumento da taxa de reação dos precursores orgânicos com o oxidante (DE SALVO, 2002).

Na figura 3.7 são mostrados os resultados obtidos por MOHAMED e ALI (1995) para oxidação de precursores com 5,0 mg/L de cloro, em três tempos de contato, variando o valor de temperatura. Pode ser percebido o incremento na formação de TTHM com o aumento da temperatura e do tempo de contato.

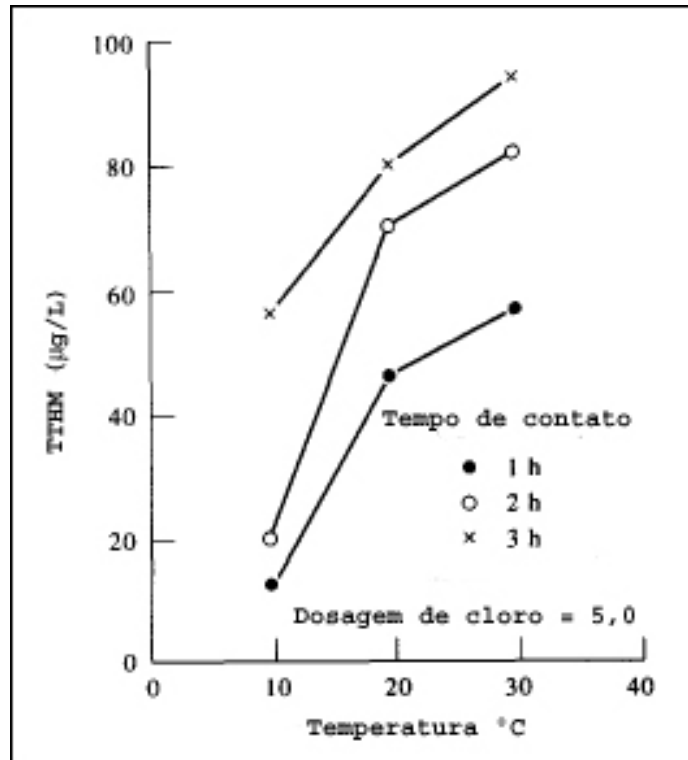


Figura 3.7: Efeito da variação de temperatura na formação de TTHM

Fonte: Adaptado de MOHAMED e ALI, 1995.

Em pesquisa realizada por BORGES (2003), conforme mostrado na tabela 3.5, pode se observar a influência da temperatura na formação de THM. Neste estudo, um aumento de 20 para 25 °C causou um aumento substancial na formação do subproduto, variando entre 80 e 177 % dependendo do pH e da dosagem do oxidante.

A formação de THM varia sazonalmente, aumentando no verão devido às temperaturas mais elevadas. Outros fatores que contribuem para este fato são a variação na concentração de precursores, que aumenta nesta estação, e a maior demanda de cloro necessária para se manter o residual na rede (USEPA, 1999).

3.1.3.4 *Dosagem e tipo do oxidante*

MOHAMED e ALI (1995) concluem em seus estudos que, quanto maior a dosagem de cloro aplicada à água, maior a concentração de trihalometanos. Todavia, a formação de THM não é diretamente proporcional às dosagens de cloro utilizadas, pois a partir de um certo valor não há concentração suficiente de precursores para que a reação continue com a mesma intensidade. A mesma relação também é descrita em estudos realizados por KIM et al. (2002) e por BORGES (2003).

O cloro residual combinado, constituído pela monocloroamina, tem menor poder de ataque às substâncias húmicas do que o cloro residual livre, levando a uma menor formação de THM (SYMONS et al., 1981 apud MACEDO, 2001).

Segundo TRUSSELL e UMPHRES (1978), a taxa de formação dos THM manifesta-se em três regiões diferentes da dosagem de cloro, onde mantém um padrão definido. Os estudos foram realizados com água sintética preparada pela adição de 10 mg/L de ácidos húmicos e 1 mg/L de amônia e com valor de pH igual a 7,0. Diferentes quantidades de cloro livre foram adicionadas, mantendo-se um tempo de contato de 2 horas, quando foram medidos o cloro residual e os THM formados. Na primeira região encontrada pelo autor, a formação dos subprodutos foi ineficiente, devido à oxidação da amônia. Em seguida, havia uma região onde ocorria um rápido desenvolvimento de THM, de cerca de 6,7 $\mu\text{g THM/mg Cl}_2$. Finalmente, na terceira região, houve o desenvolvimento de cloro residual, mas a taxa de formação dos THM diminuiu para somente 0,5 $\mu\text{g THM/mg Cl}_2$. Na figura 3.8 são mostrados os gráficos dos resultados obtidos no citado trabalho, com as três regiões numeradas.

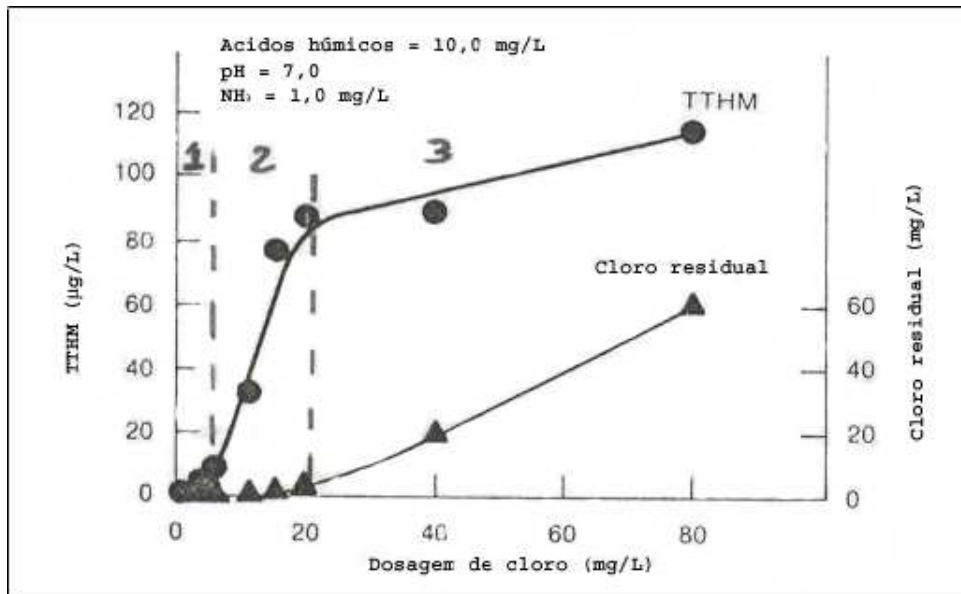


Figura 3.8: Efeito da dosagem de cloro na formação de TTHM

Fonte: Adaptado de TRUSSELL e UMPHRES (1978).

3.1.3.5 Quantidade de matéria orgânica

Uma maior concentração de matéria orgânica pode levar a uma maior concentração de ácidos húmicos, aumentando a formação de trihalometanos. STEVENS et al. (1976) demonstram que há uma dependência de primeira ordem entre a concentração inicial de ácidos húmicos e a formação de THM, isto é, para qualquer tempo de contato, a relação das concentrações de THM produzidos é igual à existente entre as concentrações iniciais de ácidos húmicos.

STUART et al. (2001), estudando águas de mananciais subterrâneos do México, Jordânia e Tailândia concluíram que existe uma relação clara entre o carbono orgânico dissolvido (COD) e o potencial de formação de trihalometanos (THMFP), quando se utiliza a cloração como forma de desinfecção. SINGER (1999) concluiu que a formação de THM é mais elevada quando se aumenta a concentração da matéria orgânica natural.

3.1.3.6 Concentração do íon brometo

A relação entre o íon brometo e o cloro afeta a formação de trihalometanos, com a substituição do cloro pelo bromo (DE SALVO, 2002). Nas reações de substituição com os compostos orgânicos, o bromo desloca o cloro, mesmo que inicialmente o segundo esteja em concentrações maiores (ISAAC, 1993). Este fato é confirmado pelo estudo de BORGES (2003). Conforme se aumentou a concentração do íon brometo, mantendo-se a dosagem de cloro, houve maior formação dos THM bromados e uma redução na quantidade de clorofórmio. Para valores elevados do íon brometo, na faixa de 1,0 mg/L, a concentração de clorofórmio foi praticamente nula. O estudo foi realizado para quatro diferentes concentrações de ácidos húmicos e para 5,0 mg/L de cloro em dosagem fixa. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 3.6.

Tabela 3.6: Influência da concentração do íon brometo na formação de THM

Ácidos Húmicos (mg/L)	Brometos (mg/L)	CHCl ₃ e CHBrCl ₂ (µg/L)	CHBr ₂ Cl (µg/L)	CHBr ₃ (µg/L)	Trihalometanos Totais (µg/L)
0,5	0,000	16	< 0,5	< 0,5	16
	0,125	< 0,5	11	31	42
	0,250	< 0,5	10	127	137
	0,500	< 0,5	< 0,5	108	109
	1,000	< 0,5	1	116	117
1,0	0,000	23	< 0,5	< 0,5	23
	0,125	5	26	55	86
	0,250	1	2	139	142
	0,500	< 0,5	4	151	156
	1,000	< 0,5	3	163	166
2,5	0,000	46	< 0,5	< 0,5	46
	0,125	6	44	114	164
	0,250	2	26	351	379
	0,500	1	9	300	310
	1,000	< 0,5	7	333	340
5,0	0,000	77	< 0,5	< 0,5	77
	0,250	2	37	505	545
	0,500	2	18	538	558
	1,000	< 0,5	23	525	548

Fonte: Adaptado de BORGES, 2003.

Nos dados da tabela 3.6, pode ser observado também o aumento da concentração de THM em função do incremento da concentração de ácidos húmicos. Para todas as concentrações de ácidos húmicos observou-se o mesmo comportamento em relação às espécies bromadas de THM.

3.1.4 Controle da formação de SPD

O controle da formação de trihalometanos em águas de abastecimento pode ser realizado através da seleção e controle do manancial, remoção dos precursores, otimização do processo de tratamento através da mudança do ponto de cloração e limitação do tempo de contato, seleção de desinfetantes alternativos e, por fim, remoção dos trihalometanos formados (DE SALVO, 2002). Na figura 3.9 são ilustradas as estratégias para a redução da formação de subprodutos da desinfecção.

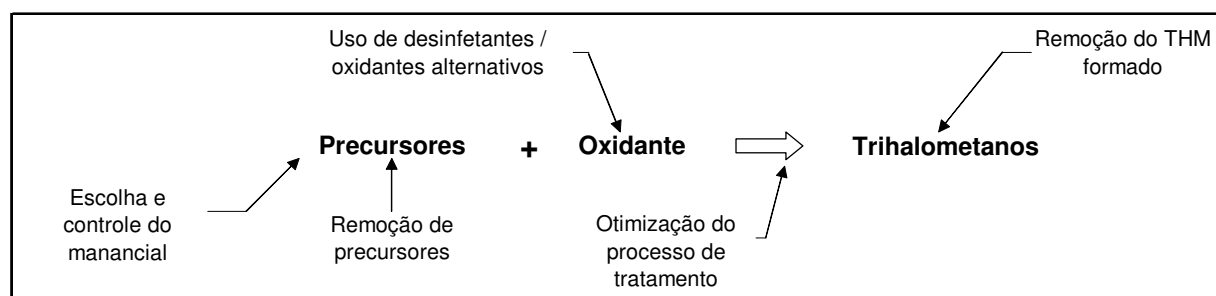


Figura 3.9: Formação e técnicas de controle de subprodutos da desinfecção

Fonte: Adaptado de HARMS, 1999 apud DE SALVO, 2002.

O primeiro fator a ser considerado para a redução na formação de THM é a escolha do manancial. A presença de algas na água bruta a ser tratada aumenta a quantidade de precursores (BORGES, 2003).

DE SALVO (2002) cita, como medidas para a minimização da concentração de precursores, o controle do crescimento de algas e seus nutrientes, mudança na

profundidade da coleta de água bruta, prevenção do avanço de águas salinas e seleção de mananciais alternativos contendo menores concentrações de substâncias húmicas e brometos.

Os principais métodos para se remover ou reduzir a quantidade de precursores de THM são por coagulação / sedimentação, coagulação otimizada, adsorção em carvão ativado e flotação por ar dissolvido (DE SALVO, 2002).

O uso de desinfetantes alternativos, tais como ozônio, dióxido de cloro, permanganato de potássio, cloroaminas e radiação ultravioleta podem reduzir, ou até mesmo eliminar a formação dos THM (USEPA, 1999). Estes compostos, quando utilizados como oxidantes na etapa de pré-oxidação, podem reduzir a concentração de precursores.

A mudança do ponto de aplicação do cloro para as etapas mais avançadas do tratamento é bastante eficiente na redução da formação de THM pois permite que a concentração da MON seja reduzida no tratamento antes da aplicação do oxidante. A substituição da pré-cloração pela pré-oxidação com oxidantes alternativos é outra opção para a redução dos subprodutos formados (USEPA,1999).

A remoção final dos trihalometanos formados, ou em formação, pode ser feita com o uso de carvão ativado em pó (CAP), carvão ativado granular (CAG), ou ainda por arraste com ar ou filtração em membranas (DE SALVO, 2002).

Segundo PETER (1980), o uso de CAP tem se mostrado antieconômico devido às altas dosagens necessárias. A filtração da água em colunas de carvão ativado granular remove não apenas os trihalometanos, mas também outros subprodutos. A alta taxa de remoção só é mantida nas primeiras duas ou três semanas de operação. A necessidade da regeneração freqüente do CAG, a fim de manter as taxas de remoção, torna o processo oneroso.

A aeração é considerada um método eficiente para a remoção dos THM formados, reduzindo os subprodutos a níveis aceitáveis. Apesar disso, ela não resolve o problema, pois o cloro residual irá continuar reagindo com a matéria orgânica não volátil presente na água (PETER, 1980).

3.1.5 Riscos à saúde

Estudos realizados a partir de 1974, nos Estados Unidos, deram as primeiras indicações de correlação entre a água de abastecimento, os trihalometanos e o desenvolvimento de câncer (MACEDO, 2001). Dois anos após, em 1976, a National Academy's Safe Drinking Water Committee levantou a hipótese de que ingestão de água contendo clorofórmio na concentração de 20 µg/L, durante o período normal de uma vida, provoca um caso a mais de câncer que o normal em cada 33.000 habitantes, com nível de confiança de 95 % (ABDEL-RAHMAN, 1982 apud MACEDO, 2001).

Em 1979, a EPA estabeleceu como limite máximo para os trihalometanos totais (TTHM), a concentração de 100 µg/L na água de abastecimento público (TOMINAGA E MIDIO, 1999). Este limite foi reduzido para 80 µg/L no ano de 1998, valor que é mantido até o presente momento (USEPA, 2004; USEPA, 1998). No Brasil, concentração máxima permitida de TTHM é de 100 µg/L, conforme preconiza a Portaria GM 518 de 25 de março de 2004 (BRASIL, 2004). Este valor foi estabelecido pela primeira vez pela Portaria GM 36, de 1990, entrando em vigor no ano de 1992 (BRASIL, 1990).

A EPA classifica o potencial carcinogênico de uma substância em cinco grupos, conforme mostrado na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Classificação das substâncias segundo seu potencial carcinogênico

Grupo A: Cancerígeno aos humanos	Evidências suficientes em estudos epidemiológicos mostram associação entre exposição e o câncer
Grupo B: Provável cancerígeno aos humanos	Evidências limitadas suficientes em estudos epidemiológicos (B1) e/ou estudos em animais (B2)
Grupo C: Possível cancerígeno aos humanos	Evidências limitadas de estudos em animais e dados inadequados ou inexistentes para humanos
Grupo D: Não classificado	Evidências inadequadas ou inexistentes em estudos com animais e humanos
Grupo E: Sem evidências de ser cancerígeno aos humanos	Sem evidências de ser cancerígeno em pelo menos dois testes adequados em animais em diferentes espécies ou em estudos adequados epidemiológicos e em animais

Fonte: Adaptado de USEPA, 1999.

Os quatro principais trihalometanos são classificados quanto ao potencial carcinogênico segundo a tabela 3.8 (USEPA, 1999).

Tabela 3.8: Potencial carcinogênico dos principais THM

Contaminante	Classificação
Clorofórmio	B2
Bromodiclorometano	B2
Dibromoclorometano	C
Bromofórmio	B2

Fonte: Adaptado de USEPA, 1999.

Segundo TOMINAGA e MIDIO (1999), desde a descoberta dos THM, muitos estudos com coleta de dados, particularmente nos Estados Unidos, para se avaliar a presença destes compostos na água e sua correlação com o câncer foram realizados. Os autores esclarecem ainda que a exposição aos SPD ocorre não apenas pela ingestão de água de abastecimento clorada, mas por qualquer atividade doméstica que utilize a mesma como a lavagem de roupas e louças, o banho, etc.

Os dados epidemiológicos sugerem, mas não provam, que esses subprodutos podem causar certos tipos de câncer na população humana. Aceita-se que existe uma alta probabilidade de relação entre câncer de bexiga, cólon e reto na exposição a estes

compostos (TOMINAGA e MIDIO, 1999). Estudos indicam que a exposição aos THM pode também resultar em problemas no sistema reprodutivo (GALLAGHER et al., 1998 apud BORGES, 2003) e até mesmo abortos espontâneos (WALLER et al., 1998 apud BORGES, 2003).

3.2 PROCESSOS OXIDATIVOS

A desinfecção é descrita por RICHTER e AZEVEDO NETTO (1991) como um processo que visa a inativação de microrganismos presentes na água. Os três mecanismos de inativação dos microrganismos são a destruição da estrutura celular, a interferência no metabolismo e na biossíntese e crescimento. Dependendo do tipo de oxidante, pode haver a combinação destes fatores, através de um processo sinérgico (USEPA, 1999).

Segundo USEPA (1999) a maioria dos desinfetantes são fortes agentes oxidantes ou geram subprodutos oxidantes tais como os radicais hidroxilas livres. Estes oxidantes reagem com os compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água.

Os desinfetantes mais utilizados são o cloro, o dióxido de cloro, as cloroaminas, o ozônio, a água oxigenada e o permanganato de potássio (USEPA, 1999) Outras formas de oxidação podem ocorrer através do uso de radiação ultravioleta (UV) e de processos oxidativos avançados (POA). O cloro, porém, é o agente desinfetante mais largamente utilizado na purificação da água, tanto na pré, como na pós-desinfecção (RICHTER e AZEVEDO NETTO, 1991; USEPA, 1999).

Estes compostos, além da função de desinfetante, servem ainda para vários outros propósitos no tratamento de água, tais como o controle de crescimento de algas, auxiliar de floculação, oxidação de compostos orgânicos naturais e sintéticos, oxidação

de compostos inorgânicos como manganês e ferro, remoção de cor e controle de gosto e odor (USEPA, 1999).

A escolha do desinfetante a ser utilizado no tratamento deve obedecer aos seguintes pré-requisitos: eliminar os microrganismos patogênicos, evitar a produção de subprodutos da desinfecção e manter um residual na rede de abastecimento (USEPA, 1999). Na tabela 3.9, são mostrados as principais características dos oxidantes / desinfetantes mais utilizados no tratamento de água, quanto a formação de subprodutos e inativação de microrganismos, baseadas em suas aplicações típicas.

Tabela 3.9: Principais características dos agentes oxidantes

Condição	Cloro	Ozônio	Dióxido de Cloro	Permanganato de potássio	Cloroamina	Ozônio / Peróxido	Ultravioleta
Produz THM com MON	s	a	n	n	s	a	n
Produz orgânicos oxidados	a	s	a	a	n	s	a
Produz orgânicos halogenados	s	a	n	n	s	a	n
Produz subprodutos inorgânicos	n	a	s	n	n	a	n
Inativação de giárdia < 2 log	s	s	s	n	n	n	n
Inativação de giárdia > 2 log	n	s	s	n	n	n	n
Inativação de crypto < 2 log	n	s	s	n	n	n	n
Inativação de crypto > 2 log	n	s	n	n	n	n	n
Inativação de vírus < 2 log	s	s	s	n	n	n	s
Inativação de vírus > 2 log	s	s	s	n	n	n	s
Deixa residual na rede	s	n	a	n	s	n	n
Habilidade do operador (1-baixa; 5-alta)	1	5	5	1	2	5	3
Aplicável a ETA de grande porte	s	s	s	s	s	s	n
Aplicável a ETA de pequeno porte	s	s	s	s	s	s	s

s - Sim; n - Não; a - Às vezes

Fonte: adaptado de USEPA, (1999).

Os valores de potenciais de oxidação de alguns produtos utilizados no tratamento de águas de abastecimento podem ser observados na tabela 3.10.

Tabela 3.10: Potencial de oxidação de agentes oxidantes mais utilizados

Espécie	Potencial de oxidação (V)	Espécie	Potencial de oxidação (V)
Fluor	3,03	Ácido hipobromoso	1,59
Radical hidroxila	2,80	Dióxido de cloro	1,57
Oxigênio elementar	2,42	Ácido hipocloroso	1,49
Ozônio	2,07	Cloro	1,36
Peróxido de hidrogênio	1,77	Oxigênio molecular	1,23
Radical peridróxido	1,70	Bromo	1,09
Íon Permanganato	1,67	Iodo	0,54

Fonte: Adaptado de NOGUEIRA e GUIMARÃES (1998).

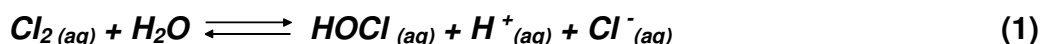
Observa-se que o permanganato de potássio possui um potencial de oxidação superior ao do ácido hipocloroso, obtido do cloro livre. O ácido hipobromoso também tem um potencial maior do que o ácido hipocloroso, justificando a maior formação de THM na presença de brometos.

3.2.1 Cloro livre

Segundo RICHTER e AZEVEDO NETTO (1991), o cloro é o desinfetante mais largamente empregado, pois é facilmente disponível como gás, líquido ou sólido (hipoclorito). É barato, fácil de aplicar devido à sua alta solubilidade em água, deixa residual em solução, é facilmente determinável e é capaz de destruir a maioria dos microrganismos patogênicos. Porém, ele apresenta como desvantagens, o fato de ser um gás venenoso e corrosivo, requerendo cuidados no manejo, e a possibilidade de causar problemas de gosto e odor, além de formar trihalometanos e outros subprodutos de desinfecção indesejáveis. Outra desvantagem do cloro livre é que este não é eficiente na remoção de protozoários (USEPA, 1999).

Nas condições atmosféricas normais o cloro é um gás amarelo esverdeado facilmente detectável pelo seu cheiro extremamente irritante e penetrante (DI BERNARDO, 1993).

O cloro, quando adicionado à água isenta de impurezas se hidrolisa segundo a equação (1). Dependendo dos valores de pH da água o ácido hipocloroso (HClO) se dissocia formando o íon hipoclorito (OCl⁻), em diferentes níveis de concentração, conforme a equação (2) (DI BERNARDO, 1993).

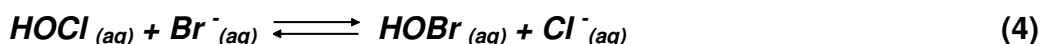


Para valores de pH entre 6,5 e 8,5, a dissociação é incompleta e as espécies HClO e OCl⁻ aparecem simultaneamente. Abaixo do pH 6,5 praticamente não ocorre a dissociação do HClO e acima de 8,5 a dissociação é completa. Como germicida, os efeitos do HClO são muito maiores do que os do OCl⁻, sendo preferível a cloração com valores baixos de pH (USEPA 1999).

O cloro pode ser aplicado na forma de gás cloro, hipoclorito de sódio e hipoclorito de cálcio. O hipoclorito de sódio é formado dissolvendo-se o gás cloro em uma solução de hidróxido de sódio, e sua reação na água é dada pela equação (3).



Na presença do íon brometo, ocorre a oxidação deste pelo ácido hipocloroso, formando o ácido hipobromoso, conforme pode ser observado na equação (4). (WESTERHOFF, 2004).



As dosagens típicas para aplicação em águas de abastecimento das várias formas do cloro são apresentadas na tabela 3.11.

Tabela 3.11: Dosagens típicas de cloro utilizadas no tratamento de água

Formas de cloro	Faixa de dosagens
Hipoclorito de cálcio	0,5 - 5 (mg/L)
Hipoclorito de sódio	0,2 - 2 (mg/L)
Gás cloro	1 - 16 (mg/L)

Fonte: USEPA, 1999.

O cloro, quando em contato com as substâncias húmicas presentes nas águas naturais, é o principal responsável pela formação de SPD.

3.2.2 Permanganato de potássio

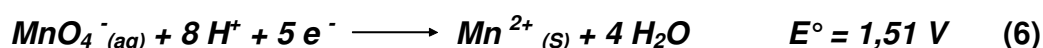
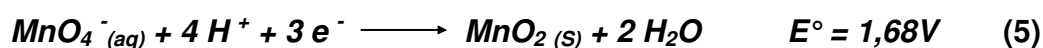
A aplicação de permanganato de potássio no tratamento de água teve início por volta de 1920, apenas para remoção de ferro e manganês. Foi pouco utilizado, até aproximadamente 1960, quando se passou a utilizar o composto na prevenção e remoção de gosto e odor (FIECK, 1978).

O permanganato de potássio, representado pela fórmula química KMnO_4 , é um agente oxidante de massa molar igual a 158 g/mol e massa específica variando entre 1.440 kg/m³ e 1.600 kg/m³ (FIECK, 1978). Ele é disponível apenas na forma seca e sua aplicação se dá com o preparo de uma solução concentrada (de 1 a 4 %) preparada na própria estação de tratamento. Sua solubilidade em água é de 6,4 g/100 mL a 20 ° C (USEPA, 1999).

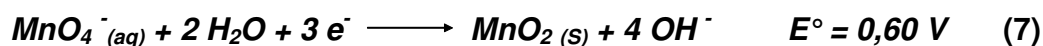
Segundo SINGER et al., 1980, o permanganato de potássio é um dos oxidantes que podem ser utilizados em substituição ao cloro na etapa de pré-oxidação, onde o objetivo é remover cor, eliminar gosto e odor e oxidar sais de ferro e de manganês. De

acordo com MYERS (1990), uma possível aplicação do permanganato de potássio é a remoção de precursores de THM. Apesar do permanganato de potássio ser capaz de inativar bactérias e vírus, ele não é comumente empregado como desinfetante (USEPA, 1999).

Segundo HAZEN e SAWYER (1992), apud USEPA (1999), o permanganato de potássio (Mn^{7+}), na forma solúvel, é reduzido a dióxido de manganês (MnO_2) (Mn^{4+}) que precipita. Sob condições ácidas as reações de oxidação são representadas pelas equações (5) e (6) (CRC, 1990, apud USEPA, 1999).



Em condições alcalinas a reação de oxidação é a representada pela equação (7) (CRC, 1990, apud USEPA, 1999).



Quando em solução, este composto confere à água uma cor que pode variar de rosa à púrpura, dependendo da concentração. Durante o processo de tratamento, ocorre a mudança de cor, do rosa ou púrpura para amarelo ou marrom, devido à redução do Mn^{+7} para Mn^{+4} (MACIEL, 1999). No caso de ocorrerem dosagens excessivas deste oxidante, pode haver a passagem de água rosa pelos filtros. Apesar de não ser tóxico, nos níveis empregados nas ETA, a presença do permanganato de potássio pode causar reclamações por parte dos consumidores devido a coloração. Sugere-se a sua remoção por carvão ativado granular nos filtros (FIECK, 1978).

FIECK (1978) e HAMMER (1979) apud SAMPAIO (1995), salientam que o primeiro requisito para a utilização do permanganato de potássio é que o sistema de tratamento inclua filtração. Esta é fundamental, pois uma significativa quantidade de óxidos metálicos floculentos não é suficientemente pesada para sedimentar por

gravidade. O dióxido de manganês, produzido pela redução do oxidante é insolúvel e deve ser removido, caso contrário, a água tratada pode apresentar uma cor amarela, ocasionando manchas em roupas e acessórios de cozinha e banheiro. Ainda segundo FIECK (1978), o dióxido de manganês freqüentemente age como um coagulante auxiliar, reduzindo a quantidade de coagulante primário, requerida para a clarificação da água.

O ponto de aplicação deste oxidante deve estar logo na chegada da água bruta, antes da adição de outros produtos químicos. Na impossibilidade de aplicação do permanganato de potássio na caixa de chegada, este deve ser introduzido a montante da mistura rápida, ou nela própria. A aplicação deve ser controlada de maneira que a cor rosa não vá além desta unidade. Caso seja necessário mais tempo para se completar a oxidação, o canal de água coagulada ou a câmara de floculação podem ser utilizados, porém, a possibilidade do dióxido de manganês, na forma coloidal, passar pelos filtros de torna maior (FIECK, 1978; MONTGOMERY, 1985 apud USEPA, 1999).

O impacto da presença de permanganato de potássio é pequeno nas outras etapas de tratamento. Não é desejável se manter um residual deste oxidante na água devido à coloração rosa da água (USEPA, 1999).

A dosagem requerida para a oxidação de ferro e manganês de 0,94 mg/mg e 1,92 mg/mg, respectivamente. Na prática, essas dosagens tem se mostrado menores do que as obtidas por estequiometria (CULP, 1986 apud USEPA, 1999). O tempo de oxidação é de 5 a 10 minutos, desde que o valor de pH esteja acima de 7,0 (KAWAMURA, 1991 apud USEPA, 1999). Para a remoção de gosto e odor, as dosagens podem variar de 0,5 à 20 mg/L (LALEZARY et al. 1986).

No que se refere ao controle de SPD, o permanganato pode ser usado para oxidar os precursores orgânicos presentes em água bruta na entrada de estações de tratamento de água, minimizando a formação de subprodutos, durante o estágio de desinfecção (HAZEN AND SAWYER, 1992, apud USEPA, 1999).

Em pesquisa desenvolvida por MYERS (1990), foram analisadas diversas técnicas para a redução das concentrações de precursores de THM da água bruta. Uma das técnicas utilizadas foi a aplicação do permanganato de potássio com carvão ativado em pó na água bruta. Após as etapas do tratamento, foi efetuada a filtração em meio de carvão ativado granular, resultando em baixas concentrações de THM na água filtrada.

GIFFORD (1989) comenta que o uso do permanganato de potássio é facilmente implementável para o controle de THM, sob algumas condições. Ele é adicionado na água bruta para oxidar as espécies orgânicas e inorgânicas. É possível a este composto, através da reação de oxidação, reduzir os precursores dos trihalometanos a outros produtos químicos, que não reagem com o cloro livre.

Em pesquisa realizada por Singer et al. (1980), foi avaliada a eficiência do permanganato de potássio na oxidação de precursores de THM, reduzindo-se a formação destes subprodutos. Para tanto, foram feitas coletas de amostras de água, de origem superficial, em duas ETA em pontos anteriores à aplicação de cloro. Estas estações de tratamento eram conhecidas por tratar água bruta com alto potencial de formação de THM. Neste trabalho, os autores realizaram ensaios de demanda de permanganato de potássio com o intuito de se determinar as dosagens a serem aplicadas para este oxidante. O cloro foi aplicado de forma a se manter um residual durante todo o tempo de contato, que foi de sete dias. As análises de clorofórmio foram realizadas por cromatografia gasosa. Os autores utilizaram três diferentes dosagens de permanganato, sendo elas iguais a 2,0, 5,0 e 10,0 mg/L. A formação de clorofórmio apresentou uma redução de 30 % e 40 % para valores de pH de 6,5 e 10,3, respectivamente, com aplicação de 10 mg/L de permanganato de potássio e duas horas de tempo de contato. O valor do pH durante a cloração foi igual a 7,0, deixando claro que a eliminação dos precursores pelo permanganato de potássio é mais eficiente em valores mais altos de pH. Os resultados obtidos pelos autores podem ser observados nos diferentes gráficos presentes na figura 3.10.

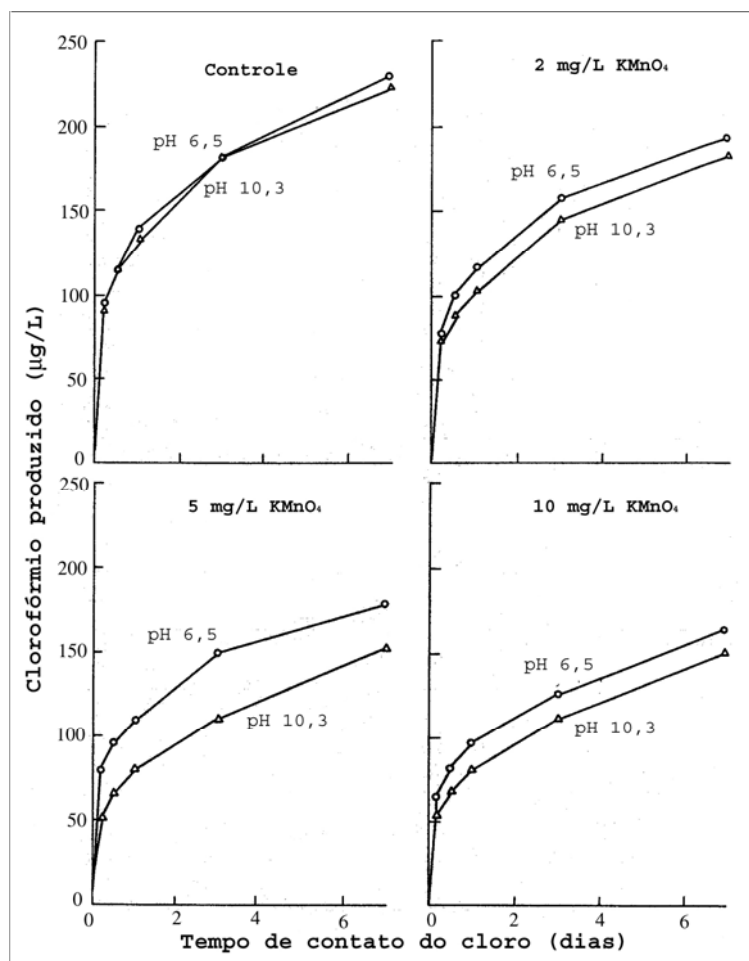


Figura 3.10: Redução na formação de clorofórmio devido à aplicação de permanganato de potássio anteriormente ao cloro

Fonte: Adaptado de SINGER et al., 1980.

SINGER et al. (1980), concluíram também que o permanganato não tem efeito na redução na formação de THM para dosagens baixas, de até 1,0 mg/L, mas que para dosagens mais altas o potencial de formação é parcialmente reduzido. Estes resultados podem ser observados na figura 3.11. Observa-se que o residual de cloro se manteve constante para as dosagens de permanganato acima de 0,5 mg/L.

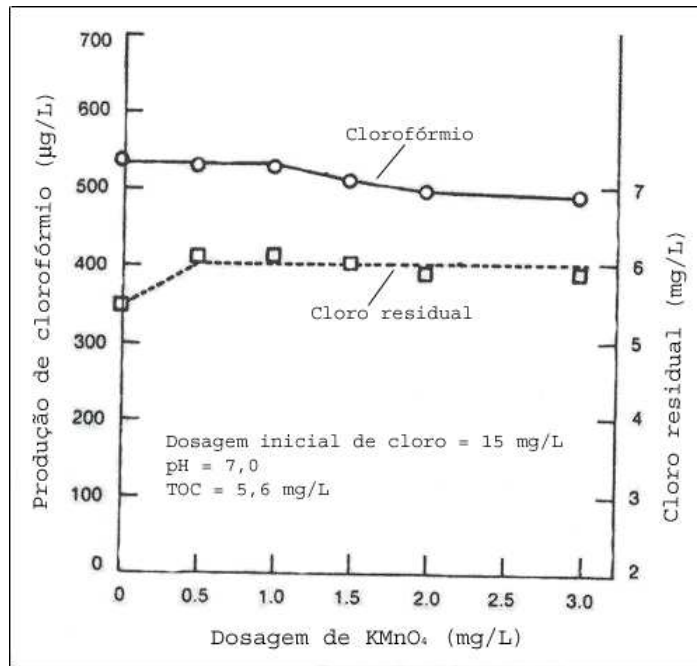


Figura 3.11: Efeito de dosagens baixas de permanganato de potássio na formação de clorofórmio e cloro residual

Fonte: Adaptado de SINGER et al., 1980.

Em pesquisa realizada por FIECK e BOLL (1980) apud USEPA (1999) examinou-se os impactos da adição de permanganato de potássio na formação de subprodutos da desinfecção em quatro ETA. Antes da alteração da pré-cloração pela pré-oxidação com permanganato de potássio a concentração média de THM era de 92 $\mu\text{g/L}$, com valores de 99 e 79 para máximo e mínimo, respectivamente. Os resultados obtidos pelos autores mostraram reduções superiores a 30 % na formação de THM para 3 das 4 ETA.

PASCHOALATO et al. (2003) avaliaram a demanda de permanganato de potássio e de cloro e a formação de TTHM para águas de poço artesiano adicionada de substâncias húmicas. Para a água estudada, foi encontrada uma demanda de 3,5 mg/L para o permanganato e 10 mg/L. As oxidações para formação de THM foram realizadas, independentemente para estes valores, coletando-se amostras em diversos tempos de contato entre 0,5 e 120 horas. Os resultados obtidos demonstraram uma formação máxima de 36,0 $\mu\text{g/L}$ de THM para a oxidação com cloro. No caso do

permanganato de potássio, não houve formação dos subprodutos, com todas as análises das amostras se mantendo abaixo de limite de detecção de 5,0 µg/L.

3.3 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA

Por tratamento convencional da água, entende-se o tratamento composto pelos processos de coagulação, floculação, sedimentação e filtração seguidas pela desinfecção (RIBEIRO, 1998). Em alguns casos, dependendo das características do manancial, podem ocorrer aplicações de desinfetantes na água bruta ou após a sedimentação. O processo de aplicação do desinfetante no início do tratamento é conhecido como pré-desinfecção. Porém, pode ser chamado também de pré-oxidação, pois, em muitos casos, seu objetivo é oxidar substâncias indesejáveis no tratamento e evitar o crescimento de algas durante o mesmo.

A coagulação é o processo onde os coagulantes são adicionados à água visando reduzir as forças que tendem a manter separadas as partículas coloidais em suspensão (RICHTER e AZEVEDO NETTO, 1991). É considerada uma das etapas mais importantes de um sistema de tratamento de água de abastecimento, sendo dependente dos parâmetros da qualidade da água natural, tais como temperatura, pH, turbidez, cor verdadeira, alcalinidade, COT, entre outros (DI BERNARDO, 1993).

As partículas coloidais possuem tamanhos que variam de 1 a 100 nanômetros. Como a área superficial é muito grande em relação à massa, predominam os fenômenos físico-químicos que ocorrem na superfície em detrimento dos efeitos gravitacionais (RIBEIRO, 1998).

Segundo EDWARDS e AMIRTHARAJAH (1985), a coagulação pode ser realizada eficientemente através de dois mecanismos distintos, sendo eles o de adsorção e o de varredura. No primeiro, a adsorção das espécies hidrolisadas solúveis

causa a desestabilização das partículas coloidais e no segundo, ocorre o aprisionamento destas nos hidróxidos precipitados. A varredura é mais efetiva para a posterior sedimentação.

Os principais coagulantes utilizados em ETA são os sais metálicos (sulfato de alumínio, sulfato férrico, cloreto férrico), sais metálicos polimerizados (cloreto de polialumínio) e polímeros orgânicos (catiônicos, aniônicos e não iônicos), sendo estes últimos utilizados principalmente como auxiliares de floculação (DI BERNARDO, 1993).

Nas ETA, a aplicação do coagulante ocorre na unidade de mistura rápida. DI BERNARDO (1993) recomenda, como parâmetros de projeto para essa unidade, que o tempo de contato deve ser menor ou igual a 60 s e que o gradiente de velocidade (G) deve estar entre 500 e 1200 s⁻¹. LETTERMAN et al. (1973) recomendam valores de G variando de 1000 s⁻¹, para um tempo de contato de 20 s, a 700 s⁻¹, para tempo de contato superior a 40 s.

A floculação é um processo físico que visa promover encontros entre as partículas desestabilizadas na coagulação, e assim, formar os flocos que deverão sedimentar. Este processo ocorre em agitação relativamente lenta (DI BERNARDO, 1993).

Os valores de G na floculação dependem do tipo de coagulante usado. BENEFIELD et al. (1982) sugerem gradientes de velocidade entre 25 e 100 s⁻¹, quando são utilizados sais de alumínio na coagulação. Para uma floculação mais eficiente, é recomendável que o gradiente de velocidade seja maior em um primeiro estágio e diminua gradualmente durante o processo. RICHTER e AZEVEDO NETTO (1991), recomendam que em floculadores mecânicos sejam previstos pelo menos 3 compartimentos em série com gradiente de velocidade variando de 75 a 10s⁻¹, sendo os valores mais comuns variando de 65 a 25 s⁻¹, do primeiro ao último compartimento. O tempo de detenção hidráulico nessas unidades pode variar de 20 a 30 min (DI BERNARDO, 1993).

3.4 ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO EM PÓ

JANKOWSKA et al. (1991) descrevem o carvão ativado como um elemento oriundo de material carbônico, com uma estrutura porosa e desenvolvida que lhe confere grande área específica e a habilidade de adsorver substâncias de origens orgânica e inorgânica, tanto na fase gasosa, quanto na fase líquida. O carvão ativado em pó é constituído de 87 à 97% de carbono, podendo conter outros elementos como o hidrogênio, oxigênio, enxofre, fósforo e nitrogênio.

Segundo TCHOUBANOGLIOUS e SCHROEDER (1985), o carvão ativado é obtido em duas etapas. A primeira é o tratamento térmico de um material de origem orgânica até a temperatura de 800 °C, por pirólise. A segunda é a oxidação dos resíduos, constituídos principalmente por hidrocarbonetos, por vapor e/ou ar, produzindo um material altamente poroso, com uma superfície ativada.

OTAWA et al. (1997) obtiveram um carvão ativado de alta área superficial através da mistura de vários materiais carbonáceos e um excesso de KOH. O processo de ativação do carvão é feito por um tratamento de aquecimento em dois estágios. O primeiro é feito em temperaturas em torno de 400 °C, com a finalidade de desidratação. No segundo estágio, o material é levado a uma temperatura entre 500 e 900 °C, o que irá garantir um aumento da área superficial com a abertura de poros. O produto é então lavado com água e, ocasionalmente, com solução de ácidos para remover o KOH remanescente e sais.

O carvão ativado em pó (CAP), segundo BANSAL et al. (1988), apresenta uma granulometria fina, menor que 100 µm. A taxa de adsorção é alta e são poucos os problemas relacionados com transporte de massa. Assim, são usados preferencialmente para adsorção na fase líquida, devido à sua pequena taxa de difusão.

A capacidade do carvão ativado de adsorver substâncias é dada pelas isotermas de adsorção da fase líquida, sendo estimadas pela comparação dos

resultados obtidos com diferentes adsorbatos como o azul de metileno, o fenol e o iodo (JANKOWSKA et al., 1991).

Os testes de adsorção de fenol, segundo SALAME et al. (2003), procuram qualificar o carvão quanto às suas propriedades químicas e porosidade. O índice de adsorção de iodo procura mensurar a área superficial específica do carvão, sendo definido como o número de miligramas de iodo adsorvido por grama de carvão ativado, em solução aquosa (ABE et al., 2001). JANKOWSKA et al. (1991) comentam que o teste de adsorção de azul de metileno é um indicador da capacidade do carvão em adsorver moléculas com dimensões lineares superiores a 1,5 nm.

ABE et al. (2001) estudaram a remoção de clorofórmio para tratamento de água utilizando carvões com índice de iodo entre 400 e 1200 mg/g. As melhores remoções foram obtidas com os carvões que apresentaram número de iodo na faixa de 760 mg/g.

3.5 TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE THM

Os riscos relacionados à ingestão dos subprodutos da desinfecção tem tornado extremamente importante a detecção dos mesmos nos sistemas produtores de água. A metodologia clássica para a detecção de tais compostos em amostras aquosas consiste na cromatografia gasosa, sendo esta reconhecida mundialmente e recomendada pelos principais organismos de padronização de ensaios para tratamento de água tais como o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater e a Environmental Protection Agency (EPA). Tecnologias alternativas, tal como a espectrofotometria são mais práticas e baratas, porém menos confiáveis. Embora estas ainda não estejam homologadas, tornam-se opções disponíveis.

3.5.1 Detecção por cromatografia

Na tabela 3.12 são indicados os principais métodos cromatográficos utilizados na detecção de trihalometanos em amostras aquosas por cromatografia gasosa.

Tabela 3.12: Principais métodos cromatográficos para detecção de THM e suas características

Fonte	Método	Extração/Concentração	Separação	Detecção	Especiação
EPA	524.2	"Purge and Trap"	CG	EM	Sim
	551.1	Líquido-líquido	CG	DCE	Sim
	552.2	Líquido-líquido	CG	DCE	Sim
SM	6210	"Purge and Trap"	CG	EM	Sim
	6230	"Purge and Trap"	CG	EM	Sim
	6232	Líquido-líquido	CG	DCE	Sim
	6232	"Purge and Trap"	CG	EM	Sim

CG - Cromatografia Gasosa

EM - Espectrometria de Massas

DCE - Detector de captura de elétron

Fonte: Adaptado de AWWA,1998, USEPA, 1995.

O procedimento "purge and trap" refere-se à concentração de espécies químicas por purgação da fase gasosa com um gás de arraste seguido de uma etapa de aprisionamento (aderência a um suporte sólido). Segundo BORGES (2003), um gás inerte é borbulhado através da amostra da água, causando a remoção dos compostos voláteis da água. Os compostos são então aprisionados num tubo adsorvente. O tubo é geralmente construído numa câmara de dessorção equipada com um mecanismo que, quando ativado, permite a liberação dos compostos e em consequência, a análise dos mesmos por cromatografia.

A extração líquido-líquido é uma remoção de fase por um solvente adequado, utilizando-se um funil de separação ou um extrator contínuo. Este é um dos processos mais utilizados na preparação de amostras para análise de orgânicos em água.

Normalmente consome muito tempo e pode haver perdas do analito por evaporação, ou devido à formação de emulsão no processo de extração (BORGES, 2002).

O método EPA 524.2 é aplicado para a identificação e simultânea quantificação de compostos orgânicos voláteis purgáveis em águas superficiais, subterrâneas e de abastecimento em qualquer estágio do processo de tratamento. Sua metodologia é indicada para uma faixa grande de compostos orgânicos, incluindo trihalometanos, que possuem alta volatilidade e baixa solubilidade na água e podem ser removidos por procedimentos de “purge and trap” (USEPA, 1995).

O método cromatográfico se resume em quatro diferentes procedimentos. Em uma primeira fase, tem-se que os compostos orgânicos voláteis com baixos valores de solubilidade em água são extraídos (purgados) da matriz por borbulhamento de um gás inerte através da amostra aquosa. Os componentes purgados da amostra são capturados em um tubo contendo materiais adsorventes adequados. Quando o processo de purga é completado, o tubo adsorvente é aquecido e retro fluxionado com gás hélio para dessorver os componentes capturados da amostra em uma coluna capilar de cromatografia gasosa (CG) interligado a um espectrômetro de massa (EM). A coluna é programada para aquecer e separar os analitos que serão analisados pelo EM, complementando-se a segunda fase. Em seguida, os compostos provenientes do cromatógrafo são identificados por comparação do seu espectro de massa e tempo de detenção na coluna com padrões presentes na biblioteca do equipamento. Os espectros de massa e tempos de detenção dos padrões são obtidos por análises nas mesmas condições das amostras analisadas. Por fim os analitos são quantificados utilizando-se de procedimentos de calibração padrão. A concentração de cada componente identificado é mensurada relacionando a resposta da quantificação iônica produzida no espectrômetro de massa com um padrão interno conhecido.

As principais interferências ao método, são os materiais voláteis no laboratório e impurezas no gás inerte de purga ou no adsorvente. Análises de laboratório em reagentes comumente chamados de brancos produzem informações sobre a presença de contaminantes.

3.5.2 Detecção por Espectrofotometria

A detecção de THM por espectrofotometria é feita através do método THM Plus™ da Hach. Neste método não é possível fazer a especificação dos compostos, sendo o resultado dado em trihalometanos totais.

Neste método, os trihalometanos presentes na amostra irão reagir com o composto N, N,-dietilnicotinamida sob condições aquecidas e alcalinas para formar um dialdeído intermediário. A amostra é então resfriada e acidificada a pH 2,5. O dialdeído intermediário formado reage com 7-naftilamida-1,3 ácido disulfônico para formar uma base colorida Schiff, que absorve cor a 515 nm. A cor formada é diretamente proporcional à quantidade de THM presente na amostra. Os resultados são reportados em µg/L de clorofórmio (HACH, 1999).

A análise de trihalometanos pelo método espectrofotométrico é baseada nas reações de Fujiwara (ESPIGARES et al., 2003; HUANG e SMITH, 1984). Tal método indica a quantidade de trihalometanos totais na forma de clorofórmio na faixa de 0 a 200 µg/L. As reações são utilizadas para mensurar hidrocarbonos halogenados, e é caracterizada pela coloração avermelhada desenvolvida quando compostos de tal natureza são aquecidos reagindo com hidróxido de sódio (NaOH) e piridina (C₅H₅N). Tal reação tem sido estudada para a determinação das concentrações de compostos orgânicos polihalogenados no ar, extratos de tecidos e fluidos corporais (HUANG e SMITH, 1984).

Na tabela 3.13 são mostrados os principais interferentes que podem causar erros de leitura no método (HACH, 1999).

Tabela 3.13: Principais interferentes e níveis máximos permitidos para o método THM PLUS

Interferente	Níveis Máximos
Cloro	< 10 ppm
Cobre	< 1.000 ppm
Dureza, Ca	< 1.000 ppm CaCO ₃
Dureza, Mg	< 4.000 ppm CaCO ₃
Ferro	< 10 ppm
Chumbo	< 2 ppm
Mercúrio	< 10 ppm
Monocloramina	< 20 ppm
Níquel	< 10 ppm
Bisulfito de sódio	< 100 ppm
EDTA	Interfere negativamente em todos os níveis

Fonte: Adaptado de HACH, 1999.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 METODOLOGIA

4.1.1 Considerações gerais

A pesquisa desenvolvida foi dividida em duas etapas. Primeiramente foi estudada a formação de THM devido à oxidação de soluções contendo ácidos húmicos e íons brometos, em diversas concentrações, pelo permanganato de potássio (primeira fase), bem como à combinação deste com o cloro livre (segunda fase). Em uma segunda etapa buscou-se avaliar a eficiência de remoção dos THM formados através de adsorção em carvão ativado em pó (CAP), seguida de tratamento físico-químico da água. Esta etapa também foi dividida em duas fases, sendo a primeira a definição de parâmetros e a segunda o tratamento da água contendo THM. Na figura 4.1 é mostrado um fluxograma esquemático da pesquisa realizada contemplando suas etapas e fases.

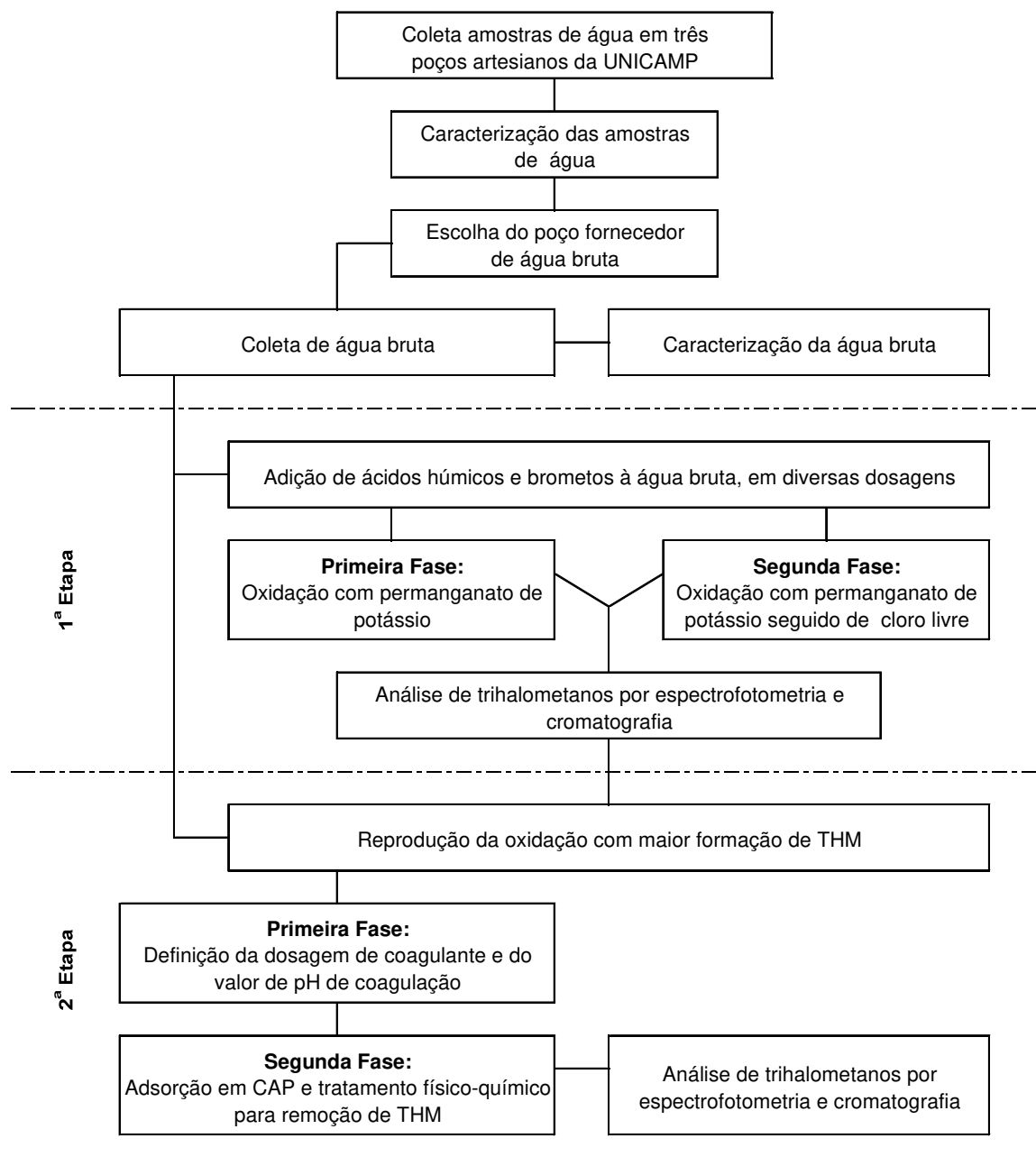


Figura 4.1: Fluxograma esquemático das etapas e fases da parte experimental da pesquisa

4.1.2 Água bruta

A água bruta utilizada na pesquisa foi coletada em um poço artesiano localizado próximo ao Ginásio Multidisciplinar da UNICAMP, que juntamente com outros poços e a água da rede de distribuição da Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A – SANASA, abastece o Campus de Barão Geraldo da Universidade Estadual de Campinas.

A escolha por se utilizar poço artesiano como fonte de água bruta para a pesquisa se deu por razões logísticas, uma vez que foram necessários grandes volumes de água, o que inviabilizava a utilização de água destilada. Outra fonte possível que seria a rede de distribuição de água da UNICAMP não foi considerada por conter cloro, que poderia influir nos resultados dos experimentos. O uso deste tipo de fonte apresenta ainda a vantagem de se obter uma água com características físicas, químicas e biológicas praticamente constantes ao longo do tempo.

Para a definição do poço a ser utilizado, foram estudadas amostras de águas dos poços do Instituto de Matemática, Estatística e Ciências da Computação (IMECC) e do Instituto de Biologia (IB), além do poço do Ginásio Multidisciplinar.

Foi realizada uma série de análises contemplando os parâmetros listados na tabela 4.1, onde são mostrados, também, os métodos utilizados para determinação de cada parâmetro estudado (AWWA, 1998; HACH, 2001). Estes ensaios de caracterização da água bruta foram realizados no Laboratório de Saneamento (LABSAN) e no Laboratório de Protótipos Aplicados ao Tratamento de Águas e Efluentes (LABPRO), ambos do DSA/FEC.

Tabela 4.1: Métodos utilizados na caracterização da água bruta

Parâmetro	Método
Cor Aparente	SM 2120 C - Spectrophotometric Method
Turbidez	SM 2130 B - Nephelometric Method
Temperatura	SM 2550 B - Laboratory and Field Method
pH	SM 4500 H ⁺ B - Electrometric Method
Condutividade	SM 2510 B - Laboratory Method
Dureza	SM 2340 C - EDTA Titrimetric Method
Alcalinidade	SM 2320 B - Titration Method
Ferro Total	Hach Method 8008 - Ferrover Method
Manganês Total	Hach Method 8034 - Periodate Oxidation Method
Bromo	Hach Method 8164 - DPD Method

As amostras de cada poço foram coletadas em galões de plástico de 5 litros, que foram pré-lavados com água destilada e mantidos por 24 horas em uma solução de ácido nítrico a 0,5 % (v/v). Imediatamente antes da coleta, os frascos foram condicionados com a água bruta, com o intuito de se eliminar quaisquer substâncias que pudessem interferir nas análises, alterando os resultados de qualidade da mesma.

O poço localizado no IB foi descartado, uma vez que sua água recebe a adição de cloro anteriormente à tomada de água. Este fato é de suma importância, pois a presença desse composto, quando combinado com os ácidos húmicos, causa a formação de THM, inviabilizando a pesquisa proposta. A escolha entre as duas fontes restantes se deu pela facilidade de acesso, uma vez que ambas forneceram amostras de água com características semelhantes.

Assim sendo, o poço artesiano escolhido para o desenvolvimento da pesquisa foi o que se situava próximo ao Ginásio Multidisciplinar da UNICAMP. Suas principais características são mostradas na tabela 4.2. O perfil geológico característico do local da escavação apresenta uma camada inicial de 9 metros em solo residual, seguido seqüencialmente de solo diabásico, sedimentos da formação Itararé, arenito fino e embasamento cristalino.

Tabela 4.2: Características do poço artesiano do Ginásio Multidisciplinar

Profundidade	200 m
Vazão mínima	11,3 m ³ /s
Diâmetro	6 polegadas
Revestimento	tubo de aço preto
Nível estático	21 m
Nível dinâmico	120 m
Tipo de bomba	EBNARA BHS 412-14, 10 hp
Profundidade da bomba	150 m

A cada coleta de água realizada durante o andamento da pesquisa, foram repetidos os mesmos ensaios de caracterização da água bruta, com o objetivo de acompanhar a estabilidade, ou não, das características da mesma ao longo do período de pesquisa.

4.1.3 Métodos de análise dos THM

A concentração de trihalometanos formados nas amostras geradas nas duas etapas da pesquisa foi medida através de dois métodos distintos, sendo eles a espectrofotometria e a cromatografia gasosa. As análises realizadas pelo primeiro método resultam na concentração de trihalometanos totais (TTHM), ou seja, a soma dos quatro principais THM, enquanto que o segundo permite fazer a especificação destes compostos, obtendo-se, desta forma, a concentração de cada um deles.

Na primeira etapa da pesquisa, de oxidação das soluções contendo precursores de THM e brometos, todas as amostras foram analisadas pelo método espectrofotométrico, porém, apenas algumas delas foram submetidas também à cromatografia gasosa. A utilização do segundo método teve por objetivo fazer a comparação entre os dois métodos, verificando-se assim a validade da

espectrofotometria para esse tipo de análise, além de se obter a especificação dos THM formados. Em virtude do alto custo das análises cromatográficas, não foi possível utilizar os dois métodos para todas as amostras desta etapa.

Na etapa seguinte, de tratamento da água, todas as análises das amostras coletadas foram realizadas pelos dois métodos de detecção, obtendo-se assim maior confiabilidade nos valores encontrados para a remoção e maior espectro de comparação das medidas obtidas em cada um deles.

Para as análises espectrofotométricas de determinação de THM foi utilizado o espectrofotômetro DR 2500 da Hach. O método adotado foi o THM Plus, desenvolvido pela Hach, que indica a concentração de trihalometanos na faixa da 0 a 200 $\mu\text{g/L}$ CHCl_3 , com erro de $\pm 6 \mu\text{g/L}$ (HACH 1999). Os referidos ensaios foram realizados no LABPRO do DSA/FEC.

Para as análises cromatográficas foi utilizado o método 524.2 - Measurement of Purgeable Organic Compounds in Water by Capillary Column Gas Chromatography / Mass Spectrometry da EPA (USEPA, 1995). Neste método, a extração / concentração da amostra é feita por Purge & Trap e a detecção por espectrometria de massas. Estes ensaios foram realizados pelo laboratório *Tasqa Serviços Analíticos*, de Paulínia, contratado para a prestação destes serviços.

4.1.3.1 Método THM Plus para análise espectrofotométrica

As análises de THM pelo método espectrofotométrico seguiram o método THM Plus, da Hach (HACH, 1999).

Primeiramente, foi preparado um banho de água quente para aquecimento das amostras em um béquer de vidro de 200 mL, em chapa aquecedora. Para dar suporte a

cubeta contendo a amostra, foi utilizada uma garra metálica acoplada a uma haste de suporte, conforme é mostrado na figura 4.2. Utilizou-se também outro béquer de 200 mL, contendo água levemente refrigerada, entre 18 e 25 °C, para o banho frio de resfriamento das amostras.



Figura 4.2: Banho quente para aquecimento da cubeta contendo a amostra

Em seguida eram preenchidas duas cubetas de vidro, com 10 mL da amostra a ser analisada em cada, sendo uma delas denominada como branco e a outra como amostra. As duas recebiam três gotas do THM Plus Reagente 1, e eram agitadas cuidadosamente. A seguir, era adicionado, com um pipetador automático, 3 mL do THM Plus Reagente 2, e agitava-se lentamente. A adição destes dois reagentes era feita rapidamente, a fim de se evitar que houvesse qualquer perda de THM volátil.

A cubeta denominada de amostra era então levada ao banho quente por cinco minutos, seguido de um banho frio de 3 minutos para restabelecer a temperatura ambiente, enquanto o branco permanecia à temperatura ambiente. Adicionava-se então

3 mL do THM Plus Reagente 3 em cada uma das cubetas, agitando-as lentamente. Este reagente gera uma reação exotérmica, causando aquecimento tanto da amostra quanto do branco, que eram então levados a um banho de refrigeração de três minutos.

Por fim, era adicionado o conteúdo de um sachê do THM Plus Reagente 4 a cada cubeta, agitando-as até a mistura completa do pó. Esperava-se então por um período de tempo de quinze minutos, recomendado pelo método, a reação deste reagente para o desenvolvimento de cor. Após o tempo de reação, o branco adquire uma cor verde-amarelada enquanto a amostra fica com um tom mais alaranjado, dependendo da concentração de THM presente na água analisada. Na foto da figura 4.3 são mostradas as cubetas denominadas branco e amostra, onde observa-se a diferença na coloração.

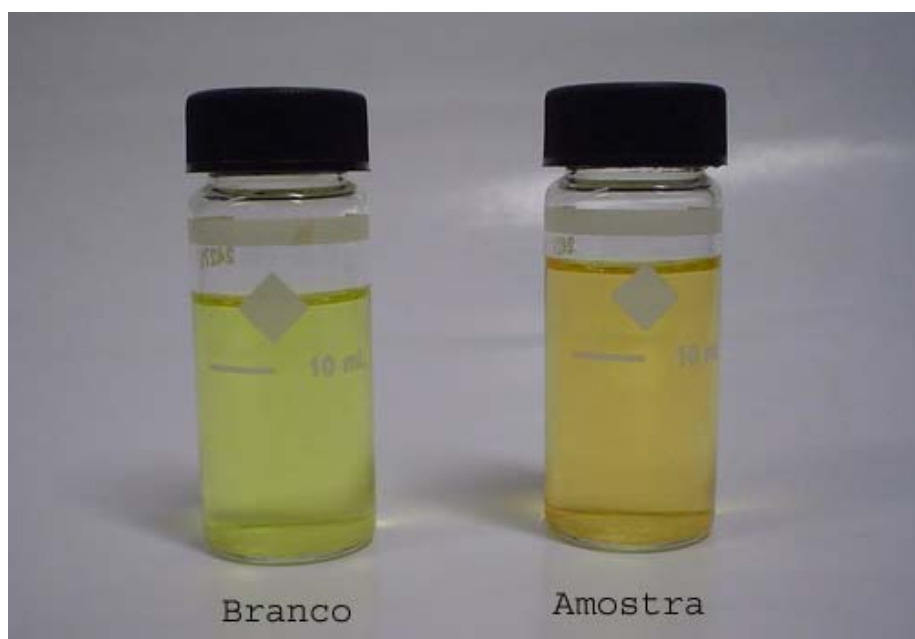


Figura 4.3: Cubetas contendo o branco e a amostra após o tempo de reação do THM Plus Reagente 4

Durante os primeiros minutos depois da adição do THM Plus Reagente 4, as cubetas eram limpas cuidadosamente com papel absorvente e, após a limpeza, eram mantidas em repouso para evitar a suspensão de parte deste reagente que não se

dissolvia. Terminado o período de reação realizava-se a leitura no espectrofotômetro através da introdução do branco no aparelho, para zerar o equipamento, e em seguida da amostra, resultando-se na leitura da concentração de THM.

4.1.4 Análise espectrofotométrica de soluções de clorofórmio

Buscando-se verificar a precisão do método THM Plus da Hach na detecção e quantificação de trihalometanos foram realizadas análises em soluções de clorofórmio com diferentes concentrações.

Em virtude da baixa solubilidade do clorofórmio em água, realizou-se primeiramente, sua diluição em etanol, que é um bom soluto para este composto e é miscível em água. As soluções foram preparadas em água deionizada a fim se evitar eventuais contaminações das amostras. Na tabela 4.3 são mostradas algumas das principais características do clorofórmio e do etanol utilizados na pesquisa, bem como suas respectivas fórmulas moleculares.

Tabela 4.3: Características dos compostos utilizados no preparo de soluções de clorofórmio

Composto	Fórmula Molecular	Concentração no frasco (%)	densidade (g / L)	solubilidade (g / 100g H ₂ O)
Clorofórmio UV/HPLC	CHCl ₃	98,9	1,48	0,8
Etanol	CH ₃ CH ₂ OH	96,0	0,79	missível

Fonte: Adaptado de LIDE, 1998; SEDIVEC e FLEK, 1976; MERCK, 1972; ROSIN, 1967.

Para o preparo dessas soluções, primeiramente o clorofórmio foi diluído em etanol, obtendo-se uma solução a partir da qual realizou-se a diluição em água, obtendo-se uma solução estoque de clorofórmio. Preparou-se então, 11 soluções com concentrações conhecidas de clorofórmio, variando entre 0 e 200 µg/L, abrangendo

toda a faixa de detecção do método. Essas amostras foram analisadas no DR 2500, comparando-se o valor obtido com o esperado teoricamente. Em virtude da alta volatilidade do clorofórmio, foram evitadas agitações durante o preparo das soluções.

4.1.5 *Preparação das soluções de reagentes utilizados na pesquisa*

As soluções utilizadas na pesquisa foram preparadas com água deionizada, evitando-se quaisquer interferentes que pudessem prejudicar ou interferir na obtenção de resultados. Os frascos utilizados para armazenamento e os balões volumétricos usados nas diluições foram previamente condicionados com água deionizada. Evitou-se a produção de grandes volumes destas soluções para que não houvesse envelhecimento das mesmas, o que poderia acarretar na alteração de suas características iniciais.

As particularidades do preparo de cada uma das soluções utilizadas na pesquisa são descritas nos sub-itens que seguem.

4.1.5.1 *Permanganato de potássio*

Foi utilizado o permanganato de potássio PA da Merck. As soluções foram preparadas através da diluição de uma massa conhecida do composto em água deionizada. A partir desta solução, foram realizadas outras diluições até se obter a concentração desejada para a solução estoque. Antes do preparo das soluções, o permanganato de potássio foi mantido em estufa, a 103 °C, por duas horas, evitando-se alteração na massa do mesmo devido à possível presença de umidade.

A solução estoque, dependendo da etapa da pesquisa, teve uma concentração diferente, com o intuito de ser evitada a pipetagem de volumes muito grandes da mesma nas amostras a serem oxidadas.

Para a primeira etapa, foram diluídos 1.172 mg do permanganato de potássio em um balão de 250 mL, preenchido com água deionizada, obtendo-se a concentração de 4.688 mg/L de KMnO_4 . A seguir, tomou-se 4 mL desta solução em um balão volumétrico de 250 mL, novamente completado com água deionizada. Com isso, obteve-se uma solução estoque final com concentração de 75 mg/L de KMnO_4 .

Na segunda etapa, como as oxidações foram realizadas em reatores de volume maiores, de 20 e 50 L, necessitou-se de uma solução estoque com uma concentração mais elevada de KMnO_4 . Para a oxidação em reator de 50 L, foram diluídos 1.500 mg de permanganato de potássio em um balão volumétrico de 500 mL, obtendo-se a concentração de 3.000 mg/L na solução estoque. Nos reatores de 20 litros, utilizou-se uma solução com concentração de 2.000 mg/L, obtida através da diluição de 500 mg de permanganato de potássio em um balão volumétrico de 250 mL, preenchido com água deionizada.

4.1.5.2 *Cloro livre*

Para o preparo das soluções de cloro livre, foi utilizado o hipoclorito de sódio PA da Vetec, que apresenta concentração entre 4 e 6 %. Anteriormente ao preparo das soluções se fez necessário a determinação da concentração de cloro livre no frasco de hipoclorito de sódio. Para tanto, utilizou-se o método SM 4500 Cl A – Iodometric Method I (AWWA, 1998).

O método iodométrico se baseia no princípio de que o cloro irá liberar iodo livre de uma solução de iodeto de potássio (KI) para valores de pH menores ou iguais a 8,0.

O iodo liberado é titulado com uma solução padrão de tiosulfato de sódio, utilizando-se uma solução de amido como indicador.

A solução estoque foi preparada semanalmente e mantida sob refrigeração e ao abrigo da luz, de modo a serem mantidas praticamente constantes suas características. Foram utilizadas diversas soluções, com concentrações diferentes, para cada etapa da pesquisa. A diluição foi feita em água deionizada.

4.1.5.3 Ácidos húmicos

O ácido húmico utilizado na pesquisa foi o comercial, PA, da Aldrich. Para cada etapa da pesquisa, foram produzidas soluções de diferentes concentrações, através da diluição de uma massa conhecida do composto em água deionizada. Assim como no caso do cloro, as soluções estoque foram preparadas semanalmente e mantidas refrigeradas, com o intuito de se manter suas características originais.

4.1.5.4 Brometos

As soluções de íons brometos foram preparadas com o sal brometo de potássio (KI) PA da marca Merck. Este sal, em solução aquosa, dissocia-se completamente liberando os íons brometo (Br^-) no meio, conforme é mostrado na equação (8).



As diluições foram realizadas através da adição de uma massa conhecida do sal a balões volumétricos contendo água deionizada, seguida de outras diluições,

também em água deionizada, até se obter a concentração desejada de íons brometo. Utilizou-se várias concentrações na solução estoque, dependendo da etapa da pesquisa.

Anteriormente à pesagem, o brometo de potássio foi mantido em estufa à 103 °C, com o intuito de se eliminar qualquer umidade que pudesse interferir na massa a ser avaliada.

4.1.5.5 Sulfato de alumínio

Foi utilizado o sulfato de alumínio PA, da marca Vetec. A solução foi preparada adicionando-se 5 g do composto em um balão de 500 mL preenchido com água deionizada. Obteve-se dessa forma uma solução de sulfato de alumínio a 1 %, ou seja, na concentração de 10 g/L. O sulfato de alumínio, antes de ser pesado para o preparo da solução, foi colocado em estufa, à 103 °C, por duas horas, para evitar a possível presença de massa de água no mesmo.

4.1.5.6 Carvão ativado em pó

Preparou-se uma diluição de carvão ativado em pó a 1 %, com o mesmo procedimento utilizado para a preparação do sulfato de alumínio. O carvão utilizado foi o Bcarbon 125 FM, da Bahia Carbon, que foi mantido em estufa, à 103 °C por duas horas antes da pesagem. No desenvolvimento do trabalho de pesquisa, quando foi empregado o CAP, a suspensão era agitada constantemente devido à facilidade de sedimentação das partículas do carvão.

4.1.6 Primeira etapa – Ensaios de oxidação

4.1.6.1 Considerações gerais

Na primeira etapa da pesquisa, foi analisada, em uma primeira fase, a formação de THM em soluções contendo precursores, com e sem íons brometo, quando submetidas a oxidações com permanganato de potássio. Na segunda fase, estudou-se o efeito da oxidação com permanganato de potássio seguido de cloro livre.

Para os ensaios de oxidação, a água do poço recebeu a adição de ácidos húmicos, garantindo-se assim a presença de precursores para a formação de THM. As dosagens de ácidos húmicos variaram entre 1,0 e 10,0 mg/L. Para o estudo da influência do íon brometo, este composto foi adicionado em concentrações de 0,25 a 3,00 mg/L.

Os reações de oxidação foram realizadas em balões volumétricos de 500 mL, quando a análise de THM se daria apenas por espectrofotometria e de 1 L quando a análise de THM se daria pelos dois métodos de detecção. Estes reatores foram mantidos sem agitação, à temperatura ambiente em local abrigado da luz, durante o tempo de reação. Não houve ajuste do valor de pH nas soluções de água bruta com precursores.

As coletas de amostras em cada reator foram realizadas em intervalos de tempo de 1, 12 e 24 horas, a partir da adição do permanganato de potássio na primeira fase, e da adição do cloro na segunda fase. No total, foram realizadas oxidações em 18 reatores, 12 apenas com permanganato de potássio e 6 com a combinação de permanganato de potássio e cloro livre, gerando 54 amostras.

Antes de cada oxidação foram medidos o valor de pH e a temperatura da água contendo precursores. A cada coleta realizada, foi medida a formação de THM pelo método espectrofotométrico, além do valor de pH e a temperatura. Nesta etapa, 21 das 54 amostras coletadas, ou seja, 39 %, foram analisadas por cromatografia gasosa.

4.1.6.2 Primeira fase - Oxidações com permanganato de potássio

As oxidações para verificação da formação de THM com permanganato de potássio, durante a primeira fase, foram feitas com dosagens do oxidante variando de 1,5 a 4,5 mg/L. Para a verificação da influência das concentrações de ácidos húmicos e brometos na formação de subprodutos, a dosagem de permanganato de potássio foi mantida em 1,5 mg/L.

Foram realizadas as oxidações em doze reatores, numerados de 1 a 12, na ordem cronológica de realização dos experimentos. Na tabela 4.4 são mostradas as dosagens utilizadas para cada reator, agrupados por objetivo. Vale ressaltar que em alguns casos, um reator serviu para atingir mais de um objetivo.

Nesta fase, foram geradas 36 amostras que foram analisadas por espectrofotometria, para detecção de THM. Destas, 13 amostras (36 %) foram também analisadas pelo método cromatográfico.

Tabela 4.4: Dosagens utilizadas para oxidação com permanganato de potássio

Reator	Objetivo	Dosagens (mg/L)		
		Permanganato de Potássio	Ácidos Húmicos	Íons Brometo
7	Verificar a formação de THM em oxidação com permanganato de potássio	1,5	2,5	2,00
8		3,0		
9		4,5		
3	Verificar a influência da concentração de ácidos húmicos na formação de THM	1,5	1,0	1,00
4			2,5	
5			5,0	
6			10,0	
10	Verificar a influência da concentração de íons brometo na formação de THM	1,5	1,0	0,00
1				0,25
2				0,50
3				1,00
11		2,5	2,5	0,00
12				0,50
4				1,00
7				2,00

4.1.6.3 Segunda fase - Oxidações com permanganato de potássio seguido de cloro livre

Nas oxidações com permanganato de potássio combinado com cloro livre, o permanganato de potássio foi adicionado à amostra anteriormente ao cloro, para dois diferentes tempos de contato entre os oxidantes: 30 e 60 minutos. Este tempo foi dado para a oxidação dos precursores pelo primeiro oxidante, antes da aplicação do cloro.

A dosagem de permanganato potássio utilizada foi de 1,5 mg/L e a de cloro foi de 10,0 mg/L. A concentração de ácidos húmicos foi mantida em 2,5 mg/L e variou-se a de brometos entre 0,5 e 3,0 mg/L. Foram utilizados seis reatores, numerados de 13 à

18, e, tal qual na primeira fase, coletou-se amostras em três para tempo de contato. Para esta fase, gerou-se 18 amostras das quais 8 (44 %) foram analisadas pelos dois métodos de detecção de THM. Na tabela 4.5 são mostradas as dosagens utilizadas em cada reator.

Tabela 4.5: Dosagens utilizadas para oxidação com permanganato de potássio combinado com cloro livre

Reator	Tempo de contato do permanganato de potássio antes da aplicação do cloro livre	Dosagens (mg/L)			
		Cloro Livre	Permanganato de Potássio	Acidos Húmicos	Íons Brometo
13	30 min	10,0	1,5	2,5	0,5
14					1,0
15					2,0
16	60 min	10,0	1,5	2,5	0,5
17					1,0
18					3,0

Os resultados obtidos foram comparados com os dados do estudo realizado por MARMO (2005), que oxidou soluções contendo precursores de THM e brometos, sob as mesmas condições do presente trabalho, apenas com cloro livre. O objetivo desta comparação será avaliar a eficiência do permanganato de potássio em reduzir a formação de THM, quando utilizado em conjunto com o cloro na pré-oxidação.

As dosagens utilizadas na pesquisa de MARMO (2005) podem ser observadas na tabela 4.6. Os reatores do referido estudo foram numerados de 19 à 21, dando continuidade à numeração utilizada para os reatores das oxidações com permanganato de potássio.

Tabela 4.6: Dosagens utilizadas para oxidação com cloro livre

Reator	Objetivo	Dosagens (mg/L)		
		Cloro Livre	Ácidos Húmicos	Íons Brometo
19	Verificar a formação de THM em oxidação com cloro livre	1,5	2,5	2,0
20		3,0		
21		4,5		

Fonte: Adaptado de MARMO (2005).

4.1.6.4 Coleta e preservação das amostras

A coleta das amostras foi realizada retirando-se uma alíquota da mesma em um béquer e deixando o restante no reator para as coletas subseqüentes com outros tempos de contato. Evitou-se que houvesse qualquer agitação da amostra, o que poderia ocasionar a perda de THM volátil.

As análises de detecção de THM por espectrofotometria foram realizadas logo após a amostragem, não havendo necessidade de preservação das mesmas.

Para o método cromatográfico, as amostras foram coletadas em duplicata, utilizando-se “vials” de 40 mL, com tampa rosqueável e septo de silicone, fornecidos pelo laboratório Tasqa, responsável pelas análises cromatográficas, não permitindo-se a formação de bolhas de ar dentro dos mesmos. A preservação das amostras foi feita conforme preconiza o Standard Methods 6010 B - Sample Collection and Preservation (AWWA, 1998). Foi adicionado um agente redutor, o tiosulfato de sódio, na proporção de 3 mg a cada 40 mL de amostra, e esta foi mantida em refrigeração a 4 °C em ambiente livre de gases orgânicos. Na figura 4.4 é mostrada uma foto dos “vials” utilizados.



Figura 4.4: Foto dos “vials” utilizados para a coleta e preservação das amostras a serem enviadas para laboratório cromatográfico.

Segundo o método EPA 524.2 (USEPA, 1995), utilizado para as análises cromatográficas, o prazo máximo para a análise das amostras é de 14 dias.

4.1.7 Segunda etapa - Ensaio de remoção de THM

4.1.7.1 Considerações gerais

A segunda etapa da pesquisa consistiu em avaliar a eficiência de remoção de THM por adsorção em carvão ativado em pó, seguido de tratamento convencional da água. Numa primeira fase, foram realizados ensaios para determinar os valores de pH e dosagem do coagulante para cada concentração de CAP utilizada. Foram estudados quatro diferentes dosagens de sulfato de alumínio e seis valores de pH. De posse desses resultados, pode-se então realizar, na segunda fase, o tratamento da água.

Para esta etapa, utilizaram-se as mesmas dosagens da oxidação realizada no reator 18 da etapa anterior. A escolha foi feita por este ter sido o que apresentou maior formação de trihalometanos. A oxidação se deu com a aplicação de permanganato de potássio e cloro livre, com uma hora de tempo de contato com o primeiro oxidante antes da aplicação do segundo. O tratamento foi realizado respeitando-se o tempo de contato de 24 horas após a adição de cloro, para a formação de THM. Na tabela 4.7, são mostradas as dosagens de precursores e oxidantes, utilizadas na preparação da água a ser tratada.

Tabela 4.7: Dosagens utilizadas na segunda etapa da pesquisa

Reator 18	Dosagens (mg/L)
Ácidos Húmicos	2,5
Brometos	3,0
Permanganato de Potássio	1,5
Cloro Livre	10,0

A coleta de água bruta para esta etapa foi realizada com o uso de bombonas com capacidade de 50 L. Estas foram mantidas em contato por duas horas com uma solução de ácido nítrico a 10 % sendo, após este tempo, enxaguadas abundantemente com água da rede de abastecimento da UNICAMP. Antes de cada coleta, os recipientes foram condicionados diversas vezes com água do poço, eliminando-se qualquer resíduo que pudesse interferir na qualidade dos dados obtidos na pesquisa. As reações de oxidação, após a adição de ácidos húmicos e brometos, foram realizadas nas mesmas bombonas utilizadas para coleta, de forma que cada bombona era suficiente para quatro ensaios de “jarteste” (com seis jarros de dois litros cada um). Na figura 4.5 é mostrada uma foto o recipiente utilizado para coleta e como reator na segunda etapa da pesquisa.



Figura 4.5: Foto da bombona utilizada para coleta e como reator de oxidação na segunda etapa da pesquisa

Após o tempo de reação com os oxidantes, os jarros do aparelho de “jarteste” foram preenchidos com a amostra oxidada, onde foram avaliadas seis diferentes dosagens de CAP, de 10, 20, 30, 50, 100 e 150 mg/L para o tratamento. A aplicação ocorreu com dois diferentes tempos de contato, de 60 e 120 minutos, entre o CAP e a amostra. Durante o tempo de contato, manteve-se uma agitação com gradiente de velocidade (G) adotado igual a 80 s^{-1} . Este valor foi escolhido de modo a promover o encontro entre as partículas de THM com o CAP sem que houvesse o turbilhonamento da amostra, o que pode acarretar em perda de THM volátil.

Terminado o tempo contato, realizou-se o tratamento físico-químico da água para remoção do CAP, simulado em aparelho de “jarteste”. Como coagulante, foi utilizado o sulfato de alumínio PA em dosagem obtida experimentalmente na primeira fase. O tratamento contemplou os seguintes processos: mistura rápida, coagulação, sedimentação e filtração em papel de filtro. Na floculação foram utilizados três tempos de contato, com gradiente de velocidade decaindo de um para o outro. O tempo de sedimentação foi estimado fixando-se uma velocidade de sedimentação do floco da

ordem de 1,0 cm/min, o que levou a coleta da amostra 7 minutos após a finalização da floculação. Na tabela 4.8 são mostrados os parâmetros utilizados para no tratamento.

Tabela 4.8: Parâmetros adotados para ensaio de “jarteste”

Fase do Tratamento	Gradiente de Velocidade (s⁻¹)	Tempo de Contato
Mistura Rápida	800	15 s
Floculação	80	10 min
	50	10 min
	20	10 min
Sedimentação	---	7 min

O valor de pH de coagulação, assim como a dosagem do coagulante, foram obtidos a partir de ensaios de “jarteste” realizados para este fim. O ajuste do pH foi realizado no jarro com a água oxidada mantida em agitação, com gradiente de velocidade igual a 80 s⁻¹, antes da adição de CAP. Foi utilizada solução de ácido nítrico a 15 % para redução do pH e de hidróxido de sódio a 2 % para elevação do mesmo. Mediu-se também o pH durante a coagulação, uma vez que a adição do coagulante influi no mesmo.

4.1.7.2 Primeira fase - Definição da dosagem de coagulante e do valor de pH

Antes do tratamento para remoção de THM, para cada uma das seis dosagens de carvão, foram determinados a dosagem de coagulante e o valor de pH a ser utilizado.

Foram avaliados seis valores de pH e quatro dosagens do coagulante. As dosagens de sulfato de alumínio estudadas foram de 5, 15, 25 e 40 mg/L. O pH foi

ajustado antes da adição de CAP na faixa de 5,5 a 8,0, variando de 0,5 em 0,5, utilizado-se soluções ácido nítrico e hidróxido de sódio. Na figura 4.6 é mostrado um esquema da definição dos parâmetros para a dosagem de 10 mg/L de CAP que foi repetido para cada uma das outras dosagens de CAP utilizadas.

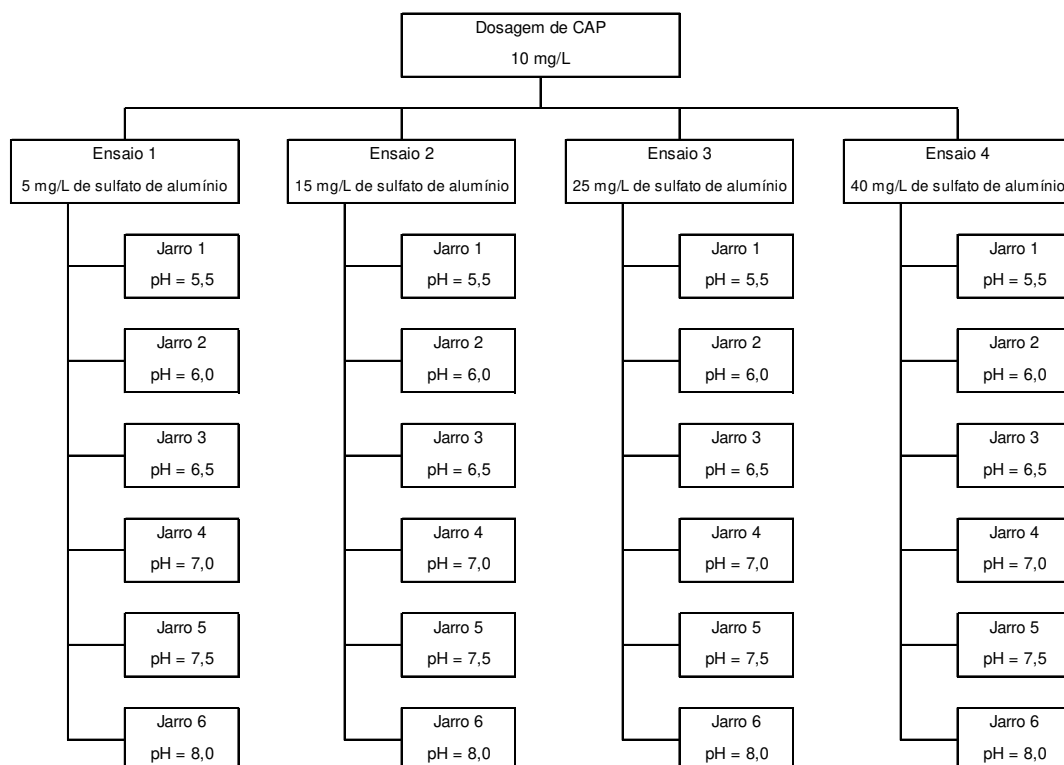


Figura 4.6: Esquema dos ensaios para escolha do valor pH e dosagem de coagulante

Para cada uma das seis dosagens de CAP, foram realizados quatro ensaios de “jarteste”, totalizando 24 baterias, denominadas de ensaio de 1 a 24.

Uma última bateria, denominada de ensaio 25, foi realizada avaliando-se a remoção do carvão apenas por filtração, sem o uso de coagulante. A água recebeu a adição de CAP, sem ajuste de pH, sob agitação, e foi filtrada em papel de filtro. O objetivo deste ensaio foi verificar a necessidade da coagulação no processo de tratamento.

Para se avaliar a eficiência de remoção do CAP no tratamento, foram medidos os parâmetros turbidez e cor aparente. Estes parâmetros foram avaliados na água oxidada, na água após a adição de CAP e na água final (após a filtração). A eficiência de remoção foi avaliada comparando-se os valores na água contendo CAP e na final, uma vez que o processo visa a remoção do CAP.

Não houve tempo de contato entre carvão e a água oxidada, uma vez que nestes ensaios não foi avaliada a remoção de THM.

O par de valores de pH e dosagem de coagulante que apresentou a melhor remoção, para cada dosagem de CAP, foi o escolhido para ser utilizado no tratamento da água oxidada.

4.1.7.3 Segunda Fase - Remoção de trihalometanos

Após a definição dos valores de pH e da dosagem de coagulante, foram realizados dois ensaios de “jarteste” para cada dosagem de carvão ativado. O tempo de contato do carvão ativado com a amostra foi de 60 minutos no primeiro ensaio e de 120 minutos no seguinte. Estes foram denominados ensaio 26 e ensaio 27 e suas características são mostradas esquematicamente na figura 4.7.

A remoção do THM foi avaliada medindo-se a concentração de THM na água antes do tratamento, sem a adição de CAP, coletivamente para os seis jarros e em cada jarro após o tratamento. Foram realizados ensaios espectrofotométricos e cromatográficos para todas as amostras coletadas. Foram realizadas também análises de cor aparente e turbidez, para a confirmação dos parâmetros encontrados na fase de definição.

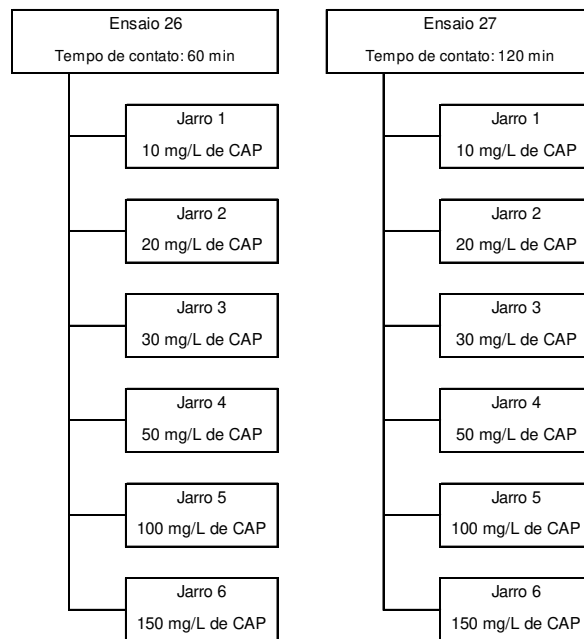


Figura 4.7: Esquema dos ensaios 26 e 27 para remoção de THM

4.2 MATERIAL

4.2.1 Equipamentos

Na tabela 4.9 são explicitados os equipamentos utilizados na parte experimental da pesquisa, bem como suas marcas e modelos.

Tabela 4.9: Equipamentos utilizados no desenvolvimento do trabalho de pesquisa

Utilização	Equipamento
Preparo de Soluções	Destilador Fanen, modelo 724/2-A
	Deionizador Permution, modelo DE 1800
	Balança Semi Analítica Ohaus, Precision Plus
	Balança Semi Analítica Ohaus, Explorer
	Balança Analítica Mettler H20T
	Estufa de secagem e esterilização Fanen, modelo 315 SE
THM, Ferro Total, Manganês Total, Bromo	Espectrofotômetro Hach DR 2500
pH, Temperatura	pHmetro de digital de bancada, Thermo-Orion, modelo 410
	pHmetro digital de bancada, Marte, modelo MB-10, com sensor de temperatura em inox acoplado
Condutividade	Condutivímetro Micronal, modelo B330
Cor Aparente	Colorímetro Hach modelo DR 890
Turbidez	Turbidímetro Hach modelo 2100 D
Tratamento da água	Equipamento de "Jarteste" Nova Ética, modelo 218/LDB
	Cronômetro manual digital

Para os ensaios de tratamento físico-químico da água na segunda etapa, foi utilizado um equipamento de "jarteste" com capacidade para seis jarros, fabricado pela Nova Ética Equipamentos Científicos S/A, modelo 218/LDB. O aparelho possui motorização para rotação das paletas nos jarros, aplicando a mesma rotação aos seis jarros e é dotado de um sistema que permite a variação de sua rotação de forma contínua, desde 0 até o limite máximo de 500 rpm. Permite ainda, a coleta simultânea de água decantada dos seis reatores.

Os reatores em acrílico têm, individualmente, volume útil de 2 litros. Possuem seção quadrada de 11,5 cm por 11,5 cm e altura total de 21 cm e espessura de 4,5 mm. O agitador é constituído de um eixo vertical $\phi = 12$ mm de diâmetro e o rotor tipo turbina confeccionado com paleta de aço inox, medindo 7,0 x 2,5 cm.

Nas fotos da figura 4.8 são mostrados os principais equipamentos utilizados na pesquisa.

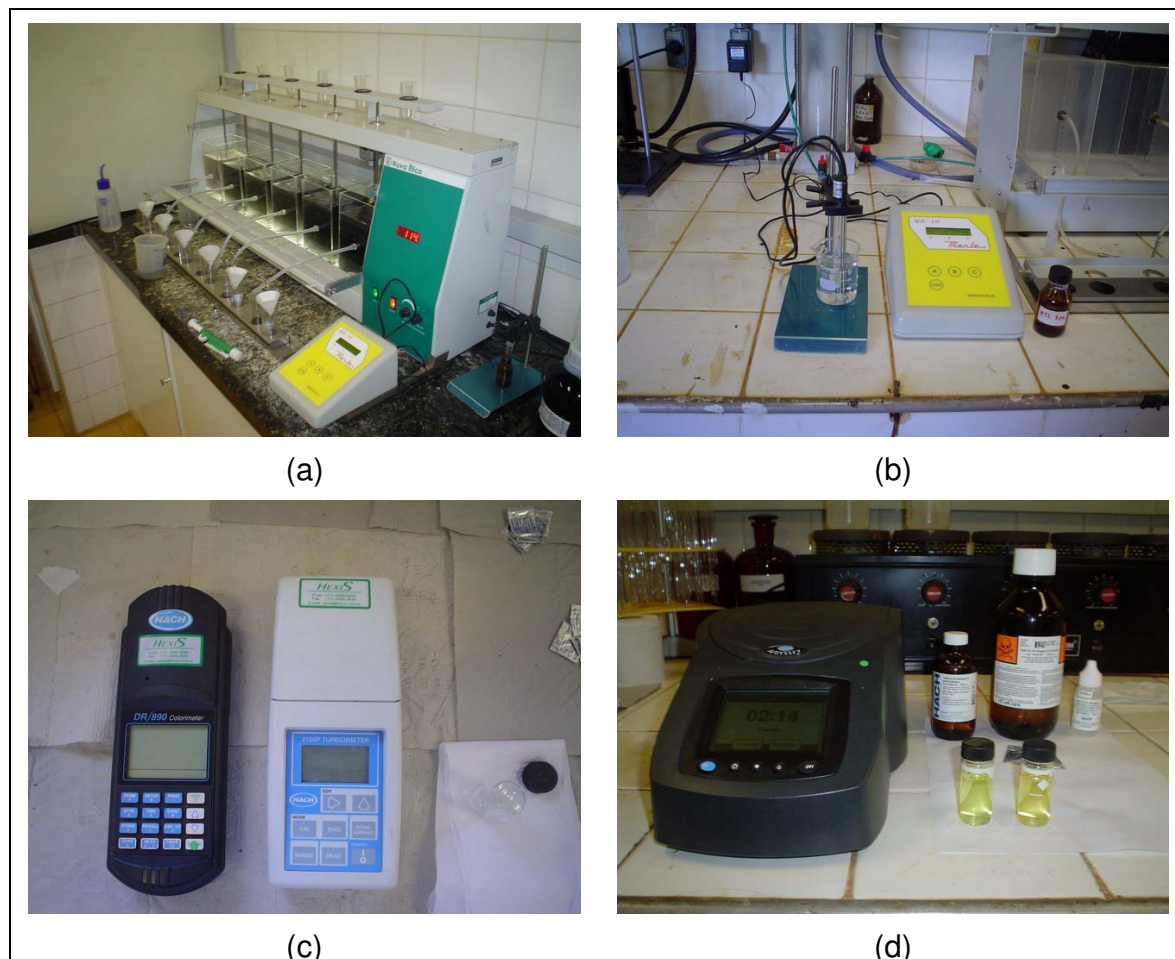


Figura 4.8: Equipamento de “jarteste” (a), pHmetro de bancada (b), o colorímetro e o turbidímetro (c) e o espectrofotômetro DR 2500 da Hach (d)

Na detecção de trihalometanos por cromatografia gasosa foi utilizado um cromatógrafo a gás modelo HP 6890-5973, com coluna capilar modelo Supelco 2-4154 com 60,0 m de comprimento e 250 μm de diâmetro nominal. A espessura nominal do filme era de 1,50 μm e a temperatura máxima atingida foi de aproximadamente 230 $^{\circ}\text{C}$. O fluxo inicial do equipamento é de 1,0 mL/min, com velocidade média de 26 cm/s;

O Espectrômetro de Massas, acoplado ao cromatógrafo, é da marca HP 5973 com injetor automático Dynatech PTA-30, Purge & Trap CDC 6000.

4.2.2 Reagentes e material de laboratório

Os reagentes químicos e outros materiais empregados nas diversas etapas da pesquisa são descritos com suas respectivas marcas nas tabelas 4.10 a 4.16.

Tabela 4.10: Reagentes utilizados na caracterização da água bruta

Dureza	
Cloreto Amônio PA	Ecibra
EDTA Sal Dissódico PA	Synth
Negro de Eriocromo T	Hopkin & Willians Ltd
Alcalinidade	
Ácido Sulfúrico PA - 96%	Synth
Bromo	
DPD Total Chlorine - 21056-69	Hach
Manganês	
Buffer Powder Citrate Type - 21076-69	Hach
Sodium Periodate - 21077-69	Hach
Ferro	
Ferro Ver 0 21057-69	Hach

Tabela 4.11: Reagentes utilizados na preparação de soluções de clorofórmio

Clorofórmio UV/HPLC – 98,9 %	Merck
Etanol PA - 96,0 %	Merck

Tabela 4.12: Reagentes utilizados na determinação da concentração de cloro livre no hipoclorito de sódio

Hipoclorito de Sódio PA - 4 a 6%	Vetec
Tiosulfato de Sódio	Merck
Amido Solúvel PA	Synth
Dicromato de Potássio	Synth
Iodeto de Potássio	Synth
Ácido Sulfúrico PA - 96%	Synth
Ácido Acético Glacial PA	Synth

Tabela 4.13: Reagentes utilizados na determinação de THM pelo método espectrofotométrico

THM Plus Reagente 1 - 27539-29	Hach
THM Plus Reagente 2 - 27540-48	Hach
THM Plus Reagente 3 - 27541-42	Hach
THM Plus Reagente 4 - 27566-99	Hach

Tabela 4.14: Reagentes utilizados na preservação das amostras enviadas para análise cromatográfica

Tiosulfato de Sódio	Merck
---------------------	-------

Tabela 4.15: Reagentes utilizados nas reações de oxidação

Hipoclorito de Sódio PA	Vetec
Permanganato de Potássio PA	Merck
Ácido Húmico PA	Aldrich
Brometo de Potássio PA	Merck

Tabela 4.16: Reagentes utilizados nos ensaios de "jarteste"

Sulfato de Alumínio PA	Vetec
Carvão Ativado em Pó	Bahiacarbon
Ácido Nítrico - 65%	Synth
Hidróxido de Sódio PA	JT Baker

O carvão ativado em pó (CAP) utilizado no trabalho foi doado pela Bahia Carbon e é da marca Bcarbon 125 FM, de origem vegetal (100% casca de coco), produzido com processo de ativação física com vapor d'água e calor (960 °C) para aplicações em purificação de efluentes municipais e industriais, orgânicos, tratamento de óleos essenciais, ciclamatos, glutamatos, álcoois, querosene, entre outros. Possui as características listadas na tabela 4.17.

Tabela 4.17: Especificações técnicas do carvão ativado Bcarbon FM 125

Característica	Valor
Número de iodo	Min. 750 mg/g
Número de melação	Min. 190
Adsorção de azul de metileno	Min. 12 g/100 g
pH	7,0 a 9,0
Densidade aparente	0,40 a 0,65 (\pm 0,05) g/cm ³
Granulometria: retido na malha 325 mesh	Máx. 8 %
Ferro	Máx. 0,01 %
Umidade ao embalar	Máx. 8 %
Solubilidade	Insolúvel em água e solventes orgânicos

Os filtros de papel utilizados nos ensaios de tratamento da água foram da marca Schleicher & Schuell, com as características mostradas na tabela 4.18.

Tabela 4.18: Especificações técnicas do papel de filtro faixa branca Schleicher & Schuell

Diâmetro nominal	110 mm
Tipo	589-2
Tamanho dos poros	4 a 12 mm
Filtração	média a rápida
Tempo de filtração (classificação de Herzberg)	140 s
Classificação	DIN 53 135: 2 b
Espessura da folha	0,19 mm
Peso específico	85 g/m ²

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos nas diferentes etapas da pesquisa, estando incluídos os estudos iniciais de escolha do manancial, caracterização da água bruta e análises espectrofotométricas de soluções de clorofórmio. Na primeira etapa buscou-se verificar a formação de THM na oxidação de soluções de ácidos húmicos e brometos com o permanganato de potássio bem como a eficiência desse em eliminar os precursores para oxidação com cloro livre. Na etapa seguinte avaliou-se a eficiência de remoção dos subprodutos formados durante a oxidação por adsorção em carvão ativado em pó (CAP) seguido de tratamento físico-químico da água.

5.1 *CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA E ESTUDOS INICIAIS*

Os estudos relativos à água bruta compreenderam a escolha do poço fornecedor de água para a pesquisa, através de ensaios de caracterização e o acompanhamento da qualidade da mesma no decorrer do trabalho de pesquisa.

5.1.1 Escolha do poço fornecedor de água bruta

Para a escolha da fonte de água bruta, foram analisados três poços artesianos da UNICAMP, sendo eles localizados nas proximidades do Ginásio Multidisciplinar, do Instituto de Matemática, Estatística e Ciências da Computação (IMECC) e do Instituto de Biologia (IB).

Foram realizadas três coletas de amostras de água em cada poço, nos dias 7, 12 e 20 de maio de 2004. Foram analisados os parâmetros turbidez, cor aparente, temperatura, pH, condutividade, alcalinidade, dureza, bromo, ferro total e manganês total. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 5.1. Deve-se salientar que não foram realizados os ensaios de todos os parâmetros para todas as coletas.

Tabela 5.1: Datas de coleta e resultados das análises para escolha do poço

Parâmetro	Data da coleta	Poço		
		IMECC	Ginásio	IB
Turbidez (UNT)	07/05/04	0,30	0,31	0,33
	12/05/04	0,24	0,34	0,19
Cor Aparente (uC)	07/05/04	15	15	13
	12/05/04	17	15	14
Temperatura (°C)	07/05/04	23,10	23,50	22,70
	12/05/04	25,70	26,20	25,80
pH	07/05/04	7,35	7,90	7,85
	12/05/04	7,28	7,35	7,47
Condutividade (µS/cm)	07/05/04	200	204	216
	12/05/04	200	206	215
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	20/05/04	88,90	85,40	88,20
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	12/05/04	46,80	43,77	57,20
	20/05/04	48,10	40,30	48,75
Bromo (mg Br ₂ /L)	07/05/04	< 0,05	< 0,05	4,98
	12/05/04	0,06	< 0,05	5,80
Ferro Total (mg/L)	07/05/04	< 0,02	0,30	0,04
	12/05/04	< 0,02	< 0,02	0,02
Manganês Total (mg/L)	07/05/04	1,1	1,2	0,4
	12/05/04	0,3	0,5	1,0

As águas dos poços analisados apresentaram características bem próximas para os parâmetros avaliados. A única exceção foi a alta concentração de bromo encontrada nas águas do poço do IB, em torno de 5,0 mg Br₂/L quando comparada com os valores em torno de 0,05 mg Br₂/L nas águas dos outros poços. Este fato se deve à presença de cloro na água do referido poço, que é um interferente, em qualquer nível para o método utilizado na detecção de bromo (HACH, 2001). A água dos três poços recebe a adição de cloro, porém, no caso do poço próximo ao IB, essa adição é feita anteriormente ao ponto de tomada de água.

Os dados de turbidez se mantiveram entre 0,20 e 0,35 uT e a cor aparente entre 13 e 17 uC. Os valores de alcalinidade e dureza ficaram em torno de 90 e 45 mg CaCO₃/L, respectivamente, típicos para águas subterrâneas. Nenhum das amostras analisadas apresentou concentrações de ferro e manganês acima de 0,30 mg/L.

O poço do IB foi descartado por apresentar cloro na água, o que poderia influir nos resultados da pesquisa. As outras duas opções apresentaram as características desejáveis para o presente estudo, sendo escolhido, como fornecedor de água bruta para o estudo, o poço próximo ao Ginásio Multidisciplinar, pela facilidade de acesso.

5.1.2 Monitoramento da qualidade da água bruta

Com o objetivo de se acompanhar possíveis variações na qualidade da água do poço escolhido, a cada coleta de água foram realizados ensaios de caracterização para os mesmos parâmetros avaliados durante a escolha da fonte a ser utilizada. No total, foram realizadas 17 coletas, concentradas principalmente no período de outubro a novembro de 2004, quando foram realizados os ensaios de oxidação e de tratamento da água oxidada. Os resultados obtidos demonstraram que a qualidade da mesma se manteve praticamente constante durante a fase experimental do estudo.

Na tabela 5.2 são mostrados os resultados obtidos para os parâmetros turbidez, cor aparente, temperatura, pH e condutividade, bem como os valores máximo, mínimo, médio e o desvio padrão. Na tabela 5.3 encontram-se os resultados de dureza, alcalinidade, bromo, ferro e manganês.

Tabela 5.2: Resultados obtidos para as análises de monitoramento da qualidade da água bruta, com as respectivas datas de coleta

Data da coleta	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Temperatura (°C)	pH	Condutividade (µS/cm)
07/05/04	0,31	15	23,5	7,90	204
12/05/04	0,34	15	26,2	7,35	206
20/05/04	<i>na</i>	<i>na</i>	<i>na</i>	<i>na</i>	<i>na</i>
31/08/04	0,20	12	<i>na</i>	8,30	144
08/09/04	1,00	20	27,9	7,55	167
14/09/04	0,90	20	26,2	8,06	163
21/09/04	0,80	18	27,6	7,86	168
28/09/04	0,85	19	28,5	8,11	169
19/10/04	0,06	22	27,2	8,07	154
25/10/04	0,11	18	24,4	8,14	158
27/10/04	0,20	30	24,5	8,11	164
03/11/04	0,11	6	28,6	7,90	165
08/11/04	0,06	5	26,7	8,16	159
11/11/04	0,11	11	25,4	8,14	160
17/11/04	0,13	12	25,2	8,28	160
22/11/04	0,16	9	26,4	8,30	163
29/11/04	0,16	8	26,9	8,17	160
Máximo	1,00	30	28,6	8,30	206
Média	0,34	15	26,3	8,03	167
Mínimo	0,06	5	23,5	7,35	144
Desvio Padrão	0,34	7	1,5	0,26	16

na - não avaliado

Tabela 5.3: Resultados obtidos para as análises de monitoramento da qualidade da água bruta, com as respectivas datas de coleta

Data da coleta	Dureza (mg CaCO3/L)	Alcalinidade (mg CaCO3/L)	Bromo (mg Br2/L)	Ferro (mg/L)	Manganês (mg/L)
07/05/04	na	na	< 0,05	0,30	1,20
12/05/04	43,8	na	< 0,05	< 0,02	0,50
20/05/04	40,3	85,4	na	na	na
31/08/04	62,0	108,0	na	< 0,02	1,25
08/09/04	64,9	111,2	0,060	< 0,02	1,00
14/09/04	64,8	111,9	0,060	< 0,02	0,40
21/09/04	63,0	111,0	< 0,05	< 0,02	0,80
28/09/04	63,0	116,0	< 0,05	< 0,02	1,10
19/10/04	64,5	82,3	< 0,05	0,52	1,20
25/10/04	67,5	87,5	< 0,05	< 0,02	0,70
27/10/04	65,0	84,0	< 0,05	< 0,02	0,30
03/11/04	68,0	112,2	< 0,05	< 0,02	0,50
08/11/04	66,2	110,9	0,050	< 0,02	0,20
11/11/04	67,2	111,9	< 0,05	< 0,02	0,30
17/11/04	65,8	109,9	< 0,05	0,02	0,20
22/11/04	65,5	109,9	< 0,05	< 0,02	0,20
29/11/04	65,7	109,0	< 0,05	< 0,02	< 0,2
Máximo	68,0	116,0	---	---	1,25
Média	62,3	104,1	---	---	0,66
Mínimo	40,3	82,3	---	---	0,20
Desvio Padrão	8,1	12,2	---	---	0,40

na - não avaliado

Analisando os dados presentes nas tabelas 5.2 e 5.3, pode ser observado que os valores de cor aparente e turbidez se mantiveram abaixo de 1,0 uT e 30 uC, com média de 0,34 uT e 15 uC, respectivamente. O valor de pH variou de 7,35 a 8,30 com média de 8,03 e não houve correções deste para a realização dos ensaios de oxidação. Vale ressaltar que o método utilizado para a determinação das concentrações de bromo total não detecta brometos (Br⁻). Não se realizou a análise estatística para os parâmetros ferro e bromo por estes se apresentarem abaixo do limite de detecção de seus respectivos métodos para cerca de 93 % e 81 % das amostras analisadas, respectivamente.

5.1.3 Detecção espectrofotométrica de THM em soluções de clorofórmio

Com o intuito de se averiguar a resposta do método THM Plus na detecção de clorofórmio, foram preparadas diversas soluções do mesmo, em diferentes concentrações, que foram posteriormente analisadas no DR 2500 da Hach.

O clorofórmio apresenta uma solubilidade em água igual a 0,8 g/100 mL, a 20 °C segundo LIDE (1998) e 0,5 g/100 g H₂O, a 25 °C, conforme MERCK (1996). Desta forma, para se obter uma solução estoque de clorofórmio utilizou-se o etanol como auxiliar de diluição.

Para o preparo das soluções, primeiramente foi realizada uma diluição de 4 mL de clorofórmio em etanol em um balão volumétrico de 100 mL, gerando a diluição 1. Desta, tomou-se 4 mL em um novo balão de 100 mL, sendo este preenchido com etanol, obtendo-se a diluição 2. Diluiu-se 6 mL da solução de clorofórmio em etanol num balão volumétrico de 250 mL, preenchido com água deionizada, gerando a diluição 3. Finalmente, transferiu-se 4 mL desta para um balão de 250 mL, obtendo-se a solução estoque de clorofórmio com concentração de 900 µg/L.

A partir da solução estoque, foram preparadas 11 diferentes soluções, com concentrações de clorofórmio variando de 5 até 198 µg/L, abrangendo toda a faixa de detecção do método. Na tabela 5.4 são mostradas as concentrações teóricas e as obtidas no espectrofotômetro para cada uma delas, bem como a diferença, em porcentagem, entre as duas.

Tabela 5.4: Dados de concentração teórica nas soluções de clorofórmio e valor obtido pelo método espectrofotométrico

Concentração teórica das soluções de clorofórmio ($\mu\text{g/L}$)	Concentração de THM detectada pelo método THM PLUS ($\mu\text{g/L}$)	Diferença %
5,4	25	363
18,0	38	111
36,0	43	20
54,0	56	4
71,9	65	-10
89,9	73	-19
107,9	78	-28
134,9	111	-18
152,9	115	-25
170,9	133	-22
197,8	128	-35

Os resultados obtidos demonstraram que as diferenças entre o valor obtido pelo método THM Plus da Hach e o valor teórico variaram entre 363 % a mais e 35 % a menos. A leitura das quatro soluções com concentrações teóricas menores, de 5,4 à 54,0 $\mu\text{g/L}$ ficaram acima do valor esperado enquanto que as restantes, de 71,9 à 89,9 $\mu\text{g/L}$ ficaram abaixo.

A partir dos dados da tabela 5.4, construiu-se o gráfico mostrado na figura 5.1. Neste, é mostrada a relação entre o valor teórico e o valor medido para as soluções, bem como o ajuste de uma reta com sua equação e o valor da regreção linear (R^2). O de R^2 (0,9719) indica que os pontos se aproximaram razoavelmente de uma reta. Pela equação da reta, obtiveram-se os valores do coeficiente angular (0,5811) e do coeficiente linear (23,712). Numa situação ideal, os valores esperados para os coeficiente linear e angular seriam de 0 e 1,0, respectivamente, indicando que o método mediu exatamente a concentração teórica da solução.

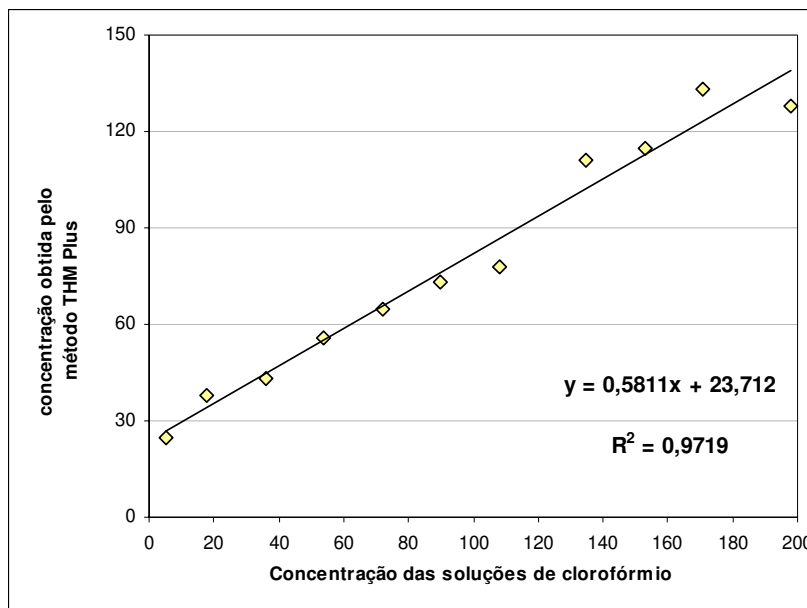


Figura 5.1: Relação entre o valor teórico e o valor medido para soluções de clorofórmio

As diferenças encontradas entre o valor teórico e o medido para as soluções podem ser tanto devido às dificuldades durante o preparo e manuseio das soluções, uma vez que o clorofórmio é pouco solúvel e bastante volátil, bem como devido à imprecisão do método de detecção utilizado. Estes resultados mostram, em um primeiro momento, que se houvesse uma maior disponibilidade financeira, ou de equipamentos e condições de recursos humanos disponibilizados, todas as amostras do trabalho deveriam ser analisadas pelos dois métodos: o cromatográfico e o espectrofotométrico.

5.1.4 Determinação da concentração do cloro livre no frasco

A determinação da concentração de cloro livre no frasco de hipoclorito de sódio comercial foi realizada pelo método SM 4500 Cl A (iodométrico) (AWWA, 1998) para três diferentes amostras.

Para a padronização do tiosulfato de sódio, dissolveu-se 0,4904 g de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), previamente seco em estufa, em um balão de 100 mL de água destilada, obtendo uma solução de concentração final próxima de 0,100 N. Em 80 mL de água destilada, adicionou-se 1 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, 10,00 mL da solução de dicromato de potássio a 0,100 N e 1 g de iodeto de potássio (KI), que foi mantido em repouso por 6 minutos em local abrigado da luz. Preparou-se uma solução de amido adicionando-se 0,5 g em 100 mL de água destilada, deixando ferver em uma chapa aquecedora. Os volumes foram pipetados do sobrenadante desta solução. Efetuou-se a titulação com a solução de tiosulfato de sódio até se obter uma cor levemente amarelada. Adicionou-se 1 mL da solução de amido (indicador) de forma que a solução se tornasse azul. Continuou-se a titulação até que o azul desaparecesse, anotando-se o volume de tiosulfato utilizado. A normalidade do tiosulfato é dada pelo inverso do volume de tiosulfato consumido.

O ensaio foi feito em duplicata, obtendo-se os volume de 11,1 e 10,0 mL e, conseqüentemente os valores de normalidade de 0,09009 e 0,10000 N, respectivamente. A normalidade do tiosulfato de sódio foi adotada como a média dos dois valores, e igual a 0,0947 N.

Para determinação da concentração do cloro livre, tomou-se 10 mL do frasco de hipoclorito de sódio 4-6 % e diluiu-se em 1.000 mL de água deionizada, obtendo-se uma solução a 1 %. Em seguida, tomou-se 20 mL desta solução em um erlenmayer de 125 mL e adicionou-se aproximadamente 1 g de iodeto de potássio (KI) e 0,5 mL de ácido acético glacial, deixando a solução com pH entre 3,0 e 4,0.

Preparou-se então uma solução de tiosulfato de sódio a 0,0237 N diluindo 125 mL do tiosulfato a 0,0947 N em 500 mL de água destilada. Efetuou-se a titulação da solução de hipoclorito com o tiosulfato de sódio (0,0237 N) até que a coloração amarelada fosse reduzida. Em seguida adicionou-se 1 mL da solução de amido, e titulou-se até que a coloração azulada desaparecesse, anotando-se o volume de tiosulfato de sódio consumido. O mesmo procedimento foi realizado em mais duas amostras de hipoclorito de sódio e em uma amostra considerada o branco, contendo

apenas água deionizada. A concentração de cloro livre foi determinada através da eq (9) (AWWA, 1998).

$$mg\ Cl\ em\ Cl_2\ /\ L = \frac{(A - B) \times N \times 35450}{mL\ amostra} \quad (9)$$

Onde:

A: volume gasto de tiosulfato de sódio para titular a amostra (mL)

B: volume gasto de tiosulfato de sódio para titular o branco (mL)

N: normalidade do tiosulfato de sódio (N).

Na tabela 5.5 são mostrados os resultados obtidos para as três amostras de hipoclorito de sódio, bem como a média adotada para concentração de cloro livre no frasco de hipoclorito de sódio para a preparação das soluções de cloro livre usadas nas oxidações.

Tabela 5.5: Concentração de cloro livre no frasco de hipoclorito de sódio

Amostra	Volume (A-B) (mL)	Concentração na diluição a 1 % (mg Cl ₂ /L)	Concentração no frasco (mg Cl ₂ /L)
1	16,6	697,33	69.733,7
2	16,5	693,14	69.313,6
3	16,3	684,73	68.473,4
média	---	---	69.173,6

Com base nos resultados obtidos na tabela 5.5, a média das concentrações para as três amostras do frasco de hipoclorito de sódio foi de 69.173,30 mg/L. Esta concentração foi adotada como padrão e foi utilizada para a confecção das soluções estoque de hipoclorito de sódio nas etapas de oxidação e tratamento por carvão ativado em pó.

A solução estoque de cloro foi preparada através da diluição de 20 mL de hipoclorito de sódio do frasco em um balão de 1000 mL com água deionizada, seguida da diluição de 60 mL da diluição em um balão de 250 mL também com água deionizada. A concentração final de cloro desta solução estoque foi de 332,03 mg/L, sendo este procedimento utilizado para todas as reações de oxidação em que se utilizou o cloro. A durabilidade desta solução, conforme DI BERNARDO et al. (2002), é de 24 horas, sendo refeita conforme o vencimento do prazo.

5.2 PRIMEIRA ETAPA – ENSAIOS DE OXIDAÇÃO

5.2.1 Considerações Gerais

Na primeira etapa da pesquisa buscou-se avaliar a formação de trihalometanos devido a oxidação de soluções contendo ácidos húmicos, com e sem brometos, com permanganato de potássio. Um segundo objetivo foi verificar a eficiência deste composto na eliminação dos precursores, para a posterior oxidação com cloro livre.

Foram realizadas oxidações em 18 reatores e gerando 54 amostras, coletadas com o tempo de contato de 1, 12 e 24 horas. As dosagens de precursores e oxidantes utilizadas para cada reator são mostradas na tabela 5.6.

Os ensaios que envolveram os reatores 1 a 12 são referentes à primeira fase desta etapa e tiveram por objetivo a verificação da influencia das dosagens de ácidos húmicos, íons brometo e permanganato de potássio na formação dos subprodutos. A numeração dos reatores diz respeito à ordem cronológica de realização dos ensaios e estes serão reagrupados por objetivo nos sub-itens seguintes. As reações nos reatores 13 a 18, segunda fase, serviram para se avaliar a formação de dos THM na oxidação pelo cloro livre precedido pelo permanganato de potássio. Os reatores 13 a 15 tiveram

tempo de contato de 30 minutos entre a aplicação dos dois oxidantes, e os reatores 16 a 18 de 60 minutos.

Tabela 5.6: Dosagens utilizadas em cada reator na 1° etapa da pesquisa

Reator	Dosagens (mg/L)			
	Ácidos Húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	Cloro livre
1	1,0	0,25	1,5	0,0
2	1,0	0,50	1,5	0,0
3	1,0	1,00	1,5	0,0
4	2,5	1,00	1,5	0,0
5	5,0	1,00	1,5	0,0
6	10,0	1,00	1,5	0,0
7	2,5	2,00	1,5	0,0
8	2,5	2,00	3,0	0,0
9	2,5	2,00	4,5	0,0
10	1,0	0,00	1,5	0,0
11	2,5	0,00	1,5	0,0
12	2,5	0,50	1,5	0,0
13	2,5	0,50	1,5	10,0
14	2,5	1,00	1,5	10,0
15	2,5	3,00	1,5	10,0
16	2,5	0,50	1,5	10,0
17	2,5	1,00	1,5	10,0
18	2,5	3,00	1,5	10,0

5.2.2 Primeira fase - Oxidações com permanganato de potássio

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em trihalometanos totais (TTHM) para as amostras oriundas dos ensaios de oxidação com permanganato de potássio, pelos dois métodos de detecção utilizados. Os trihalometanos totais constituem a soma da concentração dos quatro principais THM, sendo eles o clorofórmio, o bromodiclorometano, o dibromoclorometano e o bromofórmio.

5.2.2.1 Variação da Dosagem de Oxidante

Primeiramente, buscou-se verificar a influência da dosagem de permanganato de potássio na formação de trihalometanos, com a presença de brometos, para os tempos de contato de 1, 12 e 24 horas.

Foram preparadas soluções de ácidos húmicos e brometos nas concentrações de 2,5 e 2,0 mg/L, respectivamente. A adição do oxidante se deu em três dosagens diferentes, sendo elas 1,5, 3,0 e 4,5 mg/L. Na tabela 5.7 são apresentados os resultados de TTHM para as amostras coletadas em cada reator para os três tempos de contato. Apenas duas amostras foram analisadas por cromatografia. Na figura 5.2, são mostrados os mesmos resultados de forma gráfica, com os dados obtidos para o método espectrofotométrico.

Tabela 5.7: Resultados de TTHM para oxidação com diversas dosagens de permanganato de potássio

Reator	Dosagens (mg/L)			TTHM (µg/L)					
	Ácidos Húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	1 hora		12 horas		24 horas	
				E	C	E	C	E	C
7			1,5	6	x	4	x	3	3,36
8	2,5	2,00	3,0	7	x	nd	4,13	nd	x
9			4,5	13	x	nd	x	nd	x

E - resultados por espectrofotometria

C - resultados por cromatografia gasosa

nd - não detectado (abaixo do limite de detecção)

x - não avaliado

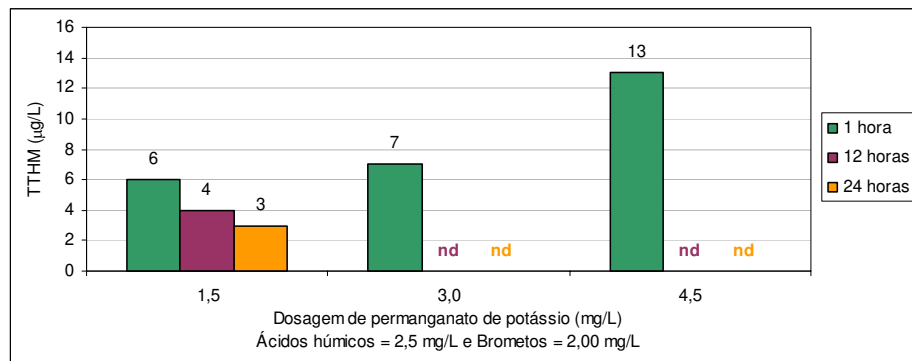


Figura 5.2: Variação da formação de TTHM em função da dosagem permanganato de potássio pelo método espectrofotométrico

Os resultados indicaram que não houve formação significativa de THM nas oxidações com permanganato de potássio. Os dados do espectrofotômetro indicaram uma pequena formação logo na primeira hora, mas que não se manteve para tempos de contato maior. Os valores obtidos neste ensaio estão bem abaixo do valor máximo permitido pela portaria GM 518 de 2004 (BRASIL, 2004).

Nas duas amostras analisadas por cromatografia gasosa resultaram em valores de 4,13 µg/L para o reator 7 com 24 horas de tempo de contato e 4,13 µg/L para o reator 8 com 12 horas de reação, confirmando-se que não houve formação expressiva de trihalometanos.

Na figura 5.3, é mostrada uma foto dos reatores com tempos de reação de aproximadamente 2 horas, 1 hora e 10 minutos, respectivamente para os reatores 7, 8 e 9. Os mesmos reatores são mostrados na foto da figura 5.4, porém com tempos de reação entre 12 e 14 horas. A diferença entre os volumes das soluções presentes em cada reator é devido ao foto da realização da amostragem em alguns deles. Observando-se a foto da figura 5.3, percebe-se que a adição do permanganato de potássio confere uma cor rosa às soluções. Com o aumento da concentração do oxidante, a cor se torna mais forte.

Comparando-se as duas fotos apresentadas, pode-se observar que conforme o tempo de reação aumenta, a cor passa a obter um tom mais amarelado. Com isso, pode-se concluir que ocorre reação entre o permanganato de potássio e o ácido húmico, de forma não imediata, apesar de não haver formação considerável de THM, conforme os dados presentes na tabela 5.7.



Figura 5.3: Foto dos reatores 7, 8 e 9 após tempos de reação de 2 horas, 1 hora e 10 minutos respectivamente



Figura 5.4: Foto dos reatores 7, 8 e 9 após tempos de reação de aproximadamente 14, 13 e 12 horas, respectivamente

5.2.2.2 Variação da Concentração de Ácidos Húmicos

Com os resultados dos ensaios nos reatores 3, 4, 5 e 6, obteve-se os dados presentes na tabela 5.8 e na figura 5.5 onde são mostrados os resultados de trihalometanos totais obtidos pelo método espectrofotométrico e pelo método cromatográfico, para os tempos de reação de 1, 12 e 24 horas. Essas reações foram realizadas com o intuito de se avaliar a influência da concentração de ácidos húmicos na formação de THM, na presença de brometos, através da oxidação com permanganato de potássio. A dosagem do oxidante foi mantida constante e igual a 1,5 mg/L. A concentração de ácidos húmicos foi variada de 1,0 até 10,0 mg/L, conforme apresentado na tabela, enquanto que a de brometos foi mantida em 1,00 mg/L.

Tabela 5.8: Resultados de TTHM para oxidação com permanganato de potássio variando-se a concentração de ácidos húmicos

Reator	Dosagens (mg/L)			TTHM (µg/L)					
	Ácidos Húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	1 hora		12 horas		24 horas	
				E	C	E	C	E	C
3	1,0			9	x	18	x	3	x
4	2,5	1,00	1,5	1	x	4	x	2	x
5	5,0			3	nd	8	x	8	x
6	10,0			13	x	8	nd	1	nd

E - resultados por espectrofotometria
 C - resultados por cromatografia gasosa
 nd - não detectado (abaixo do limite de detecção)
 x - não avaliado

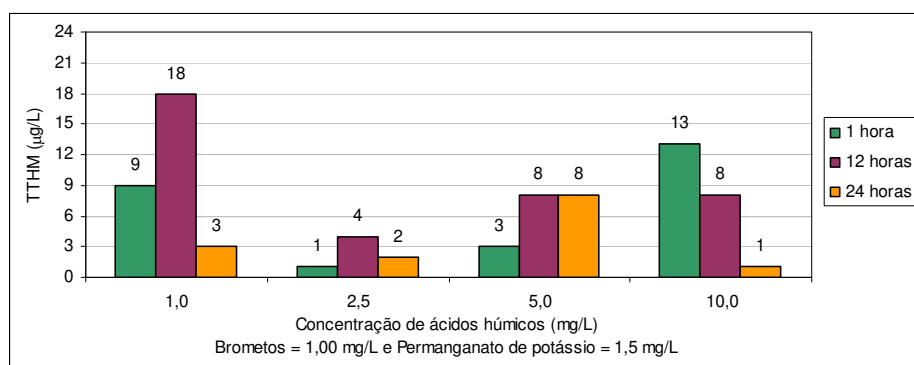


Figura 5.5: Variação da formação de TTHM em função da concentração de ácidos húmicos pelo método espectrofotométrico

A análise dos resultados obtidos na tabela 5.8 mostra que não é possível determinar nenhum comportamento da formação dos subprodutos halogenados devido à variação da concentração de ácidos húmicos. Assim como para os reatores 7 à 9, apresentados na tabela 5.7, verificou-se que não houve formação significativa de trihalometanos, chegando-se a um máximo de 18 µg/L quando medido pelo método espectrofotométrico.

Os dados obtidos das análises cromatográficas para o reator 5 com 1 hora de contato e para o reator 6 com 12 e 24 horas de contato confirmam a não formação de TTHM.

5.2.2.3 Variação da Concentração de Íons Brometo

Uma última análise foi realizada variando-se a concentração de íons brometo e mantendo-se fixa a dosagem do oxidante em 1,5 mg/L. Utilizou-se, para tanto, duas dosagens de ácidos húmicos: uma de 1,0 mg/L e outra de 2,5 mg/L. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 5.9.

Tabela 5.9: Resultados de TTHM para oxidação com permanganato de potássio variando-se a concentração de brometos

Reator	Dosagens (mg/L)			TTHM (µg/L)					
	Ácidos Húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	1 hora		12 horas		24 horas	
				E	C	E	C	E	C
10		0,00		12	x	5	nd	17	x
1	1,0	0,25	1,5	7	x	3	nd	4	x
2		0,50		9	nd	9	x	10	x
3		1,00		9	x	18	x	3	x
11		0,00		nd	nd	nd	x	10	nd
12	2,5	0,50	1,5	6	x	13	nd	1	nd
4		1,00		1	x	4	x	2	x
7		2,00		6	x	4	x	3	3,36

E - resultados por espectrofotometria

C - resultados por cromatografia gasosa

nd - não detectado (abaixo do limite de detecção)

x - não avaliado

Assim como nos casos anteriores, observou-se a formação de pequenas concentrações de TTHM, com máximo de 17 µg/L para as análises espectrofotométrica.

Nas figuras 5.6 e 5.7 são mostrados os resultados das análises espectrofotométricas da tabela 5.9, de forma gráfica, para as dosagens de 1,0 e 2,5 mg/L de ácidos húmicos, respectivamente.

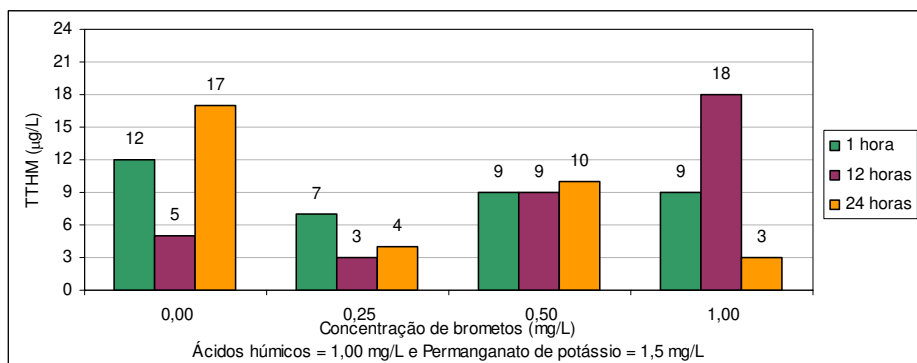


Figura 5.6: Variação da formação de TTHM em função da concentração brometos, para concentração de ácidos húmicos igual a 1,0 mg/L, pelo método espectrofotométrico

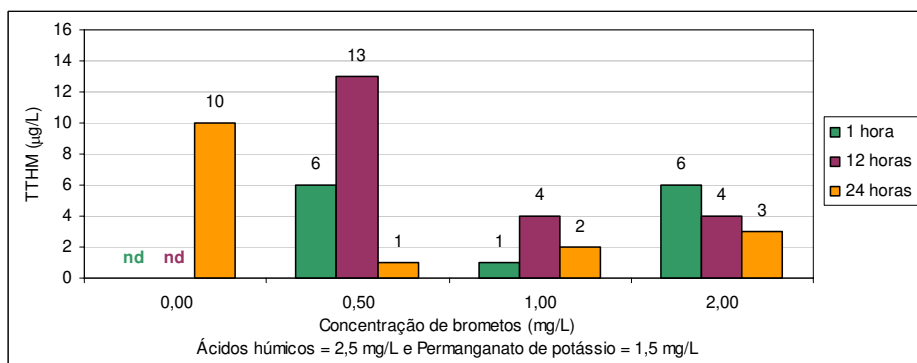


Figura 5.7: Variação da formação de TTHM em função da concentração brometos, para concentração de ácidos húmicos igual a 2,5 mg/L, pelo método espectrofotométrico

Analisando-se os gráficos e valores presentes nas figuras 5.6 e 5.7, não é possível identificar nenhum comportamento na formação de trihalometanos devido à variação da concentração dos íons brometo nem em relação ao tempo de reação. Os valores obtidos para concentração de 1,0 mg/L de ácidos húmicos ficaram em torno de 10 µg/L, levemente superiores aos obtidos para a concentração de 2,5 mg/L de ácidos húmicos que ficaram em torno de 6 µg/L.

De uma maneira geral, observou-se que não houve grandes formações de trihalometanos devido às oxidações de precursores apenas como permanganato de potássio. PASCHOALATO et al. (2003), estudando a formação de THM através da

oxidação de precursores com permanganato de potássio, para tempos e contato entre 0,5 e 120 horas não obtiveram nenhuma concentração acima do limite de detecção de 5,0 µg/L. Os resultados condizem com os obtidos na presente pesquisa.

5.2.3 Segunda fase - Oxidações com permanganato de potássio seguido de cloro livre

Nos reatores 13 a 18 as reações de oxidação tiveram por objetivo avaliar a formação de trihalometanos aplicando-se primeiramente o permanganato de potássio e, após um tempo de contato, o cloro livre. Para os reatores 13 à 15, este tempo de contato foi de 30 minutos, enquanto que para os reatores de 16 à 18 o adotado foi de 60 minutos.

As tabelas 5.10 e 5.11 contêm os resultados obtidos, para trihalometanos totais nas reações analisados pelos dois métodos de detecção. A primeira se refere ao tempo de contato de 30 minutos e a segunda ao tempo de contato de 60 minutos. As amostragens foram realizadas com 1, 12 e 24 horas de tempo de contato. As dosagens dos oxidantes foram mantidas constantes, assim como a concentração de ácidos húmicos, variando-se a concentração do íon brometo. As análises por cromatografia foram realizados apenas para os reatores 13, 14 e 15.

Tabela 5.10: Resultados de TTHM para oxidação com permanganato de potássio e cloro livre com tempo de contato de 30 minutos entre a aplicação dos oxidantes

Reator	Dosagens (mg/L)				TTHM (µg/L)					
	Ácidos Húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	Cloro livre	1 hora		12 horas		24 horas	
					E	C	E	C	E	C
13		0,50			85	122,19	104	242,51	115	345,58
14	2,5	1,00	1,5	10,0	82	147,84	104	287,80	130	409,45
15		3,00			41	168,67	125	x	120	456,80

E - resultados por espectrofotometria

C - resultados por cromatografia gasosa

x - não avaliado

Tabela 5.11: Resultados de TTHM para oxidação com permanganato de potássio e cloro livre com tempo de contato de 60 minutos entre a aplicação dos oxidantes

Reator	Dosagens (mg/L)				TTHM ($\mu\text{g/L}$)					
	Ácidos Húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	Cloro livre	1 hora		12 horas		24 horas	
					E	C	E	C	E	C
16		0,50			84	x	90	x	143	x
17	2,5	1,00	1,5	10,0	96	x	128	x	120	x
18		3,00			81	x	147	x	117	x

E - resultados por espectrofotometria

C - resultados por cromatografia gasosa

x - não avaliado

Observando-se os resultados presentes nessas tabelas, nota-se que houve formação considerável de trihalometanos, diferentemente do observado na primeira fase. Os valores obtidos pelo método espectrofotométrico foram superiores ao limite máximo permitido para águas de abastecimento, que é de $100 \mu\text{g/L}$ (BRASIL, 2004), para os tempos de contato de 12 e 24 horas e ficaram muito próximos deste para 1 hora de tempo de contato.

Os resultados obtidos pelo método cromatográfico para os reatores 13 à 15 foram bem superiores aos resultados espectrofotométricos, chegando a mais de $400 \mu\text{g/L}$ para 24 horas de reação e bem superiores ao máximo permitido.

Os dados referentes às análises espectrofotométricas das tabelas 5.10 e 5.11 podem ser observados nos gráficos das figuras 5.8 e 5.9. Os dados das análises cromatográficas presentes na tabela 5.10 foram utilizados para a construção do gráfico da figura 5.10.

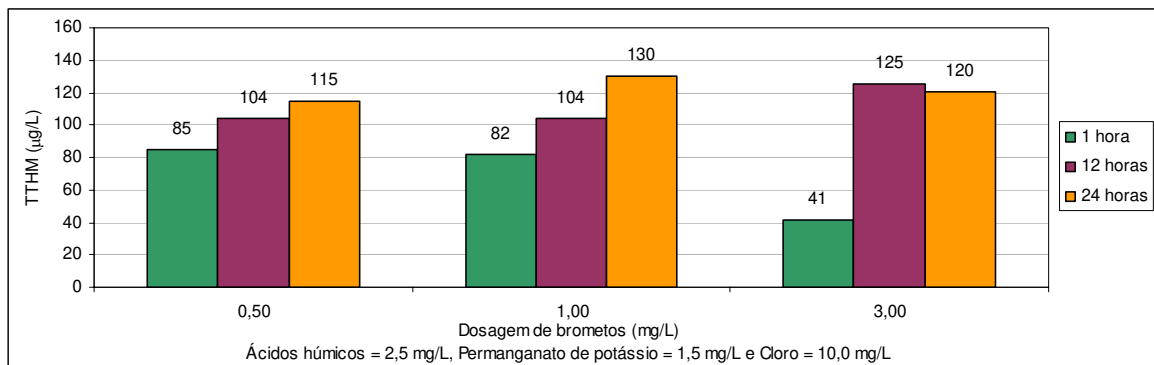


Figura 5.8: Variação da formação de TTHM em função da concentração brometos com tempo de contato de 30 minutos entre a aplicação dos oxidantes, pelo método espectrofotométrico

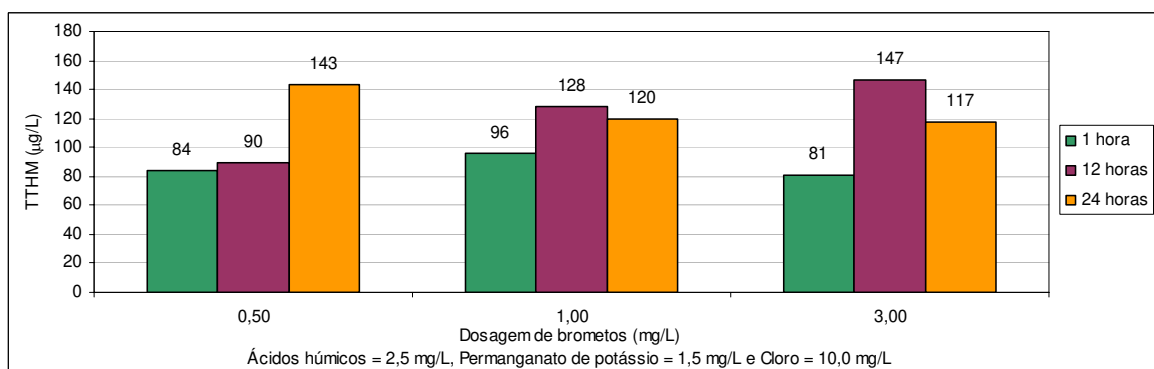


Figura 5.9: Variação da formação de TTHM em função da concentração brometos com tempo de contato de 60 minutos entre a aplicação dos oxidantes, pelo método espectrofotométrico

Analisando-se os dados das análises espectrofotométricas, percebe-se que não houve diferenças significativas na formação de THM devido às diferentes dosagens do íon brometo. Observou-se uma tendência do aumento das concentrações do subproduto com o incremento do tempo de contato.

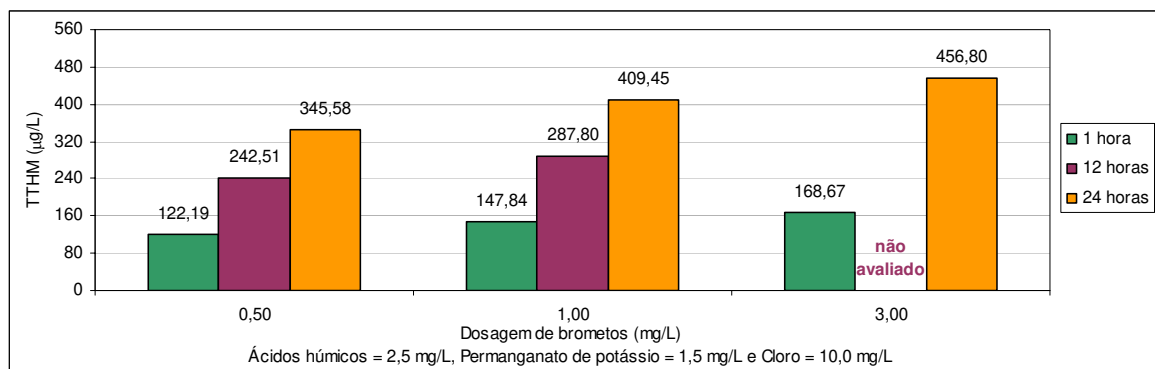


Figura 5.10: Variação da formação de TTHM em função da concentração brometos com tempo de contato de 30 minutos entre a aplicação dos oxidantes, pelo método cromatográfico

Os dados das análises cromatográficas, por sua vez, demonstraram uma clara dependência da concentração de brometos na formação dos subprodutos. Conforme foi se aumentando a presença dos íons, foi incrementada a formação de THM. O mesmo comportamento pode ser observado com a elevação do tempo de contato de 1 para 24 horas.

Os resultados obtidos foram comparados com os dados da de pesquisa de MARMO (2005), que utilizou apenas cloro livre na oxidação de soluções com as mesmas concentrações de precursores. Na tabela 5.12 e nas figuras 5.11 e 5.12 são apresentados os dados obtidos por este autor. As reações de oxidação se deram de modo semelhante às condições das utilizadas no presente trabalho. Os reatores foram numerados de 19 a 21 dando seqüência à numeração utilizada no presente estudo.

Tabela 5.12: Resultados de TTHM para oxidação com cloro livre variando-se a concentração de brometos

Reator	Dosagens (mg/L)				TTHM (µg/L)					
	Ácidos Húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	Cloro livre	1 hora		12 horas		24 horas	
					E	C	E	C	E	C
19		0,50			76	179,73	118	399,04	185	x
20	2,5	1,00	0,0	10,0	82	229,38	270	x	173	548,69
21		3,00			89	x	171	585,75	199	654,50

E - resultados por espectrofotometria
 C - resultados por cromatografia gasosa
 x - não avaliado

Fonte: Adaptado de MARMO, 2005.

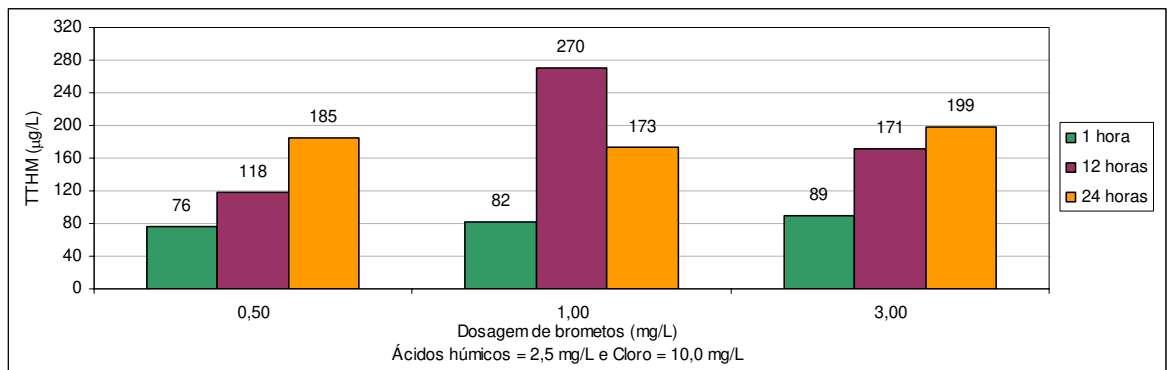


Figura 5.11: Variação da formação de TTHM em função da concentração e brometos devido a oxidação com cloro livre, pelo método espectrofotométrico

Fonte: Adaptado de MARMO, 2005.

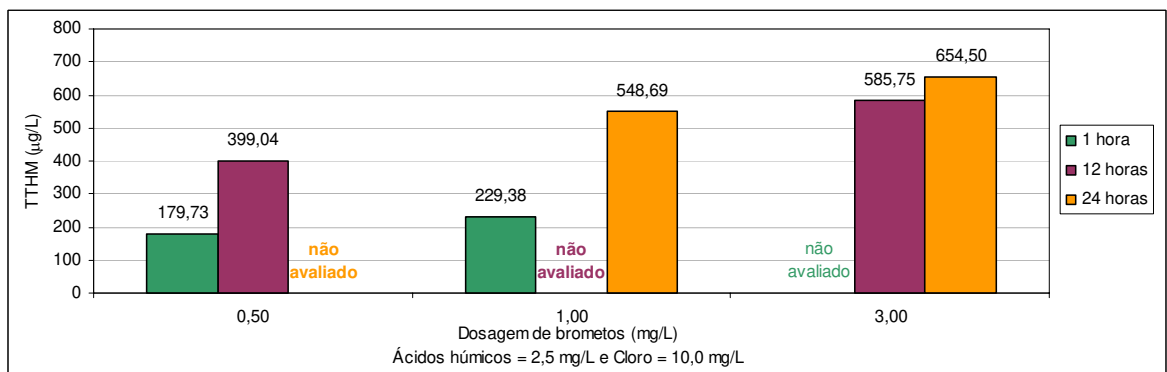


Figura 5.12: Variação da formação de TTHM em função da concentração de brometos devido a oxidação com cloro livre, pelo método cromatográfico

Fonte: Adaptado de MARMO, 2005.

Assim como para as reações utilizando os dois oxidantes combinados, não se observou uma grande variação na formação de THM devido à concentração do íon brometo, quando analisado pelo método espectrofotométrico. As concentrações foram mais elevadas conforme se aumentou o tempo de contato da solução com o oxidante, exceto para a amostra retirada com 24 horas de reação do reator 20.

As análises cromatográficas indicam que, assim como para os reatores 13 à 15 (tabela 5.10), o aumento da concentração de íons brometos gera um aumento na formação de THM. A relação com o tempo de contato também ficou evidente nestas análises.

Na tabela 5.13, são apresentados os resultados obtidos, pelos dois métodos de detecção, nos reatores 13 à 21, de forma a se observar o efeito da oxidação com o permanganato de potássio, anteriormente à adição do cloro, na formação de THM.

Tabela 5.13: Resultados para os dois métodos de detecção para formação de trihalometanos nas oxidações com permanganato de potássio seguido de cloro livre

Reator	Dosagens (mg/L)				Tempo de contato do permanganato de potássio	TTHM (µg/L)					
	Ácidos Húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	Cloro livre		1 hora		12 horas		24 horas	
						E	C	E	C	E	C
19			0,0		---	76	179,73	118	399,04	185	x
13	2,5	0,50	1,5	10,0	30 min	85	122,19	104	242,51	115	345,58
16			1,5		60 min	84	x	90	x	143	x
20			0,0		---	82	229,38	270	x	173	548,69
14	2,5	1,00	1,5	10,0	30 min	82	147,84	104	287,8	130	409,45
17			1,5		60 min	96	x	128	x	120	x
21			0,0		---	89	x	171	585,75	199	654,5
15	2,5	3,00	1,5	10,0	30 min	41	168,67	125	x	120	456,80
18			1,5		60 min	81	x	147	x	117	x

E - resultados por espectrofotometria

C - resultados por cromatografia gasosa

x - não avaliado

Com os dados presentes na tabela 5.13 foram obtidas as figuras 5.13, 5.14 e 5.15 onde são apresentados, de forma gráfica, os resultados espectrofotométricos obtidos para a formação dos subprodutos halogenados, para as concentrações de 0,50, 1,00 e 3,00 mg/L de brometos, respectivamente, nas oxidações com e sem a aplicação do permanganato de potássio antes do cloro livre. Em todos os reatores, conforme pode ser observado na tabela 5.13, a concentração de ácidos húmicos foi de 2,5 mg/l e as dosagens de oxidantes foram de 10,0 mg/L para o cloro e 1,5 mg/L para o permanganato de potássio, nos reatores que receberam a adição deste.

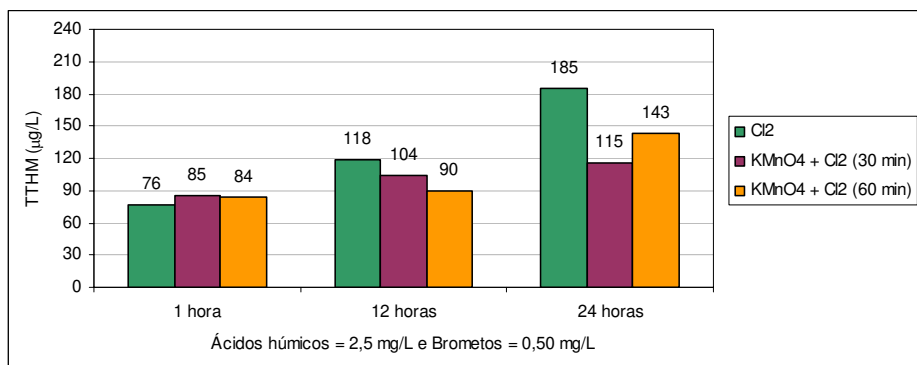


Figura 5.13: Variação da formação de TTHM em função do tempo de contato, para concentração de brometos igual a 0,50 mg/L, pelo método cromatográfico

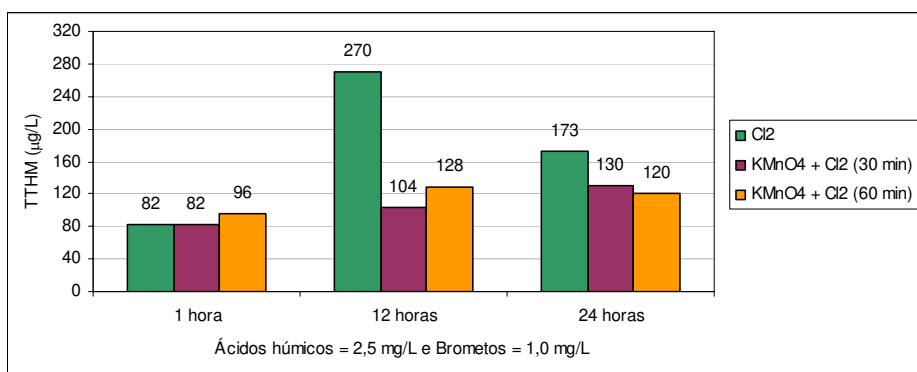


Figura 5.14: Variação da formação de TTHM em função do tempo de contato, para concentração de brometos igual a 1,00 mg/L, pelo método cromatográfico

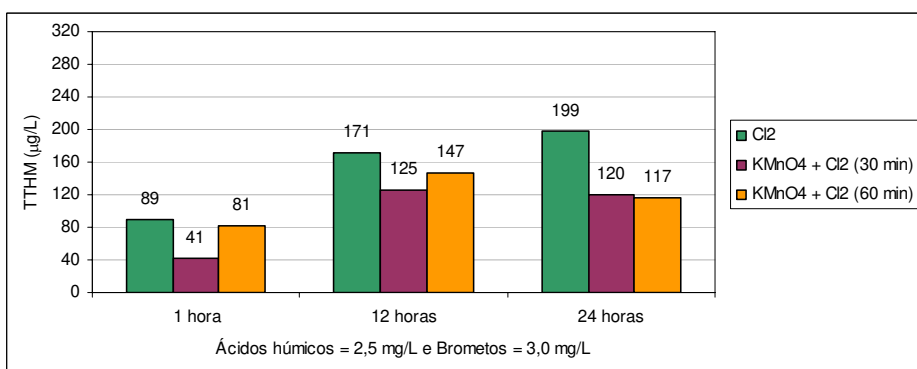


Figura 5.15: Variação da formação de TTHM em função do tempo de contato, para concentração de brometos igual a 3,00 mg/L, pelo método cromatográfico

Os dados das análises espectrofotométricas da tabela 5.13 mostram que a presença do permanganato de potássio, aplicado anteriormente ao cloro, gerou uma pequena redução para os valores de TTHM formados. Para o tempo de contato de uma hora praticamente não ocorreu redução na formação.

Os resultados cromatográficos presentes na tabela 5.13, apesar de menos numerosos, permitem perceber uma redução da formação de TTHM para todos os tempos de contato. Esta análise pode ser feita apenas para a formação nos reatores 13 e 14 para 1 hora de tempo de contato, 13 para 12 horas e 14 e 15 para 24 horas.

Não se verificou nenhuma tendência de comportamento devido às diferentes concentrações do íon brometo. Para todos os casos, a concentração encontrada com uma hora de reação ficou em torno de 80 µg/L e para 24 horas variaram de 173 a 199 e 115 a 143 µg/L, respectivamente para as oxidações com e sem a aplicação de permanganato de potássio.

O tempo de contato do permanganato de potássio antes da aplicação do cloro não influenciou na formação de THM. Este fato só pode ser avaliado pelos resultados das análises espectrofotométricas, uma vez que nenhuma das amostras que receberam permanganato de potássio com 60 minutos de tempo de contato foi analisada por processo cromatográfico.

Com os dados da tabela 5.13 foram construídas as tabelas 5.14 e 5.15, onde são apresentadas as diferenças, em porcentagem, entre a formação de TTHM com e sem a aplicação do permanganato de potássio. A primeira mostra os resultados relativos às análises espectrofotométricas enquanto que a segunda se refere às análises cromatográficas. A redução, em porcentagem, foi obtida a partir da diferença de THM produzido em 30 e 60 minutos com a quantidade determinada sem a adição de permanganato de potássio.

Tabela 5.14: Diferença percentual da formação de THM com e sem a aplicação de permanganato de potássio anteriormente ao cloro para o método espectrofotométrico

Dosagem de brometos (mg/L)	Tempo de contato do permanganato de potássio	Redução na formação de trihalometanos medidos por espectrofotometria (%)		
		1 h	12 h	24 h
0,50	30 min	-11,8	11,9	37,8
	60 min	-10,5	23,7	22,7
1,00	30 min	0,0	61,5	24,9
	60 min	-17,1	52,6	30,6
3,00	30 min	53,9	26,9	39,7
	60 min	9,0	14,0	41,2
Média		3,9	31,8	32,8

As diferenças na formação de THM foram mais acentuadas para os tempos de contato maiores, de 12 e 24 horas, ficando em média 30 % menores. Para o tempo de uma hora de reação chegou-se a verificar resultados até 17 % maiores e 54 % menores, porém na média a alteração das concentrações formadas foi de 4%.

Tabela 5.15: Diferença percentual da formação de THM com e sem a aplicação de permanganato de potássio anteriormente ao cloro para o método cromatográfico

Dosagem de brometos (mg/L)	Tempo de contato do permanganato de potássio	Redução na formação de trihalometanos medidos por espectrofotometria (%)		
		1 h	12 h	24 h
0,50	30 min	32,0	39,2	x
	60 min	x	x	x
1,00	30 min	35,5	x	25,4
	60 min	x	x	x
3,00	30 min			30,2
	60 min	x	x	x

x - não avaliado

Os dados obtidos por cromatografia apontam para uma redução média de 30% na formação de THM quando é feito o uso dos dois oxidantes. Esta análise pode ser feita apenas para alguns pontos com o tempo de contato de 30 minutos do permanganato de potássio, uma vez que as outras amostras não foram analisadas pelo

método cromatográfico. Não foi observada a influência das dosagens de brometos e nem tampouco dos tempos de reação após a aplicação do cloro.

Em resumo, observou-se que a aplicação do permanganato de potássio, anteriormente ao cloro, reduziu em torno de 30 % a formação de trihalometanos para os tempos de contato de 12 e 24 horas. Não houve diferença na formação devido ao tempo reação entre a aplicação dos dois oxidantes.

FIECK e BOLL (1980) apud USEPA (1999), estudando a aplicação de permanganato de potássio em substituição ao cloro na pré-oxidação em quatro ETA, concluíram que houve uma redução em torno de 30 % na formação de THM quando comparada aos valores obtidos com o uso de cloro. SINGER (1980), avaliando a eficiência do permanganato de potássio em oxidar precursores de THM, anteriormente a aplicação do cloro, obteve reduções de 30 a 40 % na formação destes compostos, em relação ao uso do cloro isoladamente. Os resultados obtidos por estes pesquisadores corroboram com os resultados obtidos na presente pesquisa.

5.2.4 Especificação dos compostos formados

As análises de trihalometanos por cromatografia gasosa permitem a especificação dos compostos formados em clorofórmio (CHCl_3), diclorobromometano (CHCl_2Br), clorodibromometano (CHClBr_2) e bromofórmio (CHBr_3). A soma destas quatro espécies resulta no valor de trihalometanos totais. Pelo método espectrofotométrico, esta especificação não é possível, pois o resultado é obtido diretamente em TTHM.

Nesta primeira etapa da pesquisa, 20 das 54 amostras foram analisadas pelo método cromatográfico. Deste total 12 foram oriundas das oxidações apenas com o permanganato de potássio e 8 das oxidações com permanganato de potássio seguido

de cloro livre. Na tabela 5.16 são apresentados os dados da especiação para as amostras oxidadas apenas com o permanganato de potássio (reatores 1 à 12).

Nas oxidações sem a utilização do cloro livre, o método cromatográfico detectou a formação de trihalometanos em apenas 2 da 8 amostra. O único composto presente nestas amostras foi o clorofórmio, em concentrações de 3,36, 4,13 µg/L. Estes resultados geraram alguma estranheza, uma vez que as amostras não continham cloro. Este fato se deu provavelmente por uma contaminação da amostra.

Tabela 5.16: Especiação dos THM formados nas oxidações com permanganato de potássio

Tempo de contato	Reator	Dosagens (mg/L)			Espécies de THM (µg/L)				THM (µg/L)
		Ácidos húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	CHCL ₃	CHCl ₂ Br	CHClBr ₂	CHBr ₃	
1 hora	2	1,0	0,50	1,5	nd	nd	nd	nd	nd
	5	5,0	1,00	1,5	nd	nd	nd	nd	nd
	11	2,5	0,00	1,5	nd	nd	nd	nd	nd
12 horas	1	1,0	0,25	1,5	nd	nd	nd	nd	nd
	6	10,0	1,00	1,5	nd	nd	nd	nd	nd
	8	2,5	2,00	3,0	4,13	nd	nd	nd	4,13
	10	1,0	0,00	1,5	nd	nd	nd	nd	nd
	12	2,5	0,50	1,5	nd	nd	nd	nd	nd
24 horas	6	10,0	1,00	1,5	nd	nd	nd	nd	nd
	7	2,5	2,00	1,5	3,36	nd	nd	nd	3,36
	11	2,5	0,00	1,5	nd	nd	nd	nd	nd
	12	2,5	0,50	1,5	nd	nd	nd	nd	nd

nd - não detectado (abaixo do limite de detecção)

Na tabela 5.17, são apresentados os dados referentes aos reatores 13 à 15, nos quais 8 das 9 amostras foram analisadas por cromatografia. Estes dados são mostrados graficamente na figura 5.16. Nos reatores 16 a 18, nenhuma análise cromatográfica foi realizada.

Tabela 5.17: Especificação dos THM formados nas oxidações com permanganato de potássio seguido de cloro livre

Tempo de contato	Reator	Dosagens (mg/L)				Espécies de THM (µg/L)				THM (µg/L)
		Ácidos húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	Cloro livre	CHCL ₃	CHCl ₂ Br	CHClBr ₂	CHBr ₃	
1 hora	13	2,5	0,50	1,5	10,0	5,30	15,95	56,06	44,88	122,19
	14	2,5	1,00	1,5	10,0	1,42	8,95	51,40	86,07	147,84
	15	2,5	3,00	1,5	10,0	nd	3,76	37,99	126,92	168,67
12 horas	13	2,5	0,50	1,5	10,0	4,91	37,14	114,21	86,25	242,51
	14	2,5	1,00	1,5	10,0	3,07	19,65	99,74	165,34	287,80
24 horas	13	2,5	0,50	1,5	10,0	15,23	48,93	160,03	121,39	345,58
	14	2,5	1,00	1,5	10,0	3,50	25,80	140,67	239,48	409,45
	15	2,5	3,00	1,5	10,0	0,59	10,59	99,55	346,07	456,80

nd - não detectado (abaixo do limite de detecção)

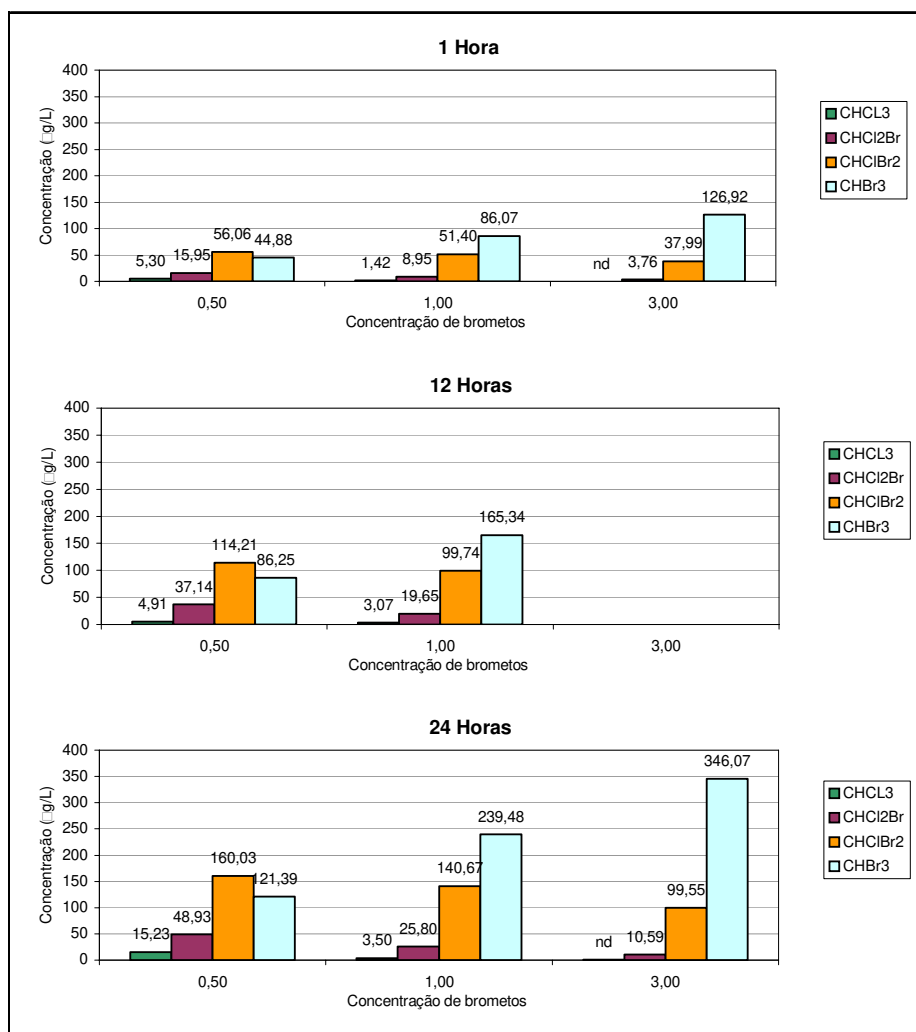


Figura 5.16: Especificação dos THM formados nas oxidações com permanganato de potássio seguido de cloro livre após 30 minutos, para os três tempos de amostragem

Os resultados apresentados na tabela 5.17 indicam que houve a predominância das espécies bromadas na composição do THM. A concentração máxima obtida para o clorofórmio foi de 15,23 µg/L enquanto que para o bromofórmio esse valor chegou à 346,07 µg/L. Para a concentração de 0,5 mg/L de brometos, o dibromoclorometano foi a espécie predominante e para as concentrações maiores de brometos essa predominância passou para o bromofórmio.

A partir da tabela 5.17, foi contruída a tabela 5.18 que contém as porcentagens de cada uma das quatro espécies estudadas em relação à concentração total de THM. Observa-se que a porcentagem de cada composto praticamente independe do tempo de contato, apesar da concentração total aumentar com o mesmo.

Tabela 5.18: Porcentagem das espécies formadas em relação à concentração total de THM

Tempo de contato	Reator	Dosagens (mg/L)				Espécies de THM (%)			
		Ácidos húmicos	Brometos	Permanganato de potássio	Cloro livre	CHCL ₃	CHCl ₂ Br	CHClBr ₂	CHBr ₃
1 hora	13	2,5	0,50	1,5	10,0	4,3	13,1	45,9	36,7
	14	2,5	1,00	1,5	10,0	1,0	6,1	34,8	58,2
	15	2,5	3,00	1,5	10,0	0,0	2,2	22,5	75,2
12 horas	13	2,5	0,50	1,5	10,0	2,0	15,3	47,1	35,6
	14	2,5	1,00	1,5	10,0	1,1	6,8	34,7	57,4
24 horas	13	2,5	0,50	1,5	10,0	4,4	14,2	46,3	35,1
	14	2,5	1,00	1,5	10,0	0,9	6,3	34,4	58,5
	15	2,5	3,00	1,5	10,0	0,1	2,3	21,8	75,8

O clorofórmio representou cerca de 4%, para a concentração de brometos de 0,5 mg/L, se chegando próximo a zero quando esta dosagem foi aumentada para 3,0 mg/L. O bromofórmio, por sua vez, representou 37 % para a menor dosagem de brometos, subindo para 76 %, conforme se aumentou essa dosagem para 3,0 mg/L. A soma da concentração das espécies bromofórmio e dibromoclorometano se manteve sempre acima dos 80 %, chegando a 98 %.

Na figura 5.17 é mostrado o cromatograma obtido na análise da amostra retirada do reator 13, com 24 horas de tempo de contato. Neste, pode-se observar os

picos relativos a cada espécie formada. A concentração de cada composto formado nesta amostra pode ser observada na tabela 5.17.

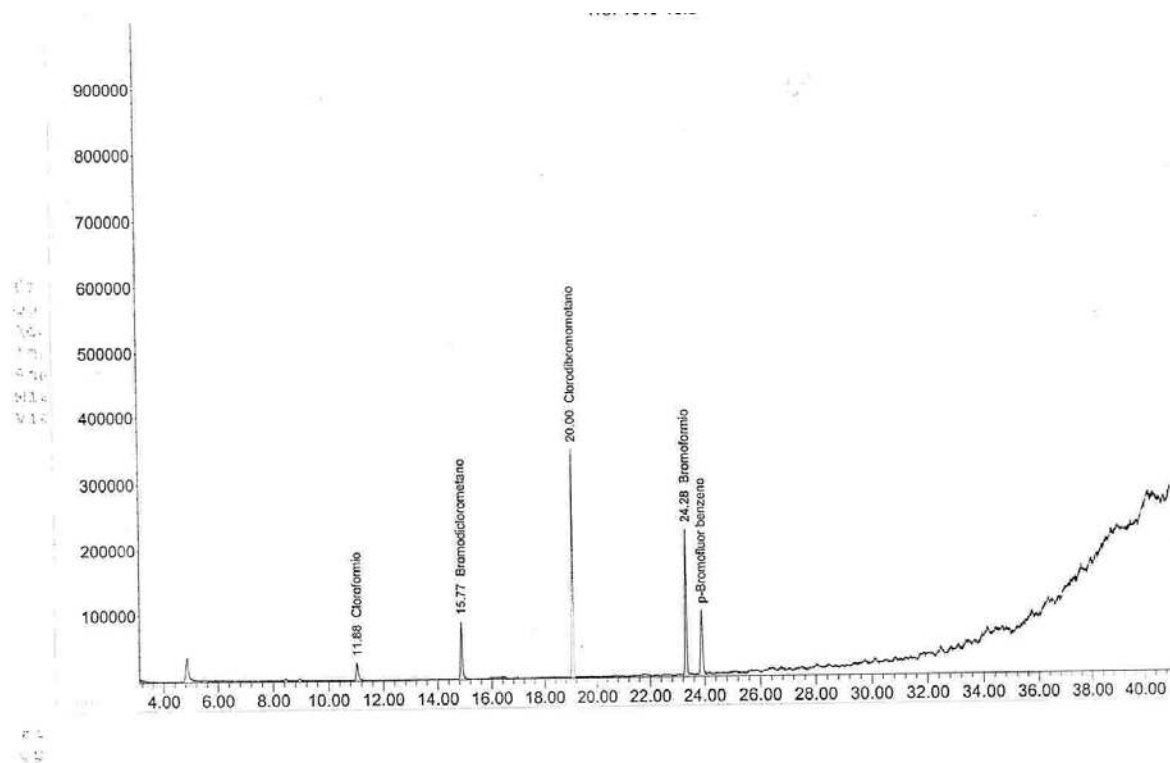


Figura 5.17: Cromatograma da amostra retirada do reator 13 com tempo de contato de 24 horas

Nas pesquisas realizadas por MARMO (2005) e BORGES (2002), verificou-se o mesmo comportamento quanto à predominância das espécies bromofórmio e dibromoclorometano, quando há presença de íons brometo na água oxidada. As mesmas pesquisas indicam que, quando ocorre a oxidação de substâncias húmicas com cloro livre, sem a presença de brometos, a espécie predominante é o clorofórmio.

5.3 SEGUNDA ETAPA – ENSAIOS DE REMOÇÃO DE THM

5.3.1 Considerações gerais

A segunda etapa da pesquisa buscou avaliar a eficiência de remoção de THM por adsorção em carvão ativado em pó (CAP), seguida de tratamento físico químico da água. Para tanto, numa primeira fase simulou-se ensaios de tratamento convencional a fim de se definir a melhor dosagem de coagulante e valor de pH para cada dosagem de CAP utilizada. Foram avaliados seis valores de pH e quatro dosagens de sulfato de alumínio.

A água a ser tratada será resultante da oxidação de soluções de substâncias húmicas e brometos utilizando-se o permanganato de potássio seguido de cloro livre. As dosagens de cada produto químico, bem como o tempo de contato entre os dois oxidantes foram adotados como os mesmos utilizados para o reator 18 da primeira etapa. O tempo de reação antes do tratamento será de 24 horas. Os parâmetros utilizados estão apresentados na tabela 5.19. As oxidações foram realizadas em bombonas de 50 L conforme item 4.1.7 da metodologia.

Tabela 5.19: Parâmetros da reação de oxidação utilizada na segunda etapa da pesquisa

Reator	Dosagens (mg/L)		Tempo de contato entre a aplicação dos oxidantes	TTHM após 24 horas (método espectrofotométrico)
18	Ácidos húmicos	2,5	60 minutos	117 (µg/L)
	Brometos	3,00		
	Permanganato de potássio	1,5		
	Cloro Livre	10,0		

5.3.2 Definição da dosagem de coagulante e do valor de pH

Para a definição das dosagens de coagulantes e valor de pH a ser ajustado para o tratamento da água, foram realizados 25 ensaios de “jarteste”, sendo quatro para cada uma das seis dosagens de CAP e um apenas por filtração, conforme descrito na metodologia, para se avaliar a necessidade da coagulação no tratamento. Os resultados obtidos para cada um dos ensaios são apresentados nas planilhas presentes no ANEXO I deste trabalho. Nelas estão presentes todos os dados referentes aos ensaios tais como caracterização da água bruta utilizada, parâmetros de gradiente de velocidade e tempo de detenção para as fases do tratamento, dosagens de produtos químicos utilizados, tanto para a oxidação como para o tratamento, resultados das análises de cor e turbidez para a amostra oxidada (inicial), após a adição de CAP e após a filtração (final), e remoções alcançadas.

Com os dados das planilhas do ANEXO I, foram construídas as tabelas 5.20 a 5.26. Nestas são mostrados os valores das dosagens de CAP e sulfato de alumínio e os valores de pH ajustado antes da adição de CAP e o obtido durante a coagulação. São apresentados também os resultados de cor aparente e turbidez para a água oxidada, chamada de inicial, para a água após a adição de CAP e para a água final, após a filtração. As remoções presentes nas tabelas foram calculadas com dos dados das amostras iniciais e após a adição de CAP, em relação à amostra final. Os dados em destaque são os referentes aos valores de pH e dosagem de coagulante adotados para a fase de tratamento.

Tabela 5.20: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 1 a 4, para dosagem de CAP igual a 10 mg/L

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP (mg/L)	Dosagem de Coagulante (mg/L)	pH		Cor Aparente (uC)			Remoção de Cor		Turbidez (UNT)			Remoção de Turbidez	
				Ajustado	Coagulação	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP
1	1	10,0	5,0	5,47	5,49	66	126	25	62,1%	80,2%	1,16	6,65	0,89	23,3%	86,6%
	2			6,03	6,05	66	105	26	60,6%	75,2%	1,16	5,58	0,57	50,9%	89,8%
	3			6,53	6,58	66	106	15	77,3%	85,8%	1,16	5,68	0,42	63,8%	92,6%
	4			7,04	7,06	66	122	18	72,7%	85,2%	1,16	5,63	0,66	43,1%	88,3%
	5			7,52	7,40	66	103	29	56,1%	71,8%	1,16	5,55	1,09	6,0%	80,4%
	6			8,04	7,70	66	115	19	71,2%	83,5%	1,16	5,98	1,07	7,8%	82,1%
2	1		15,0	5,47	5,29	68	96	14	79,4%	85,4%	1,25	5,16	0,81	35,2%	84,3%
	2			6,01	5,95	68	86	4	94,1%	95,3%	1,25	5,21	0,27	78,4%	94,8%
	3			6,30	6,46	68	87	1	98,5%	98,9%	1,25	5,32	0,13	89,6%	97,6%
	4			6,99	6,88	68	84	3	95,6%	96,4%	1,25	5,49	0,14	88,8%	97,4%
	5			7,47	7,17	68	83	9	86,8%	89,2%	1,25	5,13	0,25	80,0%	95,1%
	6			7,99	7,35	68	80	22	67,6%	72,5%	1,25	5,71	0,39	68,8%	93,2%
3	1		25,0	5,49	5,15	63	113	19	69,8%	83,2%	1,60	5,85	0,92	42,5%	84,3%
	2			6,03	5,85	63	111	3	95,2%	97,3%	1,60	6,07	0,22	86,3%	96,4%
	3			6,52	6,35	63	124	2	96,8%	98,4%	1,60	6,53	0,13	91,9%	98,0%
	4			7,03	6,77	63	118	5	92,1%	95,8%	1,60	5,63	0,37	76,9%	93,4%
	5			7,48	6,99	63	100	14	77,8%	86,0%	1,60	5,88	0,35	78,1%	94,0%
	6			8,00	7,14	63	111	9	85,7%	91,9%	1,60	5,89	0,20	87,5%	96,6%
4	1		40,0	5,51	4,78	83	142	26	68,7%	81,7%	1,08	5,30	0,95	12,0%	82,1%
	2			6,05	5,71	83	123	11	86,7%	91,1%	1,08	5,28	0,16	85,2%	97,0%
	3			6,49	6,19	83	129	7	91,6%	94,6%	1,08	5,60	0,09	91,7%	98,4%
	4			6,98	6,51	83	119	17	79,5%	85,7%	1,08	5,47	0,13	88,0%	97,6%
	5			7,50	6,70	83	127	26	68,7%	79,5%	1,08	5,50	0,16	85,2%	97,1%
	6			8,00	6,86	83	125	48	42,2%	61,6%	1,08	5,71	0,15	86,1%	97,4%

Tabela 5.21: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 5 a 8, para dosagem de CAP igual a 20 mg/L

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP (mg/L)	Dosagem de Coagulante (mg/L)	pH		Cor Aparente (uC)			Remoção de Cor		Turbidez (UNT)			Remoção de Turbidez	
				Ajustado	Coagulação	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP
5	1	20,0	5,0	5,53	5,52	73	199	22	69,9%	88,9%	1,14	10,30	1,22	-7,0%	88,2%
	2			6,04	6,07	73	198	7	90,4%	96,5%	1,14	9,60	0,59	48,2%	93,9%
	3			6,52	6,57	73	200	23	68,5%	88,5%	1,14	10,50	0,40	64,9%	96,2%
	4			7,02	7,00	73	184	24	67,1%	87,0%	1,14	10,50	0,79	30,7%	92,5%
	5			7,50	7,31	73	173	37	49,3%	78,6%	1,14	9,72	1,07	6,1%	89,0%
	6			7,99	7,52	73	191	33	54,8%	82,7%	1,14	10,60	1,37	-20,2%	87,1%
6	1		15,0	5,53	5,36	76	185	28	63,2%	84,9%	1,20	10,60	1,93	-60,8%	81,8%
	2			5,99	5,90	76	169	10	86,8%	94,1%	1,20	10,60	0,50	58,3%	95,3%
	3			6,53	6,44	76	180	15	80,3%	91,7%	1,20	10,50	0,31	74,2%	97,0%
	4			7,00	6,83	76	175	23	69,7%	86,9%	1,20	11,40	0,25	79,2%	97,8%
	5			7,48	7,07	76	193	14	81,6%	92,7%	1,20	10,50	0,29	75,8%	97,2%
	6			8,01	7,26	76	182	23	69,7%	87,4%	1,20	10,60	0,28	76,7%	97,4%
7	1		25,0	5,52	5,03	84	192	14	83,3%	92,7%	1,23	10,90	1,96	-59,3%	82,0%
	2			6,03	5,83	84	209	3	96,4%	98,6%	1,23	11,20	0,15	87,8%	98,7%
	3			6,51	6,35	84	202	3	96,4%	98,5%	1,23	10,70	0,23	81,3%	97,9%
	4			7,00	6,75	84	201	1	98,8%	99,5%	1,23	11,00	0,18	85,4%	98,4%
	5			7,46	6,95	84	198	5	94,0%	97,5%	1,23	11,70	0,22	82,1%	98,1%
	6			8,03	7,11	84	200	7	91,7%	96,5%	1,23	11,30	0,30	75,6%	97,3%
8	1		40,0	5,48	4,76	62	170	51	17,7%	70,0%	1,20	10,30	1,83	-52,5%	82,2%
	2			6,01	5,61	62	180	24	61,3%	86,7%	1,20	10,80	0,21	82,5%	98,1%
	3			6,51	6,18	62	176	29	53,2%	83,5%	1,20	10,20	0,20	83,3%	98,0%
	4			6,98	6,51	62	174	35	43,5%	79,9%	1,20	10,50	0,12	90,0%	98,9%
	5			7,53	6,74	62	177	21	66,1%	88,1%	1,20	10,80	0,17	85,8%	98,4%
	6			8,00	6,82	62	160	13	79,0%	91,9%	1,20	10,50	0,17	85,8%	98,4%

Tabela 5.22: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 9 a 12, para dosagem de CAP igual a 30 mg/L

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP (mg/L)	Dosagem de Coagulante (mg/L)	pH		Cor Aparente (uC)			Remoção de Cor		Turbidez (UNT)			Remoção de Turbidez	
				Ajustado	Coagulação	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP
9	1	30,0	5,0	5,53	5,47	46	257	25	45,7%	90,3%	1,21	15,40	1,79	-47,9%	88,4%
	2			6,04	6,02	46	245	23	50,0%	90,6%	1,21	15,30	1,01	16,5%	93,4%
	3			6,49	6,52	46	248	15	67,4%	94,0%	1,21	15,60	0,70	42,1%	95,5%
	4			6,99	6,99	46	232	21	54,3%	90,9%	1,21	15,00	0,49	59,5%	96,7%
	5			7,51	7,31	46	257	19	58,7%	92,6%	1,21	15,80	0,85	29,8%	94,6%
	6			7,98	7,54	46	235	16	65,2%	93,2%	1,21	15,10	0,71	41,3%	95,3%
10	1		15,0	5,47	5,20	74	250	30	59,5%	88,0%	1,03	13,90	1,96	-90,3%	85,9%
	2			6,00	5,90	74	272	3	95,9%	98,9%	1,03	15,70	0,24	76,7%	98,5%
	3			6,51	6,34	74	252	3	95,9%	98,8%	1,03	15,20	0,24	76,7%	98,4%
	4			6,97	6,71	74	260	1	98,6%	99,6%	1,03	14,80	0,21	79,6%	98,6%
	5			7,48	6,92	74	266	4	94,6%	98,5%	1,03	15,20	0,25	75,7%	98,4%
	6			8,02	7,11	74	254	10	86,5%	96,1%	1,03	14,20	0,33	68,0%	97,7%
11	1		25,0	5,51	4,89	58	245	42	27,6%	82,9%	1,27	15,60	2,11	-66,1%	86,5%
	2			6,03	5,72	58	226	18	69,0%	92,0%	1,27	15,70	0,32	74,8%	98,0%
	3			6,53	6,28	58	239	21	63,8%	91,2%	1,27	15,40	0,31	75,6%	98,0%
	4			6,98	6,68	58	220	15	74,1%	93,2%	1,27	14,10	0,27	78,7%	98,1%
	5			7,51	6,85	58	220	11	81,0%	95,0%	1,27	15,60	0,26	79,5%	98,3%
	6			8,01	6,93	58	241	27	53,4%	88,8%	1,27	15,80	0,30	76,4%	98,1%
12	1		40,0	5,51	4,67	46	225	32	30,4%	85,8%	1,23	15,40	2,81	-128,5%	81,8%
	2			5,97	5,44	46	229	5	89,1%	97,8%	1,23	15,10	0,73	40,7%	95,2%
	3			6,53	5,63	46	244	2	95,7%	99,2%	1,23	14,90	0,41	66,7%	97,2%
	4			7,03	6,45	46	236	3	93,5%	98,7%	1,23	15,90	0,40	67,5%	97,5%
	5			7,54	6,67	46	252	1	97,8%	99,6%	1,23	15,10	0,18	85,4%	98,8%
	6			8,05	6,83	46	242	2	95,7%	99,2%	1,23	16,00	0,23	81,3%	98,6%

Tabela 5.23: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 13 a 16, para dosagem de CAP igual a 50 mg/L

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP (mg/L)	Dosagem de Coagulante (mg/L)	pH		Cor Aparente (uC)			Remoção de Cor		Turbidez (UNT)			Remoção de Turbidez	
				Ajustado	Coagulação	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP
13	1	50,0	5,0	5,51	5,57	79	339	27	65,8%	92,0%	1,22	20,80	1,50	-23,0%	92,8%
	2			6,02	6,23	79	355	8	89,9%	97,7%	1,22	23,30	0,78	36,1%	96,7%
	3			6,52	6,70	79	348	8	89,9%	97,7%	1,22	22,90	0,49	59,8%	97,9%
	4			7,00	7,09	79	342	11	86,1%	96,8%	1,22	23,70	0,36	70,5%	98,5%
	5			7,54	7,27	79	361	16	79,7%	95,6%	1,22	22,70	0,49	59,8%	97,8%
	6			8,03	7,39	79	362	18	77,2%	95,0%	1,22	24,20	0,54	55,7%	97,8%
14	1		15,0	5,48	5,46	96	347	18	81,3%	94,8%	1,31	23,10	0,44	66,4%	98,1%
	2			5,98	6,09	96	383	29	69,8%	92,4%	1,31	27,60	0,34	74,0%	98,8%
	3			6,52	6,61	96	387	3	96,9%	99,2%	1,31	27,40	0,28	78,6%	99,0%
	4			7,03	6,97	96	369	17	82,3%	95,4%	1,31	25,60	0,34	74,0%	98,7%
	5			7,48	7,11	96	384	23	76,0%	94,0%	1,31	25,90	0,40	69,5%	98,5%
	6			8,00	7,22	96	380	18	81,3%	95,3%	1,31	25,50	0,36	72,5%	98,6%
15	1		25,0	5,51	5,03	70	353	28	60,0%	92,1%	1,14	23,10	2,80	-145,6%	87,9%
	2			6,00	5,84	70	363	5	92,9%	98,6%	1,14	24,00	0,17	85,1%	99,3%
	3			6,52	6,31	70	375	2	97,1%	99,5%	1,14	25,50	0,17	85,1%	99,3%
	4			7,04	6,60	70	368	2	97,1%	99,5%	1,14	24,20	0,19	83,3%	99,2%
	5			7,47	6,72	70	371	2	97,1%	99,5%	1,14	25,40	0,18	84,2%	99,3%
	6			7,99	6,86	70	357	3	95,7%	99,2%	1,14	25,20	0,26	77,2%	99,0%
16	1		40,0	5,48	4,61	59	383	27	54,2%	93,0%	1,05	23,75	2,73	-160,0%	88,5%
	2			6,00	5,56	59	406	4	93,2%	99,0%	1,05	26,70	0,26	75,2%	99,0%
	3			6,52	6,15	59	397	2	96,6%	99,5%	1,05	24,60	0,21	80,0%	99,1%
	4			7,01	6,44	59	386	4	93,2%	99,0%	1,05	24,80	0,30	71,4%	98,8%
	5			7,50	6,61	59	406	7	88,1%	98,3%	1,05	26,10	0,31	70,5%	98,8%
	6			7,98	6,71	59	405	4	93,2%	99,0%	1,05	26,30	0,32	69,5%	98,8%

Tabela 5.24: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 17 a 20, para dosagem de CAP igual a 100 mg/L

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP (mg/L)	Dosagem de Coagulante (mg/L)	pH		Cor Aparente (uC)			Remoção de Cor		Turbidez (UNT)			Remoção de Turbidez	
				Ajustado	Coagulação	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP
17	1	100,0	5,0	5,52	5,46	49	777	23	53,1%	97,0%	1,22	55,30	2,20	-80,3%	96,0%
	2			6,03	6,06	49	820	21	57,1%	97,4%	1,22	59,20	1,40	-14,8%	97,6%
	3			6,54	6,54	49	797	19	61,2%	97,6%	1,22	58,70	0,85	30,3%	98,6%
	4			7,00	7,00	49	807	21	57,1%	97,4%	1,22	56,50	0,81	33,6%	98,6%
	5			7,46	7,46	49	765	18	63,3%	97,6%	1,22	60,20	1,01	17,2%	98,3%
	6			8,02	8,02	49	823	16	67,3%	98,1%	1,22	59,40	0,59	51,6%	99,0%
18	1		15,0	5,46	5,45	55	943	8	85,5%	99,2%	1,01	62,80	0,51	49,5%	99,2%
	2			5,97	6,26	55	883	17	69,1%	98,1%	1,01	61,50	0,43	57,4%	99,3%
	3			6,46	6,75	55	1407	32	41,8%	97,7%	1,01	109,30	0,61	39,6%	99,4%
	4			7,02	7,03	55	795	19	65,5%	97,6%	1,01	50,70	0,60	40,6%	98,8%
	5			7,51	7,16	55	776	22	60,0%	97,2%	1,01	49,30	0,60	40,6%	98,8%
	6			8,01	7,31	55	786	13	76,4%	98,3%	1,01	52,50	0,59	41,6%	98,9%
19	1		25,0	5,45	4,92	53	810	62	-17,0%	92,3%	1,20	52,90	3,74	-211,7%	92,9%
	2			6,03	5,81	53	947	4	92,5%	99,6%	1,20	54,30	0,27	77,5%	99,5%
	3			6,54	6,30	53	935	24	54,7%	97,4%	1,20	52,70	0,22	81,7%	99,6%
	4			7,01	6,63	53	857	6	88,7%	99,3%	1,20	56,10	0,37	69,2%	99,3%
	5			7,53	6,79	53	950	9	83,0%	99,1%	1,20	53,40	0,37	69,2%	99,3%
	6			8,07	7,03	53	970	15	71,7%	98,5%	1,20	57,60	0,45	62,5%	99,2%
20	1		40,0	5,48	4,70	62	860	62	0,0%	92,8%	1,13	51,00	4,65	-311,5%	90,9%
	2			6,05	5,68	62	813	9	85,5%	98,9%	1,13	53,70	0,12	89,4%	99,8%
	3			6,48	6,12	62	943	14	77,4%	98,5%	1,13	59,00	0,23	79,6%	99,6%
	4			6,99	6,49	62	850	8	87,1%	99,1%	1,13	56,90	0,27	76,1%	99,5%
	5			7,47	6,57	62	890	12	80,6%	98,7%	1,13	51,90	0,22	80,5%	99,6%
	6			8,00	6,63	62	830	6	90,3%	99,3%	1,13	53,50	0,29	74,3%	99,5%

Tabela 5.25: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 21 a 24, para dosagem de CAP igual a 150 mg/L

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP (mg/L)	Dosagem de Coagulante (mg/L)	pH		Cor Aparente (uC)			Remoção de Cor		Turbidez (UNT)			Remoção de Turbidez	
				Ajustado	Coagulação	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação a amostra com CAP
21	1	150,0	5,0	5,42	5,44	88	1255	57	35,2%	95,5%	1,13	91,40	2,17	-92,0%	97,6%
	2			5,98	6,19	88	1350	29	67,0%	97,9%	1,13	87,50	2,11	-86,7%	97,6%
	3			6,51	6,68	88	1147	23	73,9%	98,0%	1,13	74,90	1,00	11,5%	98,7%
	4			6,95	7,04	88	1280	26	70,5%	98,0%	1,13	83,10	1,12	0,9%	98,7%
	5			7,51	7,27	88	1200	8	90,9%	99,3%	1,13	78,50	0,81	28,3%	99,0%
	6			8,03	7,39	88	1295	7	92,0%	99,5%	1,13	81,10	0,44	61,1%	99,5%
22	1		15,0	5,53	5,59	70	1625	19	72,9%	98,8%	1,13	108,50	0,53	53,1%	99,5%
	2			6,02	6,00	70	1240	25	64,3%	98,0%	1,13	78,90	0,70	38,1%	99,1%
	3			6,47	6,34	70	1390	8	88,6%	99,4%	1,13	84,30	0,49	56,6%	99,4%
	4			7,01	6,84	70	1460	13	81,4%	99,1%	1,13	92,20	0,64	43,4%	99,3%
	5			7,52	7,00	70	1747	13	81,4%	99,3%	1,13	110,30	0,68	39,8%	99,4%
	6			7,98	7,26	70	1353	11	84,3%	99,2%	1,13	89,10	0,50	55,8%	99,4%
23	1		25,0	5,52	5,16	53	1240	15	71,7%	98,8%	1,01	89,50	0,49	51,5%	99,5%
	2			6,01	5,72	53	1380	20	62,3%	98,6%	1,01	92,40	0,47	53,5%	99,5%
	3			6,51	6,18	53	1360	24	54,7%	98,2%	1,01	84,70	0,31	69,3%	99,6%
	4			6,99	6,62	53	1283	28	47,2%	97,8%	1,01	87,90	0,28	72,3%	99,7%
	5			7,47	6,86	53	1505	35	34,0%	97,7%	1,01	99,80	0,39	61,4%	99,6%
	6			7,98	6,98	53	1253	12	77,4%	99,0%	1,01	89,20	0,49	51,5%	99,5%
24	1		40,0	5,51	4,68	47	1180	116	-146,8%	90,2%	1,12	97,90	8,67	-674,1%	91,1%
	2			6,00	5,52	47	1115	7	85,1%	99,4%	1,12	85,20	0,32	71,4%	99,6%
	3			6,50	6,01	47	1100	17	63,8%	98,5%	1,12	89,80	0,40	64,3%	99,6%
	4			6,99	6,47	47	960	12	74,5%	98,8%	1,12	83,70	0,28	75,0%	99,7%
	5			7,49	6,64	47	1367	12	74,5%	99,1%	1,12	95,05	0,36	67,9%	99,6%
	6			8,03	6,80	47	1350	6	87,2%	99,6%	1,12	90,40	0,26	76,8%	99,7%

Tabela 5.26: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 25, sem a utilização de coagulante

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP (mg/L)	Dosagem de Coagulante (mg/L)	pH		Cor Aparente (uC)			Remoção de Cor		Turbidez (UNT)			Remoção de Turbidez	
				Amostra, sem ajuste	Após a adição de CAP	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação à amostra com CAP	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação à amostra com CAP
25	1	10	não utilizado	8,37	8,31	65	114	31	52,3%	72,8%	1,22	5,90	1,09	10,7%	81,5%
	2	20		8,36	8,30	65	167	26	60,0%	84,4%	1,22	10,50	1,58	-29,5%	85,0%
	3	30		8,36	8,25	65	244	24	63,1%	90,2%	1,22	15,00	1,57	-28,7%	89,5%
	4	50		8,36	8,18	65	380	36	44,6%	90,5%	1,22	25,90	2,05	-68,0%	92,1%
	5	100		8,35	8,04	65	783	37	43,1%	95,3%	1,22	55,60	2,62	-114,8%	95,3%
	6	150		8,34	7,95	65	1217	31	52,3%	97,5%	1,22	81,10	2,43	-99,2%	97,0%

Os resultados obtidos nos ensaios 1 a 4 são referentes aos estudos realizados para a dosagem de CAP igual a 10 mg/L. Esse dados são mostrado na tabela 5.20. De forma análoga, nas tabelas 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 são mostrados os resultados obtidos nos ensaios 5 a 24 para as dosagens de CAP iguais à 20, 30, 50, 100 e 150 mg/L, respectivamente.

Os dados das tabelas 5.20 a 5.25 mostram que para todas as dosagens de CAP foi possível atingir os valores máximos permitidos por lei para a cor aparente e a turbidez. As melhores remoções ocorreram para as dosagens de CAP mais elevadas, de 25,0 e 40,0 mg/L e para valores de pH entre 5,5 e 7,0.

Na tabela 5.26 são mostrados os dados referentes ao estudo de remoção do carvão ativado em pó apenas por filtração em papel de filtro, sem o uso de coagulantes. Para este ensaio, não houve correção do valor de pH, sendo este medido na amostra antes e depois da adição de CAP.

As medições de cor aparente inicial e turbidez inicial são referentes às amostras de água após a oxidação com permanganato de potássio e cloro livre por um período de 24 horas. Os valores obtidos nestes ensaios ficaram na faixa de 46 à 96 uC para cor aparente e de 1,01 e 1,60 uT para turbidez. Esses altos valores de cor se devem à presença do permanganato de potássio nas amostras, que gera uma coloração rosa, mesmo após o período de 24 horas de reação. Esta coloração pode ser vista, com leve sensibilidade visual, na foto da figura 5.18.

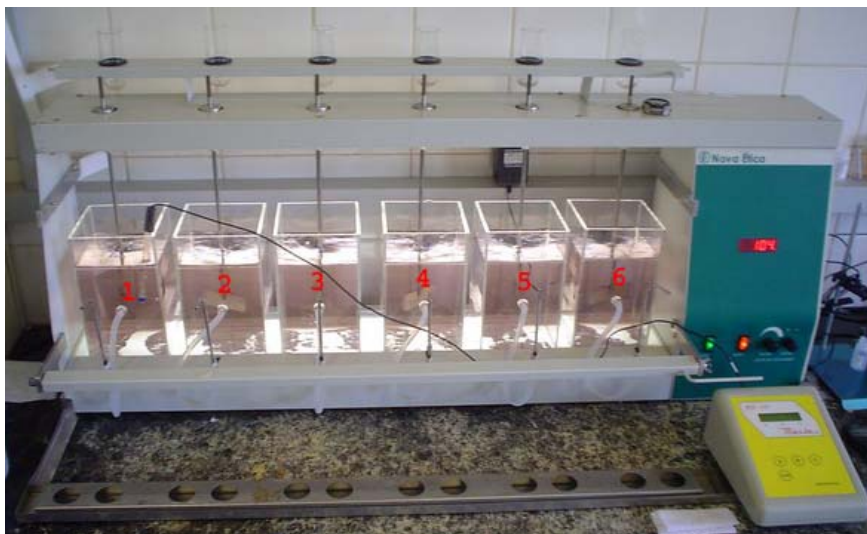


Figura 5.18: Foto mostrando a correção do pH nas amostras dos jarros de “jarteste” antes da adição de CAP

A adição do CAP foi feita individualmente para cada jarro, após a correção do valor de pH. Conforme pode ser observado nas tabelas 5.20 a 5.25, os valores encontrados para cor aparente e turbidez para cada dosagem de CAP foram variáveis de um jarro para outro. Este fato ocorre devido a adição individual em cada jarro e à dificuldade de se trabalhar com a solução de CAP, uma vez que este composto sedimenta com muita facilidade quando em suspensão. Com os dados médios obtidos das tabelas 5.20 a 5.25 para estes parâmetros foram construídos a tabela 5.27 e o gráfico da figura 5.19. Observa-se que houve um comportamento praticamente linear dos mesmos, com aumento da cor aparente e da turbidez para dosagens maiores de CAP. Na figura 5.20 é mostrada uma foto do ensaio 25, onde os jarros 1, 2, 3, 4, 5 e 6 possuíam dosagens de carvão ativado em pó iguais à 10, 20, 30, 50, 100 e 150 mg/L, respectivamente.

Tabela 5.27: Valores médios de cor aparente e turbidez para cada dosagem de CAP

Dosagem de CAP (mg/L)	Cor Aparente (uC)	Turbidez (UNT)
10	110	5,66
20	186	10,64
30	244	15,24
50	372	24,68
100	876	57,85
150	1310	89,39

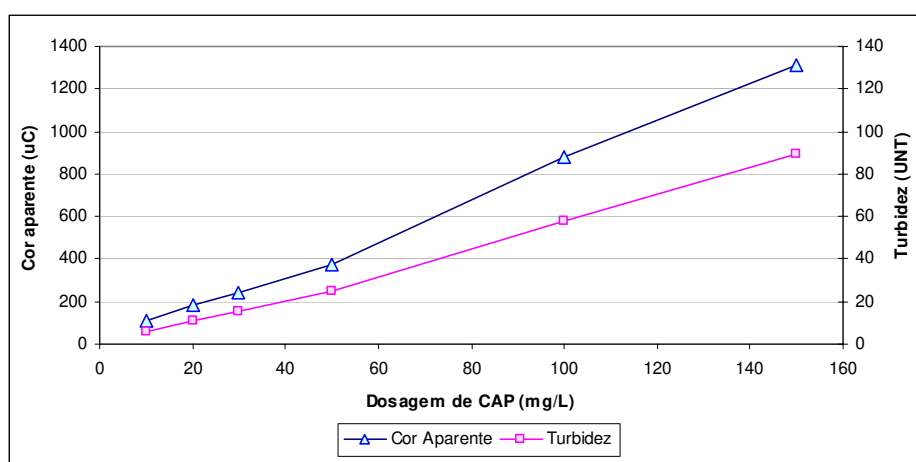


Figura 5.19: Variação dos valores de cor aparente e turbidez em função da dosagem de CAP aplicada



Figura 5.20: Foto dos jarros contendo as amostras oxidadas após a adição de CAP, no ensaio 25

A portaria GM 518/2004 limita os valores de turbidez em 1,0 uT após a filtração. Para consumo humano, os valores máximos permitidos para cor e turbidez são, respectivamente 15 uC e 1,0 uT (BRASIL, 2004).

No ensaio 25, sem a utilização do sulfato de alumínio alcançaram-se remoções de 97 %, tanto para a cor aparente como para a turbidez, em relação à amostra após a adição de CAP, conforme pode ser observado nos dados presentes na tabela 5.28. Essa remoção foi maior para as dosagens maiores do carvão. Em relação à amostra inicial, após a oxidação, a remoção de cor aparente ficou em torno de 50 % enquanto que para a turbidez, exceto para a dosagem de 10,0 mg/L de CAP, foram obtidos valores negativos, ou seja, a turbidez aumentou com o tratamento aplicado: filtração sem coagulação. Para todas as amostras, os valores finais dos dois parâmetros avaliados ficaram acima dos valores máximos permitidos pela portaria GM 518/2004.

Nos ensaios com a presença do coagulante, foram obtidos valores de remoção superiores a 98 %, e as amostras finais atenderam às especificações da legislação vigente. Estes resultados demonstraram que a coagulação é fundamental para o tratamento da água oxidada.

Após análise dos dados presentes nas tabelas 5.20 a 5.25 foram adotados os valores para dosagem de coagulante e de pH a serem utilizados para a remoção dos THM, mostrados resumidamente na tabela 5.28. A escolha foi feita levando em consideração não apenas as remoções de cor aparente e turbidez obtidas como também os valores finais obtidos para estes parâmetros.

Tabela 5.28: Parâmetros adotados para os ensaios de remoção de THM

Dosagem de CAP (mg/L)	Dosagem de Coagulante (mg/L)	pH	Cor aparente final (uC)	Remoção de cor aparente		Turbidez final (UNT)	Remoção de turbidez	
				Amostra inicial	Amostra com CAP		Amostra inicial	Amostra com CAP
10	25	6,5	2	96,8%	98,4%	0,13	91,9%	98,0%
20	25	7,0	1	98,8%	99,5%	0,18	85,4%	98,4%
30	40	7,5	1	97,8%	99,6%	0,18	85,4%	98,8%
50	25	6,5	2	97,1%	99,5%	0,17	85,1%	99,3%
100	40	6,0	9	85,5%	98,9%	0,12	89,4%	99,8%
150	40	8,0	6	87,2%	99,6%	0,26	76,8%	99,7%

5.3.3 Segunda fase - Ensaios de remoção de THM

5.3.3.1 Considerações gerais

Foram realizados os ensaios de “jarteste” 26 e 27, que tiveram por objetivo avaliar a remoção de trihalometanos por adsorção em carvão ativado em pó, em seis dosagens diferentes, seguida de tratamento convencional das amostras oriundas da oxidação de precursores de THM. A aplicação do carvão ativado em pó foi feita com os tempos de contato de 60 e 120 minutos para os ensaios 26 e 27, respectivamente. Os parâmetros utilizados para estes ensaios foram os mesmos da fase de definição dos valores de pH e dosagem de coagulante.

A amostra a ser tratada foi produzida através da oxidação da água bruta, com adição de ácidos húmicos e brometos, por permanganato de potássio seguido de cloro livre, após uma hora de contato do primeiro oxidante. As dosagens dos produtos químicos utilizados na oxidação foram as mesmas utilizadas na fase de definição de parâmetros e podem ser observadas na tabela 5.19. O tratamento se deu após 24 horas do início da reação de oxidação pelo cloro.

As análises realizadas na amostra após a oxidação foram denominadas como iniciais, enquanto que as realizadas após a filtração foram chamadas de finais. Para os parâmetros turbidez e cor aparente foram realizadas, também, análises após a adição de CAP.

As planilhas de laboratório para os ensaios de remoção de THM são apresentadas no ANEXO II deste trabalho. Os resultados obtidos para os parâmetros cor aparente e turbidez, bem como as remoções alcançadas, são apresentados na tabela 5.29. Nesta, são mostrados também as dosagens de CAP e sulfato de alumínio e os valores de pH ajustado e o de coagulação.

Tabela 5.29: Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios de “jarteste” 26 e 27

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP (mg/L)	Dosagem de Coagulante (mg/L)	pH		Cor Aparente (uC)			Remoção de Cor		Turbidez (UNT)			Remoção de Turbidez	
				Ajustado	Coagulação	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação à amostra com CAP	Inicial	Após adição de CAP	Filtrado	Em relação a amostra original	Em relação à amostra com CAP
26	1	10,0	25,0	6,47	6,46	92	103	5	94,6%	95,1%	1,17	5,96	0,24	79,5%	96,0%
	2	20,0	25,0	6,99	6,78	92	176	12	87,0%	93,2%	1,17	10,50	0,66	43,6%	93,7%
	3	30,0	40,0	7,49	6,74	92	237	4	95,7%	98,3%	1,17	14,40	0,24	79,5%	98,3%
	4	50,0	25,0	6,50	6,68	92	368	7	92,4%	98,1%	1,17	23,30	0,24	79,5%	99,0%
	5	100,0	40,0	6,03	5,84	92	750	4	95,7%	99,5%	1,17	55,00	0,17	85,5%	99,7%
	6	150,0	40,0	7,99	6,98	92	1313	7	92,4%	99,5%	1,17	84,60	0,48	59,0%	99,4%
27	1	10,0	25,0	6,51	6,67	83	99	4	95,2%	96,0%	1,10	5,09	0,23	79,1%	95,5%
	2	20,0	25,0	7,00	6,95	83	138	4	95,2%	97,1%	1,10	10,10	0,26	76,4%	97,4%
	3	30,0	40,0	7,50	6,79	83	225	5	94,0%	97,8%	1,10	13,40	0,50	54,5%	96,3%
	4	50,0	25,0	6,53	6,93	83	318	6	92,8%	98,1%	1,10	21,00	0,22	80,0%	99,0%
	5	100,0	40,0	6,02	6,19	83	773	5	94,0%	99,4%	1,10	53,90	0,16	85,5%	99,7%
	6	150,0	40,0	7,99	7,07	83	1253	9	89,2%	99,3%	1,10	79,40	0,62	43,6%	99,2%

Os resultados para cor e turbidez relativas às amostras após a adição de CAP e amostras finais são mostradas de forma gráfica nas figuras 5.21 e 5.22.

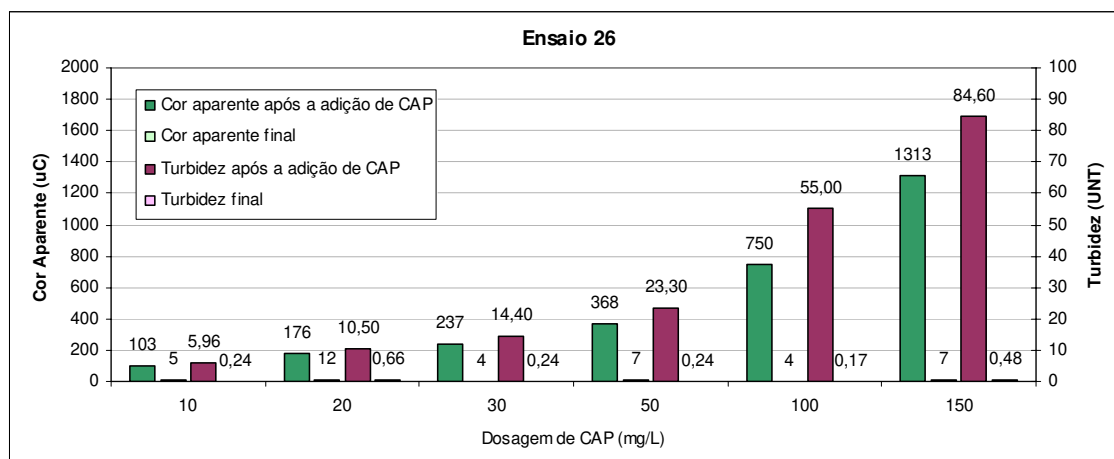


Figura 5.21: Variação da cor aparente e turbidez para a amostra após a adição de CAP e para a amostra final obtidos no ensaio 26

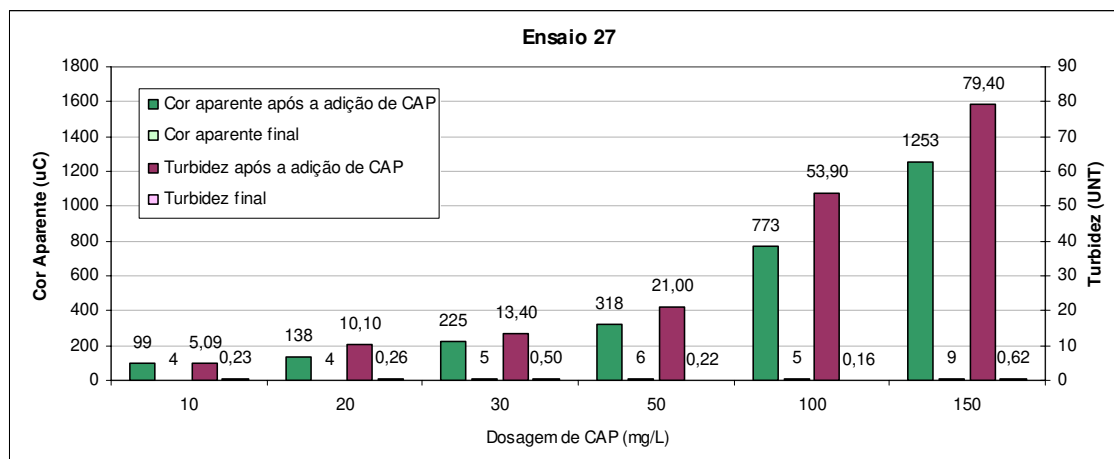


Figura 5.22: Variação da cor aparente e turbidez para a amostra após a adição de CAP e para a amostra final obtidos no ensaio 27

A remoção de cor aparente devido à presença de CAP foi superior a 95 % para quase todas as amostras. A única exceção foi a amostra retirada do jarro 2 do ensaio 29 onde a remoção foi de 93,2 %. A remoção de turbidez teve o mesmo comportamento atingindo 93,6 % para o mesmo jarro e mais de 95% para os outros jarros. Todas as

amostras finais apresentaram valores inferiores aos níveis máximos permitidos pela portaria GM 518/2004 (Brasil, 2004).

5.3.3.2 Resultados em trihalometanos totais

Para a avaliação da remoção dos trihalometanos, todas as análises foram realizadas pelos métodos espectrofotométrico e cromatográfico. Na tabela 5.30 são apresentados os dados obtidos para o TTHM na amostra inicial dos ensaios 26 e 27, bem como para a amostra com 24 horas de tempo de contato do reator 18 da etapa anterior. Deve ser notado que não foi realizada a análise por cromatografia gasosa para a amostra do reator 18.

Tabela 5.30: Valores de TTHM para as análises nas amostras iniciais dos ensaios 26 e 27 e para a amostra com 24 horas de tempo de contato reator 18 da etapa de oxidações

Origem da amostra	TTHM ($\mu\text{g/L}$)	
	Espectrofotometria	Cromatografia
Reator 18	117	na
Ensaio 26	108	250,29
Ensaio 27	86	258,33

na - não avaliado

Observa-se que nos dados obtidos pelo processo espectrofotométrico houve uma diferença de aproximadamente 25 % de entre os valores encontrados para as amostras dos ensaios 1 e 2, conforme mostrado na tabela 5.30. Para a amostra relativa ao ensaio 26, o valor encontrado ficou bem próximo obtido para a amostra do reator 18, mostrando que a oxidação foi reproduzida satisfatoriamente, uma vez que as dosagens de precursores e oxidantes nas duas amostras são teoricamente as mesmas.

Os dados cromatográficos, para as amostras iniciais dos ensaios 26 e 27 apontaram valores bem próximos para a concentração de TTHM. Este fato não confirmado com os resultados encontrados para os dados espectrofotométricos.

Os resultados obtidos, pelos dois métodos de detecção, para as amostras iniciais dos ensaios 26 e 27 representam as concentrações a serem removidas no tratamento. Os resultados espectrofotométricos ficaram próximos ao limite máximo permitido pela legislação brasileira (100 µg/L). Os resultados cromatográficos, por sua vez foram 250 % maiores do que este limite.

Na tabela 5.31 são mostrados os resultados de concentração de TTHM, analisadas pelos dois métodos de detecção, e as porcentagens de remoção para as amostras dos ensaios 26 e 27, antes e após o tratamento. Nos gráficos das figuras 5.23 e 5.24, construídos a partir dos dados presentes na tabela 5.31, são apresentados gráficos com o comportamento da variação de concentração de TTHM, conforme a dosagem de CAP aplicada, respectivamente para os métodos espectrofotométrico e cromatográfico.

Tabela 5.31: Resultados para TTHM e remoção nos ensaios 26 e 27

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP	TTHM (µg/L)		Remoção de TTHM	
			Espectrofotometria	Cromatografia	Espectrofotometria	Cromatografia
26	inicial	---	108	250	---	---
	1	10	76	115	29,6%	53,8%
	2	20	68	91	37,0%	63,5%
	3	30	58	83	46,3%	66,9%
	4	50	38	49	64,8%	80,5%
	5	100	27	19	75,0%	92,3%
	6	150	18	5	83,3%	97,8%
27	inicial	---	86	258	---	---
	1	10	57	74	33,7%	71,3%
	2	20	55	70	36,0%	73,0%
	3	30	44	54	48,8%	79,1%
	4	50	38	30	55,8%	88,2%
	5	100	16	14	81,4%	94,7%
	6	150	17	6	80,2%	97,9%

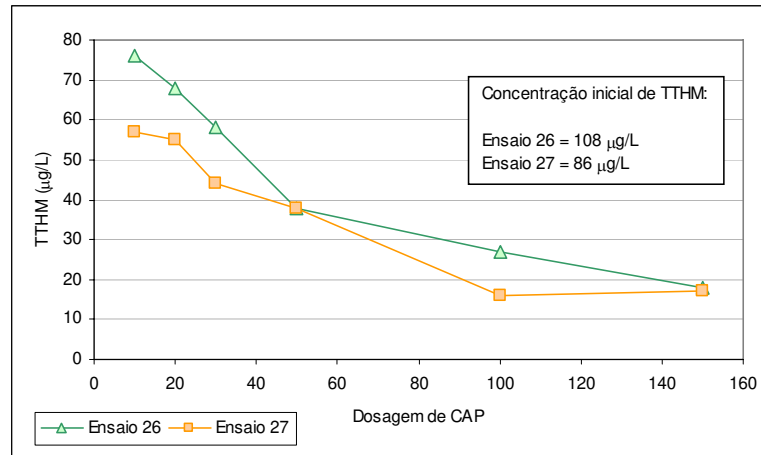


Figura 5.23: Variação da remoção de TTHM em função da dosagem de CAP, com os dados obtidos por espectrofotometria, para os ensaios 26 e 27

A análise da figura 5.23 mostra que, para o método espectrofotométrico, as concentrações finais de TTHM foram inferiores para o ensaio 27, onde o tempo de contato entre o carvão ativado e a amostra foi maior. Essa diferença foi de 20 µg/L para a dosagem de 10 mg/L de CAP e foi reduzindo conforme se aumentava esta dosagem. Os dados cromatográficos (figura 5.24) corroboram para esse comportamento apresentando diferença de 40 µg/L para a menor dosagem e apenas 1 µg/L para a dosagem de 150 mg/L.

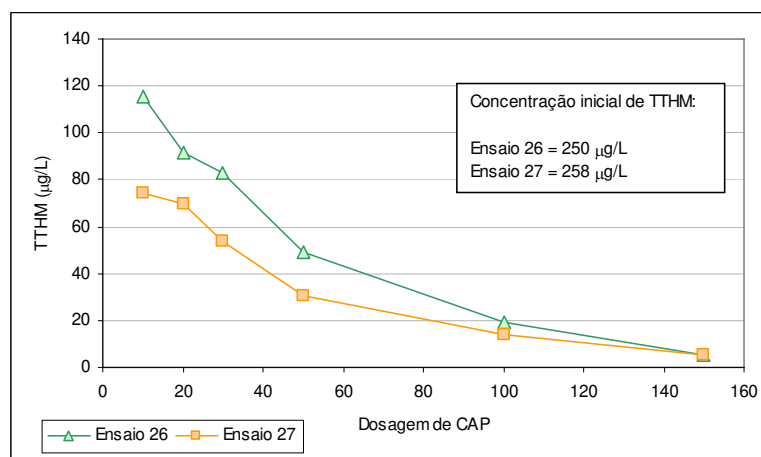


Figura 5.24: Variação da remoção de TTHM em função da dosagem de CAP, com os dados obtidos por cromatografia, para os ensaios 26 e 27

As concentrações de THM encontradas pelo método cromatográfico foram superiores às encontradas pelo método espectrofotométrico para as dosagens menores de CAP. Para as dosagens maiores de CAP, o comportamento foi inverso, com os resultados espectrofotométricos gerando valores superiores aos cromatográficos.

Nas figuras 5.25 e 5.26 são apresentadas as remoções de TTHM obtidas por cada método de detecção, para as mesmas amostras. Observa-se que pelo método espectrofotométrico, as remoções foram praticamente iguais para os dois tempos de contato com o CAP. Este fato pode ser devido à diferença observada nas concentrações iniciais de TTHM. Houve uma tendência de aumento na remoção para as dosagens maiores.

A remoção, quando analisada pelos valores obtidos no método cromatográfico, por sua vez, demonstra que o tempo de contato entre o carvão e a amostra influencia a remoção para valores baixos de dosagem de CAP, porém, quando estes valores são mais elevados a mesma influência não é verificada.

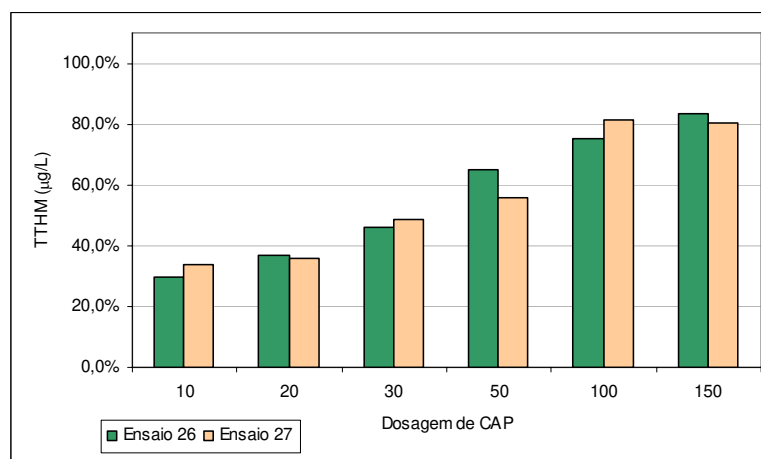


Figura 5.25: Variação da remoção de THM em função da dosagem de CAP aplicada, pelos dados obtidos por espectrofotometria

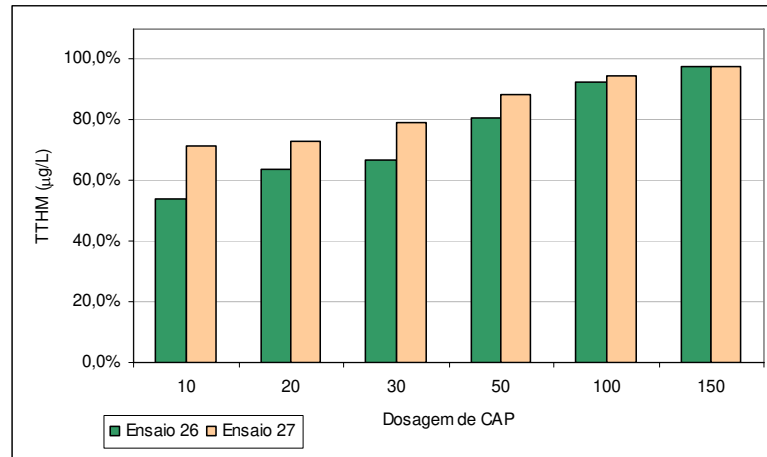


Figura 5.26: Variação da remoção de THM em função da dosagem de CAP aplicada, pelos dados obtidos por cromatografia

De maneira geral, obteve-se remoção de trihalometanos superior a 30 % e 40 % pelo processo de adsorção em carvão ativado seguido de tratamento convencional, quando analisadas pelos métodos espectrofotométrico e cromatográfico, respectivamente. As análises cromatográficas indicaram a remoção máxima de praticamente 98 % dos trihalometanos presentes na água enquanto que pelo método espectrofotométrico essa remoção chegou a apenas 83 %. Os valores de concentração final de TTHM para dosagens de CAP superiores a 100 mg/L ficaram abaixo da metade do limite máximo permitido pela portaria GM 518/2004, pelos dois métodos de detecção.

5.3.3.3 Especificação dos compostos formados

Na tabela 5.32 são mostradas as concentrações obtidas pelo método cromatográfico, para cada espécie de THM, nos ensaios 26 e 27.

Tabela 5.32: Especificação dos THM formados nos ensaios 26 e 27

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP	Espécies de THM (µg/L)				TTHM (µg/L)
			CHCL ₃	CHCl ₂ Br	CHClBr ₂	CHBr ₃	
26	inicial	---	nd	0,96	30,45	218,88	250,29
	1	10	nd	nd	10,06	105,43	115,49
	2	20	nd	nd	8,57	82,69	91,26
	3	30	nd	nd	7,88	74,84	82,72
	4	50	nd	nd	4,95	43,85	48,80
	5	100	nd	nd	2,53	16,63	19,16
	6	150	nd	nd	0,48	4,97	5,45
27	inicial	---	nd	1,12	29,98	227,23	258,33
	1	10	nd	nd	5,66	68,37	74,03
	2	20	nd	nd	5,26	64,40	69,66
	3	30	nd	nd	3,89	50,10	53,99
	4	50	nd	nd	1,64	28,74	30,38
	5	100	nd	nd	1,38	12,35	13,73
	6	150	nd	nd	0,60	4,94	5,54

nd - não detectado (abaixo do limite de detecção)

Assim como nos resultados obtidos na primeira etapa deste trabalho, houve uma grande predominância dos compostos bromofórmio e dibromoclorometano na composição do THM. O clorofórmio não foi detectado em nenhuma das amostras e o diclorometano apareceu apenas na amostra inicial e em concentração muito baixa quando comparada com o TTHM. A tabela 5.33 mostra as porcentagens de cada composto em relação à concentração total de THM.

Tabela 5.33: Porcentagem de cada espécie na composição dos TTHM detectados para os ensaios de tratamento

Ensaio	Jarro	Dosagem de CAP	Espécies de THM (%)			
			CHCL ₃	CHCl ₂ Br	CHClBr ₂	CHBr ₃
26	inicial	---	0,0	0,4	12,2	87,5
	1	10	0,0	0,0	8,7	91,3
	2	20	0,0	0,0	9,4	90,6
	3	30	0,0	0,0	9,5	90,5
	4	50	0,0	0,0	10,1	89,9
	5	100	0,0	0,0	13,2	86,8
	6	150	0,0	0,0	8,8	91,2
27	inicial	---	0,0	0,4	11,6	88,0
	1	10	0,0	0,0	7,6	92,4
	2	20	0,0	0,0	7,6	92,4
	3	30	0,0	0,0	7,2	92,8
	4	50	0,0	0,0	5,4	94,6
	5	100	0,0	0,0	10,1	89,9
	6	150	0,0	0,0	10,8	89,2

Os dados contidos na tabela 5.35 mostram que o bromofórmio representou cerca de 90 % do TTHM para todas as amostras, independentemente da dosagem de CAP utilizada na remoção. Os 10 % restantes foram representados pelo dibromoclorometano, que apresentou aproximadamente esta porcentagem para todas as amostras. O bromodichlorometano representou menos de 1 % nas amostras iniciais e não foi detectado nas amostras restantes.

5.4 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE THM

Durante a pesquisa, nas duas etapas, foram realizadas análises por espectrofotometria para todas as amostras, totalizando 68 análises. Deste total, 34 amostras, ou 50 %, foram analisadas também por cromatografia gasosa. Na tabela 5.34 são quantificadas as análises realizadas para cada etapa da pesquisa.

Tabela 5.34: Quantificação das análises espectrofotométricas e cromatográficas realizadas no trabalho de pesquisa

Etapa / fase		Análises Espectrofotométricas	Análises Cromatográficas	
1º Etapa	Fase 1	36	12	33%
	Fase 2	18	8	44%
	Total	54	20	37%
2º Etapa	Fase 2	14	14	100%
Total		68	34	50%

Os resultados das análises cromatográficas e espectrofotométricas para as amostras submetidas aos dois métodos dos reatores 1 a 12, são mostrados na tabela 5.35 e no gráfico da figura 5.27. Estes reatores pertencem à primeira etapa da pesquisa onde as oxidações foram realizadas apenas com permanganato de potássio, na presença ou não de brometos.

A análise destes dados não sugere nenhuma correlação entre os valores encontrados para cada método. Nestes reatores, a formação de THM foi muito baixa ou inexistente, produzindo dados pouco confiáveis.

Tabela 5.35: Resultados das análises espectrofotométricas e cromatográficas para as amostras submetidas aos dois métodos nos reatores de 1 a 12 da primeira etapa

Reator	Tempo de contato	TTHM ($\mu\text{g/L}$)	
		Espectrofotometria	Cromatografia
2	1 hora	9	0,00
5		3	0,00
11		0	0,00
1	12 horas	3	0,00
6		8	0,00
8		0	4,13
10		5	0,00
12		13	0,00
6	24 horas	1	0,00
7		3	3,36
11		10	0,00
12		1	0,00

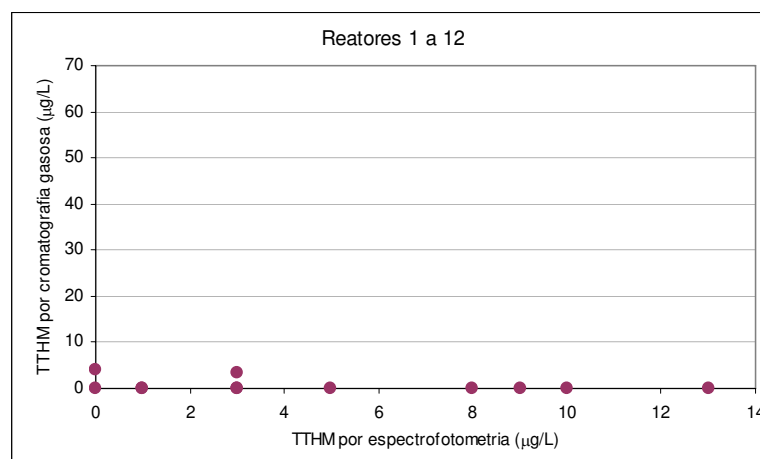


Figura 5.27: Correlação entre os valores obtidos das análises cromatográficas e espectrofotométrica para os reatores 1 a 12 da primeira etapa

Na tabela 5.36 são apresentados os resultados para os dois métodos para os reatores 13 a 15. Estes dados são referentes à oxidação com cloro livre precedido de permanganato de potássio. Deve se destacar que nos reatores 16 a 18 não foi realizada nenhuma análise de amostras por processo cromatográfico. No gráfico da figura 5.28,

buscou-se avaliar a correlação entre os valores obtidos por cada método para uma mesma amostra. Neste gráfico a disposição dos dados indica uma fraca correlação para os dados obtidos, apresentando uma regressão linear (R^2) igual a 0,632.

Tabela 5.36: Resultados das análises espectrofotométricas e cromatográficas para as amostras submetidas aos dois métodos nos reatores 13 a 15 da primeira etapa

Reator	Tempo de contato	TTHM ($\mu\text{g/L}$)	
		Espectrofotometria	Cromatografia
13	1 hora	85	122,19
14		82	147,84
15		41	168,67
13	12 horas	104	242,51
14		104	287,8
13	24 horas	115	345,58
14		130	409,45
15		120	456,8

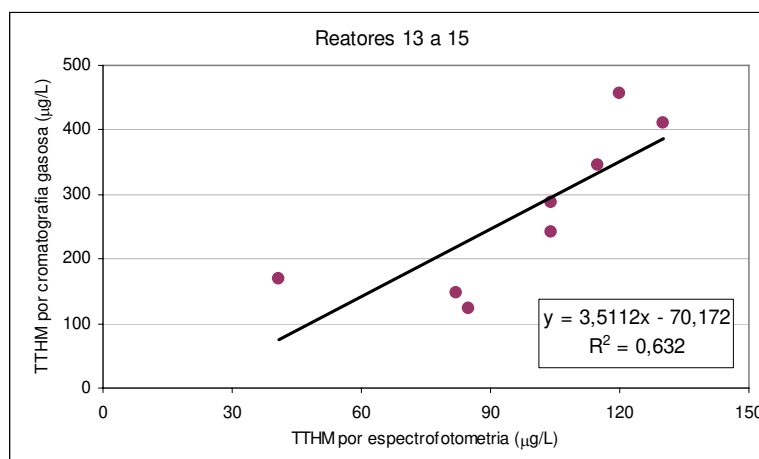


Figura 5.28: Correlação entre os valores obtidos das análises cromatográficas e espectrofotométrica para os reatores 13 a 15 da primeira etapa

Os resultados dos dois métodos para a segunda etapa da pesquisa são mostrados na tabela 5.37. O gráfico da figura 5.29, correlacionando os valores obtidos para cada método, mostra uma correlação um pouco melhor do que o apresentado para os dados dos reatores 13 a 15. Ainda assim, não se obteve uma boa correlação ficando a regressão linear em 0,8565.

Tabela 5.37: Resultados das análises espectrofotométricas e cromatográficas para as amostras submetidas aos dois métodos nos ensaios 26 e 27 da segunda etapa

Ensaio	Jarro	TTHM (µg/L)	
		Espectrofotometria	Cromatografia
26	Inicial	108	250,29
	1	76	115,49
	2	68	91,26
	3	58	82,72
	4	38	48,8
	5	27	19,16
	6	18	5,45
27	Inicial	86	258,33
	1	57	74,03
	2	55	69,66
	3	44	53,99
	4	38	30,38
	5	16	13,73
	6	17	5,54

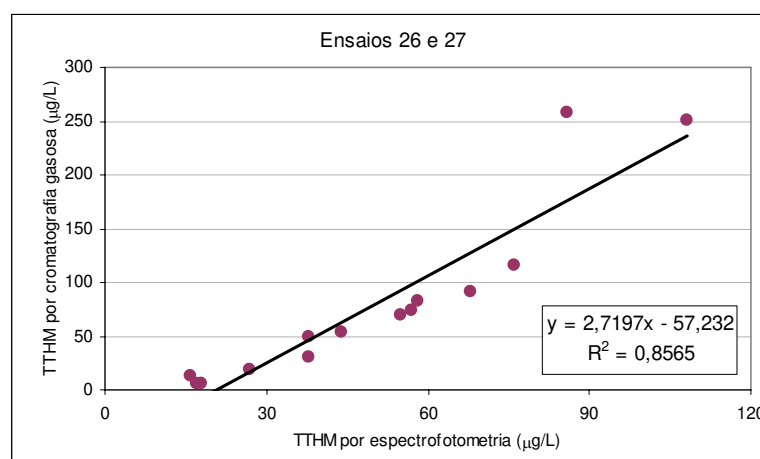


Figura 5.29: Correlação entre os valores obtidos das análises cromatográficas e espectrofotométrica nos ensaios 26 e 27 da segunda etapa

Na figura 5.30, é apresentado um gráfico consolidando os resultados obtidos, para os dois métodos, para toda a fase experimental da pesquisa. Para este, a regressão linear ficou em 0,8435, valor próximo ao obtidos para os dados da segunda etapa da pesquisa. As equações das curvas ajustadas, porém, mostrou grandes diferenças, principalmente no diz respeito ao coeficiente linear.

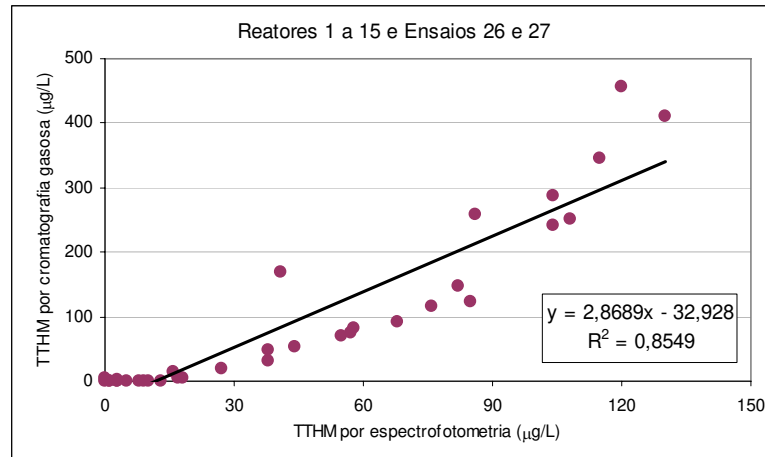


Figura 5.30: Correlação entre os valores obtidos das análises cromatográficas e espectrofotométrica nas duas etapas do trabalho de pesquisa

De uma maneira geral, pode-se observar que as análises, quando realizadas pelo método espectrofotométrico, apresentaram valores superiores aos obtidos quando usado o método cromatográfico para baixas concentrações de TTHM. A partir da concentração de 40 µg/L de THM o comportamento foi o inverso, com os resultados das análises cromatográficos sempre superiores aos do outro método.

Pelo fato do método cromatográfico ser normalizado e usado como referência, pode-se dizer que apresentou valores mais precisos para as variações na formação de THM, se mostrando mais confiável. Tal fato é verificado nos resultados relativos aos reatores 13 15, na etapa de oxidação, e nos ensaios 26 e 27, na etapa de tratamento. O método cromatográfico, porém apresenta a grande desvantagem de ser mais caro.

6 CONCLUSÕES

A presente pesquisa buscou investigar a formação de trihalometanos devido ao uso de permanganato de potássio na pré-oxidação e a redução na formação deste subproduto com a utilização do permanganato de potássio anteriormente à aplicação do cloro livre, bem como sua remoção adsorção em carvão ativado em pó seguida de tratamento convencional. Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões:

a) A água bruta utilizada na pesquisa, coletada de poço artesiano, se mostrou adequada, mantendo sua qualidade relativamente inalterada, durante todo o desenvolvimento do trabalho de pesquisa, para os parâmetros estudados;

b) O uso do permanganato de potássio na oxidação de soluções contendo ácidos húmicos como precursores de THM, com e sem a presença de brometos, não gerou concentrações significativas destes subprodutos se mantendo na faixa de 0 a 17 $\mu\text{g/L}$, quando as amostras foram analisadas por espectrofotometria;

c) Nas oxidações realizadas com o permanganato de potássio seguido de cloro livre, houve uma redução média de 30 % na formação de THM quando comparadas às oxidações realizadas apenas com o cloro livre;

d) A variação do tempo de contato com o permanganato de potássio, anteriormente à aplicação do cloro nas amostras, não alterou as concentrações de THM formados;

e) A presença do íon brometo na água altera a especiação dos trihalometanos formados, tornando predominante a formação das espécies bromadas (bromofórmio e dibromoclorometano);

f) O aumento da concentração de íons brometos na água oxidada com permanganato de potássio e cloro livre eleva a produção de TTHM;

g) A formação de THM não ocorre instantaneamente, aumentando-se a concentração dos subprodutos com o tempo de contato;

h) Para cada dosagem de carvão ativado em pó existe uma relação de dosagem de coagulante e valor de pH diferente que gera uma maior remoção de cor aparente e turbidez;

i) A utilização do carvão ativado em pó seguido de tratamento convencional promoveu a adequação da água nos valores máximos permitidos pelas normas vigentes para os parâmetros cor aparente e turbidez, não causando prejuízo à qualidade da água original;

j) A variação da dosagem de carvão ativado em pó, de 10 a 150 mg/L, influenciou no tratamento da água, sendo a remoção de THM mais efetiva para os valores mais altos dessas dosagens;

k) O aumento no tempo de contato do carvão ativado em pó com as amostras contendo THM melhorou a remoção para as dosagens mais baixas do produto, não interferindo no resultado para as dosagens mais altas;

l) A remoção de THM com carvão ativado em pó se mostrou eficiente, para a água estudada, obtendo remoções de 54 a 98 %, para o tempo de contato de 60 minutos, e de 71 a 98 % para o tempo de contato de 120 minutos, baseadas nos resultados das análises cromatográficas;

m) O uso de dois métodos para a detecção de trihalometanos gerou valores diferentes, sendo os resultados provenientes das análises por cromatografia gasosa mais consistentes do que os obtidos pelo o método espectrofotométrico;

n) O método espectrofotométrico de detecção de THM gerou resultados inferiores aos obtidos por cromatografia para concentrações menores do que 40 µg/L do subproduto, e resultados superiores ao segundo método para concentrações maiores do que 40 µg/L de THM;

o) A espectrofotometria apresentou a vantagem de gerar valores de forma imediata, norteando a tomada de decisões durante a pesquisa;

p) A utilização de soluções de clorofórmio para verificação da resposta do método espectrofotométrico não se mostrou efetiva devido às dificuldades encontradas no preparo destas soluções, no desenvolvimento do presente trabalho;

q) A metodologia adotada na pesquisa para a redução na formação de THM se mostrou eficiente para a água estudada.

7 RECOMENDAÇÕES

O estudo permitiu indicar as seguintes recomendações para futuras pesquisas sobre o tema:

a) Investigação de outros subprodutos da desinfecção, orgânicos e inorgânicos, que possam ser formados na oxidação com permanganato de potássio;

b) Estudos com diferentes dosagens de permanganato de potássio e cloro livre para oxidações utilizando-se os dois compostos, bem como o estudo de diferentes tempos de contato ou a aplicação simultânea dos dois oxidantes;

c) Verificação da influência dos íons iodeto e fluoreto na formação de subprodutos da desinfecção;

d) Estudos de utilização de diferentes tipos e dosagens de carvão ativado em pó para a remoção de trihalometanos;

e) Avaliação de diferentes parâmetros no tratamento da água, tais como gradiente de velocidade e tempos de detenção, visando a otimização do tratamento;

f) Desenvolvimento de uma curva de calibração utilizando-se diferentes padrões de THM, para o método espectrofotométrico; melhorando sua exatidão;

g) Realização de análises de THM em duplicata, para cada amostra, a fim de se confirmar a precisão dos métodos utilizados;

h) Desenvolver trabalho de modo que se possa obter resultados por processos cromatográficos e espectrofotométricos para todas as amostras analisadas.

ANEXOS

ANEXO I – Planilhas de campo dos ensaios de “jarteste” 1 a 25, para definição dos parâmetros a serem utilizados no tratamento da água

Tabela AI.1: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 1

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 01	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 23/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 22/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Dureza (mg CaCO ₃ /L)
0,16	9	163,4	109,93	65,50
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,30	26,4	< 0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	66	Turbidez (uT)	1,16

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s ⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	1	1	1	1	1	1
	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	2	2	2	2	2	2
	mg/L	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	126	105	106	122	103	115
	Turbidez (uT)	6,65	5,58	5,68	5,63	5,55	5,98
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,47	6,03	6,53	7,04	7,52	8,04
pH de coagulação		5,49	6,05	6,58	7,06	7,40	7,70
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	25	26	15	18	29	19
	remoção (amostra)	62,1%	60,6%	77,3%	72,7%	56,1%	71,2%
	remoção (amostra + CAP)	80,2%	75,2%	85,8%	85,2%	71,8%	83,5%
	Turbidez (uT)	0,89	0,57	0,42	0,66	1,09	1,07
	remoção (amostra)	23,3%	50,9%	63,8%	43,1%	6,0%	7,8%
	remoção (amostra + CAP)	86,6%	89,8%	92,6%	88,3%	80,4%	82,1%

Tabela AI.2: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 2

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 02	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 23/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 22/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,16	9	163,4	109,93	65,50
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,30	26,4	< 0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	68	Turbidez (uT)	1,25

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	3	3	3	3	3	3
	mg/L	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	2	2	2	2	2	2
	mg/L	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	96	86	87	84	83	80
	Turbidez (uT)	5,16	5,21	5,32	5,49	5,13	5,71
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,47	6,01	6,30	6,99	7,47	7,99
pH de coagulação		5,29	5,95	6,46	6,88	7,17	7,35
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	14	4	1	3	9	22
	remoção (amostra)	79,4%	94,1%	98,5%	95,6%	86,8%	67,6%
	remoção (amostra + CAP)	85,4%	95,3%	98,9%	96,4%	89,2%	72,5%
	Turbidez (uT)	0,81	0,27	0,13	0,14	0,25	0,39
	remoção (amostra)	35,2%	78,4%	89,6%	88,8%	80,0%	68,8%
	remoção (amostra + CAP)	84,3%	94,8%	97,6%	97,4%	95,1%	93,2%

Tabela AI.3: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 3

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 03	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 23/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 22/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,16	9	163,4	109,93	65,50
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,30	26,4	< 0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	63	Turbidez (uT)	1,60

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	5	5	5	5	5	5
	mg/L	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	2	2	2	2	2	2
	mg/L	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	113	111	124	118	100	111
	Turbidez (uT)	5,85	6,07	6,53	5,63	5,88	5,89
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,49	6,03	6,52	7,03	7,48	8,00
pH de coagulação		5,15	5,85	6,35	6,77	6,99	7,14
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	19	3	2	5	14	9
	remoção (amostra)	69,8%	95,2%	96,8%	92,1%	77,8%	85,7%
	remoção (amostra + CAP)	83,2%	97,3%	98,4%	95,8%	86,0%	91,9%
	Turbidez (uT)	0,92	0,22	0,13	0,37	0,35	0,20
	remoção (amostra)	42,5%	86,3%	91,9%	76,9%	78,1%	87,5%
	remoção (amostra + CAP)	84,3%	96,4%	98,0%	93,4%	94,0%	96,6%

Tabela AI.4: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 4

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 04	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 23/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 22/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,16	9	163,4	109,93	65,50
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,30	26,4	< 0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	83	Turbidez (uT)	1,08

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	8	8	8	8	8	8
	mg/L	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	2	2	2	2	2	2
	mg/L	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	142	123	129	119	127	125
	Turbidez (uT)	5,30	5,28	5,60	5,47	5,50	5,71
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,51	6,05	6,49	6,98	7,50	8,00
pH de coagulação		4,78	5,71	6,19	6,51	6,70	6,86
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	26	11	7	17	26	48
	remoção (amostra)	68,7%	86,7%	91,6%	79,5%	68,7%	42,2%
	remoção (amostra + CAP)	81,7%	91,1%	94,6%	85,7%	79,5%	61,6%
	Turbidez (uT)	0,95	0,16	0,09	0,13	0,16	0,15
	remoção (amostra)	12,0%	85,2%	91,7%	88,0%	85,2%	86,1%
	remoção (amostra + CAP)	82,1%	97,0%	98,4%	97,6%	97,1%	97,4%

Tabela AI.5: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 5

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO							
Ensaio n. 05		Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)					
Data do Ensaio: 23/11/04		Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)					
Data da Coleta: 22/11/04		Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L					
		Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L					
Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.							
CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)							
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Dureza (mg CaCO ₃ /L)			
0,16	9	163,4	109,93	65,50			
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)			
8,30	26,4	< 0,02	0,2	< 0,05			
AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)							
Cor Aparente (uC)		73		Turbidez (uT)		1,14	
PARÂMETROS DO ENSAIO							
Etapa	Rotação (rpm)		G (s ⁻¹)		T		
Mistura rápida	300		585		15 s		
Floculação	80		80		10 min		
	58		50		10 min		
	32		20		10 min		
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0		0		7 min		
PARÂMETROS	JARRO						
	1	2	3	4	5	6	
DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	1	1	1	1	1	1
	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	4	4	4	4	4	4
	mg/L	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	199	198	200	184	173	191
	Turbidez (uT)	10,30	9,60	10,50	10,50	9,72	10,60
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,53	6,04	6,52	7,02	7,50	7,99
pH de coagulação		5,52	6,07	6,57	7,00	7,31	7,52
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	22	7	23	24	37	33
	remoção (amostra)	69,9%	90,4%	68,5%	67,1%	49,3%	54,8%
	remoção (amostra + CAP)	88,9%	96,5%	88,5%	87,0%	78,6%	82,7%
	Turbidez (uT)	1,22	0,59	0,40	0,79	1,07	1,37
	remoção (amostra)	-7,0%	48,2%	64,9%	30,7%	6,1%	-20,2%
	remoção (amostra + CAP)	88,2%	93,9%	96,2%	92,5%	89,0%	87,1%

Tabela AI.6: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 6

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 06	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 23/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 22/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,16	9	163,4	109,93	65,50
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,30	26,4	< 0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	76	Turbidez (uT)	1,20

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
	80	80	10 min
Floculação	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	3	3	3	3	3	3
	mg/L	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	4	4	4	4	4	4
	mg/L	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	185	169	180	175	193	182
	Turbidez (uT)	10,60	10,60	10,50	11,40	10,50	10,60
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,53	5,99	6,53	7,00	7,48	8,01
pH de coagulação		5,36	5,90	6,44	6,83	7,07	7,26
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	28	10	15	23	14	23
	remoção (amostra)	63,2%	86,8%	80,3%	69,7%	81,6%	69,7%
	remoção (amostra + CAP)	84,9%	94,1%	91,7%	86,9%	92,7%	87,4%
	Turbidez (uT)	1,93	0,50	0,31	0,25	0,29	0,28
	remoção (amostra)	-60,8%	58,3%	74,2%	79,2%	75,8%	76,7%
	remoção (amostra + CAP)	81,8%	95,3%	97,0%	97,8%	97,2%	97,4%

Tabela AI.7: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 7

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 07	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 19/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	84	Turbidez (uT)	1,23

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	5	5	5	5	5	5
	mg/L	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	4	4	4	4	4	4
	mg/L	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	192	209	202	201	198	200
	Turbidez (uT)	10,90	11,20	10,70	11,00	11,70	11,30
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,52	6,03	6,51	7,00	7,46	8,03
pH de coagulação		5,03	5,83	6,35	6,75	6,95	7,11
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	14	3	3	1	5	7
	remoção (amostra)	83,3%	96,4%	96,4%	98,8%	94,0%	91,7%
	remoção (amostra + CAP)	92,7%	98,6%	98,5%	99,5%	97,5%	96,5%
	Turbidez (uT)	1,96	0,15	0,23	0,18	0,22	0,30
	remoção (amostra)	-59,3%	87,8%	81,3%	85,4%	82,1%	75,6%
	remoção (amostra + CAP)	82,0%	98,7%	97,9%	98,4%	98,1%	97,3%

Tabela AI.8: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 8

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 08	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 19/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	62	Turbidez (uT)	1,20

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	8	8	8	8	8	8
	mg/L	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	4	4	4	4	4	4
	mg/L	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	170	180	176	174	177	160
	Turbidez (uT)	10,30	10,80	10,20	10,50	10,80	10,50
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,48	6,01	6,51	6,98	7,53	8,00
pH de coagulação		4,76	5,61	6,18	6,51	6,74	6,82
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	51	24	29	35	21	13
	remoção (amostra)	17,7%	61,3%	53,2%	43,5%	66,1%	79,0%
	remoção (amostra + CAP)	70,0%	86,7%	83,5%	79,9%	88,1%	91,9%
	Turbidez (uT)	1,83	0,21	0,20	0,12	0,17	0,17
	remoção (amostra)	-52,5%	82,5%	83,3%	90,0%	85,8%	85,8%
	remoção (amostra + CAP)	82,2%	98,1%	98,0%	98,9%	98,4%	98,4%

Tabela AI.9: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 9

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 09	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 19/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	46	Turbidez (uT)	1,21

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	1	1	1	1	1	1
	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	6	6	6	6	6	6
	mg/L	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	257	245	248	232	257	235
	Turbidez (uT)	15,40	15,30	15,60	15,00	15,80	15,10
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,53	6,04	6,49	6,99	7,51	7,98
pH de coagulação		5,47	6,02	6,52	6,99	7,31	7,54
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	25	23	15	21	19	16
	remoção (amostra)	45,7%	50,0%	67,4%	54,3%	58,7%	65,2%
	remoção (amostra + CAP)	90,3%	90,6%	94,0%	90,9%	92,6%	93,2%
	Turbidez (uT)	1,79	1,01	0,70	0,49	0,85	0,71
	remoção (amostra)	-47,9%	16,5%	42,1%	59,5%	29,8%	41,3%
	remoção (amostra + CAP)	88,4%	93,4%	95,5%	96,7%	94,6%	95,3%

Tabela AI.10: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 10

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO							
Ensaio n. 10		Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)					
Data do Ensaio: 19/11/04		Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)					
Data da Coleta: 17/11/04		Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L					
		Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L					
Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.							
CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)							
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Dureza (mg CaCO ₃ /L)			
0,13	12	160,4	109,93	65,83			
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)			
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05			
AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)							
Cor Aparente (uC)		74		Turbidez (uT)		1,03	
PARÂMETROS DO ENSAIO							
Etapa	Rotação (rpm)		G (s ⁻¹)		T		
Mistura rápida	300		585		15 s		
Floculação	80		80		10 min		
	58		50		10 min		
	32		20		10 min		
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0		0		7 min		
PARÂMETROS	JARRO						
	1	2	3	4	5	6	
DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	3	3	3	3	3	3
	mg/L	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	6	6	6	6	6	6
	mg/L	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	250	272	252	260	266	254
	Turbidez (uT)	13,90	15,70	15,20	14,80	15,20	14,20
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,47	6,00	6,51	6,97	7,48	8,02
pH de coagulação		5,20	5,90	6,34	6,71	6,92	7,11
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	30	3	3	1	4	10
	remoção (amostra)	59,5%	95,9%	95,9%	98,6%	94,6%	86,5%
	remoção (amostra + CAP)	88,0%	98,9%	98,8%	99,6%	98,5%	96,1%
	Turbidez (uT)	1,96	0,24	0,24	0,21	0,25	0,33
	remoção (amostra)	-90,3%	76,7%	76,7%	79,6%	75,7%	68,0%
	remoção (amostra + CAP)	85,9%	98,5%	98,4%	98,6%	98,4%	97,7%

Tabela AI.11: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 11

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 11	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 19/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	58	Turbidez (uT)	1,27

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	5	5	5	5	5	5
	mg/L	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	6	6	6	6	6	6
	mg/L	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	245	226	239	220	220	241
	Turbidez (uT)	15,60	15,70	15,40	14,10	15,60	15,80
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,51	6,03	6,53	6,98	7,51	8,01
pH de coagulação		4,89	5,72	6,28	6,68	6,85	6,93
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	42	18	21	15	11	27
	remoção (amostra)	27,6%	69,0%	63,8%	74,1%	81,0%	53,4%
	remoção (amostra + CAP)	82,9%	92,0%	91,2%	93,2%	95,0%	88,8%
	Turbidez (uT)	2,11	0,32	0,31	0,27	0,26	0,30
	remoção (amostra)	-66,1%	74,8%	75,6%	78,7%	79,5%	76,4%
	remoção (amostra + CAP)	86,5%	98,0%	98,0%	98,1%	98,3%	98,1%

Tabela AI.12: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 12

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 12	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 19/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	46	Turbidez (uT)	1,23

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	8	8	8	8	8	8
	mg/L	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	6	6	6	6	6	6
	mg/L	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	225	229	244	236	252	242
	Turbidez (uT)	15,40	15,10	14,90	15,90	15,10	16,00
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,51	5,97	6,53	7,03	7,54	8,05
pH de coagulação		4,67	5,44	5,63	6,45	6,67	6,83
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	32	5	2	3	1	2
	remoção (amostra)	30,4%	89,1%	95,7%	93,5%	97,8%	95,7%
	remoção (amostra + CAP)	85,8%	97,8%	99,2%	98,7%	99,6%	99,2%
	Turbidez (uT)	2,81	0,73	0,41	0,40	0,18	0,23
	remoção (amostra)	-128,5%	40,7%	66,7%	67,5%	85,4%	81,3%
	remoção (amostra + CAP)	81,8%	95,2%	97,2%	97,5%	98,8%	98,6%

Tabela AI.13: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 13

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 13	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 10/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 08/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,06	5	159,4	110,90	66,17
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,16	26,7	< 0,02	0,2	0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	79	Turbidez (uT)	1,22

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	1	1	1	1	1	1
	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	10	10	10	10	10	10
	mg/L	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	339	355	348	342	361	362
	Turbidez (uT)	20,80	23,30	22,90	23,70	22,70	24,20
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,51	6,02	6,52	7,00	7,54	8,03
pH de coagulação		5,57	6,23	6,70	7,09	7,27	7,39
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	27	8	8	11	16	18
	remoção (amostra)	65,8%	89,9%	89,9%	86,1%	79,7%	77,2%
	remoção (amostra + CAP)	92,0%	97,7%	97,7%	96,8%	95,6%	95,0%
	Turbidez (uT)	1,50	0,78	0,49	0,36	0,49	0,54
	remoção (amostra)	-23,0%	36,1%	59,8%	70,5%	59,8%	55,7%
	remoção (amostra + CAP)	92,8%	96,7%	97,9%	98,5%	97,8%	97,8%

Tabela AI.14: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 14

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 14	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 10/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 08/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Dureza (mg CaCO ₃ /L)
0,06	5	159,4	110,90	66,17
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,16	26,7	< 0,02	0,2	0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	96	Turbidez (uT)	1,31

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s ⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	3	3	3	3	3	3
	mg/L	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	10	10	10	10	10	10
	mg/L	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	347	383	387	369	384	380
	Turbidez (uT)	23,10	27,60	27,40	25,60	25,90	25,50
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,48	5,98	6,52	7,03	7,48	8,00
pH de coagulação		5,46	6,09	6,61	6,97	7,11	7,22
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	18	29	3	17	23	18
	remoção (amostra)	81,3%	69,8%	96,9%	82,3%	76,0%	81,3%
	remoção (amostra + CAP)	94,8%	92,4%	99,2%	95,4%	94,0%	95,3%
	Turbidez (uT)	0,44	0,34	0,28	0,34	0,40	0,36
	remoção (amostra)	66,4%	74,0%	78,6%	74,0%	69,5%	72,5%
	remoção (amostra + CAP)	98,1%	98,8%	99,0%	98,7%	98,5%	98,6%

Tabela AI.15: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 15

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 15	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 18/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	70	Turbidez (uT)	1,14

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	5	5	5	5	5	5
	mg/L	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	10	10	10	10	10	10
	mg/L	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	353	363	375	368	371	357
	Turbidez (uT)	23,10	24,00	25,50	24,20	25,40	25,20
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,51	6,00	6,52	7,04	7,47	7,99
pH de coagulação		5,03	5,84	6,31	6,60	6,72	6,86
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	28	5	2	2	2	3
	remoção (amostra)	60,0%	92,9%	97,1%	97,1%	97,1%	95,7%
	remoção (amostra + CAP)	92,1%	98,6%	99,5%	99,5%	99,5%	99,2%
	Turbidez (uT)	2,80	0,17	0,17	0,19	0,18	0,26
	remoção (amostra)	-145,6%	85,1%	85,1%	83,3%	84,2%	77,2%
	remoção (amostra + CAP)	87,9%	99,3%	99,3%	99,2%	99,3%	99,0%

Tabela AI.16: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 16

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 16	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 18/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	59	Turbidez (uT)	1,05

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	8	8	8	8	8	8
	mg/L	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	10	10	10	10	10	10
	mg/L	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	383	406	397	386	406	405
	Turbidez (uT)	23,75	26,70	24,60	24,80	26,10	26,30
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,48	6,00	6,52	7,01	7,50	7,98
pH de coagulação		4,61	5,56	6,15	6,44	6,61	6,71
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	27	4	2	4	7	4
	remoção (amostra)	54,2%	93,2%	96,6%	93,2%	88,1%	93,2%
	remoção (amostra + CAP)	93,0%	99,0%	99,5%	99,0%	98,3%	99,0%
	Turbidez (uT)	2,73	0,26	0,21	0,30	0,31	0,32
	remoção (amostra)	-160,0%	75,2%	80,0%	71,4%	70,5%	69,5%
	remoção (amostra + CAP)	88,5%	99,0%	99,1%	98,8%	98,8%	98,8%

Tabela AI.17: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 17

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 17	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 18/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	49	Turbidez (uT)	1,22

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	1	1	1	1	1	1
	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	20	20	20	20	20	20
	mg/L	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	777	820	797	807	765	823
	Turbidez (uT)	55,30	59,20	58,70	56,50	60,20	59,40
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,52	6,03	6,54	7,00	7,46	8,02
pH de coagulação		5,46	6,06	6,54	7,00	7,46	8,02
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	23	21	19	21	18	16
	remoção (amostra)	53,1%	57,1%	61,2%	57,1%	63,3%	67,3%
	remoção (amostra + CAP)	97,0%	97,4%	97,6%	97,4%	97,6%	98,1%
	Turbidez (uT)	2,20	1,40	0,85	0,81	1,01	0,59
	remoção (amostra)	-80,3%	-14,8%	30,3%	33,6%	17,2%	51,6%
	remoção (amostra + CAP)	96,0%	97,6%	98,6%	98,6%	98,3%	99,0%

Tabela AI.18: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 18

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 18	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 09/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 08/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,06	5	159,4	110,90	66,17
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,16	26,7	< 0,02	0,2	0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	55	Turbidez (uT)	1,01

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS		JARRO					
		1	2	3	4	5	6
DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	3	3	3	3	3	3
	mg/L	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	20	20	20	20	20	20
	mg/L	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	943	883	1407	795	776	786
	Turbidez (uT)	62,80	61,50	109,30	50,70	49,30	52,50
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,46	5,97	6,46	7,02	7,51	8,01
pH de coagulação		5,45	6,26	6,75	7,03	7,16	7,31
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	8	17	32	19	22	13
	remoção (amostra)	85,5%	69,1%	41,8%	65,5%	60,0%	76,4%
	remoção (amostra + CAP)	99,2%	98,1%	97,7%	97,6%	97,2%	98,3%
	Turbidez (uT)	0,51	0,43	0,61	0,60	0,60	0,59
	remoção (amostra)	49,5%	57,4%	39,6%	40,6%	40,6%	41,6%
	remoção (amostra + CAP)	99,2%	99,3%	99,4%	98,8%	98,8%	98,9%

Tabela AI.19: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 19

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO							
Ensaio n. 19	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)						
Data do Ensaio: 10/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)						
Data da Coleta: 08/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L						
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L						
Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.							
CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)							
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)			
0,06	5	159,4	110,90	66,17			
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)			
8,16	26,7	< 0,02	0,2	0,05			
AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)							
Cor Aparente (uC)		53		Turbidez (uT)		1,20	
PARÂMETROS DO ENSAIO							
Etapa		Rotação (rpm)		G (s⁻¹)		T	
Mistura rápida		300		585		15 s	
		80		80		10 min	
Floculação		58		50		10 min	
		32		20		10 min	
Sedimentação (Vs = 1cm/min)		0		0		7 min	
PARÂMETROS		JARRO					
		1	2	3	4	5	6
DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	5	5	5	5	5	5
	mg/L	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	20	20	20	20	20	20
	mg/L	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	810	947	935	857	950	970
	Turbidez (uT)	52,90	54,30	52,70	56,10	53,40	57,60
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,45	6,03	6,54	7,01	7,53	8,07
pH de coagulação		4,92	5,81	6,30	6,63	6,79	7,03
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	62	4	24	6	9	15
	remoção (amostra)	-17,0%	92,5%	54,7%	88,7%	83,0%	71,7%
	remoção (amostra + CAP)	92,3%	99,6%	97,4%	99,3%	99,1%	98,5%
	Turbidez (uT)	3,74	0,27	0,22	0,37	0,37	0,45
	remoção (amostra)	-211,7%	77,5%	81,7%	69,2%	69,2%	62,5%
	remoção (amostra + CAP)	92,9%	99,5%	99,6%	99,3%	99,3%	99,2%

Tabela AI.20: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 20

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 20	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 10/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 08/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,06	5	159,4	110,90	66,17
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,16	26,7	< 0,02	0,2	0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	62	Turbidez (uT)	1,13

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS		JARRO					
		1	2	3	4	5	6
DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	8	8	8	8	8	8
	mg/L	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	20	20	20	20	20	20
	mg/L	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	860	813	943	850	890	830
	Turbidez (uT)	51,00	53,70	59,00	56,90	51,90	53,50
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,48	6,05	6,48	6,99	7,47	8,00
pH de coagulação		4,70	5,68	6,12	6,49	6,57	6,63
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	62	9	14	8	12	6
	remoção (amostra)	0,0%	85,5%	77,4%	87,1%	80,6%	90,3%
	remoção (amostra + CAP)	92,8%	98,9%	98,5%	99,1%	98,7%	99,3%
	Turbidez (uT)	4,65	0,12	0,23	0,27	0,22	0,29
	remoção (amostra)	-311,5%	89,4%	79,6%	76,1%	80,5%	74,3%
	remoção (amostra + CAP)	90,9%	99,8%	99,6%	99,5%	99,6%	99,5%

Tabela AI.21: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 21

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 21	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 10/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 08/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,06	5	159,4	110,90	66,17
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,16	26,7	< 0,02	0,2	0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	88	Turbidez (uT)	1,13

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	1	1	1	1	1	1
	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	30	30	30	30	30	30
	mg/L	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	1255	1350	1147	1280	1200	1295
	Turbidez (uT)	91,40	87,50	74,90	83,10	78,50	81,10
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,42	5,98	6,51	6,95	7,51	8,03
pH de coagulação		5,44	6,19	6,68	7,04	7,27	7,39
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	57	29	23	26	8	7
	remoção (amostra)	35,2%	67,0%	73,9%	70,5%	90,9%	92,0%
	remoção (amostra + CAP)	95,5%	97,9%	98,0%	98,0%	99,3%	99,5%
	Turbidez (uT)	2,17	2,11	1,00	1,12	0,81	0,44
	remoção (amostra)	-92,0%	-86,7%	11,5%	0,9%	28,3%	61,1%
	remoção (amostra + CAP)	97,6%	97,6%	98,7%	98,7%	99,0%	99,5%

Tabela AI.22: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 22

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 22	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 18/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	70	Turbidez (uT)	1,13

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	3	3	3	3	3	3
	mg/L	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	30	30	30	30	30	30
	mg/L	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	1625	1240	1390	1460	1747	1353
	Turbidez (uT)	108,50	78,90	84,30	92,20	110,30	89,10
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,53	6,02	6,47	7,01	7,52	7,98
pH de coagulação		5,59	6,00	6,34	6,84	7,00	7,26
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	19	25	8	13	13	11
	remoção (amostra)	72,9%	64,3%	88,6%	81,4%	81,4%	84,3%
	remoção (amostra + CAP)	98,8%	98,0%	99,4%	99,1%	99,3%	99,2%
	Turbidez (uT)	0,53	0,70	0,49	0,64	0,68	0,50
	remoção (amostra)	53,1%	38,1%	56,6%	43,4%	39,8%	55,8%
	remoção (amostra + CAP)	99,5%	99,1%	99,4%	99,3%	99,4%	99,4%

Tabela AI.23: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 23

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 23	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 18/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	53	Turbidez (uT)	1,01

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	5	5	5	5	5	5
	mg/L	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	30	30	30	30	30	30
	mg/L	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	1240	1380	1360	1283	1505	1253
	Turbidez (uT)	89,50	92,40	84,70	87,90	99,80	89,20
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,52	6,01	6,51	6,99	7,47	7,98
pH de coagulação		5,16	5,72	6,18	6,62	6,86	6,98
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	15	20	24	28	35	12
	remoção (amostra)	71,7%	62,3%	54,7%	47,2%	34,0%	77,4%
	remoção (amostra + CAP)	98,8%	98,6%	98,2%	97,8%	97,7%	99,0%
	Turbidez (uT)	0,49	0,47	0,31	0,28	0,39	0,49
	remoção (amostra)	51,5%	53,5%	69,3%	72,3%	61,4%	51,5%
	remoção (amostra + CAP)	99,5%	99,5%	99,6%	99,7%	99,6%	99,5%

Tabela AI.24: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 24

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO	
Ensaio n. 24	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 18/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 17/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)
0,13	12	160,4	109,93	65,83
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,28	25,2	0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	47	Turbidez (uT)	1,12

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)	T
Mistura rápida	300	585	15 s
Floculação	80	80	10 min
	58	50	10 min
	32	20	10 min
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0	7 min

PARÂMETROS	JARRO					
	1	2	3	4	5	6

DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	8	8	8	8	8	8
	mg/L	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	30	30	30	30	30	30
	mg/L	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	1180	1115	1100	960	1367	1350
	Turbidez (uT)	97,90	85,20	89,80	83,70	95,05	90,40
pH meta		5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
pH ajustado		5,51	6,00	6,50	6,99	7,49	8,03
pH de coagulação		4,68	5,52	6,01	6,47	6,64	6,80
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	116	7	17	12	12	6
	remoção (amostra)	-146,8%	85,1%	63,8%	74,5%	74,5%	87,2%
	remoção (amostra + CAP)	90,2%	99,4%	98,5%	98,8%	99,1%	99,6%
	Turbidez (uT)	8,67	0,32	0,40	0,28	0,36	0,26
	remoção (amostra)	-674,1%	71,4%	64,3%	75,0%	67,9%	76,8%
	remoção (amostra + CAP)	91,1%	99,6%	99,6%	99,7%	99,6%	99,7%

Tabela AI.25: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 25

ESTUDO DE FILTRAÇÃO, SEM USO DE COAGULANTE	
Ensaio n. 25	Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)
Data do Ensaio: 23/11/04	Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)
Data da Coleta: 22/11/04	Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L
	Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L

Obs.: Ensaio de jarteste referentes à fase de definição da dosagem de coagulante e do valor de pH para cada concentração de carvão ativado em pó.

CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)				
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Dureza (mg CaCO ₃ /L)
0,16	9	163,4	109,93	65,50
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)
8,30	26,4	< 0,02	0,2	< 0,05

AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)			
Cor Aparente (uC)	65	Turbidez (uT)	1,22

PARÂMETROS DO ENSAIO			
Etapa	Rotação (rpm)	G (s ⁻¹)	T
Mistura rápida	---	---	---
Floculação	---	---	---
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	---	---	---

PARÂMETROS	JARRO						
	1	2	3	4	5	6	
DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	---	---	---	---	---	---
	mg/L	---	---	---	---	---	---
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1 %	2	4	6	10	20	30
	mg/L	10,0	20,0	30,0	50,0	100,0	150,0

RESULTADOS							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	114	167	244	380	783	1217
	Turbidez (uT)	5,90	10,50	15,00	25,90	55,60	81,10
pH meta		---	---	---	---	---	---
pH (Amostra)		8,37	8,36	8,36	8,36	8,35	8,34
pH (Amostra + CAP)		8,31	8,30	8,25	8,18	8,04	7,95
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	31	26	24	36	37	31
	remoção (amostra)	52,3%	60,0%	63,1%	44,6%	43,1%	52,3%
	remoção (amostra + CAP)	72,8%	84,4%	90,2%	90,5%	95,3%	97,5%
	Turbidez (uT)	1,09	1,58	1,57	2,05	2,62	2,43
	remoção (amostra)	10,7%	-29,5%	-28,7%	-68,0%	-114,8%	-99,2%
	remoção (amostra + CAP)	81,5%	85,0%	89,5%	92,1%	95,3%	97,0%

ANEXO II – Planilhas de campo dos ensaios de “jarteste” 26 e 27, para avaliação da remoção de THM por adsorção em CAP

Tabela AII.1: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 26

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO							
Ensaio n. 26		Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)					
Data do Ensaio: 30/11/04		Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)					
Data da Coleta: 29/11/04		Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L					
		Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L					
Obs.: Ensaio de jarteste visando a clarificação da água e remoção de trihalometanos formados no processo de pré-oxidação							
CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)							
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Dureza (mg CaCO ₃ /L)			
0,16	8	159,7	108,96	65,70			
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)			
8,17	26,9	< 0,02	< 0,2	< 0,05			
AMOSTRA APÓS A OXIDAÇÃO (24 horas)							
Cor Aparente (uC)	92		Turbidez (uT)	1,17			
THM - Espectrofotometria (µg/L)	108		THM - Cromatografia (µg/L)	250			
PARÂMETROS DO ENSAIO							
Etapa	Rotação (rpm)		G (s ⁻¹)	T			
Adsorção em CAP	80		80	60 min			
Mistura rápida	300		585	15 s			
Floculação	80		80	10 min			
	58		50	10 min			
	32		20	10 min			
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0		0	7 min			
PARÂMETROS	JARRO						
	1	2	3	4	5	6	
DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	5	5	8	5	8	8
	mg/L	25,0	25,0	40,0	25,0	40,0	40,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1%	2	4	6	10	20	30
	mg/L	10,0	20,0	30,0	50,0	100,0	150,0
AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	103	176	237	368	750	1313
	Turbidez (uT)	5,96	10,50	14,40	23,30	55,00	84,60
pH meta		6,50	7,00	7,50	6,50	6,00	8,00
pH ajustado		6,47	6,99	7,49	6,50	6,03	7,99
pH de coagulação		6,46	6,78	6,74	6,68	5,84	6,98
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	5	12	4	7	4	7
	remoção (amostra)	94,6%	87,0%	95,7%	92,4%	95,7%	92,4%
	remoção (amostra + CAP)	95,1%	93,2%	98,3%	98,1%	99,5%	99,5%
	Turbidez (uT)	0,24	0,66	0,24	0,24	0,17	0,48
	remoção (amostra)	79,5%	43,6%	79,5%	79,5%	85,5%	59,0%
	remoção (amostra + CAP)	96,0%	93,7%	98,3%	99,0%	99,7%	99,4%
	THM - Espectrofotometria (µg/L)	76	68	58	38	27	18
	remoção (amostra)	29,6%	37,0%	46,3%	64,8%	75,0%	83,3%
	THM - Cromatografia (µg/L)	115	91	83	49	19	5
	remoção (amostra)	53,9%	63,5%	67,0%	80,5%	92,3%	97,8%

Tabela AII.2: Planilha de laboratório para o ensaio de “jarteste” 27

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO							
Ensaio n. 27		Concentração de Permanganato de Potássio na amostra: 1,5 mg/L (1 hora antes do Cloro)					
Data do Ensaio: 01/12/04		Concentração de Cloro na amostra: 10 mg/L (tempo de contato de 24 horas)					
Data da Coleta: 29/11/04		Concentração de Ácido Húmico na amostra: 2,5 mg/L					
		Concentração de Brometo na amostra: 3,0 mg/L					
Obs.: Ensaio de jarteste visando a clarificação da água e remoção de trihalometanos							
CARACTERÍSTICAS INICIAIS DA ÁGUA BRUTA (POÇO GINÁSIO - UNICAMP)							
Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Condutividade (mS/cm)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	Dureza (mg CaCO₃/L)			
0,16	8	159,7	108,96	65,70			
pH	Temperatura (°C)	Ferro total (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Bromo (mg/L)			
8,17	26,9	< 0,02	< 0,2	< 0,05			
AMOSTRA APÓS A OXIDAÇÃO (24 horas)							
Cor Aparente (uC)		83	Turbidez (uT)			1,10	
THM - Espectrofotometria (µg/L)		86	THM - Cromatografia (µg/L)			258	
PARÂMETROS DO ENSAIO							
Etapa	Rotação (rpm)	G (s⁻¹)		T			
Adsorção em CAP	80	80		120 min			
Mistura rápida	300	585		15 s			
Floculação	80	80		10 min			
	58	50		10 min			
	32	20		10 min			
Sedimentação (Vs = 1cm/min)	0	0		7 min			
PARÂMETROS		JARRO					
		1	2	3	4	5	6
DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS							
Sulfato de Alumínio	mL de solução a 1 %	5	5	8	5	8	8
	mg/L	25,0	25,0	40,0	25,0	40,0	40,0
Carvão ativado em pó (CAP)	mL de solução a 1%	2	4	6	10	20	30
	mg/L	10,0	20,0	30,0	50,0	100,0	150,0
AMOSTRA INICIAL (após 24 horas de oxidação)							
Amostra após a adição de CAP	Cor aparente (uC)	99	138	225	318	773	1253
	Turbidez (uT)	5,09	10,10	13,40	21,00	53,90	79,40
pH meta		6,50	7,00	7,50	6,50	6,00	8,00
pH ajustado		6,51	7,00	7,50	6,53	6,02	7,99
pH de coagulação		6,67	6,95	6,79	6,93	6,19	7,07
Amostra final (Filtrado)	Cor aparente (uC)	4	4	5	6	5	9
	remoção (amostra)	95,2%	95,2%	94,0%	92,8%	94,0%	89,2%
	remoção (amostra + CAP)	96,0%	97,1%	97,8%	98,1%	99,4%	99,3%
	Turbidez (uT)	0,23	0,26	0,50	0,22	0,16	0,62
	remoção (amostra)	79,1%	76,4%	54,5%	80,0%	85,5%	43,6%
	remoção (amostra + CAP)	95,5%	97,4%	96,3%	99,0%	99,7%	99,2%
	THM - Espectrofotometria (µg/L)	57	55	44	38	16	17
	remoção (amostra)	33,7%	36,0%	48,8%	55,8%	81,4%	80,2%
	THM - Cromatografia (µg/L)	74	70	54	30	14	6
remoção (amostra)	71,3%	73,0%	79,1%	88,2%	94,7%	97,9%	

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-RAHMAN, M. S. The presence of trihalometanes in soft drinks. **Jornal of Applied Toxicology**, v. 2, n. 3, p. 165-166, 1982

ABE, I.; FUKUHARA, T.; MARUYAMA, J.; TATSUMOTO, H.; IWASAKI, S. Preparation of carbonaceous adsorbents for removal of chloroform from drinking water. **Carbon**, v. 39, p. 1069-1073, 2001.

AGUILERA, S. D. Avaliação do potencial de formação de trihalometanos em sistemas de abastecimento de água. Campinas: 1996. (Dissertação de Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, 1996.

AWWA. Committee Report for organics removal by coagulation: a review and research needs, **Journal of the American Water Works Association**, v. 71, n. 10, p. 588-603, 1979.

AWWA; APHA; WEF. **Standard methods for the examination of water and waste water**. 20^a ed. Baltimore, Maryland, 1998.

BABCOCK, D. B.; Singer, P. C. Chlorination and coagulation of humic and fulvic acids. **Journal of the American Water Works Association**, v. 71, n. 3, p. 149-152, 1979.

BANSAL, R. C.; DONNET, J. B. e STOECLI. **Active Carbon**. 1988

BATES, A. J. Water as consumed and its impact on the consumer - do we understand the variables?. **Food and Chemical Toxicology**, Great Britain, v. 38, p. S29-S36, 2000.

BELLAR, T. A.; LICHTENBERG, J. J.; KRONER, R. C. The occurrence of organohalides in chlorinated drinking waters. **Journal of the American Water Works Association**, v. 66, n. 12, p. 703-706, 1974.

BENEFIELD, L. D.; JUDKINS JR, J. F., WEAD, B. L. **Process chemistry for water and wastewater treatment**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982. 510 p.

BLACK, A. P.; CHRISTMAN, R. F. Characteristics of colored surface waters. **Journal of the American Water Works Association**, v. 55, n. 6, p. 753-770, 1963.

BORGES, J. T. **A utilização da técnica MIMS na determinação de trihalometanos em águas de abastecimento e a influência do íon brometo, da amônia e de algas na formação desses compostos**. Campinas: 2002. (Tese de Doutorado), Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, 2002.

BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia ambiental**. 1. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 305p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 36, de 19 de janeiro de 1990. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 1990.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 2004.

CARDOSO, E. J. B. N (Coord.); TSAI, S. M. (Coord.), NEVES, M. C. P. (Coord.). **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. 360 p.

CHRISTMAN, R. F., GHASSEMI, M. Chemical nature of organic color in water. **Journal of the American Water Works Association**, v. 58, n. 6, p. 723-741, 1966.

CRC. **Handbook of Chemistry and Physics**. Seventy-first edition. LIDE, D. L. (editor). CRC Press, Boca Raton, FL. 1990.

CULP; WESNER; CULP. **Handbook of public water system**. Van Nostrand Reinhold, NY, 1986.

DE SALVO, M. T. **Redução de precursores de trihalometanos por coagulação otimizada**. Campinas: 2002. (Dissertação de Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, 2002.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária (ABES), vol 1 e 2, 1993.

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

EDWARDS, G. A. & AMIRTHARAJAH, A. Removing color caused by humic acids. **Journal of the American Water Works Association**, v. 77, n. 3, p. 50-57, 1985.

ESPIGARES, M.; LARDELLI, P.; ORTEGA, P. Evaluating trihalomethane content in drinking water on the basis of common monitoring parameters: Regression models. **Journal of Environmental Health**, v. 66, n. 3, p. 9-13, 2003.

FAWELL, J. Assessment case study: chloroform and related substances. **Food and chemical toxicology**, v. 36, p. S91-S95, 2000.

FIECK K. J. U. **Potassium permanganate for iron and manganese removal and taste and odor control**. In: SANKS, R. L. (ed.). **Water treatment plant design; for the practicing engineer**. Boston: Butterworth, 1978. cap. 21, p. 461-479.

FIECK K. J.; BOLL, J. E. Potassium permanganate: an alternative to prechlorination. **Aque**. V. 7, p. 153-156, 1980.

GAFFNEY, J. S. (Ed); MARLEY, N. A. (Ed); CLARK, S. B. (Ed). **Humic and fulvic acids: isolation, structure and environmental role**. Washington DC: American Chemical Society, 1996, 338 p.

GALLAGHER, M. D. et al. Exposure to trihalomethanes and adverse pregnancy outcomes. **Epidemiology**, v. 9, n. 5, p. 484-489, 1998

GARCIA-VILLANOVA, R. J. et al. Formation, evolution and modeling of trihalomethanes in the drinking water of a town: I. at the municipal treatment utilities. **Water Research**, vol. 31, n. 6, p. 1299-1308, 1997.

GIFFORD, J. S.; GEORGE, D. B.; ADAMS, V. D. Synergistic effects of potassium permanganate and PAC in direct filtration systems for THM precursor removal. **Water Research**, v. 23, n. 10, p. 1305-1312, 1989.

HACH. **Analytical procedures for DR/2010 instruments: THM Plus™ – trihalomethanes**. Loveland, Colorado: Hach Company Word Headquarters, 1999. 14 p.

HACH. **Odyssey DR 2500 Spectrophotometer procedure manual**. Loveland, Colorado: Hach Company Word Headquarters, 2001.

HAMMER, M. J. **Sistemas de abastecimento de água e esgotos**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1979.

HARMS, L. L. Alternative disinfection technologies and strategies for inactivating protozoan cysts. **American Water Works Association Conference Proceedings**, 1999.

HAZEN AND SAWYER. **Desinfection alternatives for safe drinking water**. Van Nostrand Reinhold, New York, NY. 1992.

HUANG, J. Y. C.; SMITH, G. C. Spectrophotometric determination of total trihalomethanes in finished waters. **Journal of American Water Works Association**, v. 76, n. 4, p. 168-171, 1984.

ISAAC, R. L. **Controle de trihalometanos em sistemas de abastecimento: remoção por adsorção em colunas de carvão ativado granular em estação de tratamento de água**. São Paulo: 1993. (Dissertação de Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.

JANKOWSKA, H.; SWIATKOWSKI, A.; CHOMA, J. **Active carbon**. 1st ed. Warsaw: Simon & Schuster International Group, 1991. 279 p.

KARIMI, A. A.; SINGER, P. C.. Trihalomethane formation in open reservoirs. **Journal of the American Water Works Association**, v. 83, n. 3, p. 84-88, 1991.

KATS, J. **Oxidation products of organic materials. In Ozone and chlorine Dioxide technology for disinfection of drinking water**. Noyes Data, 1980.

KAWAMURA, S. Integrated design of water treatment facilities. John Wiley & Sons, Inc. NY, 1991.

KIM, J. et al. Chlorination by-products in surface water treatment process. **Desalination**, v. 151, p. 1-9, 2002.

KLEOPPER, R. D. **Analysis of drinking water for organic compounds, identification and analysis of organics pollutants in water.** Ed. Keith, Lit, pub. Ann. Arbor. Sci., 1976

KRASNER, S. W. et al. The occurrence of disinfection by-products in US drinking Water. **Journal of the American Water Works Association**, v. 78, n. 3, p. 62, 1989.

LELEZARY, S.; PIRBAZARI, m.; McGuire, M. J. Oxidation of five earthy-musty taste and odor compounds. **Journal of the American Water Works Association**, v. 81, n. 8, p. 41-53, 1989.

LETTERMAN, R. D.; QUON, J. E.; GEMMEL, R. S. Influence of rapid-mix parameters on flocculation. **Journal of the American Water Works Association**, v. 65, n. 11, p. 716-722, 1973.

LIDE, D. R. (ed). **Handbook of chemistry and physics.** 78th ed. New York: CRC Press, 1998.

MACEDO, J. A. B. **Subprodutos do processo de desinfecção de água pelo uso de derivados clorados.** 1. ed. Juiz de Fora: Jorge Macedo, 2001. 67 p.

MACIEL, N. M. **Remoção de ferro e manganês em águas de abastecimento, através de reatores granulares de fluxo ascendente: aplicação em poços profundos.** (Dissertação de mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

MARMO, C. R. **Formação e remoção de trihalometanos em águas de abastecimento tratadas, na pré-oxidação, com cloro livre.** Campinas, 2005 (Disertação de mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

MERCK. **Merck Standards.** Darmstadt: Roetherdruck, 1972. 981 p.

MERCK. **The Merck index: an encyclopedia of chemical, drugs and biologicals.**

12th ed. Whitehouse Station, NJ: Merck Research Laboratories, 1996.

MIDWOOD, R. B.; FELBECK, G. T. Analysis of yellow organic matter from freshwater.

Journal of the American Water Works Association, v. 60, n. 3, p. 357-366, 1968.

MOHAMED, A. E.; ALI, R. K. THMs formation during chlorination of raw Nile river water.

Water Research, vol. 29, n. 1, p. 375-378, 1995.

MONTGOMERY, J. M. **Water treatment principles and design.** John Wiley & Sons,

Inc. NY, 1985

MORAES, S., AIBA, C. J., SUZUKI, M. **Trihalometanos – estudo e método de**

determinação na água para consumo. São Paulo: CETESB – Companhia de

Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1979. (Manual Técnico da Divisão de Análises Especiais).

MORRIS, J. C.; BAUM, B. Precursors and mechanisms of haloform formation in the

chlorination of water supplies. **Water chlorination environmental impact and health effects.** v. 2, 1978.

MYERS, A. G. Evaluating alternative disinfectants for THM control in small Systems.

Journal of the American Water Works Association, v. 82, n. 6, p. 77-84, 1990.

NOGUEIRA, R. F. P.; GUIMARÃES, J. R. Processos oxidativos avançados: uma

alternativa para o tratamento de efluentes. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 3, n. 3, 1998.

ODEN, S. Humic acids. **Kolloidchem.** vol. 11, n. 75, 1919.

OLIVER, B. G. Chlorinated non-volatile organics produced by the reaction of chlorine

with humic acids. **Canadian Research**, v. 11 n. 6 p. 21, 1978.

OTOWA, T.; NOJIMA, Y.; MIYAZAKI, T. Development of KOH activated high surface area carbon and its application to drinking water purification. **Carbon**, v. 35, n. 9, p. 1315-1319, 1997.

PASCHOALATO, F. P. R. P., et al. Demanda de cloro e permanganato de potássio para oxidação de substâncias húmicas e avaliação da formação de trihalometanos em água. **22º Congresso Brasileiro de Engenharia Brasileira e Ambiental**. 2003

PETER, C. J. **Trihalomethane formation arising from the chlorination of potable water**, Thesis submitted of the University of London, London, 1980.

RATHBUN, R. E. Effect of reaction time on the formation of disinfection byproducts. **Chemosphere**. Vol 34, n. 12, p 2699-2713, 1997.

RIBEIRO, J. T. **Estudo de remoção de precursores de THMs para águas de abastecimento**. Campinas: 1998. (Dissertação de Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, 1998.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1991. 332 p.

ROOK, J. J. Formation of haloforms during chlorination of natural waters. **Water Treatment and Examination**, v. 23, p. 234-243, 1974.

ROOK, J. J. Chlorination reactions of fulvic acids in natural waters. **Environmental Science Technology**. Vol. 11, p. 478-482, 1977

ROOK, J. J. **Possible pathways for the formation of chlorinated degradation products during chlorination of humic acids and resorcinol**. In JOLLY, R. Z.; BRUNGS, W. A.; COMING, R. S.; JACOBS, V. A. **Water chlorination, environmental impact and health effects**. Ann Arbor Science, Mich, Vol. 3. p 85-98, 1979

ROSIN, J. **Reagent chemicals and standards**. 5th ed. Princeton, New Jersey: D. Van Nostrand Company, 1967. 641 p.

SALAME, I. I.; BANDOSZ, T. J. Role of surface chemistry in adsorption of phenol on activated carbons. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 264, n.2, p. 307-312, 2003.

SAMPAIO, C. A. A. **Remoção de ferro e manganês pelo pré-tratamento de águas de abastecimento com permanganato de potássio**. Campinas: 1995. (Dissertação de Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, 1995.

SEDIVEC, V.; FLEK, J. **Handbook of analysis of organic solvents**. 1st ed. Prague: Ellis Horwood Limited, 1976. 456 p.

SÉRODES, J. B., et al. Occurrence of THMs and HAAs in experimental chlorinated waters of the Quebec City área (Canada). **Chemosphere**. V. 51, p. 253-263, 2003.

SINGER, P. C.; BORCHARDT J. H.; COLTHRUST, J. M. The effects of permanganate pretreatment on trihalomethane formation in drinking water. **Journal of the American Water Works Association**, v. 72, n. 10, p. 573-578, 1980.

SINGER, P. C.; CHANG, S. D. Correlations between trihalometanes and total organic halids formed during water treatment. **Journal of the American Water Works Association**, v. 81, n. 8, p. 61-65, 1989.

SINGER, P. C. Humic substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products. **Water Science & Technology**, v. 40, n. 9, p. 25-30, 1999.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. New York: Academic Press, 1995. 267 p.

STEVENS, A. A.; SLOCUM, C. J.; SEEGER, D.R.; ROBECK, G. G. Chlorination of organics in drinking water. **Journal of the American Water Works Association**, v. 68, n. 11, p. 615-620, 1976.

STUART, M. E.; GOODDY, D. C.; KINNIBURGH, D. G.; KLINCK, B. A. Trihalomethane formation potencial: a tool for detecting non-specific organic groundwater contamination. **Urban water**, n. 3, p. 173-184, 2001.

SYMONS, J. M., STEVENS, A. A., CLARK, R. M. et al., **Treatment techniques for controlling trihalomethanes in drinking water**. Cincinnati. United States Environmental Protection Agency, 1981. 289 p.

TCHOBANOGLOUS, G. e SCHOEDER, E. D. **Water quality**. Addison-Wesley Publishing Company, Califórnia, 1985.

THURMAN, E. M. **Organic geochemistry of natural waters**. Hingham, MA: Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, 1985. 497 p.

TOMINAGA, M. Y.; MIDIO, A. F. Exposição humana a trihalometanos presentes em água tratada. **Revista de Saúde Pública**, v. 33, n. 4, p. 413-421, 1999.

TRUSSELL, R. R.; UMPHRES, M. D. The formation of trihalomethanes. . **Journal of the American Water Works Association**, v. 70, n. 11, p. 604-610, 1978.

USEPA. **Method 524.2 - Measurement of Purgeable Organic Compounds in Water by Capillary Column Gas Chromatography/Mass Spectrometry**. [S.I.]: United States Environmental Protection Agency, 1995.

USEPA. **National primary drinking water regulation: Disinfectants and Disinfection by-products: Final Rule**. [S.I.]: United States Environmental Protection Agency, Dez. 1998.

USEPA. **Alternative disinfectants and oxidants guidance manual**. [S.I.]: United States Environmental Protection Agency, Abr. 1999.

USEPA. **2004 Edition of the drinking water standards and health adviories**. [S.I.]: United States Environmental Protection Agency, 2004.

WALLER, K. et al. Trihalomethanes in drinking water and spontaneous abortion. **Epidemiology**. V. 9, n. 2, p. 134-140,

WESTERHOFF, P.; CHAO, P.; MASH, H. Reactivity of natural organic matter with aqueous chlorine and bromine. **Water Research**, v. 38, n. 6, p. 1502-1513, 2004.

YOON, J.; CHOI, Y.; CHO, S.; LEE, D. Low trihalomethane formation in Korean drinking water. **The Science of Total Environment**, n. 302, p. 157-166, 2003.