APLICAÇÃO DE ZEÓLITA NATURAL MICRONIZADA COMO AUXILIAR DE FLOCULAÇÃO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO SUL DO BRASIL

Vanessa Maronezi[(1)]
Engenheira Ambiental (Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2017) e Mestra em Ciências (Universidade Federal de São Paulo, 2020). Especialista técnica na Celta Brasil desde 2020, com atuação em Engenharia de Aplicação para tratamento de águas e efluentes utilizando zeólitas naturais e modificadas. Possui experiência em pesquisa e desenvolvimento, áreas contaminadas por metais pesados e soluções baseadas na natureza (SbN).
Sérgio Luiz de Lima Piecas[(1)]
Técnico em Química pela Fundação Liberato Salzano Vieira da Cunha (2004). Executivo de Vendas na Celta Brasil desde 2023.
Bruno Freitas Pio de Azevedo[(1)]
Graduação em Ciências Naturais e Ambientais pela Universidade de Pisa (Itália, 2021), Mestrado em Ciências Ambientais, Monitoramento e Remediação Ambiental pela Universidade de Pisa (Itália, 2023), Doutorando na Universidade de Pisa (Itália, desde 2024 até os dias atuais), atuando em pesquisa sobre soluções de tratamento de água a base de zeólita.
Luciano Teodolino Ferreira Costa[(1)]
Engenheiro Civil pela Faculdade Mario Schenberg (2018); MBA em Engenharia do Saneamento Básico pela Universidade Candido Mendes (2021); MBI em Análise de Negócios Corporativos pela SATC-Criciúma (2024); Especialista em Engenharia e Excelência Operacional na Celta Brasil desde 2013.
Breno Alves Amorim Szoboszlay[(1)]
Engenheiro Químico pela Faculdade Oswaldo Cruz (2024). Analista de P&D desde 2025.

Endereço[(1)]**:** Rua Íris Memberg, 200 – Bairro Vila Jovina - Cotia - SP - CEP: 06705-150 - Brasil - Tel: +55 (11) 93505-3687 - e-mail: vanessa@celtabrasil.com.br.

RESUMO

As variações da qualidade da água bruta e os desafios operacionais enfrentados por Estações de Tratamento de Água (ETAs) têm impulsionado a busca por tecnologias complementares capazes de otimizar os processos de coagulação, floculação e sedimentação. Neste contexto, este trabalho avaliou a aplicação de zeólita natural micronizada, como auxiliar de floculação em ETAs da região Sul do Brasil. Foram realizados ensaios de tratabilidade em laboratório em duas ETAs do Rio Grande do Sul, avaliação em escala real em uma ETA de Santa Catarina e estudo de sedimentação por cone Imhoff. Os resultados demonstraram que a associação entre 75 ppm de zeólita micronizada e PAC promoveu a remoção de turbidez e cor aparente com maior eficiência. Em escala real, a aplicação da zeólita reduziu a turbidez média da água tratada de 0,57 NTU para 0,28 NTU, mantendo todas as amostras avaliadas ≤ 0,5 NTU. Os estudos de sedimentação apresentaram formação mais rápida de lodo e compactação final quando comparados aos sistemas contendo apenas PAC ou PAC e carvão ativado em pó. Os resultados em campo indicam que a zeólita natural micronizada constitui uma alternativa tecnicamente viável para otimização da sedimentação em ETAs, principalmente em condições de baixa turbidez.

PALAVRAS-CHAVE: Zeólita natural, Auxiliar de floculação, Tratamento de água

INTRODUÇÃO

Os processos convencionais de tratamento de água dependem diretamente da eficiência das etapas de coagulação, floculação, sedimentação e filtração. Em cenários de variabilidade da qualidade da água bruta, torna-se necessária a adoção de tecnologias auxiliares capazes de melhorar a formação dos flocos e aumentar a eficiência de remoção de partículas que geram a turbidez (LIBÂNIO, 2016; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Coagulantes primários, como sulfato de alumínio, policloreto de alumínio (PAC) ou cloreto férrico, promovem a desestabilização das partículas normalmente negativamente carregadas, tais como as argilas, siltes, microrganismos e coloides, favorecendo sua agregação para a etapa de floculação (FERREIRA FILHO, 2017). Os auxiliares de floculação, de origem orgânica ou inorgânica, atuam em conjunto com os coagulantes com a principal função de potencializar a formação e a sedimentação dos flocos (LIBÂNIO, 2016; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Em determinadas condições operacionais, como períodos de baixa turbidez, aumento de vazão ou elevada variabilidade da qualidade da água bruta, pode ser necessária a utilização de auxiliares de floculação para favorecer a formação dos flocos e torná-los mais sedimentáveis (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Nesse contexto, flocos com maior densidade, bem como maior resistência mecânica e velocidade de sedimentação tendem a apresentar melhor desempenho no processo de sedimentação, reduzindo o arraste de partículas para os filtros, evitando o aumento de retrolavagens e piora da qualidade da água filtrada (LIBÂNIO, 2016; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; FERREIRA FILHO, 2017).

Em situações de baixa turbidez da água bruta, a formação de flocos adequadamente sedimentáveis pode representar um desafio operacional, uma vez que a menor concentração de partículas suspensas pode reduzir a formação de flocos mais estáveis (LIBÂNIO, 2016). Entretanto, a eficiência do processo não depende exclusivamente do aumento da dosagem de coagulante ou floculante aplicado, uma vez que concentrações excessivas podem comprometer a estabilidade dos flocos formados (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Dessa forma, a utilização de minerais adsorventes naturais surge como alternativa para o setor de saneamento devido ao seu potencial de adsorção, troca iônica e contribuição para a melhoria das propriedades físicas dos flocos formados durante a floculação. Dentre esses materiais, destacam-se as zeólitas naturais do tipo Clinoptilolita, aluminossilicatos cristalinos caracterizados por elevada área superficial, estrutura microporosa e capacidade de troca catiônica (RESENDE; MONTE; PAIVA, 2008; VELARDE et al., 2023). Embora amplamente estudadas para remoção de amônio e metais, sua utilização como um auxiliar de floculação mineral ainda apresenta potencial pouco explorado em sistemas convencionais de tratamento de água (SHINZATO, 2007; SHINZATO et al., 2020). Nessa aplicação, a zeólita pode atuar como agente promotor da formação de flocos mais densos e com maior capacidade de sedimentação (WANG; PENG, 2010).

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação da zeólita natural micronizada do tipo Clinoptilolita malha #325 (45 µm), como auxiliar de floculação em sistemas de tratamento de água localizados na região Sul do Brasil.

OBJETIVO

Avaliar o desempenho da zeólita natural micronizada como auxiliar de floculação em uma estação de tratamento de água na região Sul do Brasil.

Objetivos específicos

- Avaliar a influência da dosagem da zeólita na remoção de turbidez e cor aparente por meio de ensaios de Jar Test;
- Analisar a influência do tempo de contato da suspensão da zeólita no desempenho do tratamento;
- Avaliar a aplicação da zeólita natural micronizada em escala real;
- Comparar a velocidade de sedimentação dos sistemas contendo PAC, PAC associado ao carvão ativado em pó (CAP) e PAC associado à zeólita por meio de ensaios em cone Imhoff.

METODOLOGIA

O estudo foi dividido em três etapas complementares: (I) ensaios de tratabilidade em Jar Test em escala laboratorial para avaliação da dosagem e do tempo adequado da suspensão de zeólita; (II) aplicação em escala real para avaliação do desempenho operacional da tecnologia; e (III) ensaios de sedimentação em cone Imhoff para análise comparativa da cinética de sedimentação e da compactação do lodo.

Variação da dosagem e tempo de contato da zeólita natural micronizada

Esta etapa foi conduzida utilizando amostras de água bruta provenientes de duas ETAs localizadas no estado do Rio Grande do Sul, denominadas ETA RS1 e ETA RS2. As estações estão localizadas na região metropolitana da capital do estado e são abastecidas por fonte superficial, com características de elevada turbidez, cor aparente e presença de gosto e odor. Os ensaios foram conduzidos pela equipe de operadores das ETAs, utilizando PAC como coagulante, polímero catiônico como auxiliar de floculação e suspensão a 10% (m/v) de zeólita natural micronizada do tipo Clinoptilolita.

A primeira etapa contemplou a variação de dosagem de zeólita em 75, 150 e 250 ppm, mantendo os valores de PAC em 18 ppm (ETA RS1) e 30 ppm (ETA RS2) e polímero catiônico em 0,04 ppm (ETA RS1) e 0,11 ppm (ETA RS2). A segunda etapa foi realizada com a melhor dosagem de zeólita da etapa 1, variando os diferentes tempos de contato do mineral com a amostra de água bruta. Para a ETA RS1 foram avaliados os tempos de contato de 05, 10, 20, 50 e 120 minutos, mantendo-se os valores de PAC (18 ppm), polímero (0,04 ppm) e zeólita (75 ppm). Para a ETA RS2, os tempos de contato adotados foram de 10, 20, 50 e 120 minutos, permanecendo com a dosagem de PAC (30 ppm), polímero (0,11 ppm) e zeólita (75 ppm).

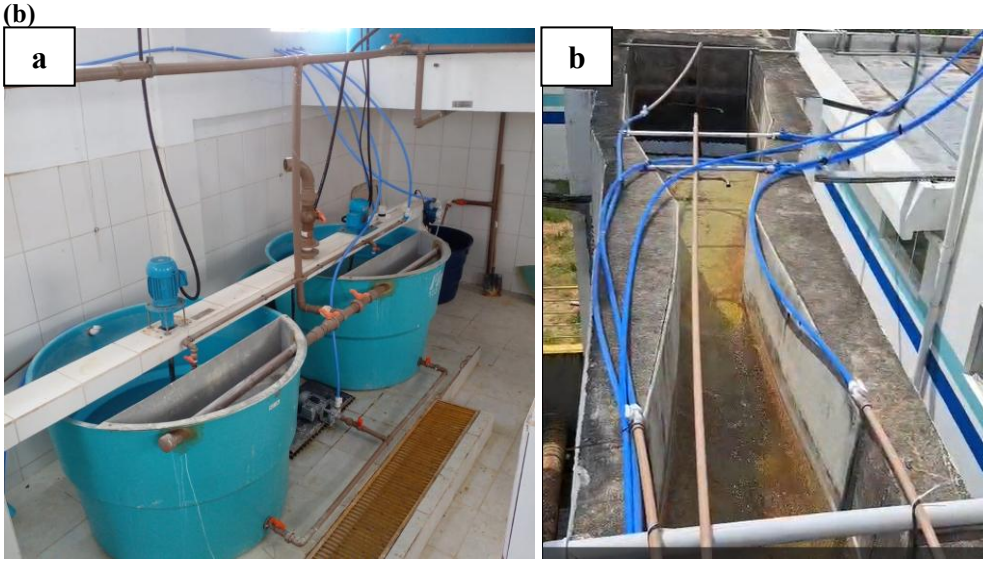
Os ensaios de Jar Test foram realizados utilizando aproximadamente 1.000 mL de água bruta em cada jarro. Inicialmente, a suspensão de zeólita foi adicionada às amostras e mantida sob agitação de 150 rpm durante 15 minutos. Em seguida, o PAC foi dosado nas concentrações previamente estabelecidas, com redução da velocidade de agitação para 75 rpm durante 10 minutos. Posteriormente, foi realizada a dosagem do polímero catiônico, reduzindo-se a velocidade para 50 rpm e mantendo-se a mistura por mais 5 minutos. Após a etapa de floculação, as amostras permaneceram em repouso por 30 minutos para sedimentação, sendo posteriormente coletadas para análise dos parâmetros de qualidade da água. Para a avaliação do tempo de suspensão de zeólita com a água bruta, o mesmo procedimento experimental foi adotado, variando-se apenas o tempo de suspensão do mineral antes da dosagem do coagulante.

Aplicação em escala real

Para esta etapa, uma ETA na região de Santa Catarina (ETA SC) foi disponibilizada como sistema para a aplicação em escala real. Esta estação apresenta proximidade com o litoral e apesar de sua captação ser originada por fonte superficial, a água possui origem montanhosa, apresentando baixa turbidez. As principais elevações de turbidez e cor aparente ocorrem apenas em períodos chuvosos.

A ETA do tipo convencional, conta com dosagem de cal hidratada para correção do pH, PAC como coagulante principal, hipoclorito de sódio e ácido fluossilícico para desinfecção e fluoretação, respectivamente. Os ensaios foram conduzidos utilizando PAC como coagulante e suspensão de zeólita natural Clinoptilolita de 45 µm a 0,09% (m/v), correspondente a uma dosagem de aproximadamente 3,6 ppm. O produto foi aplicado em Calha Parshall, empregando um sistema de dosagem semelhante ao que a operação já utilizava para a cal hidratada (Figura 1). Durante o período de avaliação, a estação operava com vazão de 95 L/s, condição superior à capacidade nominal de projeto, o que favorece o arraste de partículas não sedimentadas.

Figura 1 – Tanque de preparo de cal hidratada e zeólita (a) e ponto de dosagem da zeólita na planta da ETA SC (b)



Análise da cinética de sedimentação em Cone Imhoff

Os ensaios de sedimentação foram realizados em laboratório utilizando amostra de água bruta proveniente da ETA SC. O estudo teve como objetivo comparar o comportamento de sedimentação dos flocos formados em três condições distintas: (I) utilização exclusiva de PAC; (II) associação entre PAC e zeólita natural micronizada; e (III) associação entre PAC e CAP.

Após a realização do processo de coagulação e floculação, as amostras foram transferidas para cones Imhoff graduados, onde foram monitorados os volumes de lodo sedimentado ao longo de 60 minutos. As leituras foram realizadas em intervalos previamente definidos, permitindo avaliar a velocidade de sedimentação, a formação de lodo e o grau de compactação final obtido em cada condição experimental. Os resultados foram utilizados para comparação da cinética de sedimentação dos diferentes sistemas, bem como para avaliação da influência da zeólita na formação de flocos com maior capacidade de sedimentação.

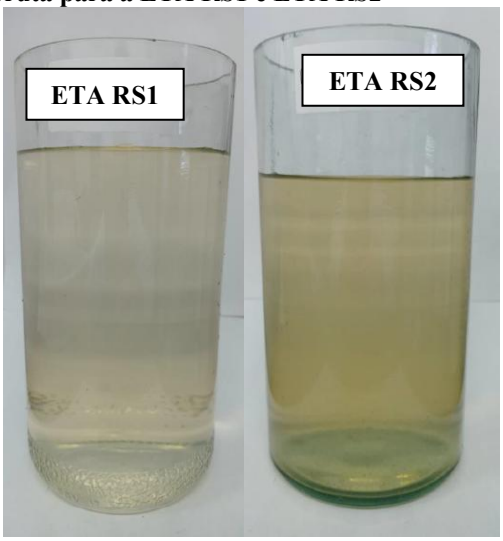
RESULTADOS

As características da água bruta utilizada nos ensaios de tratabilidade realizados nas ETAs RS1 e RS2 estão apresentadas na Tabela 1 e Figura 2. Verificou-se que a água bruta da ETA RS1 exibiu menores valores de turbidez (15,7 NTU) e cor aparente (46,5 mgPtCo/L), além de pH levemente alcalino (6,9), odor e gosto a frio como terroso leve, e odor e gosto a quente como moderado. Não houve presença de nitrogênio amoniacal.
A ETA RS2, apresentou um baixo teor de nitrogênio amoniacal (0,4 mg/L) e pH mais alcalino (8,2), além de valores mais elevados de turbidez (108 NTU) e cor aparente (136,5 mgPTCo/L). As análises organolépticas de gosto e odor a frio e a quente apresentam características terrosas moderadas a forte.

Tabela 1 – Qualidade da água para as ETAs RS1 e RS2

Parâmetro	ETA RS1	ETA RS2
Turbidez (NTU)	15,7	108
Cor aparente (mgPtCo/L)	46,5	136,5
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	0,0	0,4
Odor e gosto (a frio)	Terroso leve	Terroso moderado
Odor e gosto (a quente)	Terroso moderado	Terroso forte
pH	6,9	8,2

Figura 2 - Amostras de água bruta para a ETA RS1 e ETA RS2



Variação da dosagem de zeólita natural micronizada

Entre as dosagens avaliadas, a proporção de 75 ppm de zeólita originou os menores valores residuais de turbidez e cor aparente para ambas as ETAs. Para a ETA RS1, a turbidez foi reduzida de 15,7 NTU para 0,5 NTU, correspondendo a uma eficiência de remoção de 96,8%, enquanto a cor aparente apresentou 89,2% de remoção (46,5 para 5,0 mgPtCo/L). Foi constatado um pH levemente alcalino (7,0 a 7,2), além da redução das características de gosto e odor a frio e a quente para inodoro e terroso leve (Tabela 2 e Figura 3).

Para a ETA RS2, observou-se remoção de 99,5% da turbidez (108 para 0,5 NTU) e 94,9% da cor aparente (136,5 para 7,0 mgPtCo/L), além da redução do nitrogênio amoniacal de 0,4 para 0,0 mg/L (Tabela 3). O pH se manteve estável, em valores de 7,9 a 8,3. As características de odor e gosto a frio e a quente foram reduzidas para inodoro e terroso leve, respectivamente.

Tabela 2 – Análises de qualidade da água em ensaio Jar Test para a ETA RS1 considerando diferentes dosagens de zeólita

Parâmetro	75 ppm zeólita	150 ppm zeólita	250 ppm zeólita
Turbidez (NTU)	0,5	0,6	0,6
Cor aparente (mgPtCo/L)	5,0	5,4	5,5
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	0,0	0,0	0,0
Odor e gosto (a frio)	Inodoro	Inodoro	Inodoro
Odor e gosto (a quente)	Terroso leve	Terroso leve	Terroso leve
pH	7,2	7,1	7,0

Zeólita natural micronizada: 75, 150 e 250 ppm, PAC: 18 ppm e polímero catiônico: 0,04 ppm.

Figura 3 – Amostras da água tratada após ensaio Jar Test para a ETA RS1 utilizando diferentes dosagens de zeólita

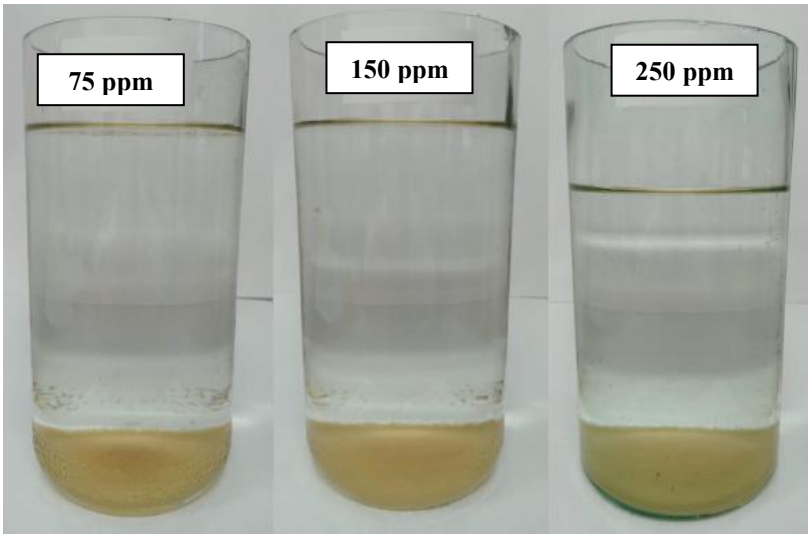
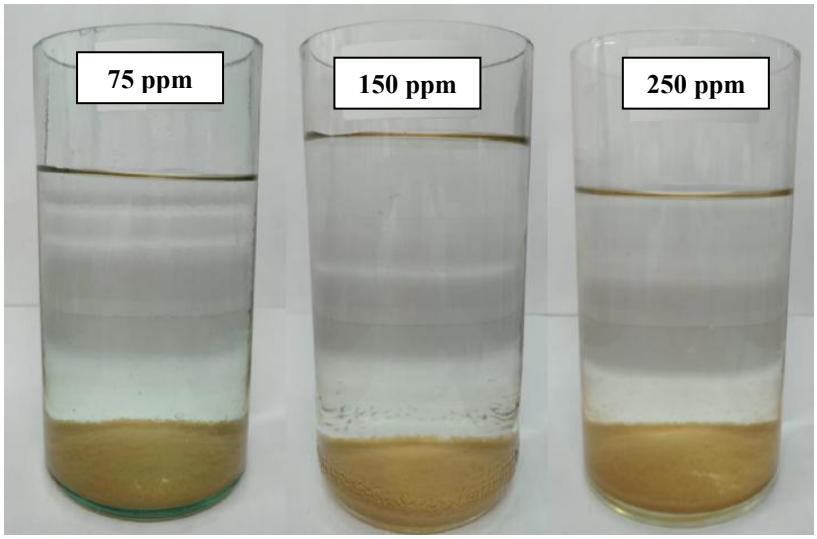


Tabela 3 - Análises de qualidade da água em ensaio Jar Test para a ETA RS2 considerando diferentes dosagens de zeólita

Parâmetro	75 ppm zeólita	150 ppm zeólita	250 ppm zeólita
Turbidez (NTU)	0,5	0,6	0,6
Cor aparente (mgPtCo/L)	7,0	7,8	8,1
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	0,0	0,0	0,0
Odor e gosto (a frio)	Inodoro	Inodoro	Inodoro
Odor e gosto (a quente)	Terroso leve	Terroso leve	Terroso leve
pH	8,3	8,1	7,9

Zeólita natural micronizada: 75, 150 e 250 ppm, PAC: 30 ppm e polímero catiônico: 0,11 ppm.

Figura 4 - Amostras da água tratada após ensaio Jar Test para a ETA RS2 utilizando diferentes dosagens de zeólita



Variação do tempo de contato

Para a ETA RS1, o tempo de suspensão da zeólita de 50 minutos proporcionou os menores valores de turbidez (0,4 NTU) e cor aparente (4,2 mgPtCo/L), além da redução das características de gosto e odor para a classificação de terroso leve, tanto a frio quanto a quente (Tabela 4 e Figura 5).

Para a ETA RS2, os menores valores de turbidez (0,9 NTU) e cor aparente (6,5 mgPtCo/L) foram obtidos após 10 minutos de contato com o mineral. Observou-se tendência de aumento desses parâmetros com o prolongamento do tempo de contato da suspensão. Nessa condição, a concentração de nitrogênio amoniacal foi de 0,21 mg/L. Entretanto, a maior redução desse parâmetro foi observada no maior tempo de contato avaliado (120 minutos, 0,15 mg/L) (Tabela 5 e Figura 6). Em relação às características organolépticas, observou-se redução do gosto e odor a frio e a quente para a classificação de terroso leve.

Tabela 4 - Análises de qualidade da água para ensaio Jar Test para a ETA RS1 considerando diferentes tempos de suspensão da zeólita

Parâmetro	05 minutos	10 minutos	20 minutos	50 minutos	120 minutos
Turbidez (NTU)	5,4	0,6	0,6	0,4	0,6
Cor aparente (mgPtCo/L)	6,5	4,6	4,4	4,2	4,6
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Odor e gosto (a frio)	Terroso moderado	Terroso leve	Terroso leve	Terroso leve	Terroso leve
Odor e gosto (a quente)	Terroso moderado	Terroso forte	Terroso moderado	Terroso leve	Terroso moderado

Figura 5 - Amostras da água tratada após ensaio Jar Test para a ETA RS1 utilizando diferentes tempos de suspensão da zeólita

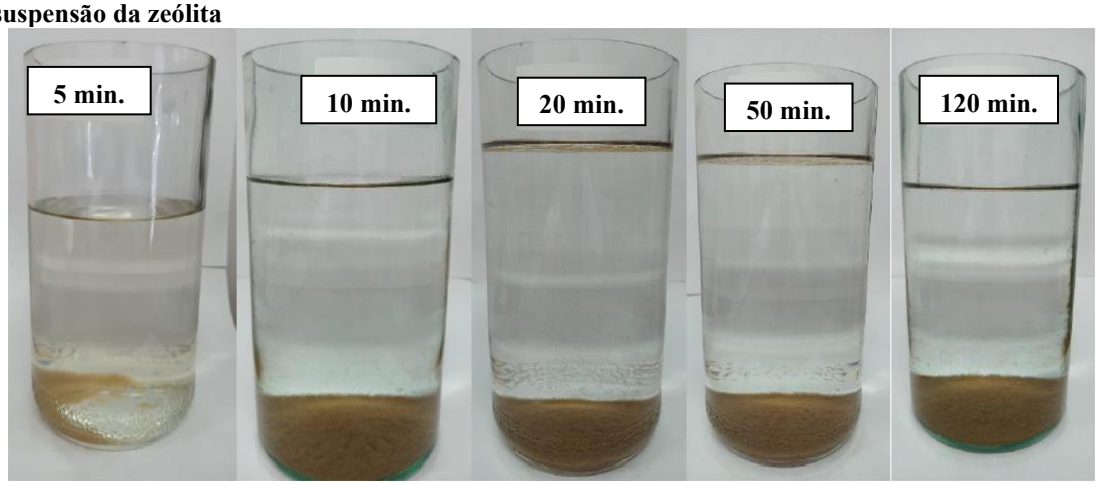
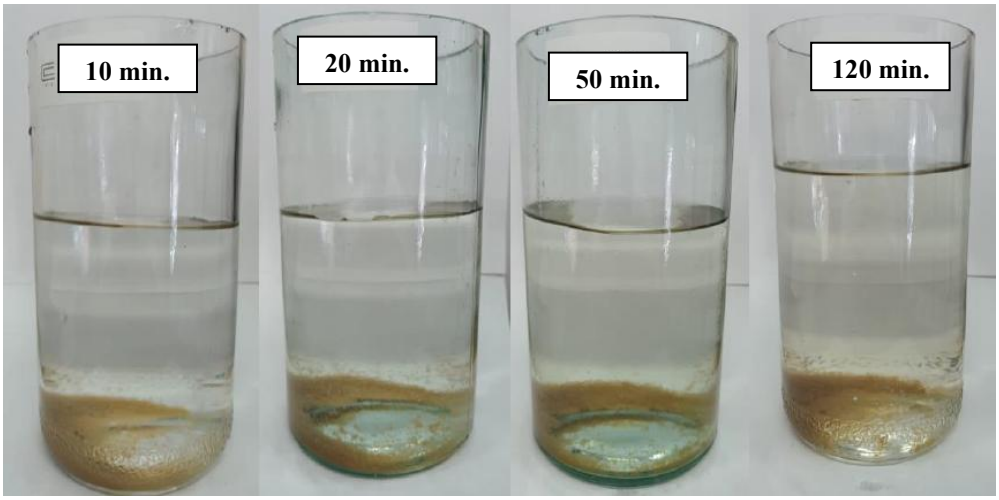


Tabela 5 - Análises de qualidade da água em ensaio Jar Test para a ETA RS2 considerando diferentes tempos de suspensão da zeólita

Parâmetro	10 minutos	20 minutos	50 minutos	120 minutos
Turbidez (NTU)	0,9	1,4	2,1	3,3
Cor aparente (mgPtCo/L)	6,5	10,5	18,0	21,5
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	0,21	0,23	0,21	0,15
Odor e gosto (a frio)	Terroso leve	Terroso leve	Terroso moderado	Terroso moderado
Odor e gosto (a quente)	Terroso leve	Terroso leve	Terroso moderado	Terroso moderado

Figura 6 - Amostras da água tratada após ensaio Jar Test para a ETA RS2 utilizando diferentes tempos de suspensão da zeólita

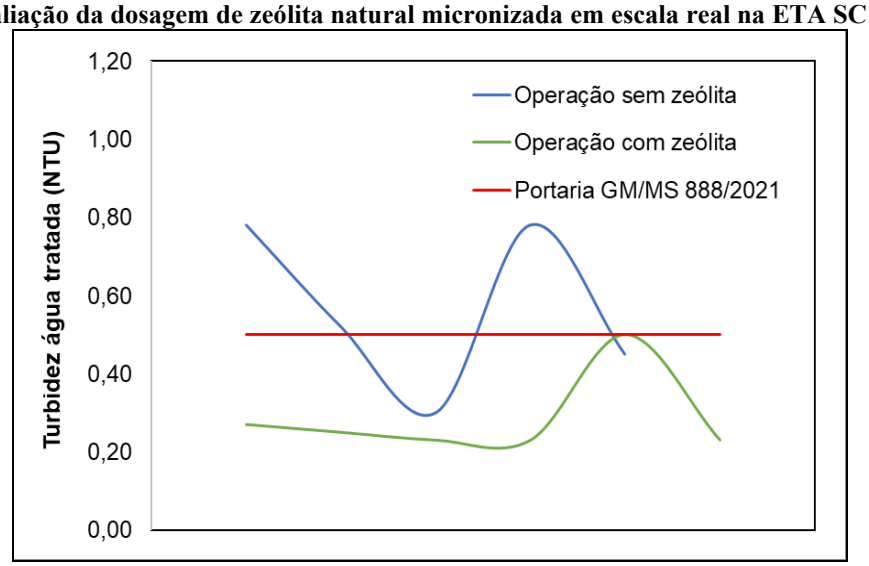


Aplicação em escala real

A aplicação em escala real em uma ETA em Santa Catarina ocorreu por dois dias consecutivos, analisando-se principalmente os valores de turbidez da água bruta e água tratada, comparando-se os dias de operação sem a dosagem da zeólita e após a dosagem da zeólita. Em ambos os períodos, houve dosagem de PAC 18% como coagulante, mas não ocorreu a dosagem de polímero catiônico e cal hidratada.

Durante o período de avaliação, a turbidez da água bruta manteve-se inferior a 1 NTU. A dosagem de PAC 18% variou entre 1,2 e 1,5 L/h (inferior a 1 ppm), a dosagem de zeólita em aproximadamente 3,6 ppm (1.800 L/h), e a vazão operacional permaneceu próxima de 95 L/s. Verificou-se que todas as amostras avaliadas após a dosagem da zeólita apresentaram turbidez ≤ 0,5 NTU, com valor médio de 0,28 NTU (Figura 7). Em contraste, as amostras coletadas antes da aplicação apresentaram turbidez média de 0,57 NTU, incluindo três medições superiores a 0,5 NTU, valor acima do máximo permitido conforme portaria de potabilidade GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021).

Figura 7 - Avaliação da dosagem de zeólita natural micronizada em escala real na ETA SC

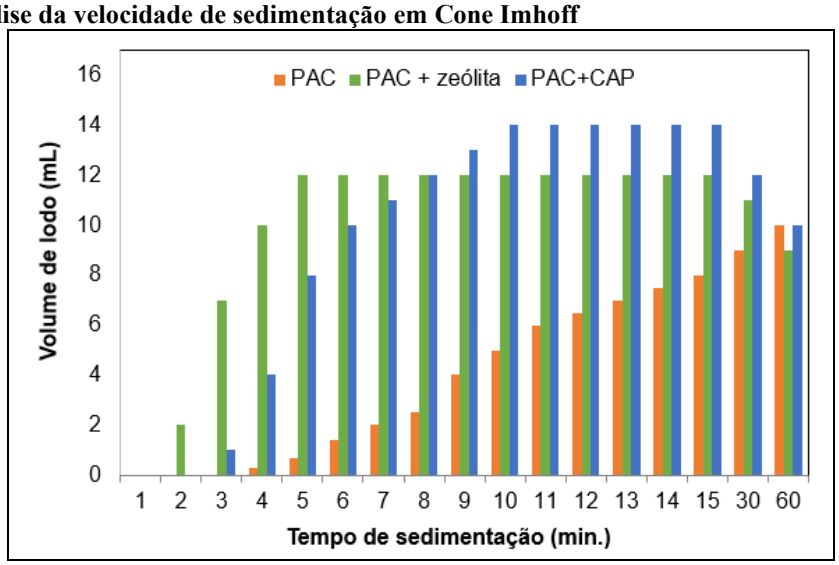


Análise da velocidade de sedimentação em Cone Imhoff

O gráfico a seguir demonstra o acúmulo progressivo de lodo resultante da sedimentação dos flocos formados durante a etapa de floculação, avaliada em cone Imhoff (Figura 8).

Os ensaios evidenciaram que a utilização da zeólita natural micronizada Clinoptilolita promoveu maior velocidade de sedimentação quando comparada aos sistemas contendo apenas PAC e PAC associado ao CAP. O volume de lodo sedimentado atingiu aproximadamente 12 mL após 5 minutos, estabilizando-se posteriormente em 15 minutos e apresentando o menor volume final entre os tratamentos (9 mL).

Figura 8 - Análise da velocidade de sedimentação em Cone Imhoff



Os valores de turbidez da água bruta oscilaram entre 5 e 7 NTU, apresentando turbidez final de 0,44 NTU para o experimento contendo a zeólita e 0,40 NTU para o CAP. Em contraste, no ensaio em que foi utilizado apenas PAC, a turbidez final foi de 2,64 NTU, constituindo o maior valor dentre as amostras.

O uso de carvão ativado como auxiliar de floculação também demonstrou melhorias não apenas na eficiência da clarificação, mas também na velocidade de sedimentação, quando comparado ao uso exclusivo de PAC. No entanto, seu desempenho mostrou-se inferior ao do mineral. A primeira fase de acúmulo de lodo, no caso do carvão ativado, apresentou duração aproximada de 10 minutos, o dobro do observado para a zeólita micronizada. Além disso, o volume de lodo formado foi superior, estabilizando em torno de 14 mL, a partir de 10 minutos.

DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a aplicação da zeólita natural micronizada Clinoptilolita influenciou o desempenho das etapas de floculação e sedimentação para os ensaios realizados em laboratório e escala real. Nos ensaios de Jar Test realizados nas ETAs RS1 e RS2, verificou-se que a associação entre PAC, polímero e zeólita proporcionou elevadas eficiências de remoção de turbidez e cor aparente, produzindo água tratada com características compatíveis com os padrões operacionais desejados. Em ambas as ETAs, a dosagem de 75 ppm apresentou os melhores resultados entre as condições avaliadas, indicando que o aumento da dosagem não resultou necessariamente em ganhos adicionais na sedimentação dos flocos.

Os ensaios de tempo de contato evidenciaram que o aumento do tempo da suspensão da zeólita exerce influência sobre a eficiência do tratamento. Entretanto, observou-se que o comportamento varia de acordo com as características da água bruta, uma vez que os tempos ótimos identificados para as duas ETAs foram distintos (50 minutos para a ETA RS1 e 10 minutos para a ETA RS2). Esse resultado sugere que a definição do tempo de contato da zeólita com a água bruta deve considerar as particularidades operacionais de cada sistema.

A avaliação em escala real demonstrou que o uso da zeólita natural micronizada é tecnicamente viável em estações que já dispõem de uma infraestrutura para preparo e dosagem de produtos sólidos em suspensão, sendo possível reaproveitar o mesmo sistema ou reproduzi-los para a aplicação do mineral. Mesmo sob condições de baixa turbidez da água bruta e operação acima da vazão nominal da estação, a utilização da zeólita micronizada promoveu redução da turbidez da água tratada, mantendo todas as amostras avaliadas abaixo de 0,5 NTU.

Os estudos de sedimentação constituíram uma das principais evidências do mecanismo de atuação da zeólita como auxiliar de floculação. Os resultados demonstraram que a presença do mineral acelerou a formação e a compactação do lodo sedimentado em 15 minutos de tempo de contato, quando comparada ao uso exclusivo de PAC ou a associação de PAC + CAP. A rápida estabilização do volume de lodo observada nos ensaios indica a formação de flocos com maior densidade e maior velocidade de sedimentação.

Embora o carvão ativado em pó também tenha contribuído para o aumento da velocidade de sedimentação em comparação ao uso exclusivo de PAC, seu desempenho foi inferior ao observado para a zeólita micronizada. Esse comportamento pode estar associado à menor densidade aparente do carvão ativado em pó se comparada a zeólita, o que favorece a formação de flocos com menor densidade aparente e menor velocidade de sedimentação.

De forma geral, os resultados indicam que a utilização de zeólita natural micronizada apresenta potencial como auxiliar de floculação de origem inorgânica mineral, especialmente em situações nas quais a eficiência da sedimentação dos flocos está comprometida e pode influenciar no desempenho da unidade de sedimentação e filtração.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a zeólita natural micronizada Clinoptilolita apresentou potencial para aplicação como auxiliar de floculação em estações convencionais de tratamento de água.

Nos ensaios de teste de jarros, a associação entre PAC e zeólita promoveu elevadas eficiências de remoção de turbidez e cor aparente, com destaque para a dosagem de 75 ppm, que apresentou o melhor desempenho entre as condições avaliadas. Os estudos de tempo de contato da zeólita com a amostra de água bruta indicaram que o tempo de contato influencia na eficiência do tratamento, sendo necessária a avaliação de cada sistema de forma independente.

A aplicação em escala real demonstrou a viabilidade operacional da tecnologia, resultando em redução da turbidez da água tratada, sendo possível atingir todas as amostras com valores ≤ 0,5 NTU durante o período avaliado. Para os ensaios de sedimentação em cone Imhoff, o uso da zeólita promoveu o aumento da velocidade de decantação e maior compactação do lodo quando comparados aos sistemas contendo apenas PAC e PAC associado ao carvão ativado em pó. Esses resultados indicam que a zeólita micronizada favorece a formação de flocos mais densos e com melhor capacidade de sedimentação.

Dessa forma, conclui-se que a utilização de zeólita natural micronizada Clinoptilolita constitui uma alternativa tecnicamente viável para otimização dos processos de clarificação e sedimentação em ETAs, especialmente em condições de baixa turbidez e em sistemas que demandam maior eficiência operacional dos decantadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 - Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

2. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P.E.N. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 3. ed. São Carlos: LDiBe Editora, 2017.

3. FERREIRA FILHO, S.S. Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

4. LIBÂNIO, M. Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água. 4. ed. Campinas: Átomo, 2016.

5. RESENDE, N. G. A. M.; MONTE, M. B. M.; PAIVA, P. R. P. In.: LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. (Ed.). Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, cap. 39: zeólitas naturais, 2008.

6. SHINZATO, M.C. *Remoção de metais pesados em solução por zeólitas naturais: revisão crítica*. *Revista do Instituto Geológico,* v. 27-28(1/2), p.65-78, 2007.

7. SHINZATO, M.C.; WU, L.F.; MARIANO, T.L.; FREITAS, J.G.; MARTINS, T.S. *Mineral sorbents for ammonium recycling from industry to agriculture. Environmental Science and Pollution Research,* v.27, p.13599–13616, Ap. 2020.

8. VELARDE, L.; NABAVI, M.S.; ESCALERA, E.; ANTTI, M-L.; AKHTAR, F. *Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review. Chemosphere.* v.328, p.138508, Jul. 2023.

9. WANG, S.; PENG, Y. *Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment*. *Chemical Engineering Journal*, v. 156, p.11-24, Jan. 2010.