

SÍNTESE DE ARGILO MINERAL PARA APLICAÇÃO EM TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES INDUSTRIAIS

Angélica de Moraes Jordão **da Silva**¹, Liandra Sartor **da Silva**², Valdeci José **Costa**³,
Daiana Petry **Rufato**⁴

(1 – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, angelica.babmoraes@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-4767-936X>; 2 – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, liandrasartor@hotmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8967-4812>; 3 - Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, valdeci.costa@udesc.br, <https://orcid.org/0000-0002-4239-0479>; 4 - Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), daiana.petry@udesc.br, <https://orcid.org/0000-0003-0541-3253>)

Resumo: O sulfato de alumínio é o coagulante mais utilizado no tratamento de água no Brasil, sendo obtido pela lixiviação do minério de bauxita com ácido sulfúrico. Esse processo gera uma lama residual com aproximadamente 15-30% de óxido de alumínio em sua composição, classificada como resíduo Classe II A pela ABNT NBR 10004, cujo potencial de valorização como coagulante carece de investigação sistemática na literatura. O presente trabalho teve como objetivo sintetizar um coagulante argilomineral a partir dessa lama industrial por meio de lixiviação ácida termicamente assistida, avaliando sua conformidade com a ABNT NBR 11176 e sua eficácia em ensaios de Jar Test com água bruta coletada no Rio dos Índios, Lages/SC. O produto sintetizado atendeu aos parâmetros normativos de alumínio ativo (6,30%) e ferro (0,28%), com rendimento de 43,6%, porém apresentou acidez livre acima do limite especificado (6,67% frente a 1,50%), indicando necessidade de ajuste no processo. Nos ensaios de Jar Test, a dosagem de 30 mg/L promoveu redução expressiva de turbidez e cor, com resultados dentro dos padrões de potabilidade vigentes. Os resultados demonstram o potencial do subproduto como coagulante alternativo e apontam para a viabilidade técnica do fechamento do ciclo produtivo desta cadeia industrial.

Palavras-chave: Tratamento de água. Sulfato de alumínio. Lama residual. Coagulação.

Economia circular.

SYNTHESIS OF CLAY MINERAL FOR APPLICATION IN WATER AND INDUSTRIAL EFFLUENT TREATMENT

Abstract: Aluminum sulfate is the most widely used coagulant in water treatment in Brazil, produced by the leaching of bauxite ore with sulfuric acid. This process generates a residual sludge containing approximately 15-30% aluminum oxide, classified as Class II A waste under ABNT NBR 10004, whose potential valorization as a coagulant lacks systematic investigation in the literature. This study aimed to synthesize a clay mineral coagulant from this industrial sludge through thermally assisted acid leaching, evaluating its compliance with ABNT NBR 11176 and its efficacy in Jar Test assays using raw water collected from the Rio dos Índios river, Lages/SC, Brazil. The synthesized product met the normative parameters for active aluminum (6.30%) and iron (0.28%), with a yield of 43.6%; however, free acidity exceeded the specified limit (6.67% vs. 1.50%), indicating the need for process adjustment. In Jar Test assays, a dosage of 30 mg/L promoted significant reductions in turbidity and color, within current potability standards. The results demonstrate the potential of the byproduct as an alternative coagulant and point to the technical feasibility of closing the productive cycle of this industrial chain.

Keywords: Water treatment. Aluminum sulfate. Residual sludge. Coagulation. Circular economy.

SÍNTESIS DE ARCILLA MINERAL PARA APLICACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUA Y EFLUENTES INDUSTRIALES

Resumen: El sulfato de aluminio es el coagulante más utilizado en el tratamiento de agua en Brasil, obtenido mediante la lixiviación del mineral de bauxita con ácido sulfúrico. Este proceso genera un lodo residual con aproximadamente un 15-30% de óxido de aluminio en su composición, clasificado como residuo Clase II A por la norma ABNT NBR 10004, cuyo potencial de valorización como coagulante carece de investigación sistemática en la literatura. El presente trabajo tuvo como objetivo sintetizar un coagulante arcillomineral a partir de dicho lodo industrial mediante lixiviación ácida térmicamente asistida, evaluando su conformidad con la ABNT NBR 11176 y su eficacia en ensayos de Jar Test con agua bruta recolectada en el Río dos Índios, Lages/SC, Brasil. El producto sintetizado cumplió los parámetros normativos de

aluminio activo (6,30%) y hierro (0,28%), con un rendimiento del 43,6%; sin embargo, la acidez libre superó el límite especificado (6,67% frente a 1,50%), lo que indica la necesidad de ajuste en el proceso. En los ensayos de Jar Test, la dosis de 30 mg/L promovió reducciones expresivas de turbidez y color, dentro de los estándares de potabilidad vigentes. Los resultados demuestran el potencial del subproducto como coagulante alternativo y apuntan a la viabilidad técnica del cierre del ciclo productivo de esta cadena industrial.

Palabras clave: Tratamiento de agua. Sulfato de aluminio. Lodo residual. Coagulación. Economía circular.

1. Introdução

O crescimento populacional e a expansão urbana têm intensificado a pressão sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos em escala global (Nguyen et al., 2022). Para atender à demanda por água potável e mitigar a degradação dos corpos hídricos, as Estações de Tratamento de Água (ETAs) e de Efluentes desempenham papel central na infraestrutura sanitária regional (Pedretti & Medeiros, 2022; Zhao et al., 2021). Nessas instalações, o processo de coagulação-floculação constitui a etapa físico-química fundamental para a remoção de sólidos em suspensão, matéria orgânica e impurezas coloidais, promovendo a agregação de partículas em flocos que são posteriormente removidos nas etapas de sedimentação e filtração (Nayeri & Mousavi, 2022; Zemmouri et al., 2012; Mazari et al., 2018b). Entre os coagulantes inorgânicos utilizados nesse processo, o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) destaca-se como o mais amplamente empregado no Brasil e no mundo, em razão da sua eficiência na remoção de cor e turbidez, facilidade de operação e custo relativamente baixo (Nguyen et al., 2022).

O uso intensivo do sulfato de alumínio gera dois passivos residuais distintos que merecem atenção. O primeiro é o lodo de ETA (Water Treatment Sludge — WTS, ou *alum sludge*), subproduto acumulado nas próprias estações de tratamento: estima-se que sua geração global alcance 10.000 toneladas por dia, com países como a China gerando cerca de 2,3 milhões de toneladas anuais (Zhao et al., 2021). Conforme os ensaios de lixiviação e solubilização previstos na ABNT NBR 10004, esse lodo é tipicamente classificado como resíduo Classe II A, não inerte, pois contém frações solúveis de alumínio, ferro, manganês e traços de metais que, quando dispostos inadequadamente, podem lixiviar para o solo e para aquíferos (Nayeri &

Mousavi, 2022; Pedretti & Medeiros, 2022). O segundo passivo, menos discutido na literatura, é a lama residual gerada no processo industrial de fabricação do próprio sulfato de alumínio, que tem como matéria-prima o minério de bauxita. Essa lama compartilha características com a chamada *red mud*, subproduto do *processo Bayer* de extração de alumina, cujo estoque global ultrapassava 5 bilhões de toneladas em 2020 (Al-Fakih et al., 2023) e apresenta, em sua composição, cerca de 15-30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) residual não extraído, além de óxidos de ferro, sílica e titânio (Harmaji et al., 2024; Nigussie et al., 2007).

A gestão do *alum sludge* das ETAs tem sido objeto de ampla investigação científica internacional nas últimas três décadas (Abd Ghafor & Kassim, 2025). O método de lixiviação ácida, empregando ácido sulfúrico, clorídrico ou nítrico sob pH controlado entre 1,5 e 3,0, demonstrou ser o de melhor mais custo-benefício para a recuperação do alumínio presente nesses lodos, alcançando taxas de extração entre 70% e quase 100% (Nayeri & Mousavi, 2022; Ballou et al., 2022; Jung et al., 2016). Estudos comprovam que o coagulante recuperado por esse processo exibe remoção de turbidez superior a 90% em ensaios de tratabilidade com efluentes industriais e águas brutas, com desempenho estatisticamente comparável ao do sulfato de alumínio comercial virgem (Nayeri & Mousavi, 2022; Dahasahastra et al., 2022; Ramadan & El Sayed, 2020). Paralelamente, o reprocessamento reduz em 40% a 50% o volume de resíduo sólido destinado a aterros (Ramadan & El Sayed, 2020), alinhando-se ao princípio da economia circular e às políticas públicas de sustentabilidade ambiental (Cremades et al., 2018; Purchase et al., 2022).

Todavia, enquanto a literatura avança na valorização do lodo gerado nas ETAs, observa-se uma lacuna expressiva no que diz respeito à lama residual produzida na etapa anterior da cadeia: a fabricação industrial do sulfato de alumínio. Esse resíduo, que retém aproximadamente 15-30% de Al_2O_3 em sua matriz mineral (Harmaji et al., 2024), representa um passivo de alta carga ambiental pois quando disposto em aterros sem tratamento adequado, as frações solúveis de alumínio tornam-se altamente móveis em condições de pH ácido, podendo atingir recursos hídricos e causar fitotoxicidade, toxicidade aquática e bioacumulação trófica (Zhao et al., 2025; Nguyen et al., 2022). A literatura evidencia que há esforços para valorizar resíduos similares do processamento de alumínio em materiais de construção civil, cerâmica e geopolímeros (Harmaji et al., 2024; Silva Filho et al., 2007; Sun, 2024), mas são praticamente inexistentes estudos que proponham a síntese direta dessa lama industrial em um coagulante líquido funcional, capaz de atender às especificações normativas para uso em

tratamento de água, como as estabelecidas pela ABNT NBR 11176.

Nesse contexto, este trabalho propõe a síntese e validação de um coagulante argilomineral a partir da lama residual gerada no processamento industrial de sulfato de alumínio em uma empresa localizada na Serra Catarinense, região que concentra relevantes depósitos de bauxita e cujas atividades industriais associadas têm potencial impacto sobre os recursos hídricos locais. Por meio de lixiviação ácida termicamente assistida, análises físico-químicas conforme a ABNT NBR 11176 e ensaios de tratabilidade em escala de bancada (Jar Test), o estudo avalia quantitativamente a eficácia do subproduto sintetizado na remoção de cor e turbidez de água bruta, comparando seu desempenho com os padrões regulatórios vigentes e contribuindo para o fechamento do ciclo produtivo desta cadeia industrial no âmbito do planejamento ambiental regional.

2. Material e métodos

O material precursor utilizado consistiu de lama residual bruta gerada durante o processo industrial de fabricação de sulfato de alumínio comercial, o qual utiliza o minério de bauxita como matéria-prima, tendo origem em uma empresa localizada na Serra Catarinense. Todo o desenvolvimento do projeto e as análises laboratoriais foram realizados em escala laboratorial na referida empresa. A caracterização físico-química inicial do resíduo foi conduzida por um laboratório terceirizado certificado, utilizando Espectrometria de Emissão Óptica para a quantificação elementar de metais, atestando a presença de concentrações residuais de óxido de alumínio, da ordem de 30%, compatíveis com a proposta de recuperação (Relatório de Ensaio LIMNOS Nº 35951/2023.0.C.).

A conversão da lama industrial em um coagulante líquido foi realizada pelo método de lixiviação termicamente assistida por via ácida. Em escala de bancada, alíquotas do resíduo foram transferidas para béqueres e submetidas à reação estequiometricamente controlada com ácido sulfúrico comercial (98%) e água deionizada. As proporções exatas de lama, ácido e água empregadas no processo constituem informação protegida por sigilo industrial da empresa parceira, razão pela qual não podem ser divulgadas neste trabalho. O sistema foi mantido sob agitação constante em chapa aquecedora a 360 °C para maximizar a extração dos hidróxidos de alumínio aprisionados na matriz mineral. Após a digestão, a mistura foi submetida a um banho de gelo até que a temperatura se iguale a 20 °C, seguido de filtração a vácuo para separação das fases. A fase líquida resultante (produto argilomineral) e a fase sólida retida (resíduo insolúvel)

foram quantificadas para o cálculo de rendimento.

Para assegurar a reprodutibilidade do método e o rigor estatístico, exigido em ensaios desta natureza, os procedimentos de síntese foram executados em triplicata.

O coagulante sintetizado foi avaliado quanto à sua densidade, pH, teor de alumínio, ferro e acidez livre, adotando-se os padrões preconizados pela norma ABNT NBR 11176. O teor de alumínio ativo foi determinado por volumetria complexométrica com EDTA; o teor de ferro foi estabelecido pelo método da titulação do Fe_2 com solução de dicromato de potássio e na determinação do ferro total, o Fe_3 é previamente reduzido a Fe_2 com cloreto estânico; e a acidez livre por titulação ácido-base com solução padronizada de NaOH; todos em conformidade com os métodos analíticos prescritos pela referida norma. O resíduo sólido insolúvel gerado após a filtração foi submetido a ensaios de lixiviação e solubilização, em conformidade com a norma ABNT NBR 10004. As concentrações de metais lixiviados e solubilizados (incluindo alumínio, cromo, chumbo, manganês e ferro) foram quantificadas por Espectrometria de Absorção Atômica, visando determinar a classificação ambiental do resíduo (Classes I, II A ou II B) e avaliar os riscos ecotoxicológicos de sua disposição em aterros (Pashaki et al., 2023).

A avaliação da eficácia do coagulante argilomineral foi conduzida através de ensaios de Jar Test, utilizando amostras de água bruta coletadas diretamente no Rio dos Índios, Lages, SC. Por se tratar de um ensaio de batelada, mesmo efetuado em triplicata, sendo o parâmetro variável a dosagem do coagulante em cada jarro, espera-se insignificância de variabilidade em cada teste. Deste modo, teste paramétricos clássicos não se adequam a este tipo de análise estatística. Por isto, a abordagem mais adequada é a análise de decisão multicritério (MCDA) com normalização min-max (Gal et al., 1999), amplamente utilizada na literatura.

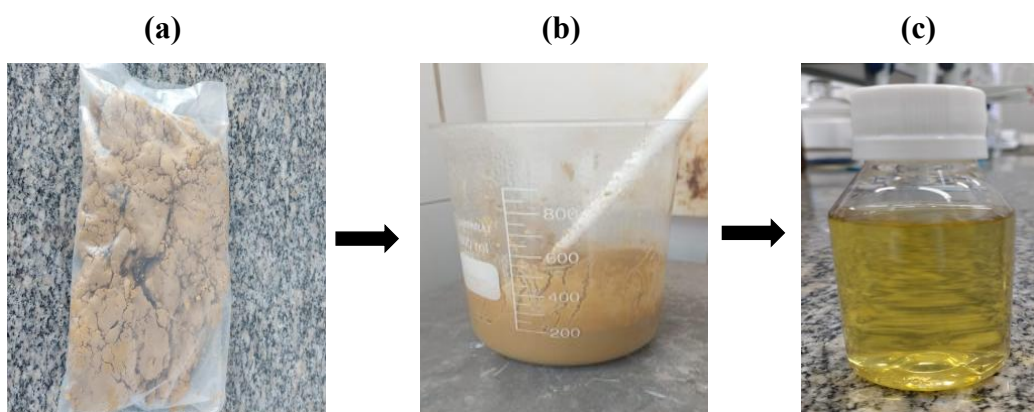
Os ensaios simularam as etapas de coagulação e floculação das estações de tratamento de água, aplicando-se gradientes de velocidade padronizados: mistura rápida a 300 rpm por um minuto, mistura lenta a 50 rpm por 10 minutos, seguidos por 60 minutos de sedimentação. O coagulante recuperado foi dosado na forma de solução a 1%, em concentrações variando de 20 ppm a 45 ppm, como mostrado na Tabela 1.

A figura 1 apresenta a sequência do processo e como os testes de reação para produção do sulfato foram realizados. A eficiência do tratamento foi monitorada através da medição de cor aparente com um colorímetro Digimed em P_{tco}; a turbidez por um turbidímetro HACH e o pH por pHmetro Seven Compact da Mettler Toledo.

Tabela 1: Dosagens em cada jarro.

Jarro	Dosagem (ppm)
1	20
2	25
3	30
4	35
5	40
6	45

Figura 1: (a) Resíduo de lama utilizado; (b) Aquecimento; (c) Produto obtido.



Fonte: Autores.

3. Resultados e discussão

Após o produto pronto, foram realizadas análises completas seguindo a norma ABNT NBR 11176, cujos resultados são mostrados na Tabela 2. O produto atendeu aos critérios normativos para as concentrações de alumínio ativo (6,30%) e de ferro (0,28%). Contudo, a análise revelou uma não conformidade no parâmetro de acidez livre, que atingiu 6,67% (frente ao limite máximo de 1,50%). Isto ocorre pelo fato de que o resíduo já foi submetido à adição de ácido sulfúrico durante a fabricação do sulfato de alumínio, influenciando o resultado final da acidez.

Estudos recentes indicam que coagulantes à base de alumínio podem apresentar variações em suas propriedades químicas, incluindo acidez e concentração de alumínio residual, dependendo do processo de produção e das condições operacionais de aplicação. Nesse contexto, pesquisas também demonstram que o controle do pH e das características do

coagulante é fundamental para garantir a eficiência da coagulação e minimizar a presença de alumínio residual na água tratada (Krupińska, 2020).

Tabela 2 - Especificação e resultados do produto pronto

Parâmetros	Unidade	Resultados	Especificação/Padrão
Alumínio	%	6,30	6,00
Ferro	%	0,28	0,50
Acidez	%	6,67	1,50
pH	-	0,30	0,30
Densidade	g/cm ³	1,300	1,300

Um dos fatores importantes a avaliar é o rendimento do produto final e a quantidade de sólidos remanescentes da reação. Na Tabela 3 são apresentados estes números. É possível verificar um rendimento de produto final de 43,6%, tendo em vista que durante a reação ocorreu evaporação de 24,1% da amostra. Isto implica, que do total, apenas 32,3% de sólidos serão destinados ao aterro, o que sugere redução de custos com o descarte e menores implicações ambientais. Na Figura 2 é apresentado o resíduo obtido através do processo de filtração do produto.

Tabela 3- Rendimentos

Rendimento Total	400 mL
Sólidos	129,2g
Produto Final	100 ml

Figura 2 – Resíduo retido no papel filtro durante a filtração



Fonte: Autores.

A caracterização do resíduo foi realizada através de ensaio de lixiviação (Tabela 4). Nos ensaios efetuados, todos os contaminantes (incluindo chumbo a 0,2163 mg/L e cromo a 0,030

mg/L) permaneceram abaixo dos limites máximos. Entretanto, o ensaio de solubilização acusou a lixiviação acentuada de metais: alumínio (1.718 mg/L), ferro (317,5 mg/L), manganês (24,99 mg/L), chumbo (0,3987 mg/L) e cromo (0,140 mg/L), ultrapassando significativamente as restrições normativas do extrato solubilizado (Tabela 5).

Tabela 4 - Resultados dos parâmetros no ensaio de lixiviação

Parâmetro	Resultado mg/L	Limite máximo no lixiviado (NBR10004) mg/L
Arsênio	<0,01	1,0
Bário	<0,020	70,0
Cádmio	<0,0010	0,5
Chumbo	0,2163	1,0
Cromo total	0,030	5,0
Fluoreto	< 005	150
Mercúrio	< 0,0002	0,1
Prata	< 0,0020	5,0
Selênio	< 0,01	1,0

Fonte: Relatório de Ensaio LIMNOS Nº 35951/2023.0.C.

Tabela 5 - Resultados dos parâmetros no ensaio de solubilização

Parâmetro	Resultados mg/L	Limite máximo no extrato mg/L
Alumínio	1.718,00	0,2
Arsênio	<0,01	0,01
Bário	<0,020	0,7
Cádmio	< 0,0010	0,005
Chumbo	0,3987	0,01
Cloreto	< 1,00	250,0
Cobre	0,0280	2,0
Cromo total	0,140	0,05
Fenóis totais	< 0,001	0,01
Ferro	317,500	0,3
Fluoreto	< 0,05	1,5
Manganês	24,990	0,1
Mercúrio	< 0,0002	0,001

Fonte: Relatório de Ensaio LIMNOS Nº 35951/2023.0.C.

Embora o material não apresente reatividade, inflamabilidade ou corrosividade que o classifique como perigoso (Classe I), o elevado carregamento de metais o enquadra estritamente como resíduo Classe II A – não inerte. Em uma análise ambiental de escala territorial, o manejo

inadequado desse lodo em aterros não controlados representa uma ameaça latente aos recursos hídricos. A literatura documenta que a migração dessas frações solúveis de alumínio e chumbo para aquíferos freáticos pode causar toxicidade aquática e fitotoxicidade, além de contribuir para a bioacumulação trófica que atinge populações humanas locais (Cheremisinoff, 2003).

Estudos conduzidos por Li e Ni (2025) demonstraram que a avaliação da liberação de metais pesados em testes de lixiviação é um dos principais critérios utilizados para determinar se um resíduo pode ser reaproveitado ou se necessita de tratamento adicional antes da disposição final.

Com relação a tratabilidade e eficiência da clarificação, análise realizada na água bruta do Rio dos Índios apresentou características iniciais de pH 6,83, cor aparente de 51,9 PtCo e turbidez de 18,4 NTU (Tabela 6). A resposta da clarificação às diferentes dosagens do coagulante argilomineral (20 a 45 ppm) evidenciou forte dependência da concentração aplicada.

Tabela 6 – Resultados da água bruta.

Parâmetro	Resultado	Padrões
pH	6,83	6,0 a 9,5
Cor (PtCo)	51,9	< 15,00
Turbidez (NTU)	18,4	< 5,00

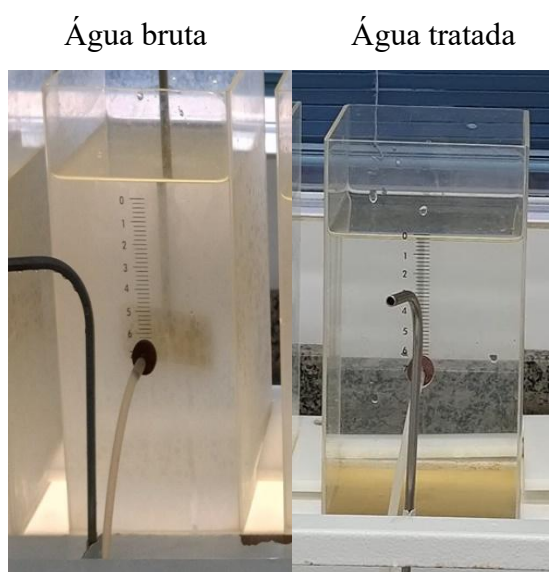
Os resultados obtidos nos ensaios de Jar Test são mostrados na Tabela 7. Com base na Análise de decisão multi-critério e na análise de sensibilidade realizada, o Jarro 3, com dosagem de 30 ppm, é identificado como a condição ótima de coagulação, pois apresenta menor turbidez absoluta (2,79 NTU) entre todos os jarros; segunda menor cor (11,8 PtCo), estatisticamente equivalente ao Jarro 4 (11,6 PtCo); pH mais adequado (6,33) em relação aos jarros de maior dosagem; eficiência de remoção de turbidez de 84,8% — a mais alta entre todos os jarros e, finalmente, princípio da economia de coagulante: dosagem inferior à do Jarro 4 com desempenho equivalente ou superior. A diferença visual entre a água bruta e a água tratada na melhor dosagem pode ser observada na Figura 3.

Esses resultados de remoção corroboram taxas de eficácia relatadas em estudos recentes que aplicaram lodos acidificados, os quais reportam remoções de turbidez entre 75% e 90% em águas superficiais (Pedretti & Medeiros, 2022).

Tabela 7- Resultados Jar test

Jarros	1	2	3	4	5	6
Dosagens (ppm)	20	25	30	35	40	50
Turbidez (NTU)	15,1	4,02	2,79	2,94	4,03	10
Cor (PtCo)	39,6	16,1	11,8	11,6	15,3	27,4
pH	6,54	6,43	6,33	6,20	6,07	5,59

Figura 3 – Visão comparativa da eficiência de remoção de cor



Fonte: Autores.

O mecanismo dominante nesta faixa de pH (6,33) consiste na adsorção e neutralização de cargas, complementado pela floculação por varredura (Nayeri & Mousavi, 2022; Mazari et al., 2018a). Estudos experimentais demonstram que a eficiência da coagulação com sais de alumínio depende fortemente do pH. Durante o processo de coagulação, o sulfato de alumínio sofre reações de hidrólise, liberando íons hidrogênio (H^+) no meio. Esse processo provoca redução do pH da água tratada, especialmente quando doses mais elevadas do coagulante são aplicadas. Estudos experimentais demonstram que a variação da dosagem do sulfato de alumínio influencia diretamente o pH e as características do processo de coagulação, podendo alterar a eficiência de remoção de turbidez, cor e sólidos suspensos (Nurjanah et al., 2025).

Pesquisas conduzidas por Yang et al. (2010) mostraram que o desempenho do sulfato de alumínio apresenta faixa ótima de coagulação entre pH 6,0 e 7,0, condição na qual ocorre maior formação de espécies hidroxiladas de alumínio responsáveis pela desestabilização

coloidal.

A análise comparativa apresentada na Tabela 8 deve ser interpretada com atenção às diferenças de contexto entre os estudos. Em termos de cor residual, os valores absolutos obtidos no presente estudo (11,8–39,6 PtCo) são numericamente superiores aos reportados por García-Ávila et al. (2021) (2,0–3,5 PtCo) e Lugo-Arias et al. (2020) (1,3–2,3 NTU de turbidez). No entanto, essa diferença não reflete necessariamente desempenho inferior do coagulante sintetizado, mas sim a distinção nas condições experimentais: a água bruta utilizada no presente estudo apresentava cor inicial de 51,9 PtCo e turbidez de 18,4 NTU, enquanto os estudos de referência operaram provavelmente com águas de qualidade inicial superior ou com coagulantes já purificados. Considerando essa assimetria, o coagulante argilomineral sintetizado promoveu remoção de 77,2% da cor e 84,8% da turbidez — índices quantitativamente alinhados com a literatura de recuperação de coagulantes de lodos de ETA, que reporta remoções típicas entre 75% e 90% (Pedretti & Medeiros, 2022; Nayeri & Mousavi, 2022).

Tabela 8- Comparativo da eficiência do uso do sulfato de alumínio virgem X subproduto obtido através do lodo - Resultados Jar test.

Dosagens (mg/L)	Cor (PtCo)			Turbidez (NTU)			pH		
	Presente estudo	García-Ávila et al., (2021)	Lugo-Arias, et al., (2020)	Presente estudo	García-Ávila et al., (2021)	Lugo-Arias, et al., (2020)	Presente estudo	García-Ávila et al., (2021)	Lugo-Arias, et al., (2020)
20	39,6	2	*	15,1	0,78	*	6,54	7,34	*
25	16,1	2,45	*	4,02	0,84	2,3	6,43	7,02	6,1
30	11,8	2,65	*	2,79	1,02	*	6,33	7,14	*
35	11,6	2,55	*	2,94	0,76	1,5	6,2	6,89	5,8
40	15,3	2,65	*	4,03	1,04	*	6,07	6,93	*
45	27,4	3,5	*	10	0,86	*	5,59	7,11	*
50	*	*	*	*	*	1,3	*	*	5,6

No que se refere ao pH, o presente estudo operou em faixa ligeiramente mais ácida (5,59–6,54) em relação a García-Ávila et al. (2021) (6,89–7,34), consequência direta da acidez livre elevada do coagulante sintetizado. Ainda assim, a melhor dosagem de 30 ppm manteve o pH em 6,33 — dentro da faixa ideal de coagulação com sais de alumínio (6,0–7,0), conforme Yang et al. (2010) e Tahraoui et al. (2024). É importante destacar, ainda, que os estudos de referência utilizam coagulantes já recuperados ou sintéticos, enquanto o presente trabalho parte de um resíduo bruto de indústria de base, sem etapas prévias de purificação. Essa distinção

posiciona os resultados obtidos como uma demonstração de viabilidade técnica de primeira ordem, não como uma competição direta com coagulantes comerciais. O objetivo central do trabalho — demonstrar que a lama residual da fabricação do sulfato de alumínio pode ser sintetizada em um coagulante funcionalmente competente, dentro dos padrões regulatórios vigentes — é atendido pelos dados da Tabela 8.

Conclusão

- Este estudo comprovou a viabilidade técnica de sintetizar um coagulante argilomineral diretamente a partir da lama residual gerada no processamento industrial primário do sulfato de alumínio. Diferentemente da literatura internacional recente, que se concentra predominantemente na recuperação de alumínio a partir de lodos já gerados nas ETAs. Este trabalho avança no estado da arte ao intervir na base da cadeia produtiva, valorizando o passivo bruto da própria indústria química geradora.
- A caracterização físico-química do produto obtido atestou a sua adequação à grande maioria dos critérios da ABNT NBR 11176, destacando-se o teor de alumínio ativo de 6,30%, essencial para a eficiência do processo. No entanto, registrou-se uma inconformidade no parâmetro de acidez livre, que alcançou 6,67% em virtude do ácido residual da matriz produtiva. Embora essa alta acidez não tenha inviabilizado a tratabilidade primária nos ensaios de bancada, é fundamental destacar as suas implicações operacionais em uma eventual aplicação em escala real.
- A eficácia do coagulante sintetizado foi validada através de ensaios de Jar Test, atingindo melhor desempenho com dosagem de 30 ppm: remoção de 84,8% da turbidez (alcançando 2,79 NTU) e de 77,2% da cor aparente (alcançando 11,8 PtCo), com pH de 6,33, dentro da faixa ideal para mecanismos de desestabilização coloidal com sais de alumínio. Embora os valores absolutos de cor e turbidez residuais sejam numericamente superiores aos reportados por García-Ávila et al. (2021) e Lugo-Arias et al. (2020), essa diferença deve ser contextualizada: os estudos de referência operaram com águas de qualidade inicial superior e com coagulantes já processados ou purificados, enquanto o presente trabalho parte de um resíduo bruto de indústria de base, sem etapas prévias de purificação. As taxas de remoção obtidas são compatíveis com os padrões de potabilidade vigentes e alinhadas com as eficiências reportadas na literatura de

recuperação de coagulantes de lodos de ETA (75%–90%), o que atesta o potencial tecnológico do produto como alternativa viável ao sulfato de alumínio comercial.

- Sob a perspectiva da engenharia de processos e do balanço de massas, o método de lixiviação ácida obteve um rendimento expressivo de 43,6% em produto útil, limitando a geração de resíduos sólidos destinados a aterros industriais a apenas 32,3% da massa original. A caracterização desse rejeito classificou-o como Classe II A (não inerte) frente à NBR 10004. Contudo, faz-se estritamente necessário problematizar os riscos ecotoxicológicos associados aos elevados índices de solubilização de metais identificados, a exemplo do alumínio, ferro, chumbo e cromo. As dimensões desse achado indicam que o manejo incorreto da fração sólida possui grande potencial de lixiviação e contaminação de aquíferos freáticos. Logo, a disposição final demanda políticas de impermeabilização adequada ou tratamento posterior, a fim de evitar danos ao meio ambiente.
- Diante dessas ponderações e com vistas ao amadurecimento desta inovação tecnológica, recomendam-se como próximos passos: a aplicação de ferramentas estatísticas para validar a reprodutibilidade dos lotes em campo, utilizando-se de amostras de água bruta de outros rios da região; o aperfeiçoamento das rotas químicas para a redução primária da acidez; e a necessária modernização estrutural da planta fabril para absorver integralmente os desafios desta nova frente de produção sustentável.

Referências

- Abd Ghafor, A. F., & Kassim, J. (2025). Conservation of natural resources through sustainable fertilized soil from alum sludge by Takakura composting. *International Journal of Conservation Science*, 16(1), 303-312.
- Al-Fakih, A., Nor, Z. M., Basha, S. I., Shaikh, M. N., Ahmad, S., Al-Osta, M. A., & Aziz, A. (2023). Characterization and applications of red mud: An aluminum industry waste material in the construction and building industries, as well as catalysis. *The Chemical Record*, 23(5). <https://doi.org/10.1002/tcr.202300039>.
- Ballou, I., Kounbach, S., Naja, J., Bakher, Z. E., Laraki, K., Raibi, F., Saadi, R., & Kholtei, S. (2022). A new approach of aluminum extraction from drinking water treatment sludge. *Minerals Engineering*, 189, 107859.

- Cheremisinoff, N. P. (2003). Handbook of solid waste management and waste minimization technologies. Butterworth-Heinemann.
- Cremades, L. V., Cusidó, J. A., & Arteaga, F. (2018). Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1071–1080.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). MWH's water treatment: Principles and design. John Wiley & Sons.
- Dahasahastra, A. V., Balasundaram, K., & Latkar, M. V. (2022). Turbidity removal from synthetic turbid water using coagulant recovered. *Hydrometallurgy*, 213, 105939.
- Gal, T., Stewart, T. J., & Hanne, T. (1999). Multicriteria decision making: Advances in MCDM models, algorithms, theory, and applications. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5025-9>.
- García-Ávila, F., Zhindón-Arévalo, C., Valdiviezo-Gonzales, L., Pérez-Salinas, C., & Moscoso-Ruiz, F. (2021). Comparative study of the efficiency of coagulation-flocculation process in water with different turbidities using aluminum sulfate and polyaluminum chloride. *Water Practice & Technology*, 16(3), 961–972. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.053>.
- Grotto, L. G., Menegoni, V. L., Ruschel, C. K., & Schumann, C. (2021). Reutilização de sulfato de alumínio recuperado a partir do lodo de ETE – Estação de tratamento de efluentes. *Meio Ambiente (Brasil)*, 3(3), 02-16.
- Lugo-Arias, E., Lugo-Arias, J., Taron-Dunoyer, A., Cardona-Arrieta, J., & Ballesteros-Ballesteros, V. (2020). Evaluación de la eficiencia del sulfato de aluminio en el tratamiento del agua para consumo humano. *Revista Espacios*, 41(47), 1–12.
- Harmaji, A., Jafari, R., & Simard, G. (2024). Valorization of residue from aluminum industries: A review. *Materials*, 17, 5152. <https://doi.org/10.3390/ma17215152>
- Jung, K. W., Hwang, M. J., Park, D. S., & Ahn, K. H. (2016). Comprehensive reuse of drinking water treatment residuals in coagulation and adsorption processes. *Journal of Environmental Management*, 181, 425–434.
- Krupińska, I. (2020). Aluminium drinking water treatment residuals and their toxic impact on human health. *Molecules*, 25(3), 641.
- Li, S., & Ni, G. (2025). Heavy metals environmental fate in metallurgical solid wastes: Occurrence, leaching, and ecological risk assessment. *Journal of Xenobiotics*, 15(6), 211.

<https://doi.org/10.3390/jox15060211>.

- Mazari, L., Abdessemed, D., Scymczyk, A., & Trari, M. (2018a). Assessment of coagulation-ultrafiltration performance for the treatment of primary effluent. *Water and Environment Journal*, 32, 621-629.
- Mazari, L., Abdessemed, D., & Scymczyk, A. (2018b). Evaluating reuse of alum sludge as coagulant for tertiary wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering*, 144(12), 04018119.
- Nayeri, D., & Mousavi, S. A. (2022). A comprehensive review on the coagulant recovery and reuse from drinking water treatment sludge. *Journal of Environmental Management*, 319, 115649. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115649>.
- Nguyen, M. D., Thomas, M., Surapaneni, A., Moon, E. M., & Milne, N. A. (2022). Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102651.
- Nigussie, W., Zewge, F., & Chandravanshi, B. S. (2007). Removal of excess fluoride from water using waste residue from alum manufacturing process. *Journal of Hazardous Materials*, 147(3), 954-963. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.135>.
- Nurjanah, F. L., Cahyonugroho, O. H., & Novembrianto, R. (2025). Analysis of aluminum sulfate dosage on water quality parameters in the coagulation–flocculation process. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, 11(1), 8–15.
- Pashaki, S. G. A., Khojastehpour, M., Ebrahimi-Nik, M., & Tedesco, S. (2023). Evaluation of combined thermo-chemical processes for the treatment of landfill leachate using virgin and recovered FeCl₃ coagulants. *Journal of Environmental Management*, 347, 118973.
- Pedretti, A., & Medeiros, R. C. (2022). Avaliação do potencial de coagulante recuperado de lodo de estação de tratamento de água para uso em águas de baixa e elevada turbidez. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27(6), 1177-1188.
- Purchase, C. K., Al Zulayq, D. M., O'Brien, B. T., Kowalewski, M. J., Berenjian, A., Tarighaleslami, A. H., & Seifan, M. (2022). Circular economy of construction and demolition waste: A literature review on lessons, challenges, and benefits. *Materials*, 15, 76.
- Ramadan, H., & El Sayed, A. E. A. (2020). Optimization of alum recovery from water treatment sludge-case study: Samannoud water treatment plant, Egypt. *Water and Environment Journal*, 34, 464-473. <https://doi.org/10.1111/wej.12481>

- Silva Filho, E. B., Alves, M. C. M., & Da Motta, M. (2007). Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Revista Matéria*, 12(2), 322-338.
- Sun, Z. (2024). Leaching methodologies for alkali activated materials containing industrial wastes. In Z. Sun (Ed.), *Mining and metallurgical wastes based alkali-activated materials* (pp. 233-249). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-97-6285-9_12.
- Tahraoui, H., Toumi, S., Boudoukhani, M., Touzout, N., Sid, A. N. E. H., Amrane, A., Belhadj, A. E., Hadjadj, M., Laichi, Y., Aboumustapha, M., Kebir, M., Bouguettoucha, A., Chebli, D., Assadi, A. A., & Zhang, J. (2024). Evaluating the effectiveness of coagulation–flocculation treatment using aluminum sulfate on a polluted surface water source: A year-long study. *Water*, 16(3), 400. <https://doi.org/10.3390/w16030400>.
- Yang, Z. L., Gao, B. Y., Yue, Q. Y., & Wang, Y. (2010). Effect of pH on coagulation behavior of aluminum-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid-kaolin synthetic water. *Journal of Hazardous Materials*, 178, 596-603. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.127>.
- Zemmouri, H., Drouiche, M., Sayeh, A., Lounici, H., & Mameri, N. (2012). Coagulation flocculation test of Keddara's water dam using chitosan and aluminium sulfate. *Procedia Engineering*, 33, 254-260.
- Zhao, W., Xie, H., Li, J., Zhang, L., & Zhao, Y. (2021). Application of alum sludge in wastewater treatment processes: “Science” of reuse and reclamation pathways. *Processes*, 9(4), 612.
- Zhao, B., Christodoulatos, C., Shi, Q., Ji, M., Sheets, S., & Meng, X. (2025). Effective removal of sulfate and heavy metals from wastewater by ettringite precipitation using aluminum-based sludge. *Separation and Purification Technology*, 382, 135776. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.135776>.

Publisher: Universidade Federal de Jataí. Instituto de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFJ. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores: Angélica de Moraes Jordão da Silva: Elaboração, coleta,

organização e análise dos dados, tabelas, gráficos, mapas, escrita; Liandra Sartor da Silva: coleta e organização dos dados; Valdeci José Costa: escrita e discussão, orientação e revisão; Daiana Petry Rufato: Orientação e revisão. Declaramos ainda ciência das Diretrizes Gerais da Geoambiente On-line.

Financiamento: Esta publicação teve o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), edital 025/2025, através da concessão de bolsa de estudos. Apoio da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e da Universidade do Planalto Catarinense (UNIPLAC) mediante fornecimento de infraestrutura, equipamentos e laboratórios para a realização deste estudo.

Uso de Inteligência Artificial: Os autores declaram que ferramentas de inteligência artificial generativa (Claude e NotebookLM) foram utilizadas durante a preparação deste manuscrito exclusivamente para aprimoramento da legibilidade, estrutura linguística e organização textual. Nenhuma ferramenta de IA foi utilizada para gerar resultados científicos, interpretações ou conclusões. Os autores revisaram e aprovaram integralmente a versão final do manuscrito e assumem total responsabilidade pelo conteúdo apresentado.

Conflito de interesse: Os autores declaram que não possuem interesses financeiros ou não financeiros relevantes relacionados a este trabalho.