



FERRATO DE SÓDIO NO TRATAMENTO DE ÁGUA: SÍNTESE, OTIMIZAÇÃO E POTENCIAL DE APLICAÇÃO COMO PRÉ-OXIDANTE

Vívian Nazareth Oliveira Fernandes⁽¹⁾

Possui graduação em Farmácia pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), mestrado em Química pela UFJF e Curso Técnico em Leite e Derivados pelo Centro Tecnológico/Instituto de Laticínios Cândido Tostes. MBA em “Gestão Estratégica e Formação de Lideranças para o Setor Público”. Atualmente, Analista de Saneamento (Bioquímico II) e Assessora de Controle da Qualidade (ACQ) na Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora (CESAMA).

Ana Elisa Ferreira de Oliveira Fonseca⁽²⁾

Doutora e Mestre em Ciências, com ênfase em Física e Química de Materiais (FQMat), pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Licenciatura e Bacharelado em Química pela UFSJ. Pós-graduação em Engenharia Ambiental e Saneamento Básico. Pós-doutorado em Química Analítica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Vencedora do Prêmio Capes de Tese (2023) na área de Materiais. Atualmente, Analista de Saneamento (Químico I) na Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora (CESAMA).

Rafael Arromba de Sousa⁽³⁾

Bacharelado e Licenciatura em Química pela Universidade Estadual de Campinas. Mestrado em Química, na área de Química Analítica e Doutorado em Ciências, na mesma universidade. Atualmente é professor Associado IV do Departamento de Química da Universidade Federal de Juiz de Fora (DQ-UFJF).

Grazielle Cristine Silva Rodrigues⁽⁴⁾

Técnica em Química pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). MBA em “Gestão Estratégica e Formação de Lideranças para o Setor Público”. Atualmente, Técnica de Saneamento e Coordenadora de Processos de Produção (CPP) na Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora (CESAMA).

Endereço⁽¹⁾: Rua Tupi, 260 - Santa Terezinha - Juiz de Fora - MG - CEP: 36045-380 - Brasil - Tel: +55 (32) 98847-2724 - e-mail: vivianazareth@yahoo.com.br

RESUMO

Neste trabalho o ferrato de potássio foi estudado quanto ao seu comportamento em diferentes concentrações e tempo de contato. O objetivo foi otimizar a dosagem do pré-oxidante e observar como o tempo de contato afetou a eficiência do processo. A concentração de 2,0 mg/L se mostrou a mais eficiente, com redução significativa da cor e turbidez. Em relação ao tempo de contato na pré-oxidação, o aumento do tempo de oxidação resultou em maior quantidade de amostra oxidada, inferindo aumento na demanda por oxidante. A pré-oxidação com ferrato de potássio mostrou-se eficaz no tratamento de água, especialmente na concentração de 2,0 mg/L, que reduziu em 74,8% a cor e em 81,8% a turbidez. Apesar dos bons resultados, a produção e uso do ferrato de sódio apresentam desafios, como sua instabilidade em solução, dificuldade de armazenamento e perdas durante a síntese por via úmida. Por esses motivos, sua aplicação em larga escala ainda é limitada, embora avanços na formulação e comercialização possam viabilizar seu uso futuro em estações de tratamento de água (ETAs).

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de água; pré-oxidação; ferrato de sódio

INTRODUÇÃO

No Brasil, as Estações de Tratamento de Água (ETAs) geralmente utilizam um sistema de tratamento convencional, composto das seguintes etapas: captação, adução, alcalinização, coagulação, floculação, decantação, filtração, correção de pH desinfecção, fluoretação e reservação (FUNASA, 2014; BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2017; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

Contudo, existe uma etapa do tratamento de água, adotada por muitas ETAs, chamada de pré-oxidação. A etapa de pré-oxidação tem diversas finalidades como, oxidação da matéria orgânica, diminuição de algas, aumento da eficiência da coagulação, melhoria na eficiência da filtração, remoção de metais e outros materiais particulados, redução do gosto e odor da água e a remoção de cor (KERRY J. HOWE, 2016). A pré-oxidação danifica a ligação

entre as partículas e seus compostos orgânicos adsorvidos, reduzindo a massa molecular de matéria orgânica, o que resultaria na dessorção de revestimentos orgânicos estabilizados, e a redução do efeito estérico e da barreira eletrostática. Já na presença de ferro ou manganês, a pré-oxidação pode romper complexos de íons metálicos, resultando em uma produção *in situ* de coagulante (XIE, CHEN, *et al.*, 2016; XIE, MA, *et al.*, 2013; CHANDRAKANTH e AMY, 1996).

O principal agente usado na pré-oxidação é o cloro, como dióxido de cloro (ClO_2), hipoclorito de sódio (NaClO), hipoclorito de cálcio [$\text{Ca}(\text{ClO})_2$] e cloro (Cl_2). Entretanto, pesquisas têm demonstrado que a oxidação da água com grande quantidade de Matéria Orgânica Natural (MON), pode produzir diversos compostos que representam riscos à saúde, os Subprodutos da Desinfecção (SPDs). A MON inclui uma matriz complexa de compostos orgânicos oriundos de fontes naturais que estão presentes na água. Junto com as algas e cianobactérias, são os principais precursores que os halogênios reagem para formação de subprodutos da oxidação (HILLEBRAND e BENETTI, 2020; DANIEL, 2001).

Uma alternativa para tentar minimizar a formação dos SPDs inclui substituir o agente químico usado, visto que a maioria é resultante da reação com o cloro. Algumas pesquisas sugerem o uso de Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2), Permanganato de Potássio (KMnO_4) e Ferrato (IV) de Sódio (Na_2FeO_4) (ALAVI, BIDHENDI, *et al.*, 2023; WANG, MA, *et al.*, 2018; JANA NACERADSKA, 2017).

O íon ferrato (VI), FeO_4^{2-} é um forte oxidante que tem sido testado como oxidante alternativo no tratamento de água e efluentes. O ferrato (VI) é mais estável, em condições alcalinas do que em condições ácidas. Isso faz com que a degradação seja dificultada. Logo, o poder de oxidação é superior em condições ácidas. Em meio ácido o ferrato tem um alto potencial de oxidação, mais elevado que os outros oxidantes comumente empregados no setor de saneamento. Em pHs menores que 6,0 o ferrato é altamente instável, se decompõe. Essa degradação é visível pela mudança de cor da solução (LUCA, LUCA e SANTANA, 2003; LI, LI e GRAHAM, 2005).

OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento do ferrato de sódio na pré-oxidação da água bruta em uma ETA. Foram executados vários ensaios de *Jar-test* a fim de avaliar o comportamento da pré-oxidação, onde a qualidade da água foi monitorada utilizando parâmetros físico-químicos. O ferrato de sódio testado foi sintetizado pelo método de oxidação úmida.

METODOLOGIA

Reagentes e Kits de Análise

Os reagentes empregados nas etapas experimentais foram selecionados com base em sua pureza e aplicabilidade nos processos de tratamento de água. O ferrato de potássio (Na_2FeO_4) foi obtido por meio de síntese própria, sem número de lote atribuído. Para correção de pH, utilizou-se hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), fornecido pela marca Geocálcio. Como agente coagulante, empregou-se sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), da marca Coagulan 20, lote 67L0619122.

Outros reagentes utilizados incluíram: hidróxido de sódio (NaOH), da marca ACS Científica, lote 202203095; hidróxido de potássio (KOH), da LS Chemicals, lote 127058; e hipoclorito de sódio (NaOCl) a 8%, da marca BH, lote 063/24. O cloreto férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) foi fornecido pela Dinâmica, lote 115622. Além disso, foram utilizados álcool metílico (CH_3OH), da Quimis, lote 13082079; fosfato de sódio dibásico anidro (Na_2HPO_4), da marca Êxodo, lote 2207204457; e borato de sódio decahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), da Impex, lote 566-M.

Estação de Tratamento de Água

As amostras de água bruta utilizadas nesse trabalho são oriundas das represas Dr. João Penido e Chapéu D'uvas. As águas dessas represas são tratadas na Estação de Tratamento de Água Marechal Castelo Branco (ETA MCB) em Juiz de Fora/MG. A ETA MCB tem capacidade instalada para tratar até 1300 litros de água por segundo. A estação realiza tratamento do tipo convencional, com coagulação, floculação, decantação, filtração rápida (6 filtros com duas células por unidade de filtração) e desinfecção, além da fluoretação e correção de pH. A coleta para os ensaios de *Jar-test* foi feita na ETA logo antes da adição do

alcalinizante/coagulante. Nesse momento já foi feita a composição das águas provenientes das represas Dr. João Penido e Chapéu D'uvas.

Técnicas de Análise

As análises foram conduzidas no Laboratório Central da Cesama, acreditado segundo a ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017, e também no laboratório da ETA MCB.

Sobre os residuais de oxidante, a concentração de Ferrato de Potássio (mg/L) foi determinada por espectrofotometria UV-Vis. Os íons Fe(VI) apresentam coloração roxo-escura em solução, com pico máximo de absorbância em 505 nm. A concentração de Fe(VI) é estimada por meio da equação: $\epsilon = A/BC$, na qual "ε" corresponde ao coeficiente de absorção molar ($1070 \text{ M}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$); "A" a absorbância medida; "B", a concentração de Fe(VI) em molaridade (M); e "C", o caminho óptico (cm) da célula de quartzo utilizada (Bielski; Thomas, 1987).

A Turbidez (NTU) foi determinada pelo método nefelométrico, o qual compara a intensidade da luz dispersa pela amostra, sob condições definidas, com a intensidade da luz dispersa por uma suspensão padrão de referência, conforme descrito no método *2130 B Nephelometric Method, 2023* (APHA, 2023; SMEWW.2130-B, 2023). A Cor Aparente (UC) foi analisada utilizando o método *2120 E Tristimulus Spectrophotometric Method, 2023*, baseado na técnica Tristimulus (APHA, 2023; SMEWW.2120-E, 2023; SMEWW.4500-H+ B, 2023). O pH foi medido com auxílio de um eletrodo de vidro, conforme o método *4500-H⁺ B pH - Electrometric Method, 2023* (APHA, 2023; SMEWW.4500-H2O2, 2023).

A Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) foi determinada por meio de uma célula de condutividade, de acordo com o método *2510 B Conductivity - Laboratory Method, 2023* (APHA, 2023; SMEWW.2510-B, 2023). O Oxigênio Dissolvido (mg/L) foi quantificado com um oxímetro de eletrodo galvânico, segundo o método *4500-O G Membrane-Electrode Method, 2023*. A Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) foi obtida com o mesmo equipamento, conforme o método *2550 B Temperature - Laboratory and Field Methods, 2023* (APHA, 2023; SMEWW.4500-O-G, 2023; SMEWW.2550-B, 2023).

Ensaio de Jar-test

O modelo utilizado foi o *Jar-test* Microcontrolado 6 Provas - JT303M/6 (Marca: Milan). As execuções dos ensaios foram realizadas no laboratório da ETA MCB. Em resumo, os ensaios são executados da seguinte forma: inicia-se adicionando 2 L de água bruta em cada jarro. Em seguida o coagulante e alcalinizante são adicionados nos jarros ao mesmo tempo e realiza-se a agitação rápida (100 rpm) por 1 minuto. Até esse ponto simula-se a etapa de coagulação. Após, a velocidade de agitação diminui (70 rpm) e se mantém por mais 19,5 minutos. Essa etapa é marcada pela formação de flocos maiores e aglomerados (floculação). Por fim, inicia-se a etapa de decantação por 4 minutos onde não há nenhuma agitação, logo os flocos sedimentam.

Para esse estudo adicionou-se a etapa de pré-oxidação. O resumo da programação do equipamento utilizada encontra-se na Tabela 1. As etapas de mistura rápida, mistura lenta e sedimentação foram mantidas fixas para que fosse possível avaliar apenas a contribuição da pré-oxidação. O gradiente de velocidade da pré-oxidação também não foi alterado. Todos os ensaios de *Jar-test* foram executados em períodos curtos para que os mananciais não alterassem suas características significativamente.

Equipamentos

Todos os instrumentos estavam calibrados, garantindo a precisão e confiabilidade nas medições realizadas durante o estudo. Para determinação de pH utilizou-se um pHmetro - Marca: Milwaukee, Modelo: MW151 max. A Turbidez foi determinada por meio de um Colorímetro - Marca: Policontrol, Modelo: AP 2000 WT, enquanto a Cor Aparente e a Cor Verdadeira foram analisadas com o auxílio de um Colorímetro Tristimulus (0 – 500 UC) - Marca: Digimed, Modelo: DM-Cor. A condutividade foi medida com um Condutivímetro - Marca: Thermo Scientific, Modelo: Orion Star A212. Para determinação de ferrato de sódio utilizou-se o Espectrofotômetro (340 a 900 nm) - Marca: Hach, Modelo: DR2800.



Tabela 1 - Exemplo de um ensaio de Jar-test junto ao resumo da programação do equipamento

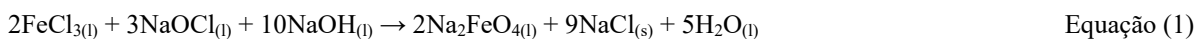
| FASE | PARÂMETROS | CONDIÇÕES |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| PRÉ-OXIDAÇÃO | Tempo de Contato: | 2 - 8 minutos |
| | Gradiente de Velocidade: | 40 rpm |
| | Dosagem: | 0,5 - 2,50 mg/L |
| COAGULAÇÃO (Mistura Rápida) | Tempo de Contato: | 1,0 minutos |
| | Gradiente de Velocidade: | 100 rpm |
| | Dosagem: | 20 mg/L |
| | pH: | 6,38 |
| FLOCULAÇÃO (Mistura Lenta) | Tempo de Contato: | 19,5 minutos |
| | Gradiente de Velocidade: | 70 rpm |
| DECANTAÇÃO (Sedimentação) | Tempo de Contato: | 4,0 minutos |
| | Gradiente de Velocidade: | 0 rpm |
| FILTRAÇÃO CLORAÇÃO | Filtro de Papel: | Whatman 40 |
| | Dosagem: | 5 mg/L de Hipoclorito de Sódio |

RESULTADOS E DISCUSSÕES

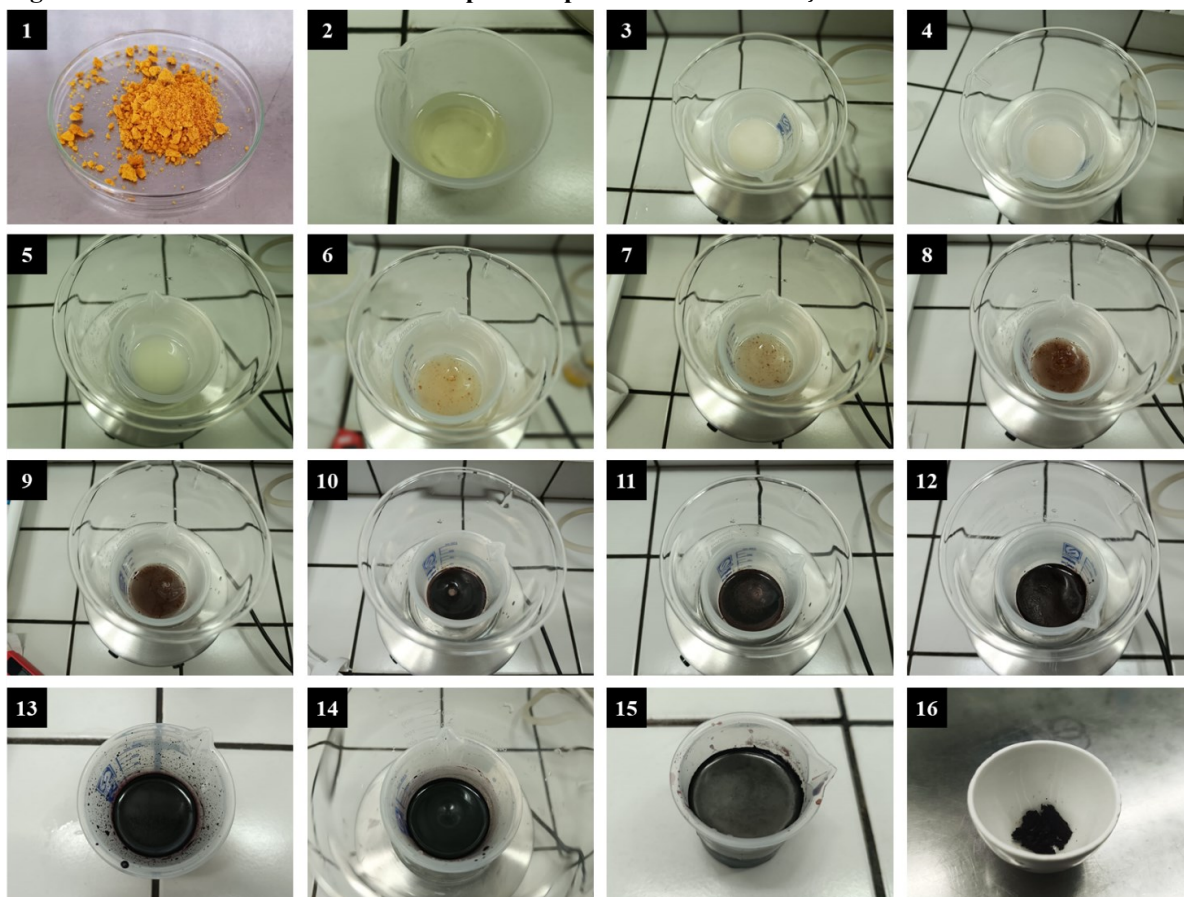
Síntese do Ferrato de Sódio

O método de oxidação úmida para produção de ferrato tem sido amplamente utilizado por diversos pesquisadores para produzir ferrato sólido ou líquido, especialmente ferrato de sódio e potássio (VI). A maior parte dos métodos consiste em reagir FeCl_3 líquido com NaOCl na presença de NaOH para produzir um ferrato de potássio (Na_2FeO_4) conforme mostrado na Equação (1) (THOMAS, KOZIK, *et al.*, 2020; WEI, WANG e LIU, 2015; BARIŞCI, ULU, *et al.*, 2014).

O Na_2FeO_4 sólido tem alta solubilidade em solução concentrada de NaOH , tornando mais difícil sua separação. Assim, com a finalidade de aumentar a eficiência de produção do ferrato(VI), nesse trabalho o KOH substituiu o NaOH e, portanto, a formação de Na_2FeO_4 será interrompida. Aumentando o rendimento do sal de ferrato de potássio - K_2FeO_4 . Isso ocorre por um processo de precipitação onde o K_2FeO_4 pode ser isolado ou precipitado da solução de hidróxido de potássio como mostrado na Equação (2), realizando numerosas etapas de dissolução e precipitação (LI, LI e GRAHAM, 2005; GUNAWAN GUNAWAN, 2022).



A Figura 1 traz fotos da síntese, onde FeCl_3 foi usado como precursor (1). Resumidamente, 20 g de NaOH e 30 mL de NaOCl (2) foram misturados por uma hora à uma velocidade de agitação de 800 rpm mantendo a temperatura inferior à 20 °C (3) e (4). Em seguida, a solução foi centrifugada (3500 rpm) e filtrada para remover o excesso de NaOH não dissolvido, onde o sólido foi descartado (5). Após, a solução reagiu durante 150 min com 2 g de FeCl_3 mantendo sob agitação a 800 rpm (6) - (12). Então a fase líquida foi filtrada, descartando o sólido que possuía excesso de NaCl (13).

Figura 1 - Fotos da síntese do ferrato de potássio pelo método de oxidação úmida

Logo, a solução líquida foi misturada com 20 mL de KOH saturado (14), agitada a 800 rpm por 20 minutos, e centrifugada a 3500 rpm para separar as fases sólido/líquido. O material sólido resultante foi retido e adicionado em 10 mL de KOH 6,0 M. Após um processo de centrifugação a 3500 rpm durante 10 min e sólido/líquido separação, a porção líquida foi adicionada à 20 mL de KOH saturado gelado (15). Finalmente, esta mistura foi filtrada e o ferrato de potássio bruto resultante foi submetido a lavagens consecutivas usando n-pentano, álcool metílico e éter etílico por aproximadamente 2 minutos cada. O sólido em papel filtro foi então seco a vácuo à temperatura ambiente durante 1 hora para produzir o K_2FeO_4 seco e purificado (16).

Algumas considerações importantes podem ser feitas sobre a execução dessa síntese. A produção de ferrato por via úmida apensar de ser amplamente relatada na literatura, é uma forma desafiadora de produção. Devido à grande solubilidade do ferrato em água, a sua separação na forma sólida é difícil, gerando muitas perdas durante o processo de lavagem do precipitado.

Além disso, a solução de ferrato é altamente instável, sofrendo a degradação que é observada pela alteração da coloração de vermelho-púrpura para alaranjado. Assim, apenas das propriedades atrativas do ferro, sua produção no estado sólido ainda é um grande problema devido a sua instabilidade química (MUNYENGABE e ZVINOWANDA, 2019)

Embora as soluções aquosas de FeO_4 sejam relativamente estáveis na faixa de pH entre 9 e 10,5, elas se deterioram rapidamente em meios mais ácidos com evolução de oxigênio. As soluções de ferrato(VI) devem ser preparadas dissolvendo uma quantidade desejada de sais de ferrato(VI) em uma solução tampão de 5 mM $Na_2HPO_4/1$ mM borato a pH 9,2, onde o ferrato(VI) é mais estável. O fosfato serve como agente complexante para o Fe(III) produzido, que de outra forma precipitaria como hidróxido aceleraria a decomposição do ferrato(VI). Todas as soluções-estoque preparadas de Fe(VI) deverão ser usadas dentro de 30 minutos após a preparação para evitar uma decomposição significativa de Fe(VI) (BIELSKI e THOMAS, 1987; LEE, YOON e GUNTEN, 2005).

Desta forma, a solução de Ferrato de Potássio 1000 mg/L usada nesse trabalho era preparada diluindo K_2FeO_4 em solução tampão de 5 mM Na_2HPO_4 /1 mM borato a pH 9,2. Essa solução era preparada e utilizada dentro de 30 minutos.

Otimização do Uso do Ferrato de Sódio como Pré-Oxidante no Tratamento de Água

No estudo foram avaliados os efeitos da concentração de ferrato de potássio e do tempo de pré-oxidação nos parâmetros. Após os ensaios de *Jar-test*, as amostras foram coletadas e analisadas para os seguintes parâmetros: Cor Aparente (UC), pH, Condutividade ($\mu S/cm$), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/L), Temperatura ($^{\circ}C$). As amostras eram avaliadas sempre em comparação à água bruta utilizada. O pH foi mantido fixo em todos os ensaios *Jar-test* a seguir (pH = 6,38). Como a etapa de coagulação/floculação é fortemente influenciada pelo pH, ao manter o pH fixo foi possível minimizar sua influência, focando apenas na ação do pré-oxidante.

Para estabelecer as condições iniciais, a Tabela 2 mostra o volume de alcalinizante necessário para ajustar o pH ideal de 6,38.

Tabela 2 - Avaliação da pré-oxidação com ferrato de potássio (1000 mg/L) como oxidante

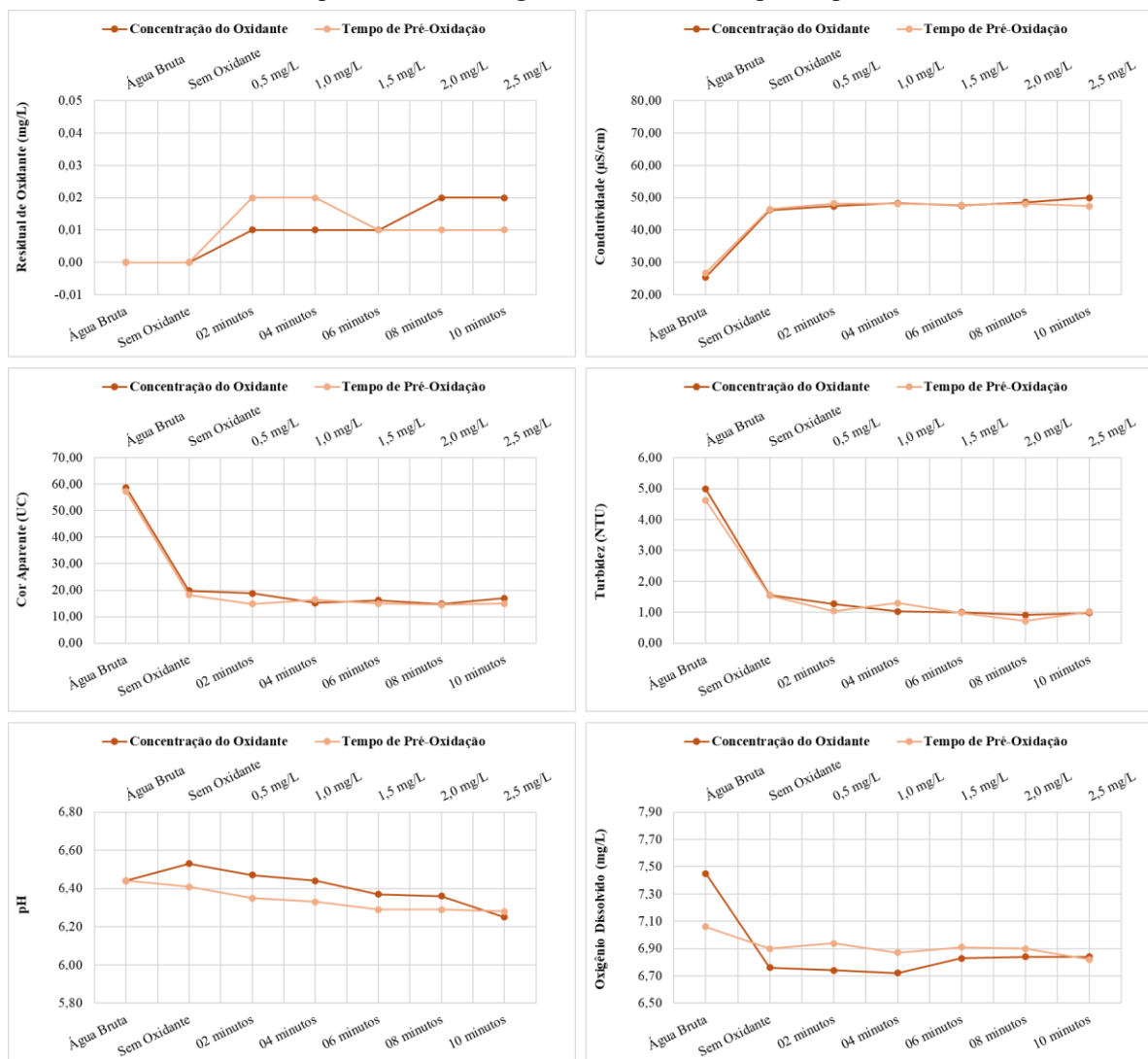
| Jarro | Concentração do Oxidante | Volume de Oxidante (mL) | Volume de Coagulante (mL) | pH Ideal | Volume de Alcalinizante (mL) | pH Após Alcalinizante |
|-------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|----------|------------------------------|-----------------------|
| 1 | Sem Oxidante | - | 4,0 | 6,38 | 1,6 | 6,41 |
| 2 | 0,5 mg/L | 2,0 | 4,0 | 6,38 | 1,4 | 6,40 |
| 3 | 1,0 mg/L | 4,0 | 4,0 | 6,38 | 1,4 | 6,43 |
| 4 | 1,5 mg/L | 6,0 | 4,0 | 6,38 | 1,3 | 6,38 |
| 5 | 2,0 mg/L | 8,0 | 4,0 | 6,38 | 1,3 | 6,43 |
| 6 | 2,5 mg/L | 10,0 | 4,0 | 6,38 | 1,3 | 6,36 |

Em seguida, o tempo de pré-oxidação foi fixado em 6 minutos e a concentração de ferrato de potássio foi variada entre 0,5 e 2,5 mg/L. Em seguida, o tempo de contato foi alterado de 2 a 10 minutos, mantendo a concentração otimizada de 2,0 mg/L. Os resultados dos parâmetros analisados estão organizados na forma de gráficos na Figura 2.

Conforme observado no gráfico os resíduos de ferrato de potássio aumentaram de 0,00 a 0,02 mg/L com o aumento da concentração do oxidante devido a maior quantidade de oxidante. Já com o aumento do tempo de oxidação, o ferrato de potássio apresentou uma redução (de 0,02 a 0,01 mg/L) devido ao maior consumo do oxidante. Isso sugere que a concentração do oxidante e o tempo de oxidação afetam positivamente na eficiência do tratamento de água.



Figura 2 - Gráficos mostrando o comportamento de diferentes parâmetros de análise (Ferrato de Potássio, Cor Aparente, pH, Condutividade, Turbidez, Oxigênio Dissolvido e Temperatura) aplicando diferentes concentrações de peróxido de hidrogênio e diferentes tempos de pré-oxidação



Ao relacionar o residual de ferrato de potássio com a demanda de oxidante é possível avaliar a eficácia do ferrato de potássio em atender à demanda de oxidante.

A demanda de oxidante corresponde à diferença entre a quantidade de oxidante adicionada e a concentração de oxidante residual medida após um tempo de contato específico, considerando um pH e temperatura definidos. Já o consumo de oxidante refere-se à quantidade de oxidante necessária para alcançar um determinado resíduo de oxidante, em um tempo de contato, pH e temperatura determinados (SMEWW.2350, 2023; SMEWW, 2023).

Conforme os resultados mostrados, a demanda de oxidante apresentou valores bem similares variando entre 98,0 e 99,3%. Logo, infere-se que todo oxidante foi provavelmente oxidado, e ainda devia havia matéria para oxidação. Contudo, conforme será discutido a seguir, o uso de concentrações maiores de ferrato de potássio implicaria no acréscimo de cor devido a coloração natural da solução.

Sobre o tempo de oxidação, o consumo de oxidante variou de 1,98 mg/L (99,0% / 2 minutos) a 1,99 mg/L (99,5% / 10 minutos). Uma variação pouco significativa, mas mantendo o padrão de quanto maior o tempo de oxidação, maior a quantidade de amostra oxidada, aumentando a demanda.



A condutividade da água bruta, de 25,40 e 26,75 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aumentou para 46,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (um incremento de 45,0%) e 46,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (um incremento de 42,5%) após o processo de coagulação/floculação. Quando a concentração de ferrato de potássio foi aumentada de 0,0 a 2,5 mg/L, na condutividade houve variação entre 46,20 e 50,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, representando uma variação de 2,7%. No experimento de tempo de contato, a condutividade variou entre 46,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 48,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o que representa um coeficiente de variação de 1,4%, à medida que o tempo de oxidação foi prolongado de 2 para 10 minutos. Contudo, essas variações não foram significativas o suficiente para embasar uma conclusão.

Após a coagulação/floculação sem oxidante, houve redução de cor aparente de 66,3% e 68,1%, enquanto a turbidez diminuiu 68,9% e 66,7%, nos ensaios realizados com variação da concentração do oxidante e do tempo de contato, respectivamente. A pré-oxidação, ao decompor substâncias indesejáveis, favorece o processo de coagulação. Isso é observado no aumento da concentração do oxidante, a maior eficiência na redução da cor aparente e da turbidez foi alcançada com 2,0 mg/L, resultando em 74,8% de redução na cor aparente e 81,8% na turbidez. No que se refere ao tempo de pré-oxidação, a redução máxima da cor e da turbidez ocorreu após 8 minutos, com uma eficiência de 74,7% na cor aparente e 84,4% na turbidez. Em maiores concentrações de ferrato de potássio é esperado um aumento de cor aparente e turbidez considerando que a solução de ferrato de potássio apresenta uma cor vermelho-púrpura.

Como pode ser visto na Figura 1, há uma correlação positiva entre o pH e a cor da água, com o pH diminuindo à medida que a cor também diminui. No entanto, essa variação é discreta, com um coeficiente de variação para o pH de 1,5% no estudo de concentração de oxidante e 0,8% no estudo do tempo de oxidação. E para o oxigênio dissolvido, o coeficiente de variação foi de 0,8% no estudo de concentração de oxidante e 0,6% no estudo do tempo de oxidação, o que indica que não houve alterações significativas nesses parâmetros.

CONCLUSÕES

Em síntese, a pré-oxidação com ferrato de potássio demonstrou um impacto positivo na eficiência do tratamento de água. A concentração do oxidante e o tempo de contato foram fundamentais para a redução da cor aparente e turbidez. Entre os resultados obtidos, a concentração de 2,0 mg/L se mostrou adequada, pois obteve-se uma redução de 74,8% na cor e 81,8% na turbidez. Dessa forma, recomenda-se a utilização de ferrato de potássio a 2,0 mg/L para a pré-oxidação.

Alguns aspectos técnicos relevantes devem ser considerados quanto à execução da síntese. A produção de ferrato por via úmida, embora amplamente descrita na literatura, apresenta elevada complexidade operacional. Devido à alta solubilidade do ferrato em meio aquoso, a recuperação do composto na forma sólida torna-se dificultosa, resultando em perdas significativas durante as etapas de separação e lavagem do precipitado.

O ferrato de potássio apesar de ser apresentado como um forte oxidante com propriedade coagulante, seu uso no tratamento de água é impossibilitado devido à instabilidade em solução e dificuldade de armazenamento. Conforme discutido por muitos pesquisadores, a aplicação do ferrato(VI) em larga escala é limitado pela falta de dispositivos de síntese práticos (DENG e ABDEL-SHAIFY, 2024). Assim, apesar de inovador, ainda não é aplicável dentro de uma ETA. Algumas empresas têm iniciado a comercialização do ferrato(VI) com uma formulação estável. Assim, o uso do ferrato(VI) pode se tornar uma realidade com o tempo, desde que a síntese e armazenamento sejam contornados para aplicação em condições reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alavi, S. H. et al. Effects of Ferrate (VI) Pre-oxidation in the Coagulation Treatment of Drinking Water. *Journal of Engineering Research and Reports*, **2023**, 124-133.7
2. Bernardo, L. D.; Dantas, A. D. B.; Voltan, P. E. N. *Métodos E Técnicas De Tratamento De Água*. 3th ed. LDIBE: São Carlos, 2017.
3. Bielski, B. H. J.; Thomas, M. J. *Journal of the American Chemical Society*, **1987**, 109, 7761-7764. [<https://doi.org/10.1021/ja00259a026>]

4. Chandrakanth, M. S.; Amy, G. L. *Environmental Science Technology.*, **1996**, *30*, 431-443. [https://doi.org/10.1021/es9500567]
5. Daniel, L. A. *Métodos Alternativos de Desinfecção da Água*. Rima Artes: São Carlos, 2001.
6. Funasa. *Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS*. Funasa: Brasília, 2014.
7. Gunawan, G.; Prasetya, N. B. A.; Haris, A.; Pratist, E. *Open Chemistry*, **2022**, *20*, 1142-1154. [https://doi.org/10.1515/chem-2022-0223]
8. Hillebrand, F. J.; Benetti, A. D. *Engenharia Sanitária e Ambiental.*, **2020**, *25*, 237. [https://doi.org/10.1590/S1413-41522020193488]
9. Naceradska, J.; Pivokonsky, M.; Pivokonska, L.; Baresova, M.; Henderson, R. K.; Zamyadi, A.; Janda, V. The impact of pre-oxidation with potassium permanganate on cyanobacterial organic matter removal by coagulation. *Water Research*, **2017**, 42-49.
10. Kerry J. Howe; Hand, D. W.; Crittenden, J. C.; Trussell, R. R.; Tchobanoglous, G. *Princípios de Tratamento de Água*. São: Cengage Learning: São Paulo, 2016.
11. Li, C.; Li, X.; Graham, N. *Chemosphere*, **2005**, *6*, 537. [doi:10.1016/j.chemosphere.2005.02.027]
12. Li, C.; Li, X.; Graham, N. *Chemosphere*, **2005**, *6*, 537. [doi:10.1016/j.chemosphere.2005.02.027]
13. Luca, M. A. D.; Luca, S. J. D.; Santana, M. A. *Quím. Nova*, **2003**, *26*, 420-424. [https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000300021]
14. Ministério Da Saúde, M. *Vigilância e Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano*. 1st ed. Editora MS: Brasília, 2006.
15. Munyengabe, A.; Zvinowanda, C. *Br. J. Anal. Chem.*, **2019**, *6*, 40-57. [10.30744/brjac.21793425.RV-19-2019]
16. Sibel Barışçi; Feride Ulu; Heikki Särkkä; Anatholy Dimoglo; Mika Sillanpää. *Int. J. Electrochem. Sci.*, **2014**, *9*, 3099-3117. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)07995-6]
17. SMEWW.2120-E. Physical and Aggregate Properties of Water and Wastewater: 2120 E. Tristimulus Spectrophotometric. Em: Lipps, W. C.; Braun-Howland, E. B.; Baxter, T. E. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 24th ed. APHA Press: Washington DC, 2023, p. 87.
18. SMEWW.2130-B. Physical and Aggregate Properties of Water and Wastewater: 2130 B. Nephelometric Method. Em: Lipps, W. C.; Braun-Howland, E. B.; Baxter, T. E. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 24th ed. APHA Press: Washington DC, 2023, p. 89.
19. SMEWW.2350. Physical and Aggregate Properties of Water and Wastewater: 2350 Oxidant Demand/Requirement. Em: Lipps, W. C.; Braun-Howland, E. B.; Baxter, T. E. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 24th ed. APHA Press: Washington DC, 2023, p. 125.
20. SMEWW.2510-B. Physical and Aggregate Properties of Water and Wastewater: 2510 B Conductivity - Laboratory Method. Em: Lipps, W. C.; Braun-Howland, E. B.; Baxter, T. E. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 24th ed. APHA Press: Washington DC, 2023, p. 134.

21. SMEWW.2550-B. Physical and Aggregate Properties of Water and Wastewater: 2550 B Temperature - Laboratory and Field Methods. Em: Lipps, W. C.; Braun-Howland, E. B.; Baxter, T. E. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed. APHA Press: Washington DC, 2023, p. 149.
22. SMEWW.4500-H⁺ B. Inorganic Nonmetallic Constituents of Water and Wastewater: 4500-H⁺ B pH Electrometric Method. Em: Lipps, W. C.; Braun-Howland, E. B.; Baxter, T. E. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed. APHA Press: Washington DC, 2023, p. 473.
23. SMEWW.4500-O-G. Inorganic Nonmetallic Constituents of Water and Wastewater: 4500-O G. Membrane-Electrode Method. Em: Lipps, W. C.; Braun-Howland, E. B.; Baxter, T. E. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed. APHA Press: Washington DC, 2023, p. 463.
24. Thomas, M.; Kozik, V.; Barbusiński, K.; Sochanik, A; Jampilek, J.; Bąk, A. *Materials*, **2020**, *13*, 5017. [<https://doi.org/10.3390/ma13215017>]
25. Wang, X. et al. The effects of hydrogen peroxide pre-oxidation on ultrafiltration membrane biofouling alleviation in drinking water treatment. *Journal of Environmental Sciences*, **2018**, 117-126.
26. Wei, Y.-L.; Wang, Y.-S.; Liu, C.H. *Metals*, **2015**, *5*, 1770. [<https://doi.org/10.3390/met5041770>]
27. Xie, P.; Chen, Y.; Ma, J.; Zhang, X.; Zou, J.; Wang, Z. *Chemosphere*, **2016**, *155*, 550-563. [<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.003>]
28. Xie, P.; Ma, J.; Fang, J.; Guan, Y.; Yue, S.; Li, X.; Chen, L. *Environmental Science and Technology*, **2013**, *47*, 14051 - 14061. [<https://doi.org/10.1021/es4027024>]