# BENTONITA COMO AUXILIAR DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO: UMA SOLUÇÃO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA COM BAIXA TURBIDEZ

**Bruna Temochko dos Passos, MSc.** [(1)]
Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina com estudo direcionado para o uso de bentonita no tratamento de água. Possui mais de sete anos de experiência em laboratório, sendo técnica em química formada pelo Instituto Federal de Santa Catarina. Atualmente, atua como consultora comercial na T-Minas Bentonitas Industriais, onde é responsável pela prospecção e gestão de clientes em diferentes segmentos industriais, além do estudo e desenvolvimento de novas oportunidades de mercado.
**Débora Kochepka, MSc. Dra** [(2)]
Doutora em Química pela Universidade Federal do Paraná com MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas. Possui mais de 10 anos de experiência em projetos de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e produtos nos setores de mineração, aditivos para nutrição animal, agronegócio e energia. Atualmente, atua como gerente técnica na T-Minas Bentonitas Industriais, onde lidera iniciativas estratégicas e de inovações.
**Marcelo Cruz** [(3)]
Técnico em Química na Companhia de Saneamento do Paraná, Sanepar, atuando como responsável técnico pela qualidade da água em 25 municípios.

**Endereço[(1)]:** Rua Arnaldo Perine, nº530 – Florestal – Quatro Barras – Paraná - CEP: 83420-000 - Brasil - Tel: +55 (48) 9 9610-3537 - e-mail: bruna.passos@t-minas.com.br**.**

## RESUMO

As condições da água bruta estão cada vez mais sujeitas a oscilações climática e, entre os diversos parâmetros, a redução de turbidez gera grande preocupação. Isto porque, para as ETAs com tratamento convencional, a baixa turbidez promove ineficiência no tratamento e rápida colmatação de filtros. Neste cenário, o uso de bentonita como auxiliar de coagulação surge como uma solução de baixo custo, alta eficácia e de fácil aplicação. Dentre as características das bentonitas que explicam sua aplicação eficaz estão a sua composição majoritária de montmorilonita, capacidade de troca catiônica e a sua carga superficial negativa, os quais possibilitam que elas desempenhem comportamento similar às partículas coloidais que naturalmente promovem turbidez a água. Deste modo, o trabalho avaliou a utilização de bentonita policatiônica em águas de baixa turbidez e demonstrou que, uma vez adicionada ao processo, a bentonita gerou resultados positivos para o tratamento da AB. Em escala laboratorial, obteve-se redução de turbidez de 57,4%, 27,6% e 50,5% quando comparado ao tratamento unicamente com o policloreto de alumínio. Enquanto em ETA, o aumento na eficiência do processo de coagulação levou a redução significativa do indicador de perdas por litro no sistema produtor (IPLP) e aumento da carreira de filtração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bentonita, auxiliar de coagulação, tratamento de água.

## INTRODUÇÃO

A água é reconhecida como um direito humano pela Organização das Nações Unidas (ONU), e está no centro das discussões dos objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS) (DALSTEIN; NAQVI, 2022; UNESCO, 2023; YATEH; LI; TANG; LI CHENG, 2024). Vale ressaltar que apesar de 70% da Terra ser coberta por água, apenas 2,5% existem como água doce (GRZEGORZEK; WARTALSKA; KA´ZMIERCZAK, 2023; HAFEEZ; SHAMAIR; SHEZAD; JAVED *et al.*, 2021).

Devido à escassez de água doce e pela sua elevada demanda, prévio ao consumo humano, é necessário que a água bruta (AB) seja tratada afim de adequá-la aos padrões de potabilidade estabelecidos pelos órgãos reguladores (FRANCISCO; POHLMANN; FERREIRA, 2011; YATEH; LI; TANG; LI CHENG, 2024). No Brasil, o sistema de tratamento convencional é o mais usado, que consiste nas etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (HELLER; PÁDUA, 2010; MICHELAN; BATISTA; BATISTA; SANTOS *et al.*, 2019).

O tratamento da AB envolve a remoção de partículas coloidais, sólidos em suspensão e matéria orgânica, incluindo microrganismos como algas, bactérias e fungos, que contribuem para a turbidez (DAYARATHNE; ANGOVE; JEONG; ARYAL *et al.*, 2022; FARHAN, 2019; HUANG; ZHAO; GAO; SUN *et al.*, 2016). A turbidez é definida como a medida do grau de interferência da luz através de um líquido, geralmente expressa em unidades de turbidez nefelométricas (NTU) (MICHELAN; BATISTA; BATISTA; SANTOS *et al.*, 2019; ORGANIZATION, 2017). Segundo a Organização Mundial da Saúde, os sistemas públicos de abastecimento de água devem atingir no máximo 0,5 NTU após a filtração (ORGANIZATION, 2022).

No entanto, um dos grandes desafios da atualidade é a variabilidade das características da AB devido as mudanças climáticas e meteorológicas, especialmente o efeito das chuvas (PEREIRA; CRUZ, 2010). Períodos prolongados sem chuva têm se tornando cada vez mais frequentes, mesmo em regiões que, historicamente, possuem alto índice pluviométrico. Como consequência, as características das águas dos mananciais superficiais são alteradas, especialmente a turbidez (HELLER; PÁDUA, 2010; MORUZZI; REALI, 2008).

O tratamento da AB com baixa turbidez é geralmente mais desafiador (HELLER; PÁDUA, 2010; MICHELAN; BATISTA; BATISTA; SANTOS *et al.*, 2019) e isto ocorre porque a eficácia do processo está relacionada ao desempenho da coagulação-floculação. Assim, para uma coagulação bem-sucedida, a presença de quantidades significativas de partículas coloidais é essencial. O processo se baseia na adição de um agente coagulante ao sistema sob agitação, o qual provoca a desestabilização das cargas superficiais dos coloides, caracteristicamente negativas, permitindo a atuação das forças de atração (DAHASAHASTRA; BALASUNDARAM; LATKAR, 2022; FARHAN, 2019; RANGA, 2018). Entre os coagulantes mais comumente utilizados cita-se o policloreto de alumínio (PAC) em função do seu baixo custo e alto desempenho (FARHAN, 2019; HUANG; ZHAO; GAO; SUN *et al.*, 2016).

Na etapa seguinte, chamada de floculação, a aglomeração das partículas ocorre devido às colisões provocadas pelo movimento browniano, promovendo a formação de flocos, e posterior decantação (FARHAN, 2019; MA; WANG; WANG; ZHANG *et al.*, 2019; RANGA, 2018). Logo, quando a turbidez da AB é baixa, a baixa concentração de partículas em suspensão dificulta a formação de aglomerados (HELLER; PÁDUA, 2010; PEREIRA; CRUZ, 2010). Portanto, uma alternativa para o problema descrito, considerando a pouca viabilidade de alterações estruturais nas ETAs, é a adição de auxiliares de coagulação-floculação. Alguns autores mostram que as bentonitas podem ser usadas para melhorar a remoção de sólidos em suspensão da água, o que é uma de suas vantagens além de seu baixo custo, alta eficácia, fácil aplicação e carácter ecológico das argilas (AHARIA; DDAHIMB; RAMADANEC, 2018; EL-TAWEEL; MOHAMED; ALREFAEY; HUSIEN *et al.*, 2023; FARHAN, 2019; MA; WANG; WANG; ZHANG *et al.*, 2019; RANGA, 2018; SULTANA, 2021; WARZECHA, 2018).

Bentonitas são argilas ricas em montmorilonita com unidade estrutural do tipo 2:1. Estes materiais lamelares são compostos por duas folhas tetraédricas de sílica combinadas com uma folha octaédrica central de alumina, unidas entre si através de átomos de oxigênio comum a ambas (HALDAR, 2014; KUMARASAMY; SHAH; SUNDARADOSS; BALU *et al.*, 2022). Esta estrutura cristalina tem a capacidade de sofrer substituições isomórficas, nas quais os íons estruturais podem ser trocados por cátions de menor carga e tamanho semelhante, o que gera um desbalanceamento eletrônico no retículo cristalino (SCHULZE, 2005 ; SILVA; FERREIRA, 2008).

Como forma de balancear a carga superficial negativa, o espaço interlamelar é ocupado por cátions trocáveis como, por exemplo, sódio, cálcio, magnésio, potássio e lítio, que podem difundir-se livremente entre as lamelas (ROSÁRIO, 2010; SILVA; FERREIRA, 2008). Para esta propriedade é dado o nome de capacidade de troca catiônica (CTC). A presença dos cátions trocáveis é de extrema importância para as propriedades das argilas bentoníticas, uma vez que a espécie predominante influenciará na classificação do argilomineral (SCHULZE, 2005 ). As bentonitas chamadas de sódicas são aquelas que possuem $Na^{+}$ como íon majoritário. De forma análoga, quando há abundância de $Ca^{2+}$ a bentonita é denominada cálcica. Uma terceira classificação ocorre quando não há uma concentração de cátion predominante e a bentonita é denominada de policatiônica (DELAVI, 2011; LUZ; OLIVEIRA, 2005; ROSÁRIO, 2010).

Como característica do desbalanceamento eletrônico mencionado, quando em meio aquoso, a bentonita se comporta de forma similar às partículas coloidais que promovem a turbidez na água. Logo, quando incorporadas na AB, o coagulante também agirá sobre a bentonita, possivelmente através da neutralização das cargas

superficiais negativas. Assim, promove-se com maior efetividade os choques que levarão à formação dos flocos e torna-se viável o processo de coagulação e floculação (DELAVI, 2011; HELLER; PÁDUA, 2010). Ainda que os fenômenos sejam compreendidos, há pouquíssimos relatos na literatura sobre o tema, além de não haver um consenso sobre o impacto de diferentes concentrações de bentonita adicionadas ao tratamento quando a turbidez da água bruta é variável, fator que justificou este estudo de aplicação prática

## OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial da bentonita policatiônica em atuar como auxiliar de coagulação para o tratamento de águas de baixa turbidez, tanto em escala laboratorial quanto em grande escala em uma ETA.

## METODOLOGIA

Ensaios em escala laboratorial

Os ensaios de coagulação e floculação foram realizados através do teste de jarros e separados em duas fases. Na etapa inicial, avaliou-se a eficácia do coagulante isoladamente, a fim de determinar a dosagem responsável por gerar a menor turbidez residual na água tratada ($T_{AT}$). Na etapa seguinte, examinou-se a ação combinada de coagulante e diferentes concentrações de argilas bentonítica como auxiliar de coagulação. Ambas as fases foram realizadas em duplicata. Os resultados obtidos na segunda etapa foram então comparados com amostras tratadas somente com o coagulante nas dosagens pré-determinadas na primeira fase.

A água bruta utilizada neste trabalho foi cedida pela Companhia Catarinense de Água e Saneamento, CASAN. A coleta foi realizada na adutora da ETA José Pedro Horstmann, localizada no município de Palhoça, SC, nos meses de agosto, setembro e dezembro de 2023. As amostras consistem na mistura de dois mananciais superficiais que abastecem a estação: Rio Cubatão e Rio Pilões, historicamente caracterizados pela baixa turbidez e alta cor. O pH das amostras foi mantido nos valores originais, entre 6,5 e 7,5, e estas foram armazenadas a -2ºC. Ainda, é importante ressaltar que para os testes, a AB foi somente utilizada após alcançar temperatura ambiente (25 °C).

Visto os três diferentes momentos de coleta, a água bruta apresentou condições iniciais de turbidez distintas, aqui divididas em três grupos: baixa, média e alta turbidez, como evidenciado na tabela 1. Entretanto, destaca-se que esta divisão foi adotada apenas para facilitar a discussão, uma vez que todas as amostras utilizadas são águas de baixa turbidez, não excedendo 33 NTU.

**Tabela 1: Turbidez inicial média da água bruta para os grupos amostrais aqui nomeados como baixa, média e alta turbidez.**

| Grupo amostral | Turbidez da água bruta (NTU) | |
|---|---|---|
| | Ensaios com coagulante | Ensaios com coagulante e bentonita |
| Baixa turbidez | 7,6 ± 0,5 | 7,0 ± 0,2 |
| Turbidez intermediária | 21,3 ± 0,8 | 20,6 ± 1,5 |
| Alta turbidez | 29,6 ± 0,9 | 30,6 ± 0,9 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Como coagulante, fez-se uso do policloreto de alumínio (PAC 12%) com 10,72% (m/m) de óxido de alumínio e densidade de 1,265 g/cm$^3$, o qual foi cedido pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). Para a primeira etapa de experimentos, utilizou-se diferentes concentrações de PAC a fim de determinar a dosagem que gerará menor turbidez residual, sendo estas expressas em termos de mg/L de $Al_2O_3$, conforme tabela 2. Tais dosagens foram estipuladas a partir de estudos prévios.

Para a segunda etapa de experimentos, avaliou-se a ação combinada do coagulante e auxiliar de coagulação. Fixou-se a dosagem de PAC determinada na etapa anterior e diferentes concentrações de bentonita foram adicionadas ao sistema, conforme tabela 3. A argila bentonítica utilizada neste estudo, classificada como policatiônica, foi fornecida pela T-Minas Bentonitas Industriais e extraída de uma das jazidas da empresa, localizada na cidade de Quatro Barras – PR. O argilomineral se encontra na forma de pó com diâmetro de

partícula majoritário de 0.044 mm (#325), coloração bege, inchamento de Foster inferior a 6 mL/2g, capacidade de troca catiônica (CTC) superior a 400 mmol/Kg e pH de 6,5 em suspensão aquosa com 0,6% de sólidos (m/m).

**Tabela 2: Concentrações de coagulante, expressas em mg/L de $Al_2O_3$, utilizados na primeira fase de experimentos para os grupos amostras com água bruta de baixa, média e alta turbidez inicial.**

| Baixa | Média | Alta |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 30 | 30 |
| 8 | 35 | 35 |
| 11 | 40 | 40 |
| 14 | 45 | 45 |
| 17 | 50 | 50 |
| 20 | 55 | 55 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Todos os experimentos de coagulação e floculação foram realizados em *Jar Test* Quimis, modelo Q305, composto por seis béqueres, cada um deles contendo 500 mL de água bruta. As amostras foram submetidas a mistura rápida a 110 rpm por 15 segundos, seguida de mistura lenta a 15 rpm por 15 min, com subsequente repouso para decantação por 30 min. Os parâmetros aqui descritos foram determinados a fim de mimetizar as condições da ETA José Pedro Horstmann. Após decantação, retirou-se 25 mL do sobrenadante com o auxílio de uma seringa, aproximadamente, 2 cm a abaixo da superfície da água para posterior análises. A eficiência dos tratamentos foi avaliada pela análise da turbidez residual através do método nefelométrico com turbidímetro Instrutherm TD-200.

**Tabela 3: Concentrações de bentonita, expressas em mg/L, utilizados na segunda fase de experimentos para os grupos amostrais com água bruta de baixa, média e alta turbidez inicial.**

| Baixa | Média | Alta |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 15 | 3 |
| 10 | 25 | 6 |
| 15 | 35 | 9 |
| 20 | 45 | 15 |
| 25 | 55 | 20 |
| 30 | 65 | 25 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Juntamente aos ensaios de coagulação e floculação, entende-se a importância de avaliar o comportamento do desenvolvimento da carga superficial quando a bentonita é dispersa em água, sob diferentes condições de pH, visto ser um fator crucial para a remoção de turbidez (JIANG, 2015; MOUD, 2022; SARITH; KARNEN; DWARAPUREDDI, 2019). Nesse contexto, determinou-se o potencial zeta em equipamento da Malvern, modelo Zetasizer Nano – ZS, tendo água como material dispersante, para faixa de pH de 2 a 12. O ajuste do potencial hidrogeniônico foi realizado através de soluções de ácido clorídrico e hidróxido de sódio.

Ensaios em estação de tratamento de água

A fim de avaliar o desempenho da bentonita como auxiliar de coagulação em estações de tratamento de água, realizam-se ensaios na ETA Ubiratã, localizada na cidade de Ubiratã, PR, pelo período de 30 dias. Projetada como estação tipo CEPIS, a unidade conta com sistema convencional de tratamento e é formada por quatro módulos filtrantes, cada qual com quatro filtros. No que tange a turbidez da água bruta, em função da redução expressiva dos volumes de chuva durante o período de testes, os valores eram inferiores a 10 NTU. Como coagulante, também se fez uso do policloreto de alumínio (PAC).

Poucas alterações mostraram-se necessárias para incorporação da bentonita ao tratamento. Para este processo, fez-se uso um tanque, acoplado a agitador mecânico, onde dispersou-se a argila bentonítica em água na concentração de 25 g/L. O uso do agitador, programado para operar por 15 min a cada 60 min, tornou-se fundamental para o sucesso da aplicação, visto a necessidade de manter a argila em suspensão.

Como ponto de dosagem da dispersão de bentonita, adotou-se a adutora de chegada e, com auxílio de uma bomba dosadora, manteve-se fixa a concentração do auxiliar de coagulação em 30 mg/L. Com o intuito de avaliar os impactos na turbidez, análises na água *in-natura* e na caneleta de mistura rápida foram realizadas a cada 60 min. A efetividade do auxiliar foi avaliada através dos efeitos na carreira de filtração e impactos no indicador de perdas por litro no sistema produtor (IPLP). O IPLP se refere a quantidade de água perdida no processo de tratamento (limpeza de filtros e descarga de decantadores), fazendo relação entre o volume aduzido nas captações e o produzido com o número de ligações.

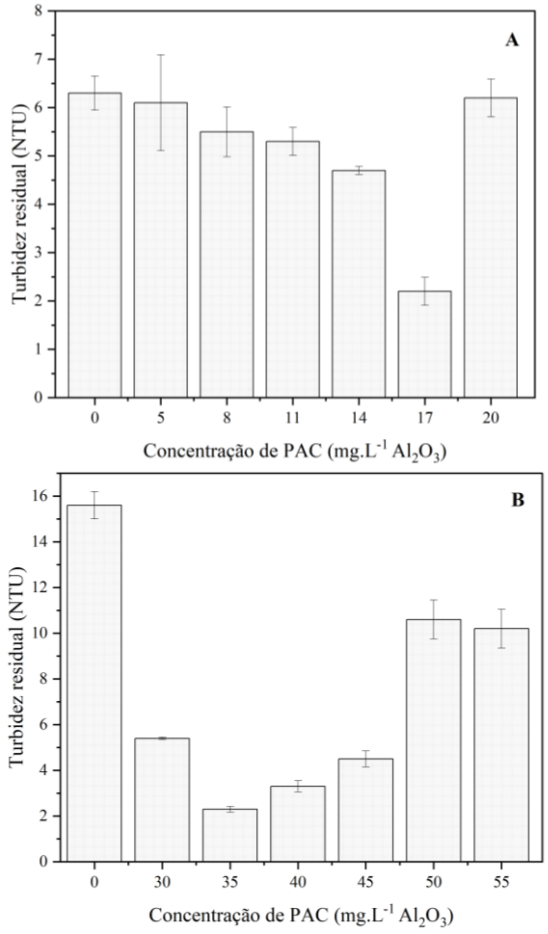
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

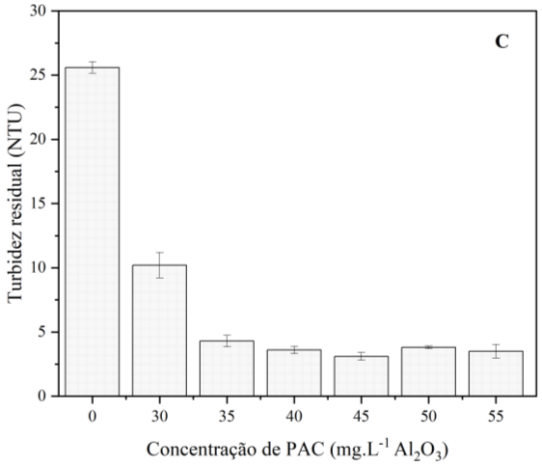
Estudos em escala laboratorial

A primeira fase dos experimentos de coagulação-floculação avaliou diferentes dosagens de coagulante, frente às condições iniciais distintas de água bruta com baixa turbidez, a fim de determinar a concentração que gerará a menor turbidez residual. Na figura 1 estão apresentados os resultados de $T_{AT}$ para amostras do grupo de baixa, média e alta turbidez inicial (7,6 ± 0,5 NTU, 21,3 ± 0,8 NTU e 29,6 ± 0,9 NTU, respectivamente).

Para o grupo de baixa turbidez inicial, a dosagem de 17 mg/L de $Al_2O_3$ reduziu a turbidez em 70%, com resultado de 2,24 NTU, conforme figura 1-A. Já para água bruta com turbidez inicial intermediária, a concentração de 35 mg/L de $Al_2O_3$ (*Fig. 1-B*) gerou a menor turbidez residual de 2,32 NTU. A figura 1-C apresenta os dados de turbidez residual para o grupo com alta turbidez inicial, no qual a dosagem de 45 mg/L de $Al_2O_3$ resultou na maior redução de turbidez, 90 %, com 3,10 NTU de turbidez residual. Entretanto, destaca-se a proximidade dos resultados obtidos a partir de 35 mg/L de $Al_2O_3$, o que possibilita a aplicação de concentração inferiores a 45 mg/L de $Al_2O_3$ em estações de tratamento de água a fim de otimizar o custo-benefício operacional.

**Figura 1: Efeito da concentração de coagulante na água bruta com baixa (7,6 ± 0,5 NTU), média (21,3 ± 0,8 NTU) e alta (29,6 ± 0,9 NTU) turbidez inicial, representadas como A, B e C, respectivamente.**



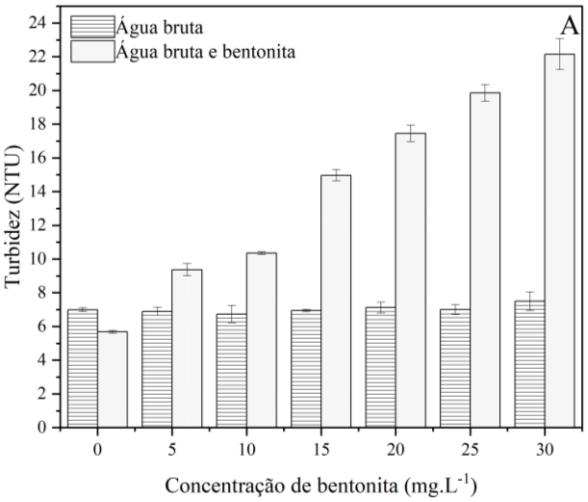


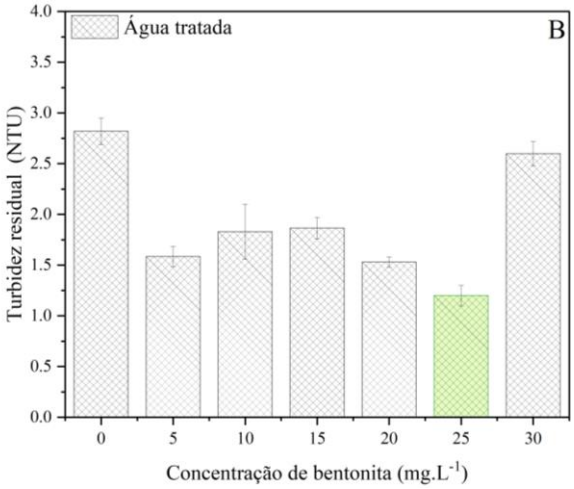

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para a segunda etapa dos testes de coagulação-floculação, diferentes concentrações de bentonita foram incorporadas ao sistema com a dosagem fixa de coagulante, conforme os valores determinados na fase anterior (17 mg/L, 35 mg/L e 45 mg/L de $Al_2O_3$ para os grupos de baixa, média e alta turbidez inicial da AB, respectivamente). O efeito da adição de bentonita na turbidez inicial é mostrado nas Figuras 2-A, 4-A e 5-A para três amostras diferentes de água bruta com turbidez inicial média de 7,0 ± 0,2 NTU, 20,6 ± 1,5 NTU e 30,6 ± 0,9 NTU, respectivamente.

Água bruta com baixa turbidez inicial foi tratada com adição de PAC (17 mg/L de $Al_2O_3$) e diferentes concentrações de bentonita. Após o processo de coagulação, floculação e decantação, todos os valores de turbidez residual foram menores do que aqueles obtidos somente com o coagulante (Figura 2-B). Ou seja, a adição de argila bentonítica possibilitou maior remoção de partículas em suspensão. Em detalhe, com 25 mg/L de bentonita, obteve-se $T_{AT}$ de 1,20 NTU, redução de 57% quando comparado a água tratada somente com o PAC.

**Figura 2: Efeito da concentração de bentonita na água bruta com baixa turbidez inicial (7,0 ± 0,2 NTU) e 17 mg/L de $Al_2O_3$. Em (A) mostra-se a turbidez da água bruta no estado inicial e a turbidez da mistura de água bruta e bentonita antes do jar-test. Em (B) observa-se a turbidez da água tratada após o ensaio de coagulação-floculação e decantação de 30 minutos.**



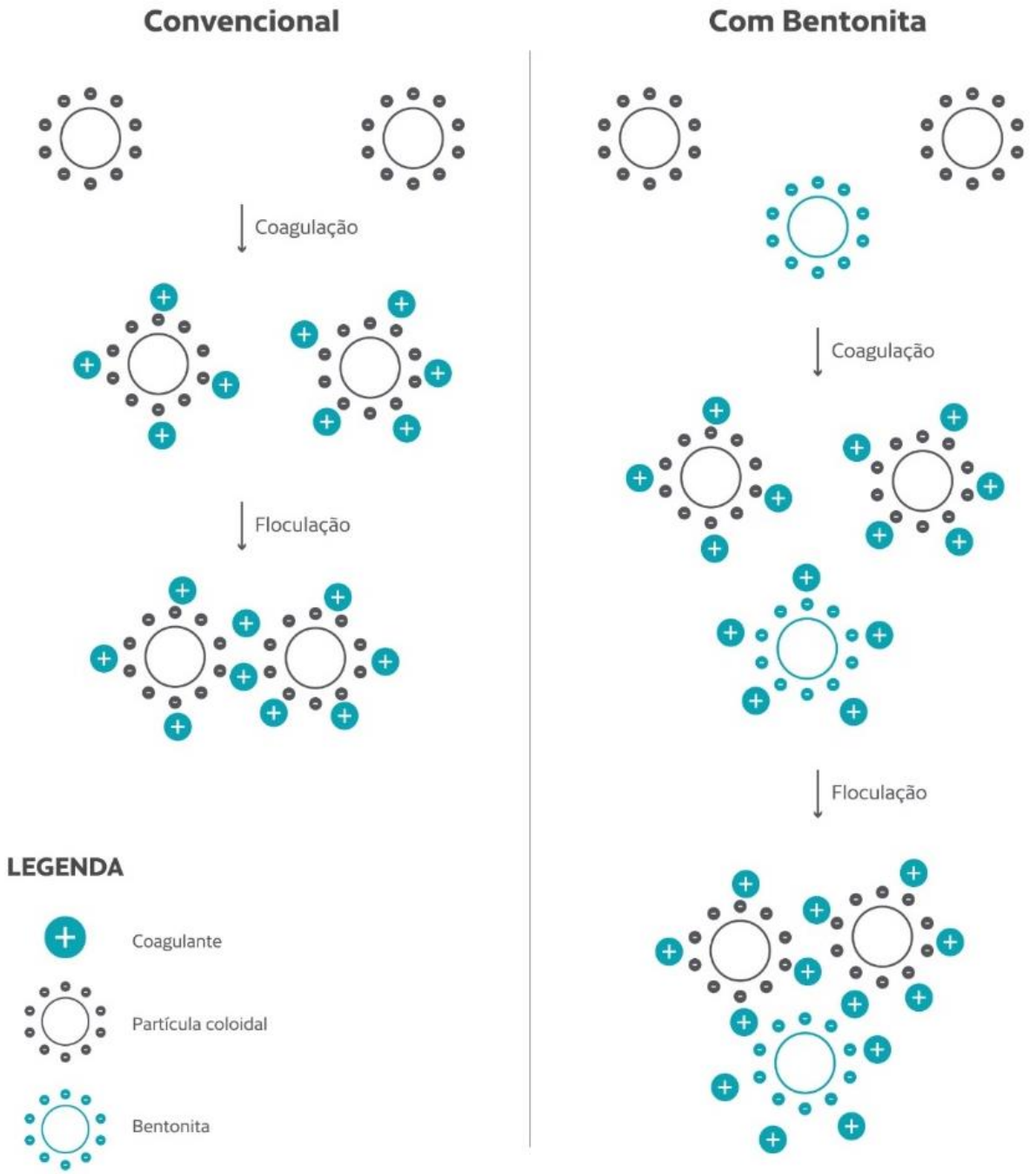



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como observado (Fig. 2-A, 4-A e 5-A), a adição de bentonita na água, visto o seu carácter coloidal, provocará o aumento da concentração de sólidos em suspensão. Como consequência, este incremento levará ao aumento da turbidez da AB (AHARIA; DDAHIMB; RAMADANEC, 2018). Entretanto, as cargas superficiais negativas deste argilomineral, representadas por um potencial zeta de -36,6 mV, impedirão que grandes aglomerados sejam formados, não sendo recomendado o seu uso isoladamente, mas sim, em ação conjunta com o coagulante (EL-TAWEEL; MOHAMED; ALREFAEY; HUSIEN *et al.*, 2023; MOUD, 2022; SARITH; KARNEN; DWARAPUREDDI, 2019).

Quando incorporado ao sistema, o coagulante (PAC) liberará cátions em solução. Esses íons com carga positiva interagem com a superfície carregada negativamente das partículas coloidais em suspensão, provocando uma diminuição significativa no potencial zeta através da neutralização de carga (DAYARATHNE; ANGOVE; JEONG; ARYAL *et al.*, 2022; HIEMENZ; RAJAGOPALAN, 1997; MA; WANG; WANG; ZHANG *et al.*, 2019). Assim, a bentonita atua como uma partícula nucleadora, de modo que possibilita o aumento dos choques efetivos através do movimento browniano e promove a formação de aglomerados, como ilustrado na figura 3.

**Figura 3: Representação esquemática do processo de coagulação e floculação convencional e com adição de bentonita.**

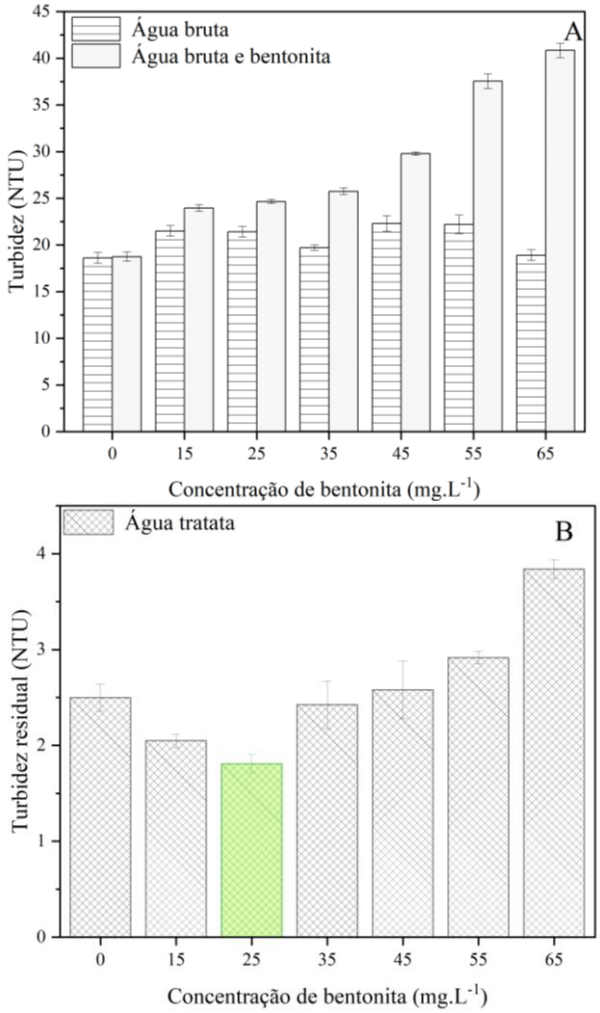



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a água bruta com turbidez inicial intermediária (20,6 ± 1,5 NTU), a adição de bentonita também levou ao aumento expressivo da turbidez inicial, conforme Figura 4-A. Entretanto, após os ensaios de coagulação-floculação, observa-se que quando a concentração de argila excede 35 mg/L, os valores de $T_{AT}$ são superiores a 2,50 NTU, sendo este o resultado da amostra tratada unicamente com o PAC (Figura 4-B). Tal comportamento pode estar relacionado ao excesso de bentonita no sistema, uma vez que a dosagem predefinida do coagulante não foi o suficiente para provocar a desestabilização de carga (ANNADURAI; SUNG; LEE, 2004).

Para menores concentrações de bentonita, 15 e 25 mg/L, observou-se melhores resultados quando comparado ao tratamento unicamente com o PAC. Em detalhe, com 25 mg/L de bentonita, atingiu-se $T_{AT}$ de 1,81 NTU, indicando uma redução de 27% quando comparado a o ensaio somente com o coagulante.

**Figura 4: Efeito da concentração de bentonita na água bruta com turbidez inicial intermediária (20,6 ± 1,5 NTU) e 35 mg/L de $Al_2O_3$. Em (A) mostra-se a turbidez da água bruta no estado inicial, sem bentonita, e a turbidez da mistura de água bruta e bentonita antes do jar-test. Em (B) observa-se a turbidez da água tratada após o ensaio de coagulação-floculação e decantação de 30 minutos.**

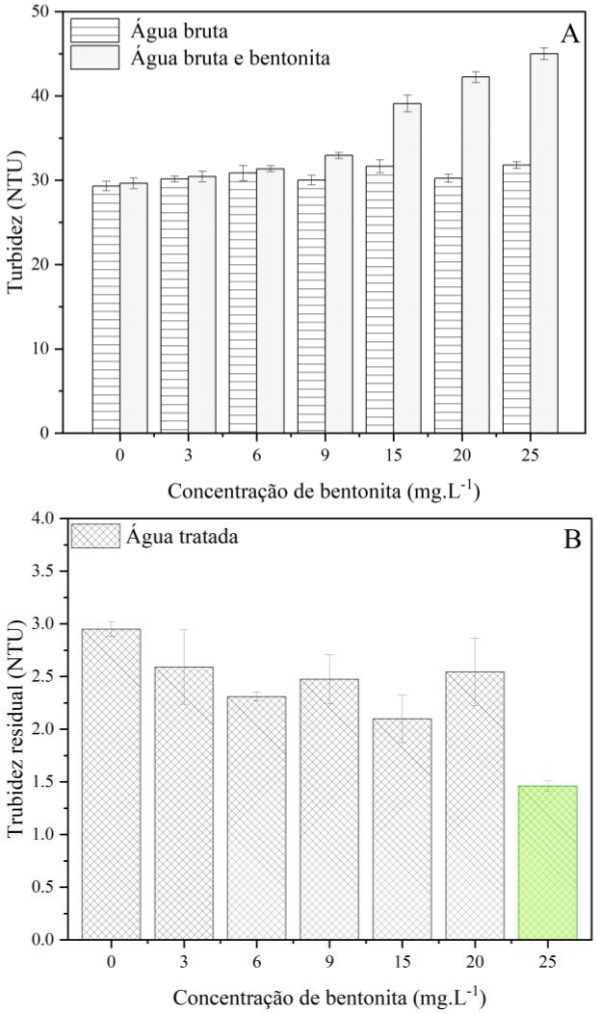



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para água bruta do grupo de alta turbidez, obteve-se um comportamento similar aos demais, no qual a adição de bentonita ao sistema levou ao aumento significativo da turbidez. Em resposta, após os ensaios de coagulação-floculação, encontrou-se menores valores de $T_{AT}$ quando comparados aos testes sem bentonita, indicando a maior remoção de sólidos em suspensão, conforme Figura 5. Destaca-se a dosagem de 25 mg/L de bentonita que, assim como nos dos demais grupos amostrais, gerou a menor turbidez residual. Em detalhe, resultou em $T_{AT}$ de 1,46 NTU, redução da turbidez em 50% quando comparada com o tratamento unicamente com o coagulante.

**Figura 5: Efeito da concentração de bentonita na água bruta com alta turbidez inicial (30,6 ± 0,9 NTU) e 45 mg/L de $Al_2O_3$. Em (A) mostra-se a turbidez da água bruta no estado inicial, sem bentonita, e a turbidez**

**da mistura de água bruta e bentonita antes do jar-test. Em (B) observa-se a turbidez da água tratada após o ensaio de coagulação-floculação e decantação.**




Fonte: Elaborada pelos autores.

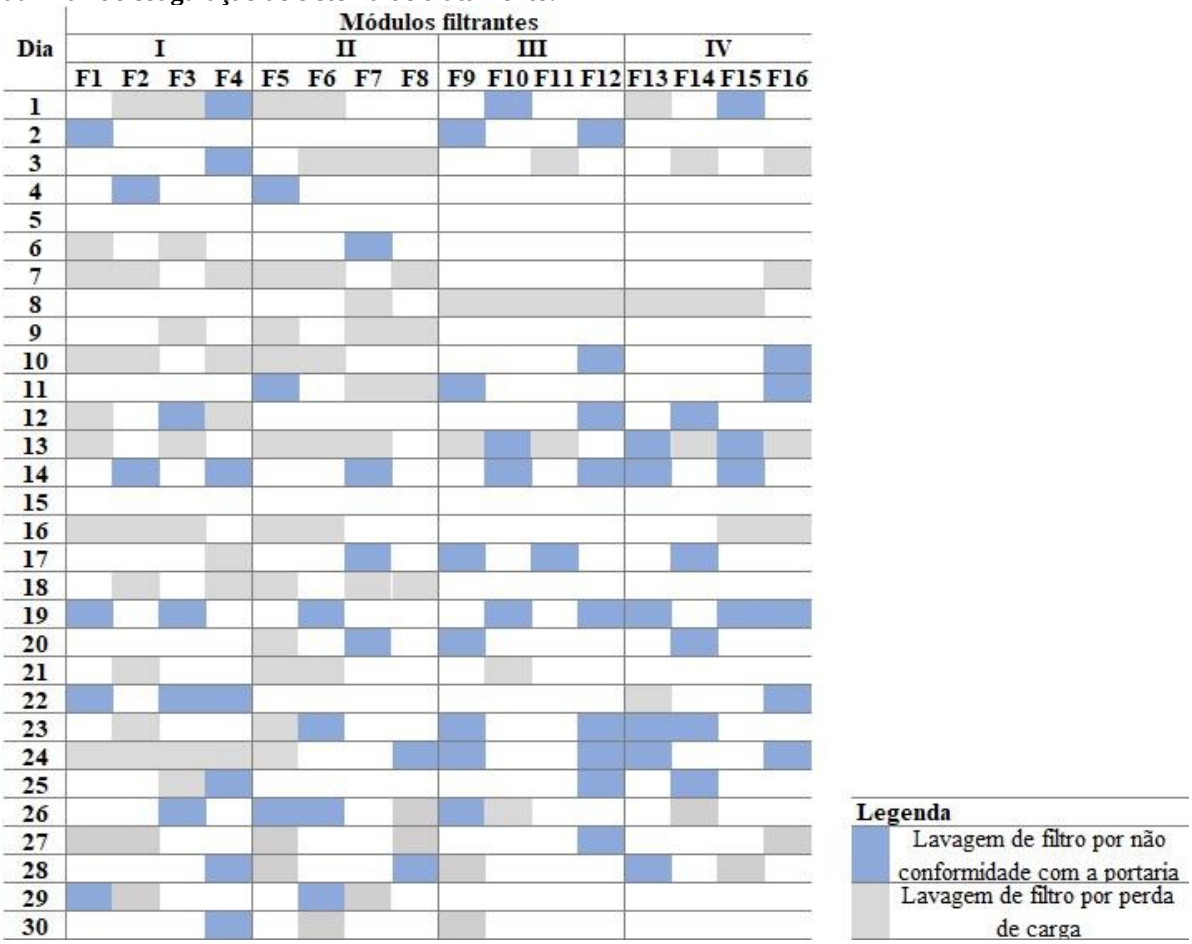
Ensaios em estação de tratamento de água

Referente aos ensaios realizados na ETA Ubiratã, cita-se que a região, abastecida pelo rio Água Grande, sofreu com a escassez de chuvas que assolou o estado do Paraná nos anos de 2019, 2020 e 2021 (TOKUDA, 2022). Como consequência, a turbidez da água alcançou níveis historicamente baixos, inferior a 10 NTU, gerando grandes prejuízos ao processo de tratamento. Neste contexto, a discussão a seguir são resultados da aplicação de 30 mg/L de bentonita policatiônica como auxiliar de coagulação, o que proporcionou o aumento na eficiência do tratamento, gerando melhorias significativas na operação da ETA (figura 7).

Além disso, pensando em estações de tratamento de água do tipo convencional, vale ressaltar que a forma mais comum para avaliar a eficiência do processo de coagulação e floculação está relacionado aos impactos nas operações subsequentes. As análises são feitas de forma indireta com destaque mais expressivo para a influência na carreira de filtração. Entende-se por carreira de filtração o intervalo de tempo de operação dos filtros entre duas lavagens consecutivas. Atualmente, existem dois motivos majoritários que exigem tirar um filtro de operação para limpeza: não conformidade com o padrão de potabilidade e perda de carga (HELLER; PÁDUA, 2010). Referindo-se a potabilidade, de acordo com a portaria GM/MS Nº888 de 04 de maio de 2021, do Ministério da Saúde, após passar pelos filtros, o valor máximo permitido de turbidez para a água tratada é 0,50 NTU, que deve ser avaliado a cada 2 horas (SAÚDE, 2021). Já a perda de carga está relacionada à colmatação dos filtros, onde a retenção de impurezas atinge o valor máximo estabelecido em projeto.

Em geral, recomenda-se que os filtros estejam operantes com carreiras mínimas de 20 h (DIBERNARDO, 2005; HELLER; PÁDUA, 2010). Isto porque as curtas carreiras de filtração exigem alta frequência de lavagem, provocando aumento expressivo nos custos operacionais da ETA, bem como o consumo de água tratada (HELLER; PÁDUA, 2010). A ETA de Ubiratã operava com, no mínimo, duas lavagens de filtros diárias. Na figura 6, pode-se observar o comportamento da carreira de filtração sem a utilização do auxiliar de coagulação durante um período de 30 dias.

**Figura 6: Registro de lavagem de filtros na ETA Ubiratã antes da incorporação de bentonita como auxiliar de coagulação ao sistema de tratamento.**




Fonte: Elaborado pelos autores.

Na figura 6 observa-se que, no dia 1, oito dos dezesseis filtros atuantes na ETA, precisaram ser suspensos de operação para limpeza, em momentos diferentes ao longo do dia. Este processo além de custoso operacionalmente, provoca grande perda de água. Com a incorporação de bentonita policatiônica ao sistema, foram obtidas inúmeras vantagens para a ETA. Além do aumento expressivo da carreira de filtração, com lavagens semanais, como representado na Figura 7, houve redução significativa de perdas de água do processo, além de aumento do volume reservado de água tratada.

Ademais, os resultados apresentados na figura 7 indicam ação de lavagem em função da perda de carga. Ou seja, estima-se que a turbidez da água decantada seja extremamente baixa, em função da alta eficiência do processo de coagulação e floculação, possibilitando que os filtros atuem com produção de água tratada com turbidez inferior a 0,50 NTU, conforme imposto pela portaria GM/MS Nº888, por períodos de até 7 dias. Após esse prazo, a colmatação, em função do longo período de uso, requer que seja feita a lavagem dos filtros.

**Figura 7: Registro de lavagem de filtros na ETA Ubiratã, após a incorporação de bentonita como auxiliar de coagulação ao sistema de tratamento.**

| Dia | Módulos filtrantes | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | | | | II | | | | III | | | | IV | | | |
| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 | F9 | F10 | F11 | F12 | F13 | F14 | F15 | F16 |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Legenda |
|---|
| Lavagem de filtro por não conformidade com a portaria |
| Lavagem de filtro por perda de carga |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Como consequência do aumento da carreira de filtração, somada a ausência de sistemas de recirculação na estação, o IPLP sofreu uma redução expressiva. A incorporação de bentonita ao sistema de tratamento promoveu uma diminuição de 50,8% no IPLP, permitindo que o índice atingisse a meta determinada para a ETA de 6,62 litros.

## CONCLUSÕES

A primeira etapa de testes em escala laboratorial, conduzidos apenas com o policloreto de alumínio (PAC), indicaram dosagens ótimas de 17, 35 e 45 mg/L de $Al_2O_3$ para águas de baixa (7,6 ± 0,5 NTU), média (21,3 ± 0,8 NTU) e alta (29,6 ± 0,9 NTU) turbidez inicial, respectivamente. Já para a segunda etapa, manteve-se fixa a dosagem de coagulante e avaliou a ação combinada com diferentes concentrações de bentonita.

Para AB com 7,0 ± 0,2 NTU, classificada no grupo de baixa turbidez, 25 mg/L de bentonita resultaram em 83% de remoção de turbidez. Neste cenário, a água tratada, após a decantação, alcançou uma turbidez de 1,20 NTU, enquanto sem bentonita era de 2,82 NTU. Para o grupo de turbidez intermediária, 20,6 ± 1,5 NTU, dosagens de bentonita superiores a 35 mg/L saturaram o sistema. A menor remoção alcançada foi de 81% para 65 mg/L do mineral argiloso. Em contraste, a máxima atingiu 91% quando a concentração foi reduzida para 25 mg/L de bentonita, resultando em água tratada com 1,81 NTU. Para ensaios somente com o PAC, obteve-se remoção de 89,9% com $T_{AT}$ de 2,50 NTU. Para água bruta categorizada como alta turbidez inicial, 30,6 ± 0,9 NTU, 25 mg/L de bentonita resultaram em 95,10% de remoção de turbidez com $T_{AT}$ de 1,46 NTU. Já ensaios somente com o PAC, indicaram turbidez de 2,95 NTU.

Além disso, é importante observar que se classificou a água bruta em grupos de alta média e baixa turbidez a fim de facilitar a discussão. Entretanto, os valores de turbidez da AB não excedem 32 NTU, sendo considerado uma condição crítica de tratamento para ETA visto a baixa turbidez. Assim, conclui-se nos testes laboratoriais que a utilização de bentonita mostrou-se vantajosa como auxiliar de coagulação.

Em relação as cargas superficiais, a análise de potencial zeta mostrou que as cargas da superfície se mantêm negativas em ampla faixa de pH. A predominância de cargas negativas da argila bentonítica promove o afastamento entre as partículas. Essa característica é crucial para o seu desempenho como auxiliar no processo de coagulação e floculação, uma vez que a superfície negativa se comportará de forma similar as partículas coloidais que promovem a turbidez natural da água bruta. Assim, a bentonita estará sujeita a ação do coagulante, possibilitando a formação de flocos mais densos e robusto. É importante ainda ressaltar que os benefícios do processo eficiente de floculação se estendem as etapas subsequentes do tratamento, com destaque para aumento da carreira de filtração.

Essa característica pode ser observada na ETA Ubiratã, onde o uso de bentonita como auxiliar de coagulação promoveu aumento significativo na carreira de filtração, além de redução em 50% do indicador de perdas por litro no sistema produtor (IPLP).

De modo geral, conclui-se que a incorporação de bentonita ao sistema como auxiliar de coagulação-floculação gerou resultados positivos para o tratamento de águas com baixa turbidez. Os resultados em escala laboratorial demostraram redução de turbidez 57,4%, 27,6% e 50,5% para águas com turbidez inicial de 7,0 ± 0,2, 20,6 ± 1,5 e 30,6 ± 0,9 NTU, respectivamente, quando comparado ao tratamento unicamente com o PAC. Enquanto que os resultados foram comprovados em estação de tratamento, onde o uso de bentonita policatiônica levou ao aumento na eficiência do processo de coagulação, redução significativa do IPLP e aumento da carreira de filtração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHARIA, M. h.; DDAHIMB, H.; RAMADANEC, R. Performance of bentonite clay as a coagulation aid on water quality. **Desalination and Water Treatment**, v.143, p. 229-234, DOI: 10.5004/dwt.2019.23552.

2. ANNADURAI, G.; SUNG, S. S.; LEE, D.-J. Simultaneous removal of turbidity and humic acid from high turbidity stormwater. **Advances in Environmental Research**, 8, p. 713-725, 2004. DOI: 10.1016/S1093-0191(03)00043-1.

3. DAHASAHASTRA, A. V.; BALASUNDARAM, K.; LATKAR, M. V. Turbidity removal from synthetic turbid water using coagulant recovered from water treatment sludge: A potential method to recycle and conserve aluminium. **Hydrometallurgy**, 213, p. 105939 - 105950, 2022. DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.105939.

4. DALSTEIN, F.; NAQVI, A. 21st Century water withdrawal decoupling:Apathway to a more water-wise world? **Water Resources and Economics**, 38, 2022. DOI: doi.org/10.1016/j.wre.2022.100197.

5. DAYARATHNE, H. N. P.; ANGOVE, M. J.; JEONG, S.; ARYAL, R. *et al.* Effect of temperature on turbidity removal by coagulation: Sludge recirculation for rapid settling,. **Journal of Water Process Engineering**, 46, 2022. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102559.

6. DELAVI, D. G. G. **Defloculação de suspensões aquosas de argila e sua correlação com caracterizações químicas e de superfície**. 2011. (Mestre) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina.

7. DIBERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: 2005. 8576560666.

8. EL-TAWEEL, R. M.; MOHAMED, N.; ALREFAEY, K. A.; HUSIEN, S. *et al.* A review of coagulation explaining its definition, mechanism, coagulant types, and optimization models; RSM, and ANN. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v.6, DOI: 10.1016/j.crgsc.2023.100358.

9. FARHAN, A. A.-R. Evaluation of a number of coagulants and coagulation aids in removing water turbidity. **International Conference on Sustainable Engineering Techniques**, v.518, p. 62016-62027, DOI: 10.1088/1757-899X/518/6/062016.

10. FRANCISCO, A. A.; POHLMANN, P. H. M.; FERREIRA, M. A. Tratamento convencional de águas para abastecimento humano: uma abordagem teórica dos processos envolvidos e dos indicaores de referência. *In*: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2011, Londrina.

11. GRZEGORZEK, M.; WARTALSKA, K.; KA´ZMIERCZAK, B. Review of water treatment methods with a focus on energy consumption. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 143, p. 106674-106684, 2023. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106674.

12. HAFEEZ, A.; SHAMAIR, Z.; SHEZAD, N.; JAVED, F. *et al.* Solar powered decentralized water systems: A cleaner solution of the industrial wastewater treatment and clean drinking water supply challenges. **Journal of Cleaner Production**, 289, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125717.

13. HALDAR, S. K. Basic Mineralogy. *In*: **Introduction to Mineralogy and Petrology** 2014. v. 1, cap. 2, p. 39-79.

14. HELLER, L.; PÁDUA, V. L. d. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2 ed. 2010. 978-85-7041-845-6.

15. HIEMENZ, P. C.; RAJAGOPALAN, R. **Principles of colloid and surface chemistry**. 3 ed. 1997.

16. HUANG, X.; ZHAO, Y.; GAO, B.; SUN, S. *et al.* Polyacrylamide as coagulant aid with polytitanium sulfate in humic acid-kaolin water treatment: Effect of dosage and dose method. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 64, p. 173-179, 2016. DOI: 10.1016/j.jtice.2016.04.011.

17. JIANG, J.-Q. The role of coagulation in water treatment. **Current Opinion in Chemical Engineering**, 8, p. 36-44, 2015. DOI: 10.1016/j.coche.2015.01.008.

18. KUMARASAMY, K.; SHAH, R. G.; SUNDARADOSS, M. V.; BALU, S. K. *et al.* Analytical approach on Indian bentonites from Rajasthan: Structural and physical characterization. **Materials Today: Proceedings**, 64, p. 549-553, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.111.

19. LUZ, A. B. d.; OLIVEIRA, C. H. d. Argila - Bentonita. *In*: **Bentonita**. Centro de Tecnologia Mineral, 2005. v. 1, cap. 11, p. 239-253.

20. MA, J.; WANG, R.; WANG, X.; ZHANG, H. *et al.* Drinking water treatment by stepwise flocculation using polysilicate aluminum magnesium and cationic polyacrylamide. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 7, 2019. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103049.

21. MICHELAN, D. C. G. S.; BATISTA, I. F.; BATISTA, D. F.; SANTOS, D. d. G. *et al.* Desempenho das etapas de tratamento de água da estação de tratamento de água Poxim. **SCIENTIA CUM INDUSTRIA**, 7, 2019. DOI: dx.doi.org/10.18226/23185279.v7iss3p7.

22. MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Investigação da coagulação e floculação adequadas para a FAD no tratamento de água com cor aparente moderada e baixa turbidez destinada ao abastecimento público. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, 2008.

23. MOUD, A. A. Polymer based flocculants: Review of water purification applications. **Journal of Water Process Engineering**, 48, 2022. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102938.

24. ORGANIZATION, W. H. **Water quality and health: Review of turbidity**. p. 10. 2017.

25. ORGANIZATION, W. H. **Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda**. 2022. 614 p. 978-92-4-004506-4.

26. PEREIRA, L.; CRUZ, J. C. d. B. **Avaliação da eficácia do tratamento convencional da água**. 2010. (Bacharel) - Engenharia Civil, Faculdade Doctum.

27. RANGA, S. Bentonite used as natural coagulant and adsorbent: A review. **The Pharma Innovation Journal**, 7, p. 155-157, 2018.

28. ROSÁRIO, J. d. A. d. **Obtenção de material antimicrobinao a patir de bentonita nacional tratada com prata**. 2010. (Doutor) - Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina.

29. SARITH, V.; KARNEN, M. K.; DWARAPUREDDI, B. K. Exploring natural coagulants as impending alternatives towards sustainable water clarification" – A comparative studies of natural coagulants with alum. **Journal of Water Process Engineering**, 32, 2019. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100982.

30. SAÚDE, M. d. PORTARIA GM/MS pp.

31. SCHULZE, D. G. Clay Minerals *In*: (EDITOR-IN-CHIEF), D. H. (Ed.). **Encyclopedia of Soils in the Environment**. Boston: Elsevier, 2005 v. 1, p. 246-254.

32. SILVA, A.; FERREIRA, H. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, 3.2, p. 26-35, 2008.

33. SULTANA, S. Environment-friendly clay coagulant aid for wastewater treatment. **Applied Water Science**, 12, 2021. DOI: 10.1007/s13201-021-01540-z.

34. UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water**. 2023. 189 p. 978-92-3-100576-3.

35. WARZECHA, P. Bentonite clay suspension -coagulation process and identification of properties. **E3S Web of Conferences**, 49, p. 124-134, 2018. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/20184900124.

36. YATEH, M.; LI, F.; TANG, Y.; LI CHENG, X. B. Energy consumption and carbon emissions management in drinking water treatment plants: A systematic review. **Journal of Cleaner Production**, 437, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140688.