

APLICAÇÃO DE HIPOCLORITO DE SÓDIO E DIÓXIDO DE CLORO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA BRUTA: AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA, VÍRUS E BACTÉRIAS

Palavras-Chave: Água Bruta, Hipoclorito de Sódio, Dióxido de Cloro.

Autores(as):

Kamilli Vitoria Pereira (COTIL, UNICAMP), João Henrique Marchi (COTIL, UNICAMP), Caroline Vitória Moreira da Silva (ETEC Trajano), Caroline Campos Munhoz (ETEC Trajano) Prof^(a). Dr^(a). Maria Aparecida Carvalho de Medeiros (orientadora) – FT, UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Nos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) para obtenção de água potável tem sido utilizado amplamente o cloro (Cl_2) e seus derivados nas etapas de pré-oxidação e pós-oxidação (desinfecção) da água para fins de abastecimento público, visando a oxidação da matéria orgânica natural (MON) e a inativação dos microrganismos patogênicos de veiculação hídrica, presentes na água bruta.

Nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) para obtenção de água potável têm sido descrito por diversos autores: CARVALHO DE MEDEIROS (2023), DI BERNARDO & DANTAS (2005), SEKLER (2017) e WHO (2011) a utilização do processo convencional de tratamento de água (captação, adução, pré-oxidação, coagulação, floculação, decantação, filtração, fluoretação, desinfecção e correção de pH), entretanto, a qualidade da água bruta que tem sido captada em mananciais superficiais, principalmente nos períodos extremos de efeitos sazonais, com elevados períodos de estiagem ou de chuvas, tem sido cada vez mais degradada, de acordo com o mais recente relatório da CETESB de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo (2022), devido aos lançamentos de esgotos sem processos de tratamentos adequados ou com baixa eficiência, implicando em elevadas dosagens de cloro nas etapas de pré-oxidação e de desinfecção da água que está sendo tratada na ETA, para realizar a oxidação da MON e a inativação dos microrganismos patogênicos de veiculação hídrica, presentes na água bruta.

A aplicação de pré-oxidação e de desinfecção durante o tratamento da água bruta são importantes para produzir água tratada com a qualidade necessária para atender aos requisitos dos parâmetros de potabilidade que são regulados pela atual Portaria de potabilidade nº 888 (2021).

As análises físico-químicas e microbiológicas são necessárias para avaliação da qualidade das águas bruta e tratada para fins de abastecimento público (Portaria de potabilidade no. 888, de 2021).

A cromatografia gasosa (CG) é uma das técnicas analíticas mais utilizada na separação, identificação e quantificação de misturas de compostos orgânicos voláteis e termicamente estáveis, como os trihalometanos (THMs). A análise por CG ocorre através da distribuição dessa mistura de compostos orgânicos entre uma fase estacionária sólida ou líquida (coluna cromatográfica) e uma fase móvel gasosa (gás de arraste) (COLLINS, 2006).

Neste contexto, há uma necessidade de estudos de pré-oxidação e desinfecção envolvendo compostos com caráter oxidante comparativo ao cloro (Cl_2), como o hipoclorito de sódio ($NaClO$), porém estes oxidantes podem potencializar a geração de subprodutos de desinfecção (SPDs) organoclorados,

como os trihalometanos (THMs), que são potencialmente cancerígenos, uma alternativa para a minimização de SPDs tem sido a utilização de dióxido de cloro (ClO₂) (FAUSTINO, 2016).

No presente trabalho foi feito um estudo sobre a qualidade das águas brutas dos mananciais alternativos de captação da cidade de Limeira: rio Jaguari e ribeirão Pinhal, pertencentes às bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), assim como a avaliação dos oxidantes NaClO e ClO₂ na etapa de pré-oxidação do tratamento das águas brutas, em escala piloto, utilizando o aparelho de Jar Teste, buscando ampliar as análises de remoção de matéria orgânica das águas brutas dos mananciais alternativos, conforme os resultados interessantes anteriormente obtidos no trabalho de mestrado (FAUSTINO, 2016).

METODOLOGIA:

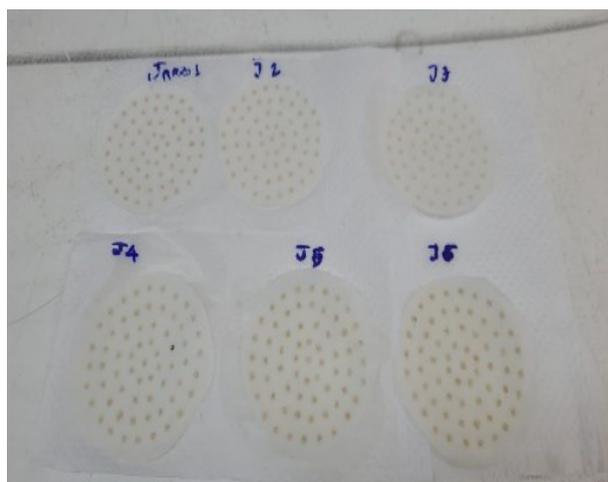
No Laboratório Físico-químico da Faculdade de Tecnologia (FT-UNICAMP), foram realizadas análises Físico-químicas (pH, Cor, Turbidez, Condutividade, Sólidos Totais Dissolvidos e Alcalinidade, de acordo as metodologias do Standard Methods (APHA, SMWW, 2012) para a verificação da qualidade das águas brutas dos mananciais de captação do município de Limeira: rio Jaguari e ribeirão Pinhal. Também foram realizados os ensaios em escala piloto de tratamento das águas brutas, aplicando o hipoclorito de sódio e o dióxido de cloro na pré-oxidação, no equipamento Jar Teste.

Após as coletas das amostras de águas brutas dos mananciais do município de Limeira, ribeirão Pinhal e rio Jaguari, da água tratada na saída da ETA, na FT (torneira localizada no Laboratório Físico-Químico) e no COTIL (torneira localizada na entrada do restaurante), foram realizadas as análises Físico-químicas, conforme as metodologias anteriormente descritas e os ensaios no equipamento Jar-Teste, com as seguintes etapas: Pré-Oxidação, Mistura rápida, Floculação, Decantação e Filtração, para a otimização das etapas de tratamento de água convencional, utilizando como coagulante o Sulfato de Alumínio (Al₂(SO₄)₃) e como alcalinizante a cal hidratada. Na Figura 1 são mostradas as fotos do sistema de filtração a vácuo utilizado e dos filtros de papel quantitativo (C 40, faixa branca, marca Unifil) utilizados após as respectivas filtrações das amostras recolhidas dos jarros (J1 a J6) do aparelho de Jar Teste (Figura 2).

Figura 1- (a) Sistema de filtração á vacuo, (b) Filtros utilizados na filtração das amostras recolhidas nos jarros do aparelho de Jar Teste (J1 a J6).



(a)



(b)

Figura 2 - Aparelho utilizado no Ensaio de Jar Teste com as amostras de águas brutas dos mananciais alternativos: rio Jaguari e ribeirão Pinhal: (a) Início do ensaio e (b)-Término do ensaio.



(a) - Início do ensaio: Mistura rápida,



(b) - Término do ensaio: Após a decantação.

Após as etapas do tratamento em escala piloto realizadas no aparelho de Jar Teste, foram recolhidas as amostras de cada jarro (J1 a J6) e efetuadas as filtrações, em seguida as mesmas análises Físico-químicas realizadas para as águas brutas. Também foram realizadas as análises espectrofotométricas na região do Ultravioleta (UV) (em $\lambda=254$ nm) para avaliação da matéria orgânica, utilizando o espectrofotômetro GCB-Cintra e na região do Visível (em $\lambda=455$ nm) para a avaliação da Cor, utilizando o espectrofotômetro DR-3900 da HACH.

Foram realizadas também as análises de Cloro residual em cada jarro, utilizando o sachê de DPD da HACH, sendo que para o oxidante NaClO foi utilizado o método no. 88 do DR3900 e para o oxidante ClO₂ foi utilizado o método no. 76 do DR3900.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Após a primeira coleta das amostras de águas brutas dos mananciais alternativos de captação do município de Limeira: ribeirão Pinhal e rio Jaguari, da água tratada na saída da ETA e nos pontos da FT e do COTIL, foram realizadas as análises Físico-químicas (pH, Cor, Turbidez, Condutividade, Sólidos Totais Dissolvidos e Alcalinidade, de acordo as metodologias do Standard Methods (APHA, SMWW, 2022) para a verificação da qualidade das águas, os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados das Análises Físico-Químicas das amostras de águas dos mananciais Ribeirão Pinhal e rio Jaguari, água tratada coletada na torneira do COTIL e da torneira da FT. 1ª. Coleta (19/01/2024).

Análise das Amostras - 19/01 e 22/01						
PARÂMETROS	Água Filtrada Ribeirão Pinhal (J1)	Água Filtrada Rio Jaguari (J3)	Água Decantada Ribeirão Pinhal (J1)	Água Decantada Rio Jaguari (J3)	Água Tratada Torneira Cotil	Água Tratada Torneira FT
Turbidez (NTU)	1,62	5,2	2,9	8,1	0,11	0,08
Cor (uH)	25,3	36,25	32,6	46,0	3,0	1,6
pH	6,73	5,58	5,53	6,76	7,59	8,98
Condutividade (uS/cm)	88,3	123,9	124,9	82,32	122,56	187,2
TDS (ppm)	45,04	61,58	62,71	40,87	68,85	92,43
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	25,0	9,0	6,0	20,0	27,0	2,0

De acordo com os resultados da Tabela 1, tem-se que as amostras de água tratada estão atendendo os parâmetros de potabilidade (Portaria No. 888, 2021).

Foram realizados os ensaios em escala piloto no equipamento Jar-Teste, para a otimização das etapas de tratamento: coagulação-floculação-decantação, seguida de filtração, utilizando como coagulante o Sulfato de Alumínio (Al₂(SO₄)₃) e como alcalinizante a cal hidratada. Estas soluções foram preparadas com concentração estoque= 2,0 g L⁻¹, sendo calculada a concentração diluída, a partir das

soluções estoque (em mg L⁻¹) para aplicação nos jarros do ensaio de Jar Teste, com as etapas do tratamento convencional: Mistura rápida(2 minutos, 100 rpm), floculação(20 minutos, 50 rpm), decantação(20 minutos, em repouso), em seguida, essas amostras foram filtradas e os parâmetros Físico-químicos foram analisados: pH, Cor Aparente, Turbidez, Condutividade, TDS e Alcalinidade e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados das Análises Físico-Químicas das amostras, após o Ensaio de Jar-Teste. 1ª. Coleta (19/01/2024). Ribeirão Pinhal (RP) e Rio Jaguari (RJ).

Análise das Amostras de água bruta do Ribeirão Pinhal e Rio Jaguari, Após o ensaio de Jar-Teste e filtração.						
PARÂMETROS	Água Filtrada - Ribeirão Pinhal (Jarro1) - [13 mg/L Al ₂ (SO ₄) ₃]	Água Filtrada - Ribeirão Pinhal (Jarro 2) - [33 mg/L Al ₂ (SO ₄) ₃]	Água Filtrada - Ribeirão Pinhal (Jarro 3) - [53 mg/L Al ₂ (SO ₄) ₃]	Água Filtrada - Rio Jaguari (Jarro 1) - [15 mg/L Al ₂ (SO ₄) ₃]	Água Filtrada - Rio Jaguari (Jarro 2) - [45 mg/L Al ₂ (SO ₄) ₃]	Água Filtrada - Rio Jaguari (Jarro 3) - [60 mg/L Al ₂ (SO ₄) ₃]
Turbidez (NTU)	1,62	0,51	15,0	0,24	0,02	5,2
Cor Aparente (uH)	25,3	13,3	109,6	19,25	7,0	36,25
pH	6,73	6,44	5,16	6,98	6,9	5,58
Condutividade (uS/cm)	88,3	86,76	89,83	105,63	116,26	123,9
TDS (ppm)	45,04	43,34	45,19	53,21	58,59	61,58
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	25,0	12,0	7,0	28,0	22,0	9,0

RP-Jarro 1 (J1) RP- Jarro 2 (J2) RP-Jarro 3 (J3) RJ-Jarro 1 (J1) RJ-Jarro 1 (J2) RJ-Jarro 3 (J3)

Apesar de aparentemente terem sido obtido melhores resultados nos jarros 1 (RP-J1) do Ribeirão Pinhal e 3 (RJ-J3) do Rio Jaguari a olho nu, em relação a cor e turbidez, foram os jarros 2(J2), de ambos mananciais que apresentaram os melhores resultados, após as análises de todos os parâmetros Físico-químicos serem realizadas (Tabela 2). Estes foram os jarros que continham a quantidade de concentração de coagulante sulfato de alumínio (Al₂(SO₄)₃) otimizada.

Na segunda etapa do presente trabalho, foram realizados outros ensaios de Jar Teste, com as águas brutas do ribeirão Pinhal e rio Jaguari, utilizando para a pré-oxidação das águas brutas do rio Jaguari as concentrações do oxidante NaClO igual a 2,5 mgL⁻¹. Já no ensaio do Jar teste para a água bruta do rio Jaguari foi utilizado ClO₂ nos jarros de 1 a 3 e o oxidante NaClO e nos jarros de 4 a 6, ambos com concentração de 2,5 mg L⁻¹. Em seguida, os parâmetros Físico-químicos foram analisados: pH, Cor Aparente, Turbidez, Condutividade, TDS e Alcalinidade. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados obtidos após os ensaios de Jar teste com as águas brutas: rio Jaguari foi utilizado o oxidante ClO₂ nos jarros de 1 a 3 e o oxidante NaClO nos jarros de 4 a 6, ambos com concentração de 2,5 mg L⁻¹.

CONCENTRAÇÃO DOS OXIDANTES NO ENSAIO - JAR-TESTE						
Manancial	Pré-Oxidação: ClO ₂ -2,5 mg/L			Pré-Oxidação: NaClO-2,5 mg/L		
Rio Jaguari	J1- 12mg Al ₂ (SO ₄) ₃ /L	J2- 22mg Al ₂ (SO ₄) ₃ /L	J3- 32mg Al ₂ (SO ₄) ₃ /L	J1- 12mgAl ₂ (SO ₄) ₃ /L	J2- 22mgAl ₂ (SO ₄) ₃ /L	J3- 32mgAl ₂ (SO ₄) ₃ /L
Conc. residual oxidante(mg/L)	0,44	0,45	0,55	0,6	0,9	1,1

De acordo com os resultados da Tabela 3, nota-se que após todas as etapas de tratamento, foram realizadas as análises de Cloro residual para os oxidantes NaClO e ClO₂ e em todos os jarros foram determinadas as respectivas concentrações residuais em cada jarro, demonstrando que houve consumo dos respectivos oxidantes na pré-oxidação da matéria orgânica, assim como de vírus e bactérias que estavam presentes na água bruta, com elevada eficiência, pois ainda foram quantificadas concentrações de ambos oxidantes com concentrações igual ou maiores do que 0,44 mg L⁻¹ em todos os jarros. Os ensaios para as análises dos SPDs ainda não foram realizados, devido a um problema que houve com o equipamento GC-MS e não estão sendo apresentados.

CONCLUSÕES:

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que:

As amostras de água tratada estão atendendo os parâmetros de potabilidade (Portaria No. 888, 2021).

A otimização das concentrações do coagulante Sulfato de Alumínio ($Al_2(SO_4)_3$) com o ensaio de Jar Teste foi eficiente, pois foram obtidos parâmetros de cor e turbidez que atendem aos parâmetros de potabilidade (Portaria No. 888, 2021).

A utilização dos oxidantes alternativos ao cloro: hipoclorito de sódio e dióxido de cloro foram eficientes para as etapas de pré-oxidação e demais etapas de tratamento da água bruta em escala piloto no equipamento de Jar Teste, pois, houve completa oxidação da matéria orgânica, conforme as análises de Cloro residual para ambos os oxidantes NaClO e ClO_2 . Nota-se que ainda foram quantificadas concentrações de ambos os oxidantes igual ou maiores do que $0,44 \text{ mg L}^{-1}$ em todos os jarros.

O presente trabalho continua em andamento para a análise dos SPDs após a etapa de oxidação com os respectivos oxidantes NaClO e ClO_2 .

BIBLIOGRAFIA:

- APHA(SMWW). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 22nd ed. Washington, DC, New York: American Public Health Association, 2012.
- BRASIL, Ministério da Saúde: Portaria de potabilidade no. 888, de 2021.
- CARVALHO DE MEDEIROS, Maria Aparecida. Apostila de **ST517-Tratamento de Água para Fins de Abastecimento**, Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2023.
- CETESB, **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo**, 2022.
- COLINS, Carol H. **FUNDAMENTOS DE CROMATOGRAFIA**. 1º ed. UNICAMP.2006.
- DI BERNARDO, Luiz e DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. São Carlos: RiMa, 2005.
- FAUSTINO, Nilto. **ALTERNATIVAS DE PRÉ-OXIDAÇÃO $ClO_2/H_2O_2/NaClO$ COMBINADAS COM ULTRASSOM PARA MINIMIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS EM ÁGUAS SUPERFICIAIS**. Dissertação (Mestrado)- Curso de Tecnologia e Inovação, Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2016.
- SEKLER, Sidney F. F, **Tratamento de Água – Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento**. 1º ed. GEN LTC, 2017.
- WHO, World Health Organization, **World health statistics**, 2011.

AGRADECIMENTO:

À PRP-UNICAMP-PIBIC-EM e ao CNPq pelo apoio financeiro e às Escolas COTIL e ETEC Trajano e a orientadora Profa.Dra. Maria Aparecida Carvalho de Medeiros pela oportunidade de participarmos deste projeto e aprendermos sobre os processos de tratamento de água para que seja possível consumir água potável e sem riscos para a saúde, assim como de conhecer a FT-UNICAMP.