



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Luiza Helena Lima Moraes

**Aplicação do processo de regeneração por via ácida de coagulante químico
em lodo de Estação de Tratamento de Água**

Rio de Janeiro

2023

Luiza Helena Lima Moraes

**Aplicação do processo de regeneração por via ácida de coagulante químico em lodo de
Estação de Tratamento de Água**



Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Daniele Bila

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Rosane Cristina de Andrade

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M828 Moraes, Luiza Helena Lima.
Aplicação do processo de regeneração por via ácida de coagulante
químico em lodo de estação de tratamento de água / Luiza Helena
Lima Moraes. – 2023.
89 f.

Orientadora: Daniele Maia Bila.
Coorientadora: Rosane Cristina de Andrade.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Água - Estações de tratamento
- Teses. 3. Lodo residual - Teses. 4. Água - Purificação - Coagulação -
Teses. I. Bila, Daniele Maia. II. Andrade, Rosane Cristina de. III.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
IV. Título.

CDU 628.168

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Luiza Helena Lima Moraes

Aplicação do processo de regeneração por via ácida de coagulante químico em lodo de Estação de Tratamento de Água

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Daniele Bila (Orientadora)

Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof.^a Dr.^a Rosane Cristina de Andrade (Coorientadora)

Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Everton Gripa

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Felipe Cury Mazza

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Ronei de Almeida

Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro

2023

AGRADECIMENTOS

À professora Dr.^a Daniele Bila, não somente pelas revisões e ensinamentos, mas também por acreditar no trabalho e se desdobrar ao máximo para possibilitar a execução do mesmo.

À professora Dr.^a Rosane Cristina de Andrade, por auxiliar no desenvolvimento do estudo, pela coleta do LETA em Viçosa, e sobretudo, por dedicar-se ao trabalho mesmo durante a licença maternidade.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Sanitária (LES) Sidnei e Daniela, pelo apoio com as análises de COD e ensaios de *jar test*

Aos colegas do LES Louise e Rafael, pelo apoio com a realização dos ensaios de toxicidade com *Vibrio fischeri*.

Ao Rafael, à professora Rosane e seus alunos de iniciação científica pela ajuda à coleta da água do córrego em Mesquita.

Ao professor Dr. Marcelino e demais técnicos do Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas (LIETA) pela realização dos ensaios de FRX e XRD

Aos meus irmãos Daniele e Rodrigo, e sua mãe Angela, pela hospedagem às vezes que precisei comparecer à UERJ.

À minha mãe, Elizete e à minha esposa Jhessica, pelo incentivo, por acreditarem na minha capacidade e torcerem pelo meu sucesso.

RESUMO

MORAES, Luiza Helena Lima. *Aplicação do processo de regeneração por via ácida de coagulante químico em lodo de estação de tratamento de água*. 2023. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O presente trabalho analisa a viabilidade técnica da recuperação por via ácida de coagulante como método para melhoria do processo de valorização de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA). Ensaios de recuperação de coagulante utilizando ácido sulfúrico, i.e., processo via ácida foram realizados. O lodo foi coletado da ETA da Universidade Federal de Viçosa (LETA), Minas Gerais, Brasil (722065.30 m E, 7702362.74 m S). O qual O qual apresentou toxicidade aguda sobre *Vibrio fischeri* (percentual de efeito entorno de 30,24%), composto principalmente de água (53,85%), matéria orgânica (9,98%) e óxidos tais como Al_2O_3 (37,74 %), SiO_2 (35,98 %), P_2O_5 (0,599 %), SO_3 (0,375 %), Cl (0,353 %), K_2O (0,216 %), CaO (0,312 %), TiO_2 (1,783 %), MnO (0,159 %) e Fe_2O_3 (22,31 %), presentes em formas cristalinas (Caulinita, Goethita, Hematita e Gibbissita, entorno de 48,7 %) e amorfas (51,3 %). Realizado o processo de regeneração do coagulante do LETA, foram gerados dois produtos: um coagulante e um resíduo sólido não solubilizado chamado de "LETA tratado". A análise química do coagulante recuperado revelou uma concentração de sulfato de alumínio de $0,53 \text{ g.L}^{-1}$, que apesar de ter sido menor do que a concentração de 20 g.L^{-1} do coagulante comercial usado para comparação no estudo, mostrou resultados de remoção de cor em 83,30% e de turbidez em 55,67%, tendo em vista a possibilidade da recuperação de outros agentes coagulantes como o sulfato férrico. No entanto, devido ao coagulante recuperado ter aumentado a concentração de Carbono Orgânico Dissolvido (COD) em $3,035 \text{ mg.L}^{-1}$ na água bruto, e à possibilidade deste em adicionar à água tartada metais dissolvidos presentes em sua composição, sua utilização não foi recomendada para utilização em tratamento de água para abastecimento público, sendo mais indicado para o tratamento de efluentes. O "LETA tratado", apesar de apresentar características semelhantes ao lodo original da LETA, apresentou resultados menores em relação aos teores de umidade, matéria orgânica e de óxidos como SiO_2 (35,730 %), P_2O_5 (0,550 %), SO_3 (0,091 %), Cl (0,310 %), K_2O (0,192 %), CaO (0,330 %), TiO_2 %, (1,672 %), MnO (0,156 %) e Fe_2O_3 (20,86 %), e maiores quanto à presença de Al_2O_3 no meio (39,950 %), e de percentual de efeito sobre a ecotoxicidade testada utilizando a bactéria *Vibrio fischeri* (Percentual de efeito de 85,22%) Essas alterações nas características do "LETA tratado" sugerem que ele pode ser mais adequado para alguns métodos de destinação, como incorporação do lodo em concreto e cerâmica, uma vez que a aplicação do processo de recuperação de coagulante através do lodo permitiu reduzir algumas características que limitavam a aplicação desses métodos, como umidade, matéria orgânica e a presença de alguns óxidos presentes no LETA. No entanto, são necessários estudos mais detalhados sobre cada uma das metodologias de reaproveitamento após a recuperação do coagulante, a fim de avaliar melhor a viabilidade técnica e econômica desses procedimentos.

Palavras-chave: Coagulação/ floculação; Recuperação por acidificação; Valorização de resíduos; Sulfato de alumínio; Lodo químico.

ABSTRACT

MORAES, Luiza Helena Lima. *Application of the acidic regeneration process of chemical coagulant in sludge from a water treatment plant*. 2023. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

The present study analyzes the technical feasibility of recovering a coagulant through an acidic process as a method to enhance the valorization process of sludge from a Water Treatment Plant (WTP). Recovery trials of the coagulant using sulfuric acid, i.e., an acid recovery process, were conducted. The sludge was collected from the WTP of the Federal University of Viçosa (WTPS), Minas Gerais, Brazil (722065.30 m E, 7702362.74 m S). It exhibited acute toxicity to *Vibrio fischeri* (around 30.24% effect), composed mainly of water (53.85%), organic matter (9.98%), and oxides such as Al₂O₃ (37.74%), SiO₂ (35.98%), P₂O₅ (0.599%), SO₃ (0.375%), Cl (0.353%), K₂O (0.216%), CaO (0.312%), TiO₂ (1.783%), MnO (0.159%), and Fe₂O₃ (22.31%), present in crystalline forms (Kaolinite, Goethite, Hematite, and Gibbsite, around 48.7%) and amorphous forms (51.3%). After the regeneration process of the coagulant from LETA, two products were generated: a coagulant and an unsolubilized solid residue called "treated WTPS." The chemical analysis of the recovered coagulant revealed an aluminum sulfate concentration of 0.53 g.L⁻¹, which, despite being lower than the concentration of 20 g.L⁻¹ of the commercial coagulant used for comparison in the study, showed color removal results of 83.30% and turbidity removal of 55.67%, considering the possibility of recovering other coagulants such as ferric sulfate. However, due to the recovered coagulant increasing the concentration of Dissolved Organic Carbon (COD) by 3.035 mg.L⁻¹ in the raw water, and the possibility of introducing dissolved metals into the treated water, its use was not recommended for public water supply but was more suitable for effluent treatment. The "treated WTPS" despite having similar characteristics to the original WTP sludge, showed lower results in terms of moisture content, organic matter, and oxides such as SiO₂ (35.730%), P₂O₅ (0.550%), SO₃ (0.091%), Cl (0.310%), K₂O (0.192%), CaO (0.330%), TiO₂ (1.672%), MnO (0.156%), and Fe₂O₃ (20.86%), and higher in the presence of Al₂O₃ in the medium (39.950%), and the percentage effect on ecotoxicity tested using the bacterium *Vibrio fischeri* (Effect percentage of 85.22%). These changes in the characteristics of the "treated LETA" suggest that it may be more suitable for some disposal methods, such as incorporating the sludge into concrete and ceramics, as the application of the coagulant recovery process through the sludge allowed reducing some characteristics that limited the application of these methods, such as moisture, organic matter, and the presence of certain oxides in the LETA. However, more detailed studies on each of the reuse methodologies after coagulant recovery are needed to better assess the technical and economic feasibility of these procedures.

Keywords: Coagulation/flocculation; Recovery by acidification; Waste valorization; Aluminum sulfate; Chemical sludge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma simplificado do processo realizado nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) do tipo convencional.....	16
Figura 2 – Distribuição da água presente em um floco de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA).....	20
Figura 3 - Distribuição relativa das espécies de alumínio em solução do solo (BERTSCH & PARKER, 1995 apud WENDLING, 2012).....	23
Figura 4 - Aspectos visuais do Lodo de Estação de Tratamento de Água da ETA da Universidade Federal de Viçosa, MG, Brasil. Lodo proveniente do sistema piloto de leito de drenagem e armazenado em saco de rafia.	36
Figura 5 - Difratoograma resultante da análise de difração de raios X do LETA bruto.	50
Figura 6 – Fluxograma simplificado do processo sugerido para Recuperação do Coagulante a partir do LETA.	52
Figura 7 - Difratoograma da amostra de lodo após tratamento.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dosagens dos coagulantes comercial e recuperado do LETA utilizados para realização dos ensaios de <i>jar test</i> . LETA = lodo de estação de tratamento de água.	44
Tabela 2 - Resultado da caracterização físico-química do LETA da ETA da UFV.....	48
Tabela 3 - Percentual de óxidos identificados no LETA da UFV anterior e posterior ao tratamento por recuperação de coagulante do meio	49
Tabela 4 - Resumo comparativo entre os efeitos do LETA bruto e tratado, em diferentes quantidades sobre a produção de luminescência por <i>Vibrio fisheri</i> em razão do tempo de exposição dos organismos ao resíduo.....	51
Tabela 5 - Relação percentual entre parte cristalina e amorfa das amostras de LETA anterior e posterior ao tratamento por recuperação de coagulante do LETA.	53
Tabela 6 – Composição química do coagulante recuperado do LETA obtidos por meio da análise de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF)	61
Tabela 7 - Resultados de pH, cor, turbidez e COD da água bruta antes e após ensaio de <i>Jar Test</i> realizados com os coagulantes comercial e recuperado do LETA.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ag – Prata

Al - Alumínio

Al(OH)^{2+} - Hidróxido de Alumínio

Al(OH)_3 – Hidróxido de Alumínio (III)

Al(OH)_4 - Aluminato

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – Sulfato de Alumínio

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ - Caulinita

AWWA - American Water Works Association

Ca - Cálcio

CaO - Óxido de cálcio

Cd - Cádmiio

CH_4 - Metano

CIPP - Concentração de Impureza Permissível por Produto

Cl - Cloro

CO – Óxido de carbono

CO_2 – Dióxido de Carbono

COD – Carbono Orgânico Dissolvido

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

Cr - Cromo

Cu - Cobre

D = dose de coagulante (mg L^{-1});

D. similis - *Daphnia similis*

XRD – Difração de raios X

E/S - Estabilização e Solidificação

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

F⁻ Flúor

Fe - Ferro

Fe(OH)_3 - Hidróxido de ferro (III)

Fe_2O_3 - Óxido de ferro(III)

$\text{FeO}(\text{OH})$ - Goethita

Ga - Gálio

H- Hidrogênio

Hg - Mercúrio

K – Potássio

$K1$ e $K2$ = coeficientes adimensionais da fórmula empírica.

K_2O - Óxido de potássio

kV - Quilovolt

LETA – Lodo de Estação de Tratamento de Água

LIETA - Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas

MgO - Óxido de magnésio

Mn - Manganês

MnO – Óxido de Manganês

MO – Matéria Orgânica

M_s = produção de sólidos (kg de sólidos por m^3 de água tratada);

Na - Potássio

Na_2O - Óxido de sódio

NaCl - Cloreto de sódio

NBR - Norma Brasileira

Ni - Níquel

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez

$P1$ = Massa de lodo bruto

P_2O_5 - Pentóxido de fósforo

$P2$ = Massa de lodo desidratado

$P3$ = Massa de lodo calcinado

Pb - Chumbo

pH - Potencial Hidrogeniônico

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PO_4^{3-} - Íon de fosfato

SDD - Silicon Drift Detector

Si - Silício

SiO_2 - Dióxido de silício

SO_3 - Trióxido de Enxofre

SO_4^{2-} - Sulfato

P_a = período de acúmulo de lodo (s);

TiO_2 - Dióxido de titânio

TXRF - Fluorescência de raios X por reflexão total

UFV - Universidade Federal de Viçosa

XRD - Difração de raios X

XRF - Fluorescência de raios X

Z – Número atômico

Zn - Zinco

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ - Alpha alumina

$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ - Gamma alumina

$\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ - Delta alumina

$\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ - Deta alumina

$\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ - Capa alumina

$\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ - Csi alumina

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
OBJETIVOS	14
1. REFERENCIAL TEÓRICO	16
1.1 Estações de Tratamento de Água (ETA)	16
1.2 Lodo de Estação de Tratamento de Água	19
1.3 Impactos do LETA ao meio ambiente e à saúde humana	21
1.4 A Gestão do LETA no mundo e no Brasil	24
1.5 Metodologias alternativas de tratamento e disposição de LETA	26
1.5.1 Uso de lodo de ETA em processos de recuperação de coagulante.....	26
1.5.2 Uso no setor de construção civil.....	30
1.5.3 Uso de LETA como adsorvente para poluentes	33
1.5.4 Uso de lodo de ETA no solo.....	34
2. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 Lodo de ETA	36
3.2 Caracterização do LETA	37
3.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH)	37
3.2.2 Teor de umidade e teor de matéria orgânica.....	38
3.2.3 Composição química	39
3.2.4 Ensaio de ecotoxicidade aguda	40
3.3 Recuperação de sulfato de alumínio contido no LETA por via ácida	41
3.4 Estudo de tratabilidade com coagulante recuperado	42
3.4.1 Análise elementar do coagulante recuperado	42
3.4.2 Água bruta	43
3.4.3 Ensaio de <i>Jar test</i>	43
3.4.4 pH	45
3.4.5 Cor	45
3.4.6 Turbidez.....	45
3.4.7 Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 Caracterização do LETA bruto	47
4.2 Recuperação de coagulante presente no LETA por via ácida	51

4.2.1	LETA excedente após recuperação de coagulante por via ácida.....	52
4.2.2	Coagulante recuperado do LETA por via ácida	60
CONCLUSÕES.....		66
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		67
REFERÊNCIAS		69

INTRODUÇÃO

Os sólidos retidos durante o processo de tratamento de água para consumo humano compõem um subproduto da Estação de Tratamento de Água (ETA), denominado lodo de ETA (LETA), uma torta densa e viscosa de composição variável, reconhecido através da NBR 10.004 (ABNT, 2004) como resíduo sólido de Classe II – A (Não perigoso – inerte), e abrangido pela Lei nº 12.305/2010, que Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), por meio da alínea “e” do inciso I do artigo 13, como resíduo dos serviços públicos de saneamento básico.

A maior parte das ETAs no Brasil lançam esses resíduos sem nenhuma forma de tratamento diretamente nos corpos d’água. Isso tem se tornado uma grande preocupação ambiental devido à presença de metais tóxicos, sólidos em suspensão e matéria orgânica presentes no LETA, que podem causar modificações nas características biológicas e químicas das águas naturais, acarretando prejuízos à fauna e flora aquática, e à saúde do homem (COUTO, 2011; FERNANDES, 2014; ANDRADE, SILVA & OLIVEIRA, 2014).

Por este motivo, diversos métodos para tratamento e disposição do LETA têm sido investigados visando a redução dos impactos da destinação final destes, destacando-se os métodos que visam o reaproveitamento do resíduo, devido à sua potencialidade em conferir sustentabilidade e ainda gerar renda para as ETAs e demais elos da cadeia (MANSOUR, ABDEL-SHAF E AZAB, 2020; LAURINDO et al, 2020; WAGNER, 2015).

Dentre os inúmeros estudos sobre reaproveitamento do LETA, têm se destacado nos últimos anos, a aplicação do lodo como incorporação em produtos voltados à construção civil, uso como adsorvente de poluentes e como insumo na agricultura (OLIVEIRA, 2011). Contudo, grande parte dos trabalhos que aplicaram essas metodologias têm citado que, devido às características do LETA, sobretudo quanto à presença de altos teores de hidróxidos metálicos, a qualidade dos produtos gerados com sua reciclagem tem sido afetada negativamente, mesmo quando aplicadas pequenas quantidades do resíduo (GHIZONI, 2013).

A metodologia de recuperação de coagulante tem por objetivo transformar as moléculas de hidróxidos metálicos presentes no lodo de ETA em sais metálicos, de forma a removê-los do meio melhorando a destinação final do lodo, possibilitando, ainda a utilização do sal formado como agente coagulante para o tratamento de água ou efluentes (DANDOLINI, 2014).

Até o momento, existem quatro opções tecnológicas disponíveis para realização da recuperação do coagulante do LETA, sendo estes via ácida, via alcalina, via extração por solvente e via quelação (JULIO, SANTOS & OROSKI, 2009). Todavia, a alternativa de

regeneração que tem alcançado o maior desenvolvimento industrial é de recuperação pela via ácida (PIOTTO et al.,1999; GUIMARÃES, 2005).

Nesse sentido, pondera-se sobre a utilização do processo de recuperação de coagulante por via ácida como metodologia para melhoria do procedimento de reaproveitamento de LETA, visando oferecer melhores condições de aplicação do resíduo à geração de produtos, de forma a reduzir ao máximo o descarte deste *in natura*.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica da aplicação do processo de regeneração de coagulante por via ácida como método para recuperação de coagulante químico presente no Lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA).

Objetivos específicos

- Realizar a caracterização físico-química do lodo da ETA da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais, Brasil;
- Recuperar o coagulante presente no Lodo de ETA (LETA) por via ácida;
- Avaliar a ação do agente coagulante recuperado no tratamento de água bruta captada de um manancial do município de Mesquita, Rio de Janeiro, Brasil;
- Realizar a caracterização físico-química do lodo gerado após a recuperação do coagulante presente no LETA por via ácida;
- Avaliar a toxicidade aguda do LETA antes e após a recuperação do coagulante presente no LETA por via ácida utilizando *Vibrio fischeri*;
- Analisar, com base nos resultados obtidos e levantamentos bibliográficos a respeito da interferência do lodo após aplicação recuperação do coagulante

presente no LETA nas principais metodologias de reaproveitamento apontadas em literatura.

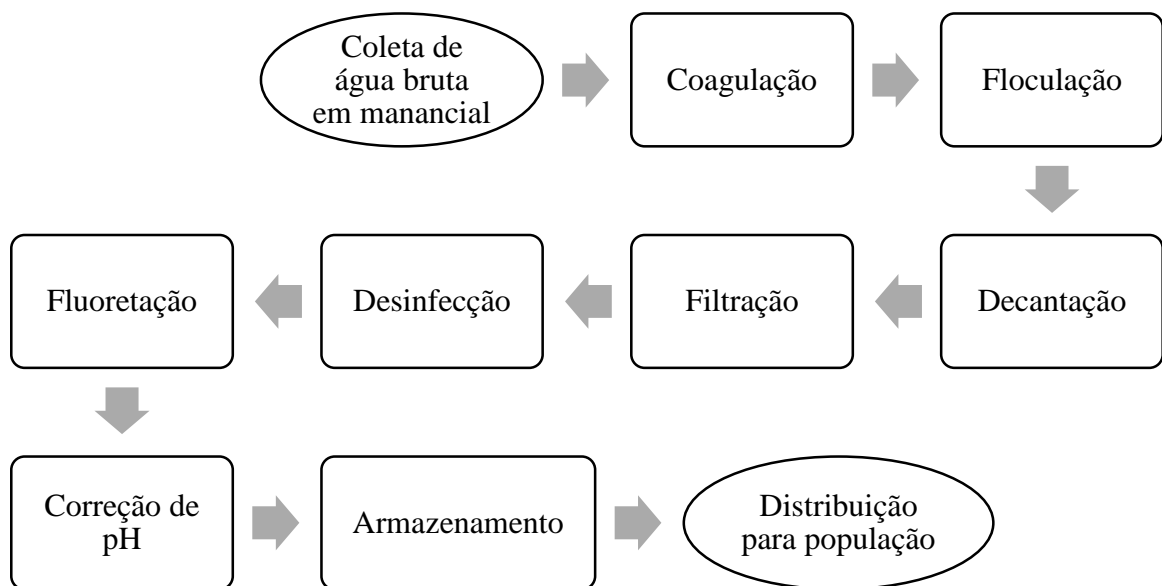
1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 Estações de Tratamento de Água (ETA)

A água é um recurso essencial à sobrevivência de todos os seres vivos. Quando destinada ao consumo humano, essa deve ser tratada, limpa e estar livre de qualquer contaminação, seja esta de origem microbiológica, química, física ou radioativa, conforme o Padrão de Potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde, GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021), normalmente atingidos por meio das Estações de Tratamento de Água (ETA) (MORAES et al., 2018).

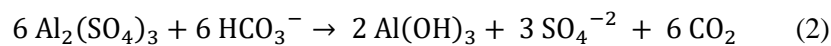
De acordo com a resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 357/2005 as ETAs são classificadas em três tipos, conforme a sua metodologia de tratamento, variando entre simples, convencional e avançado (BRASIL, 2005). A metodologia de tratamento mais utilizada pelas ETAs no Brasil, é a do tipo convencional, composta pelas etapas de captação, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH (ACHON, BARROSO & CORDEIRO, 2013; FERNANDES & SOUSA, 2020).

Figura 1 – Fluxograma simplificado do processo realizado nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) do tipo convencional.

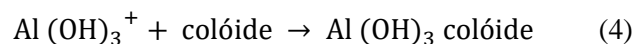
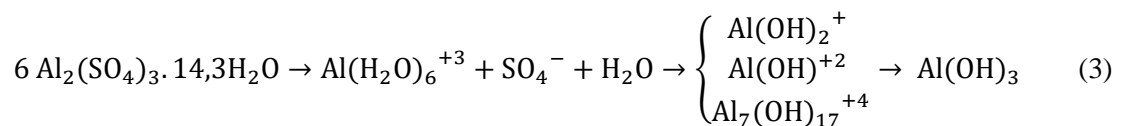


Fonte: (Adaptado de Francisco, Polman e Ferreira, 2011).

De acordo com Fernandes (2014), a coagulação consiste, basicamente, no processo de desestabilização de partículas coloidais através de reações químicas que ocorrem em uma unidade de mistura rápida onde o agente coagulante (geralmente Cloreto Férrico ou Sulfato de Alumínio) e a água bruta entram em contato, formando espécies hidrolisadas com carga positiva ou precipitados do metal do coagulante utilizado, conforme exemplificado nas equações 1 e 2 abaixo.



Rações subsequentes de hidrólises dos íons de alumínio com água formam várias espécies de hidróxidos de cargas multivalentes, como consta à equação 3. Os hidróxidos de alumínio formados assumem caráter coloidal, adsorvendo íons positivos da solução para formar um gel carregado positivamente, capaz de neutralizar a carga dos coloides negativos presentes na água bruta auxiliando na aglomeração dos mesmos, como pode ser visto à equação 4 (CARDOSO, 2003).



Segundo Cardoso (2003), devido ao gel ser formado em solução muito diluída, é importante que o sulfato de alumínio seja distribuído rapidamente, uniformemente e com um gradiente de velocidade adequado.

Devido a isto, as Estações de Tratamento de Água, introduzem o coagulante através da unidade de mistura rápida, que tem como objetivo garantir a dispersão rápida e uniforme do coagulante na água. As unidades de mistura rápida mais comuns incluem tanques com agitadores rápidos e misturadores hidráulicos (ASHBY, 2013).

Previamente desestabilizadas e neutralizadas na coagulação, as partículas coloidais presentes na água são movimentadas e carregadas lentamente colidindo entre si e se aglomerando, aumentando de tamanho físico e formando flocos. Essa agitação proveniente do

transporte do fluido deve ser moderada, sem alterações localizadas e decrescendo ao longo do aumento do tamanho dos flocos, para evitar a desagregação de flocos já formados (FERNANDES, 2014).

Os tipos de unidades de floculação podem ser categorizados em floculadores mecânicos, que são subdivididos em eixo vertical e eixo horizontal, bem como em floculadores hidráulicos, que podem ser de fluxo vertical ou horizontal (ASHBY, 2013).

Na decantação, os flocos formados realizam, pela ação da gravidade, um movimento descendente, que através da sedimentação em uma superfície ou zona de armazenamento, proporciona a clarificação do meio líquido com a separação das fases sólidas e líquidas (ASSIS, 2014).

Os flocos sedimentados formam uma camada de lodo no fundo dos decantadores, a qual deve ser removida periodicamente. Dependendo do porte da ETA, a remoção dos sólidos depositados pode ser realizada de forma mecanizada, hidráulica ou manual. No caso de limpeza manual, a remoção deve ser realizada após 30 dias de operação, através do esvaziamento da unidade e lavagem por jateamento de água sob alta pressão (ELIE, 2023).

Os sólidos sedimentados removidos do tanque de decantação são entendidos como Lodo de ETA (LETA). No Brasil, a maioria das ETAs não realizam tratamento do LETA, sendo estes, geralmente, lançados *in natura* nos corpos d'água (BILIATTO E CECCHINI JUNIOR, 2022).

Quanto à água resultante à decantação, esta é submetida à etapa de filtração desempenha um papel crucial no tratamento de água, sendo responsável por remover partículas que persistem na água após as etapas anteriores, como sólidos em suspensão e microrganismos (BRAGA, 2014).

Os componentes fundamentais nessa etapa, geralmente são: tanque, que age como estrutura de contenção para a água a ser filtrada; leitos filtrantes, constituídos por uma camada de areia e uma de carvão ativado; camadas de suporte, formadas por material granular e pedregulhos de maior granulometria; e fundo falso, geralmente composto por blocos cerâmicos, que tem a função de drenar a água (ARAÚJO, 2021).

A etapa de desinfecção consiste na remoção ou inativação dos microrganismos patogênicos presentes na água, tornando-os incapazes de se reproduzirem ou de transmitirem doenças (LIBÂNIO, 2010). Segundo Almeida (2014), essa etapa é realizada através da aplicação de agentes físicos ou químicos à água capazes de removerem cianotoxinas do meio, tais como cloro, peróxido de hidrogênio, ácido acético, bromo, iodo, permanganato de potássio, ozônio, raios ultravioleta (UV) e gama, e fervura.

Compostos de cloro, são aqueles oxidantes que mais têm sido utilizados para esse fim, devido ao seu custo acessível e à capacidade de deixar uma concentração residual na água, garantindo a sua distribuição segura (ALVARENGA, 2010).

A fluoretação envolve o aumento da concentração de íons fluoreto (F^-) na água tratada, de modo a atender a concentração de flúor na água, conforme estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021), em contribuição à prevenção de cáries dentárias na população.

Conforme destacado por Libânio (2010), qualquer composto capaz de se dissociar e liberar íons fluoreto na água pode ser empregado no processo de fluoretação, desde que apresente solubilidade e pureza adequadas, e que o cátion liberado juntamente com o ânion não introduza toxicidade ou outras características indesejáveis à água, tais como fluossilicato de sódio, fluoreto de sódio; e ácido fluossilícico.

Após a água passar por todo o tratamento, é necessário que seja realizada a correção do pH da mesma antes desta ser distribuída (ARAÚJO, 2021). Uma vez que as águas posteriores à coagulação assumem um caráter mais ácido, essa etapa visa elevar o pH da água, tornando-a mais alcalina, evitando a formação de gás carbônico livre, de modo a prevenir a corrosão dos encanamentos e equipamentos (BRASIL, 2014). Os produtos que podem ser utilizados nesse processo são: cal virgem e hidratada, carbonato de sódio e hidróxido de sódio (Braga, 2014).

1.2 Lodo de Estação de Tratamento de Água

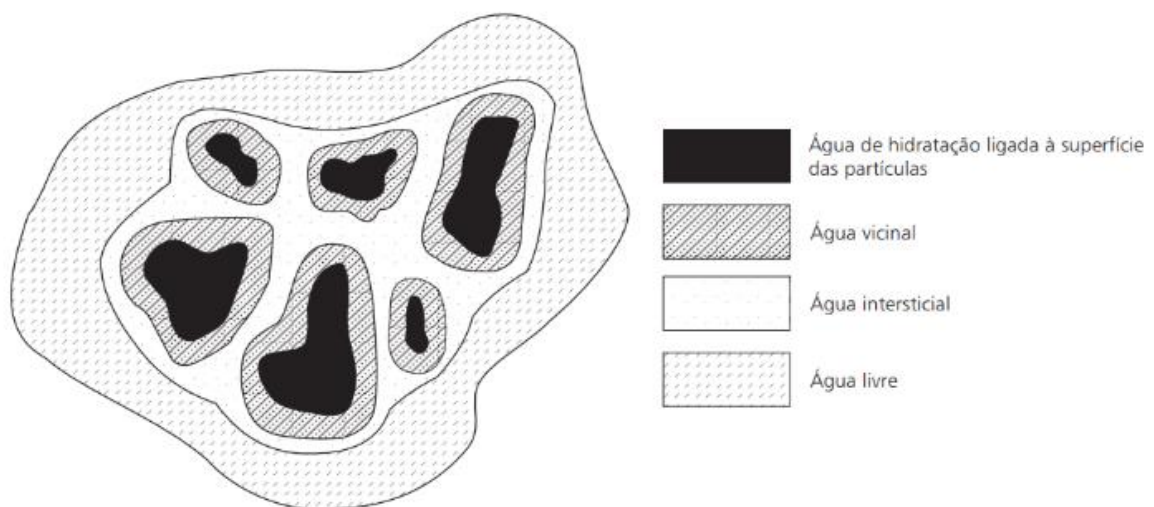
As águas brutas presentes nos mananciais são acompanhadas de partículas coloidais e em suspensão, como areia, argila, silte, pedaços de vegetais, microorganismos e substâncias húmicas, responsáveis por conferir cor e turbidez às águas naturais. O tratamento efetuado nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) permite, dentre outros aspectos, a separação dessas partículas da água, de modo que são obtidas ao final dois produtos, um em fase líquida e outro em fase sólida (FIGUEIREDO NETO, 2011).

A parte líquida, se refere a água tratada própria para distribuição à população. A parte sólida, denominada de lodo de ETA (LETA), é compreendida como o resíduo da ETA, cuja composição é dada, majoritariamente, por água, substâncias húmicas e minerais (KATAYAMA, 2012).

A água presente no LETA pode ser encontrada em quatro diferentes formas, as quais são classificadas como livre, intersticial ou capilar, vicinal e de hidratação, ilustradas à Figura

2. A água livre representa a parcela do líquido presente no LETA que se move livremente por gravidade, podendo ser removida por gravidade ou evaporação. A intersticial representa a parcela de água que está intimamente ligada às partículas floculadas pelo tratamento por coagulação/floculação, sendo esta a responsável por preencher os espaços entre as partículas, ligando-as umas nas outras, sendo a remoção desta do meio possível somente se o lodo for filtrado a pressões que superem a resistência contra a separação dos flocos. A vicinal encontra-se fortemente ligada às partículas sólidas por meio de pontes de hidrogênio, movendo-se juntamente com as partículas, sendo necessário para a remoção dessas do meio a introdução de algum tipo de energia. A água de hidratação é representada por moléculas de água ligadas quimicamente às partículas coloidais, sendo sua remoção possível somente com aplicação de altas temperaturas. As quantidades relativas das diferentes frações de água determinam as características de retenção de água dos resíduos e, conseqüentemente, o desempenho dos sistemas de remoção de água e de tratamento do lodo (CABRAL, 2013).

Figura 2 – Distribuição da água presente em um floco de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA).



Fonte: Biliatto e Cecchini Junior (2022).

De acordo com Souza e Scalize (2013), a capacidade de desidratação do lodo de ETA está diretamente relacionada à Resistência Específica do LETA, definida pela APHA (2005), como sendo a resistência oferecida por um peso unitário de lodo por unidade de área de filtro.

Segundo Maraschin (2018), quanto maior a Resistência Específica do LETA, mais difícil a desidratação deste. Lodos com resistência específica superior a 5×10^{12} mg/kg apresentam maior dificuldade de desidratação, já nos de valores inferiores a 1×10^{12} mg/kg, nota-se uma maior facilidade quanto a esse processo (TAVARES, 2016).

No que diz respeito à matéria orgânica presente no lodo, estudos como os realizados por Andreoli et al. (2006) e Lucon (2012), apontam que, apesar do resíduo conter matéria orgânica em sua composição, o mesmo se mostra predominantemente inorgânico, tendo sido obtido pelos autores mencionados percentuais de matéria orgânica no meio variando de 5 a 35% em relação à massa total do LETA.

Quanto à parte inorgânica do resíduo, Portella et al. (2003), Andreoli et al. (2006), Roque, Montalvan e Boscov (2021) e Silva et al. (2019) afirmam que se constitui, majoritariamente, por óxidos e hidróxidos como Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO , CaO , Na_2O e K_2O , originados em razão da presença de elementos como alumínio, silício, ferro, titânio, magnésio, cálcio, sódio e potássio presentes na água bruta em suas fases cristalina, como em caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2), muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e hematita (Fe_2O_3), e amorfas, e à reação desses com os sais de alumínio ou ferro adotados pelas ETAs como agentes coagulantes no tratamento.

A composição do lodo é altamente variável, sendo suas características diretamente relacionadas à qualidade da água bruta, a origem, a tecnologia, o tipo e dosagem de agentes coagulantes e a própria forma de remoção dos resíduos dos decantadores. A composição do lodo é típica para cada ETA, principalmente no que se refere à concentração de metais e quantidade de sólidos presentes que podem vir a ser mais elevadas nos sistemas que efetuam limpezas em grandes intervalos de tempo (CORDEIRO, 2001; FERRANTI, 2005; ASSIS, 2014; SANTOS, MICHELAN & JESUS, 2021).

Os LETAS tem-se apresentado como um problema em termos de gerenciamento adequado de resíduos sólidos. Devido à alta variabilidade das características do mesmo, dificulta-se o alinhamento de um tratamento que seja universal para os LETA, de modo que, diante do desconhecimento, diversas ETA's têm destinado o mesmo *in natura* sem qualquer tipo de tratamento prévio (ACHON, MEGDA, & SOARES, 2004; ASSIS, 2014; BATISTA et al., 2021).

1.3 Impactos do LETA ao meio ambiente e à saúde humana

De acordo com Batista et al. (2021) existem poucos estudos acerca dos efeitos tóxicos do lodo de ETA e os possíveis riscos que o descarte inadequado deste pode causar ao meio ambiente. Apesar disso, trabalhos como de Roque, Montalvan e Boscov (2021) e Guimarães (2005), afirmam que, devido à presença de sedimentos, metais e patógenos no resíduo, quando

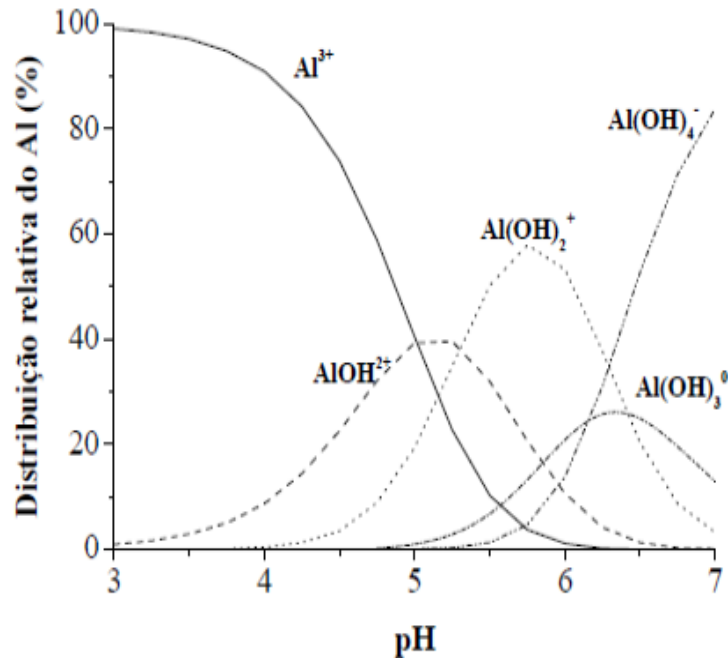
disposto *in natura*, pode ocasionar diversos prejuízos ao meio ambiente, sendo o percentual de toxicidade do LETA diretamente relacionado a essas características e às do meio após a contaminação.

Quando disposto em cursos d'água, os impactos do descarte de LETA *in natura* incluirão, minimamente, alterações de turbidez e cor do corpo receptor, as quais podem causar modificações nas características biológicas e químicas da água, tendo em vista o impacto destas à atividade fotossintética, gerando, em consequência, o aumento de atividades microbiológicas anaeróbicas na água, que, na presença de metais como ferro e alumínio, gera um ambiente totalmente prejudicial à camada bentônica, a peixes, e a toda a flora aquática (GUIMARÃES, 2005; COUTO, 2011).

Barbosa (2000) realizou, com lodos contendo hidróxidos de ferro e lodos contendo hidróxidos de alumínio, testes de toxicidade relação à mortalidade de microcrustáceos (*Dalphia similis*), quiromídeos (*Chironomus xanthus*) e peixes (*Hyphessobrycon equis*), também em relação a reprodução e mortalidade da *D. similis* e à comunidade bentônica. Foi verificado neste estudo que o LETA não causou toxicidade aguda nos organismos estudados, o que não ocorreu com relação à toxicidade crônica, onde verificou-se toxicidade no lodo de cloreto férrico em relação a reprodução e mortalidade da *D. similis* e à fauna bentônica.

Quando disposto diretamente no solo, o alumínio presente no LETA pode ser facilmente liberado e acumulado, comprometendo o desenvolvimento de plantas no local (Banet et al., 2020). Isso por que o Al em solução se hidrolisa, de tal modo que a espécie de alumínio trivalente, Al^{3+} , predomina em condições ácidas ($pH < 5,0$), enquanto as espécies $Al(OH)^{2+}$ e $Al(OH)_2^+$ são formadas quando o pH aumenta ($pH > 5,0$), conforme pode ser visto na Figura 3 (ECHART & MOLINA, 2001).

Figura 3 - Distribuição relativa das espécies de alumínio em solução do solo (BERTSCH & PARKER, 1995 apud WENDLING, 2012).



Em decorrência desta complexidade química, a fitotoxicidade dos diferentes tipos de alumínio não está totalmente esclarecida. Todavia, alguns estudos têm mostrado que, quando em forma trivalente, esse metal torna o meio altamente nocivo, pelo seu fator bioacumulativo, que se aglomera às raízes das plantas dificultando a absorção de água e nutrientes, resultando na inibição do desenvolvimento da mesma. Além disso, na forma metal solúvel, este pode percolar até as águas subterrâneas e contaminar bacias de águas superficiais que alimentam as ETAs, principalmente em solos tropicais e ácidos, podendo entrar em contato com a população humana (SANTORE et al., 2018; HE, LI & HE, 2019).

Em ambos os casos, disposto em curso d'água ou solo, a gestão inadequada do LETA também pode representar riscos à saúde humana, seja no contato com a água contaminada ou ingestão de alimentos cultivados em solos próximos àqueles da disposição, sobretudo quanto à presença de metais, como Alumínio (GASTALDINI et al., 2015).

Conforme apontado nos estudos de Tavares (2016), metais como o Alumínio não integram os processos metabólicos e não são excretados ou eliminados com facilidade, e retém durante anos cerca de 2% de alumínio, que entra no sangue devido ao seu potencial acumulativo, podendo gerar diversos problemas de saúde.

Segundo Rosa (2015), no cérebro a presença do $Al(OH)_3$ está associada às dificuldades cognitivas e mal de Alzheimer, no coração, a presença do metal está relacionada à hipertrofia cardíaca e nos ossos está associado às taxas reduzidas de formação óssea, aumentando o risco de fraturas.

Tais aspectos, somados ao contínuo crescimento do volume de resíduo formado em consequência ao aumento exponencial da população humana e seu desenvolvimento crescente, que exigem água em quantidade e qualidade, e conseqüentemente, o uso de tecnologias de tratamento de água mais avançadas e com maior eficiência de tratamento, geralmente associadas ao maior consumo de produtos químicos, têm tornado a gestão desse resíduo ainda mais requisitada ao redor do globo (KLEEMANN et al., 2020; MOTTA SOBRINHO et al., 2019).

1.4 A Gestão do LETA no mundo e no Brasil

Historicamente, existem, em todo o mundo, várias rotas de descarte populares para o lodo de Estação de Tratamento de Água, como descarga em corpos hídricos e lançamento em sistemas de tratamento de esgoto, tendo em vista seus baixos custos e ausência de necessidade de mão de obra técnica para realização (ZHAO et al., 2018). Contudo, com o crescimento da implantação de regulamentos e legislações voltados à gestão ambientalmente correta dos resíduos, essas rotas têm se tornado menos atrativas, devido aos impactos ambientais adversos que podem ocasionar (GHD, 2015; VERRELLI, 2008).

No Brasil, o LETA é abarcado pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), que o classifica como resíduos sólidos de classe II-A, não perigoso- inerte, e pela Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305/2010), onde consta como resíduo dos serviços públicos de saneamento básico, conforme consta na alínea “e” do inciso I do artigo 13, ficando clara a necessidade de se atenderem os critérios requeridos por estas normas quanto à gestão do lodo de ETA (BRASIL, 2010).

Adicionalmente, existem no país a Lei Federal nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997), que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e dá diretrizes quanto ao uso dos recursos hídricos, as Resoluções CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005) e nº 430/2011 (BRASIL, 2011), que dispõem, dentre outros, as condições e padrões de lançamento de efluentes, e a Lei Federal nº 9.605/1998 (BRASIL, 1998), Lei de Crimes Ambientais, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.

Ainda cada estado brasileiro possui sua legislação própria para gerenciamento de resíduos sólidos. O estado de Minas Gerais possui, em complementação à legislação nacional, a Política Estadual de Resíduos Sólidos, Lei nº 18.031/2009 (MINAS GERAIS, 2009), regulamentada pelo Decreto nº 45.181/2009 (MINAS GERAIS, 2009), na qual também consta explícita, por meio do inciso XXIII, do artigo 4º, a menção do LETA como sendo entendido como resíduo sólido, de modo que a gestão do mesmo fica passível aos critérios estabelecidos pela legislação em questão.

Nesse sentido, considerando o que tem sido exigido em legislação e a necessidade crescente das empresas em mostrarem bom desempenho ambiental para obtenção de financiamento nacional e internacional, além de uma imagem positiva frente aos consumidores e prevenção quanto a possíveis encargos, fez-se necessária a busca por um novo procedimento para o descarte seguro desses resíduos de forma a minimizar os impactos ambientais (WOLF, SCHWABE & CONCEIÇÃO, 2015).

Por esse motivo, a disposição do lodo em aterros fez-se uma alternativa, tendo ganhado atenção na Europa no período dos anos 1980 e se mantido em alguns locais até hoje, tendo em vista seu gerenciamento rápido, objetivo, conhecido e ambientalmente correto em relação à disposição *in natura* (HENGGEN, 2014). Entretanto, devido à redução do espaço disponível nos aterros, e o conseqüente aumento dos custos de disposição, cada vez mais as empresas têm sido impulsionadas a explorarem métodos alternativos de descarte (GHD, 2015; ZHAO et al., 2018).

Segundo Camargo (2014), alternativas para destinação dos lodos de ETA têm surgido em países da Europa, no Japão e na Austrália, como aplicações do lodo em áreas degradadas e agrícolas, e em processos industriais como produção de cimento, alumínio e peças cerâmicas, que tem, em sua maioria, se mostrado eficientes na redução de custos frente à disposição em aterros sanitários.

Ademais, tratando-se de casos no Brasil, onde é requerido, por meio do artigo 9º da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), a gestão de resíduos sólidos que priorize, nesta ordem, a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada do rejeito, as ETAs têm sido cada vez mais impulsionadas a buscarem por soluções alternativas de disposição de seu resíduo (URBAN, ISAAC e MORITA, 2019).

Grande parte do lodo gerado em ETAs ainda é disposta em rios ou em aterros sanitários. Contudo, principalmente em grandes centros urbanos, condições de licenciamento ambiental restritivas e custos logísticos crescentes tem levantado interesse em usos benéficos para o LETA (CAMARGO, 2014; ELIE, 2023).

1.5 Metodologias alternativas de tratamento e disposição de LETA

Com a crescente preocupação acerca da disposição adequada do LETA, vêm sendo realizados cada vez mais, estudos com vistas a identificar e desenvolver alternativas de minimização, tratamento e disposição final desses resíduos, que sejam viáveis economicamente ou consigam beneficiar os empreendimentos responsáveis por sua gestão (HOPPEN, et al., 2005, SANTOS, 2023). É possível observar diante desses trabalhos que ainda existem muitas lacunas a serem preenchidas de forma a eleger a melhor maneira de dispor esses resíduos, de modo a causar cada vez menos impactos ambientais e com melhor viabilidade socioeconômica (CORNWELL, 1999; BIDONE *et al.*, 2001; RICHTER 2001; DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

As pesquisas sobre reciclagem ou reutilização dos resíduos foram as que obtiveram maior avanço nos últimos anos nesse sentido, tendo em vista que possibilitam, através da metodologia, a redução de danos ao meio ambiente, agregação de valor aos resíduos na forma de um novo produto, desenvolvimento econômico sustentável e a neutralização e estabilização de possíveis materiais tóxicos contidos nos resíduos (MENEZES et al., 2002; SANTOS, 2023).

Segundo Souza (2010), a reciclagem de resíduos, independentemente do seu tipo, tem inúmeras vantagens em relação à utilização de recursos naturais *in natura*, como a redução do volume de extração de matérias-primas e do consumo de energia, menores emissões de poluentes e conseqüente melhoria da saúde e segurança da população e preservação dos recursos naturais, prolongando sua vida útil e reduzindo os impactos sobre a paisagem, fauna e flora.

Dentre os diversos estudos sobre o tema, as estratégias de reaproveitamento e reciclagem que têm se destacado em todo o mundo, tem sido a para recuperação de coagulantes, incorporação em produtos voltados à construção civil, como adsorvente para poluentes e aplicação como insumo na agricultura (OLIVEIRA, 2011).

1.5.1 Uso de lodo de ETA em processos de recuperação de coagulante

Devido à presença de hidróxidos metálicos no Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA), advindos da reação do uso do coagulante durante o processo de potabilização da água, diversos estudos têm avaliado a viabilidade de reutilização desses resíduos por meio do

processo de recuperação do coagulante do meio e seu reuso para tratamento de água ou efluentes (BELLO, 2022; MACHADO, 2022; VILELA, 2020).

O processo de recuperação do coagulante a partir do LETA, consiste na solubilização de espécies de alumínio e ferro, que possuem potencial de coagulação, por reações químicas com foco em equações de equilíbrio entre os hidróxidos metálicos presentes no lodo, de modo a proporcionar a precipitação de metais de interesse e posterior segregação do mesmo ao meio (DI BERNARDO, 2005; PEDRETTI, 2022).

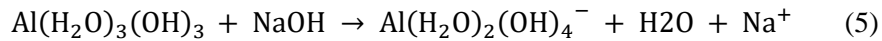
Até o momento, existem quatro opções tecnológicas disponíveis para realização da recuperação do coagulante do LETA, sendo elas via extração por solvente, via quelação, via alcalina e via ácida, sendo o que diferencia cada técnica, a forma pela qual os metais presentes no lodo são solubilizados (JULIO, SANTOS & OROSKI, 2009). De todo modo, a solubilização em cada método envolve equações de equilíbrio entre o precipitado e as espécies solúveis, sendo construído a partir disso diagramas de equilíbrio Al(OH)_3 /espécies solúveis, quando o coagulante utilizado no tratamento da água bruta pela ETA for a base de alumínio, e de Fe(OH)_3 /espécies solúveis, quando o coagulante utilizado no tratamento da água bruta pela ETA for a base de ferro (DANDOLINI, 2014).

A recuperação via extração por solvente consiste na extração seletiva do metal através de duas fases intituladas de “Extração” e “Stripping”. A fase de extração compreende a solubilização dos metais presentes no LETA através de diluição do resíduo com extrator orgânico, como ácidos alquil-fosfóricos. A etapa intitulada de stripping objetiva a retirada do metal solubilizado do meio através da adição de solventes no mesmo, como querosene, tolueno e hexano (BELLO, 2022).

Apesar da possibilidade de seletividade do metal a ser solubilizado, dificuldades operacionais relacionadas ao carreamento do solvente orgânico podem ser estimadas, como a necessidade de construção de unidades extras para evitar este problema, dificultando, do ponto de vista econômico, sua utilização em grande escala (DANDOLINI, 2014).

A recuperação via quelação se dá por meio da formação de quelatos dos metais objetos de recuperação a partir do LETA, que consiste em molécula formada pela ligação de um íon metálico a um carreador orgânico, utilizando membranas orgânicas compostas de esferas de polímeros quelantes, como politetrafluoretileno ao lodo previamente acidificado em pH em torno de 3,5, em uma solução contendo de 2% a 10% de ácido sulfúrico. Devido à seletividade deste tipo de polímero, o Al é prioritariamente adsorvido, em detrimento de outros cátions metálicos, todavia, existem poucos dados quanto à aplicabilidade em escala piloto desta via (JULIO, SANTOS & OROSKI, 2009; DANDOLINI, 2014; OLIVEIRA, 2008).

A recuperação por via alcalina consiste na solubilização em pH maior que 11, o qual pode ser alcançado por meio da adição de produtos alcalinos como hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio ao LETA, conforme exemplificado na equação 5, referente à reação entre hidróxido de alumínio presente no lodo e hidróxido de sódio (BELLO, 2022; GUIMARÃES, 2005).



Estudos que foram conduzidos com os dois tipos de álcalis supramencionados, NaOH e $\text{Ca}(\text{OH})_2$, revelaram que o uso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, apesar de reduzir de 10 a 15% o teor de metais pesados na solução, foi capaz de alcançar teores de coagulantes recuperados de apenas 25%. Em contrapartida, a utilização de NaOH para recuperação foi capaz de solubilizar coagulantes com teores entorno de 80%. De todo modo, apesar da elevada eficiência que pode ser alcançada com este método, testes realizados nos EUA mostraram que a matéria orgânica presente no lodo é mais solúvel em pH alcalino e que o coagulante recuperado não apresentou poder de coagulação satisfatório (BELLO, 2022; DANDOLINI, 2014; AWWA, 1987).

A recuperação por via ácida consiste basicamente na acidificação do LETA previamente desidratado à pH 2, de maneira a transformar os hidróxidos metálicos presentes em espécies químicas solúveis, conforme segue representado à equação 6, que ilustra a reação entre o hidróxido de alumínio presente no lodo e o ácido sulfúrico (AWWA, 1987).



Utilizando-se este processo, em 1975 foram instalados no Japão estações de tratamento de água com sistemas de recuperação e reciclo de coagulantes. Aparentemente, devido às impurezas metálicas contidas no ácido e ao baixo pH, o reciclo de coagulantes aumentou a concentração de metais pesados na água tratada, particularmente estanho, zinco e manganês (DANDOLINI, 2014).

Todavia, conforme Piotto et al. (1999) e Guimarães (2005) esta alternativa de regeneração foi a que alcançou o maior desenvolvimento industrial, tendo sido descoberta no final do século passado, aprimorada em 1974 através da metodologia de Fulton, e estudada até os dias atuais, inclusive com realizações em grande escala em países do hemisfério norte. Devido a isto e por ser considerado como uma técnica de baixo custo, como apontado por

Ahmad, Ahamad e Alam (2021), esta via foi escolhida para recuperação de coagulante no presente estudo.

Independentemente do método escolhido, a aplicação dessa técnica apresenta significativos benefícios à gestão do LETA, como a drástica redução do volume de lodo, melhora das características de desidratação e a possibilidade de reutilização dos compostos coagulantes, minimizando os custos e problemas associados à disposição final (VILELA, 2020; GUIMARÃES, 2005, TSUTIYA e HIRATA, 2001).

Ahmad, Ahmad e Alam (2021), que analisaram a qualidade da água superficial tratada com coagulante recuperado por via ácida, alcançaram porcentagens de 96,2%, 68%, 47% e 95% de remoção de turbidez, DBO5, DQO e de ferro, respectivamente, mostrando que o recuperado é eficaz na remoção de impurezas presentes na água bruta.

De acordo com o trabalho de Keeley et al. (2016), a aplicação dessa metodologia apresentou-se viável técnica e economicamente às ETAs, uma vez que seus custos com disposição em aterro sanitário e transporte diminuíram significativamente após a redução do volume do resíduo.

Apesar da melhoria das condições de desidratação do resíduo acidificado, em alguns casos o custo do coagulante recuperado pode ficar maior do que o do coagulante comercial, não compensando o processo de recuperação por via ácida (GUIMARÃES, 2005).

Segundo Nair e Ahammed (2018), embora a recuperação do coagulante seja um processo simples, sua eficiência é governada por uma série de fatores, como características do lodo, características da água bruta, tipo e dose de coagulante utilizado, que por sua vez depende das características da água bruta e da concentração do tipo de coagulante.

Estudos como de Nair e Ahammed (2014) e Chen et al. (2012), que compararam os coagulantes recuperados a partir de lodos de ETAs que utilizaram sulfato de alumínio e PACl, concluíram que a recuperação de Al do lodo formado a partir de PACl foi maior quando comparada à do LETA gerado por sulfato de alumínio. No entanto, o lodo para estes estudos foi obtido de ETAs que tratavam água de diferentes fontes e utilizavam diferentes dosagens de coagulante.

Além disso, conforme apontado por Freitas et al. (2005), uma vez que o método em questão possibilita a solubilização de metais contidos no LETA, a depender das características do resíduo, esta aplicação pode vir a ocasionar problemas relacionados à qualidade do coagulante regenerado, dado pela presença de poluentes solubilizados no meio, como metais pesados, que inviabilizam a utilização do coagulante formado, em sistemas de abastecimento

de água, sendo, portanto, mais adequado para aplicação em sistemas de tratamento de esgotos sanitários.

1.5.2 Uso no setor de construção civil

De acordo com Gheller (2021), devido às características do LETA, sobretudo quanto à presença de metais tóxicos, a utilização de metodologias de reaproveitamento torna-se um desafio devido à possibilidade de reação ou lixiviação das substâncias potencialmente tóxicas.

Por essa razão, as técnicas de estabilização e solidificação do LETA, tem recebido cada vez mais destaque, uma vez que podem vir a minimizar os problemas citados, com baixo custo e grande eficácia.

A estabilização e a solidificação (E/S) permitem o melhoramento do manuseio e das características físicas do resíduo ou ainda limitam a solubilidade de constituintes perigosos dos resíduos, por meio da redução da área superficial exposta à lixiviação e/ou do isolamento dos resíduos dentro de uma cápsula impermeável (Gheller, 2021). A técnica de E/S é recomendada para o tratamento de resíduos específicos, que possuem limitações para disposição final adequada, pois outros tratamentos apresentam limitações técnicas e/ou econômicas, como por exemplo, uso na fabricação de materiais para construção, como tijolos, concretos e argamassas contendo resíduo incorporado (JOVELINO et al., 2020; EPA, 1989, FERREIRA, 2021).

1.5.2.1 Cerâmica

Segundo Ferrari (2007) e Cabral Júnior et al. (2019), a indústria cerâmica compreende, dentre outros, os produtos formados a partir da transformação da argila bruta em um produto, como tijolos maciços, blocos cerâmicos de vedação e estruturais, telhas, manilhas, tabelas e lajotas para piso.

A incorporação de LETA em cerâmica tem sido bastante investigada no meio científico, devido à similaridade das características do lodo com a da argila utilizada (TSUTIYA & HIRATA, 2001; SMIRDELE, 2016). De acordo com Tartari (2008), Oliveira et al. (2004), Andreoli, Carneiro & Pegorini (2003), Wolff et al. (2007), Hoppen et al (2005), Monteiro et al. (2007) e Paixão (2005), a maioria dos resíduos de ETA apresentam em cerca de 80% da sua composição SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , sob as fases de caulinita, quartzo, mica, hematita, gibsitita,

goethita, moscovita e rútilio, componentes que se assemelham às argilas utilizadas na fabricação de cerâmicas vermelhas.

Já existem locais que utilizam o LETA no processo produtivo de materiais cerâmicos, como, por exemplo, a cidade de Durham, Inglaterra, em que cerca de 15% do lodo gerado em ETA são reciclados na fabricação de tijolos, sem haver perda da qualidade estrutural do produto, e no Estado do Rio de Janeiro, com o lodo gerado na ETA Porto das Caixas, em Itaboraí, encaminhado para uma indústria cerâmica em Tanguá, tendo em vista que auxilia no atendimento às exigências ambientais, contribui para a diminuição da extração de materiais neste setor industrial, e também se torna uma alternativa mais adequada de destinação do lodo (SMIRDELE, 2016).

Conforme Benlalla et al. (2015) e Santana (2019), a inclusão do Lodo de Estações de Tratamento de Água (LETA) na produção de materiais cerâmicos não apenas contribui para a redução de custos das empresas, diminuindo a necessidade de matéria-prima, mas também desempenha um papel na solução de problemas ambientais, uma vez que esse processo permite a diminuição da extração de argila em jazidas naturais, podendo resultar em uma redução dos impactos socioambientais associados a essa atividade, tais como, alterações paisagísticas, poluição do ar, ruídos, impactos visuais e sobre os recursos hídricos.

Estudos como de Rodrigues (2023), afirmam que, em geral, os LETA gerados em ETAs que utilizam sulfato alumínio como coagulante sempre irão afetar as propriedades da massa cerâmica. Por este motivo, a incorporação deve ser feita em percentuais de 8% a 12,5%, para que o impacto da adição do resíduo seja mínimo na qualidade do produto, tendo em vista que os produtos cerâmicos possuem parâmetros de qualidade a serem alcançados para que possam ser comercializados (PAIXÃO, 2005; TEIXEIRA, 2006; TARTARI, 2008; CASTÃO *et al.*, 2017).

Outro aspecto relevante, trata-se das questões de biossegurança e toxicidade do material cerâmico contendo lodo de ETA. Takada et al. (2013), em seu estudo sobre a incorporação de lodo de ETA na fabricação de artefatos cerâmicos, alertaram quanto a possibilidade de lixiviação dos contaminantes contido no material, podendo inviabilizar a metodologia para confecção de peças cerâmicas que fiquem em contato com alimentos ou bebidas, sendo, portanto, mais adequado para confecção peças decorativas.

1.5.2.2 Argamassa

De acordo com a norma NBR 1328 (ABNT, 2005), pode-se definir argamassa como uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser classificada como argamassas para assentamento, para revestimento de paredes e tetos, de uso geral, para reboco, decorativa em camada fina ou decorativa em monocamada.

Tendo em vista as características do cimento que compõe a argamassa, sobretudo pela baixa concentração de sílica, ferro e alumínio em sua composição, diversos estudos têm indicado a adição de lodo de ETA para a produção de argamassa (REIS, 2007). Mehta & Monteiro (2008) e Oliveira et al. (2023) sugerem, ainda, que essa incorporação pode vir a colaborar com as propriedades reológicas do estado fresco e mecânicas no estado endurecido, podendo ocasionar a redução de custos e de impactos ao meio ambiente.

Todavia, conforme Sales e Souza, (2006), Liesenfeld, Balz e Dahmer (2019) e Laurindo et. al. (2020), as concentrações mais adequadas de lodo a serem incorporadas em argamassa variam de 2 a 10% (m/m), sendo concentrações acima dessa faixa, tecnicamente inviáveis, considerando os padrões de qualidade que devem ser alcançados para que o produto possa ser comercializado.

1.5.2.3 Concreto

Segundo Neville & Brooks (2013), concreto é qualquer produto ou massa que é produzido a partir do uso de um meio cimentante, sendo este geralmente a reação entre cimento hidráulico e água. O concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e conter pozolanas (sílica ativa, cinzas volantes, escória de alto forno, etc.), adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras.

Devido a suas propriedades de versatilidade, durabilidade e desempenho, resultando em uma vida útil adequada às construções a um custo competitivo, o concreto é o material estrutural mais utilizado na indústria da construção civil (ISAIA, 2011). Em razão deste alto consumo, a quantidade de matérias primas provenientes de recursos naturais é significativa, assim como a energia utilizada para sua fabricação, o que conseqüentemente, gera ainda mais impactos ambientais (ZHANG, 2014).

Nesse sentido, tendo em vista a composição do LETA como sendo majoritariamente formada por compostos de semelhança aos que compõem a matéria prima dos concretos, alguns

estudos, como de Cremades et al. (2018) e Tafarel et al. (2016), admitem a incorporação do lodo na fabricação do concreto como favorável à construção civil e o ambiente, devido à diminuição da quantidade de resíduo lançada no ambiente e da extração de matéria-prima, reduzindo impactos ambientais.

Estudos realizados por Gomes et al. (2019) indicam que a incorporação de LETA no concreto deve ser realizada com concentração do resíduo de até 10% (m/m), uma vez que quantidades superiores a esta podem conferir limitações significativas para sua aplicação prática, devido à baixa trabalhabilidade do material, bem como à redução da resistência mecânica que ele confere aos produtos finais.

1.5.3 Uso de LETA como adsorvente para poluentes

A adsorção é um importante fenômeno de transferência de massa que ocorre quando os componentes de uma fase fluida, chamado de adsorvato, são transferidos para a superfície de um sólido adsorvente, proporcionando a separação dos componentes dos fluidos (NASCIMENTO et al., 2014; MINHO, 2023).

De acordo com Nascimento et al. (2014), a adsorção pode ser classificada em dois diferentes tipos, adsorção física e adsorção química. A física, também denominada de fisissorção, envolve a ligação do adsorvato à superfície do adsorvente através de interações relativamente fracas atribuídas às forças de Van der Waals, podendo acontecer em multicamadas, permitindo haver ligações adsorvato-adsorvato. A química, também chamada quimissorção, envolve a troca ou partilha de elétrons entre as moléculas do adsorvato e a superfície do adsorvente (NASCIMENTO et al., 2014; MINHO, 2023).

Em ambos os casos, algumas variáveis afetam a eficácia do processo de adsorção, como área superficial, propriedades do adsorvente e adsorvato, pH e temperatura e pressão (STOMINSKY, BORTOLOTTO & ANDREAZZA, 2022).

O material adsorvente mais estudado é o carvão ativado (AHMED, 2016; KYZAS et al., 2015). O carvão ativado possui composição carbonácea e têm como propriedade a alta área superficial, em razão de sua superfície porosa e a presença de vários grupos funcionais (GUILARDUCI et al., 2006; MANGUEIRA, 2014). Pode ter origem mineral - oriundo de antracita, betume ou linhito - ou vegetal, tendo como materiais precursores cascas de coco, turfas, madeiras e diversos resíduos. Esses, normalmente, são submetidos à queima controlada de forma a se construir a estrutura porosa do material (FANGMEIER & HOEHNE, 2012). No

entanto, há outros materiais não carbonáceos que também são utilizados como adsorventes, como a zeólita e adsorventes magnéticos como a magnetita (MARTINS, 2021).

Dentre os possíveis precursores de materiais adsorventes, o LETA se mostra interessante, pois se trata de um resíduo gerado de forma intermitente em abundância e medidas de gerenciamento quanto à destinação e disposição final são desafios emergentes, sendo os poluentes passíveis de remoção a partir do LETA, chumbo, cobre, flúor, íons contaminantes, compostos orgânicos voláteis, corantes de efluentes têxteis e o fósforo (ARAÚJO, 2019).

De acordo com Ribeiro (2017) e Dias et al. (2021), grande parte da potencialidade do uso do LETA como adsorvente se deve à sua composição química, sobretudo à presença de compostos de ferro e alumínio, que possuem alta afinidade com componentes metálicos dos poluentes, sobretudo com fósforo e metais pesados, por meio de troca iônica e mecanismos de complexação.

Todavia, considerando que diversos estudos de caracterização de lodo de ETA vêm mostrando a presença de metais pesados no meio, além dos teores de Al e Fe, essa metodologia se apresenta limitada, uma vez que, após executada a adsorção do poluente, a destinação final do sólido resultante vira uma questão, devido a elevada concentração de sais e metais pesados (ALBUQUERQUE, 2013, BABATUNDE & ZHAO, 2007, RITTER, 2020).

1.5.4 Uso de lodo de ETA no solo

Conforme Shah et al. (2020), a aplicação de LETA em solo para fins agrícolas é uma das melhores alternativas de disposição deste resíduo, tendo em vista que o lodo, além de fornecer diversos nutrientes essenciais às plantas, pode vir a melhorar as propriedades físicas do solo, como porosidade, maior retenção de umidade e maior coesividade, devido à capacidade do mesmo em agregar as partículas do solo.

Alguns locais, como nos Estados Unidos, Inglaterra, e Austrália, já existem aplicação de lodos de ETA que utilizam sais de ferro e alumínio em solos para agricultura, em áreas florestais e para recuperação de áreas degradadas, que constatam que a viabilidade desta aplicação seja possível, a depender das características físicas e químicas dos lodos, sobretudo, quanto aos nutrientes e contaminantes constituídos no mesmo (DAYTON et al, 2001; TOLEDO, VENTURIN & DIAS, 2012).

De acordo com Silva, Melo e Teixeira (2005), que estudou o uso de LETA para recuperação de áreas degradadas por mineradora de cassiterita, verificou-se que essa metodologia apresentou efeitos positivos significativos na recuperação do local, haja visto que

forneceu às plantas utilizadas na área nutrientes como Fe, Ca, Mg, Cu e Mn, além de ter proporcionado aumento do pH do solo, que evita a percolação de metais pesados no solo, bem como foi notado por Teixeira et al. (2005) em seu estudo sobre aplicação de lodo de ETA em solo degradado.

No entanto, certas características do lodo, como presença de elementos potencialmente tóxicos, tais como, óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, devem ser cuidadosamente avaliadas previamente à recomendação de seu uso a fim de se minimizarem os riscos de contaminação ambiental, conforme descrito por Ranković et al. (2020) e Botero et al. (2009).

Conforme Sousa, Miranda e Oliveira (2007) a aplicação inadequada do resíduo de ETA em solo, pode causar prejuízos à vegetação do local, ao afetar o desenvolvimento das raízes de diferentes espécies, reduzindo sua superfície de contato com o solo e, conseqüentemente, a possibilidade de absorção de nutrientes e água, gerando alterações anatômicas e morfológicas nos indivíduos que deixam de cumprir com sua função no meio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Visando analisar a viabilidade da utilização do processo de recuperação de coagulante por via ácida como método para melhoria valorização do Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA), foi realizada, além da recuperação de sulfato de alumínio do LETA da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Universidade Federal de Viçosa, a caracterização do resíduo antes e após o processo de recuperação do coagulante (pH, matéria orgânica, umidade, óxidos e ecotoxicidade), e teste de eficiência do coagulante recuperado, por meio da aplicação de análise por *jar test* e caracterização antes e após este ensaio, utilizando-se água bruta proveniente de um córrego do município de Mesquita, e de coagulante regenerado.

3.1 Lodo de ETA

Para realização deste trabalho foi utilizado o lodo doado da limpeza dos tanques de decantação da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Universidade Federal de Viçosa, (Minas Gerais, Brasil), coletados após deságue em sistema piloto de leito de secagem por meio de dois sacos de rafia de 10 kg em 25/08/2022.

Na Figura 4 pode ser visualizada a aparência do LETA bruto após coleta.

Figura 4 - Aspectos visuais do Lodo de Estação de Tratamento de Água da ETA da Universidade Federal de Viçosa, MG, Brasil. Lodo proveniente do sistema piloto de leito de drenagem e armazenado em saco de rafia.



De acordo com o descrito no site do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV (2023) e da própria UFV (2023), a ETA trata cerca de 50 L/s de água bruta diariamente pelo método convencional, que abrange as etapas de coagulação, realizada através do uso de sulfato de alumínio, mistura rápida hidráulica, por meio de calha Parshall, floculação, mediante ação de um floculador hidráulico, decantação, por meio de decantador convencional circular, filtração, possibilitada através de dois filtros rápidos por gravidade, e desinfecção, mediante adição de cloro gás. Uma vez a cada 3 meses é realizada a limpeza do decantador, por meio de retrolavagem, que, através de pressão hidráulica, carregam os sedimentos retidos durante o processo de tratamento da água à rede de água pluvial, com destino à Lagoa da Reitoria, à jusante do ponto de captação.

A água bruta tratada pela ETA em questão é captada no manancial superficial oriundo do represamento do Ribeirão São Bartolomeu, denominado Lagoa da Funarbe, cuja bacia de captação é composta majoritariamente por ocupação urbana crescente e atividades agropecuárias relativamente intensas, sendo a área em que é efetivamente efetuada a coleta do recurso para tratamento e distribuição, caracterizada pela baixa presença de mata ciliar (Muniz, 2019).

3.2 Caracterização do LETA

Na caracterização físico-química do LETA foram determinados os seguintes parâmetros: pH, teor de matéria orgânica, teor de umidade e composição química. Foram também realizados ensaios de ecotoxicidade aguda com uso da bactéria *Vibrio fischeri*.

3.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

Com o lodo previamente homogeneizado, foram preparadas 6 amostras em bécheres de vidro de 50 ml, marcados com as letras A, B, C, D, E e F, a partir da mistura entre 10 g de lodo com 25 ml de água destilada, conforme proporção recomendada pela Fotana et al. (2017), homogeneizados com auxílio de um bastão de vidro, submetidas em leitura por pHmetro (marca Quimis e modelo Q400AS) devidamente calibrado, conforme metodologia 4500-H+B (APHA; AWWA; WEF, 2012).

3.2.2 Teor de umidade e teor de matéria orgânica

Para determinação do teor de umidade e matéria orgânica foi utilizado o método gravimétrico descrito na NBR 10664 (ABNT, 1989) em conjunto com o método utilizado por Freitas et al. (2005). O método consiste na diferença entre a massa da amostra de lodo bruto e a massa obtida da amostra após a secagem em estufa por 24 horas ($110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$), entendida como massa de lodo desidratado, e entre a massa da amostra de lodo desidratado e a massa obtida da amostra após queima em forno mufla a $750 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 hora, definida como massa de lodo seco inorgânico.

Para tanto, inicialmente fora disposto cerca de 150 g de LETA bruto em sete cadinhos de cerâmica, com apoio de uma Balança semi analítica modelo BK5000 (marca GEHAKA).

Em seguida, todas as amostras de LETA bruto foram dispostas em estufa da marca Olidef CZ para esterilização e secagem por 24 horas a $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Passado o tempo determinado, as amostras foram pesadas novamente, possibilitando a execução da Equação (7), para determinação da porcentagem de umidade removida do LETA.

$$\%Teor\ de\ umidade = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) * 100 \quad (7)$$

Onde:

P1= Massa de lodo bruto

P2 = Massa de lodo desidratado

As amostras secas em estufa, após pesadas foram destinadas à calcinação em Mufla microprocessado, modelo Q318M, marca Quimis, a $750 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 hora. Posteriormente, as amostras foram submetidas a pesagem novamente, de modo a possibilitar a utilização da equação (8), responsável por definir a porcentagem de Matéria Orgânica presente no LETA estudado.

$$\%Teor\ de\ matéria\ orgânica = \left(\frac{P_2 - P_3}{P_1} \right) * 100 \quad (8)$$

Onde:

P1= Massa de lodo bruto

P2 = Massa de lodo desidratado

P3 = Massa de lodo seco inorgânico

3.2.3 Composição química

A composição química do Lodo de Estação de e Tratamento de Água (LETA) foi analisada por meio das técnicas espectroscópicas de fluorescência de raios X (XRF, do inglês, *X-ray fluorescence*) e difração de raios X (XRD) (do inglês *X-ray diffraction*).

A espectroscopia de fluorescência de raios X permite a identificação e concentração de compostos químicos presentes em uma amostra através do uso de raios-X para excitar os níveis eletrônicos de átomos de uma amostra desconhecida (UFJ, 2023). Para tal foi utilizado o equipamento comercial Epsilon 1 (Malvern Panalytical), composto por um tubo de raios X com alvo de Prata (Ag) e um detector SDD (do inglês, *Silicon Drift Detector*, resolução de energia < 135 eV para Mn-K α).

Foram confeccionadas pastilhas com as amostras de lodo, com diâmetro de 2,54 cm, e densidade superficial de aproximadamente 200 mg/cm², elaboradas a partir da compactação de uma alíquota de 1 g de massa peneirada de resíduo a uma pressão de 2 TON por, aproximadamente, 15 minutos.

Em seguida as amostras de lodo foram analisadas utilizando duas configurações experimentais. A primeira configuração experimental (baixo Z) privilegia a excitação dos elementos de número atômico $Z \leq 20$ para as linhas K. Nesta configuração experimental foi utilizado uma tensão de 10 kV, corrente de 150 μ A com um tempo de aquisição de 300 s. A segunda configuração experimental (alto Z) privilegia a excitação dos elementos de número atômico $20 < Z < 42$ para as linhas K e $55 < Z < 92$ para as linhas L, sendo que nesta configuração experimental foi utilizada uma tensão de 50 kV, uma corrente de 100 μ A, filtro de Cu (500 μ m) com um tempo de aquisição de 600 s. As concentrações elementares foram calculadas no próprio *software* do equipamento utilizando os parâmetros fundamentais da fluorescência de raios X.

A difração de raios X é uma técnica aplicada para determinar a estrutura atômica e molecular, na qual os átomos cristalinos fazem com que um feixe de raios X incidentes difrate em muitas direções específicas (LIMA SEIBEL e KATO, 2022). Neste estudo, a XRD foi realizada utilizando-se o equipamento comercial de bancada D2 Phaser da BRUKER ambos localizados no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas (LIETA) da UERJ, com amostras do LETA antes e após o tratamento, em triplicatas.

Nas análises por XRD, as amostras foram analisadas em pó, a partir da secagem do LETA a 60°C até massa constante, e moagem mecânica do mesmo, até a obtenção de granulometria de aproximadamente 325 mesh (44 µm), posteriormente acomodada em um porta-amostras de acrílico e levada ao difratômetro *D2 Phaser* para análise por XRD.

Foi realizada uma varredura, para cada amostra, nas seguintes condições operacionais usada na medida de difração:

- a) Tensão: 30 kV;
- b) Corrente: 10 mA;
- c) Slit: 0,6 mm;
- d) Filtro K β : Ni;
- e) Rotação: 15 rpm;
- f) Tempo de medida: 0,5 s;
- g) Ângulos inicial e final: 5° e 90°;
- h) Incremento angular: 0,02°.

3.2.4 Ensaios de ecotoxicidade aguda

Para avaliação do efeito ambiental provocado pelo lançamento de LETA em cursos hídricos, foi realizado teste de ecotoxicidade aguda com a bactéria bioluminescente *Vibrio fischeri*, por sua sensibilidade, rapidez, simplicidade, reprodutibilidade e confiabilidade, o qual foi realizado através da linhagem NRRL B-11177, seguindo a Norma Técnica NBR 15411-3 (ABNT, 2021) e o protocolo do manual do equipamento Microtox® da SDI (modelo 500 Analyser).

A análise em questão baseia-se na determinação da taxa de inibição metabólica de bactérias marinhas ocasionada por uma amostra, durante um período determinado, apurada por meio da comparação da bioluminescência bacteriana gerada diante da exposição destas ao controle (diluente do ensaio) e a amostra com contaminante, sendo a toxicidade relativa da amostra expressa como a porcentagem de inibição comparada ao controle (STOLTE et al., 2012).

Para realização do teste foi utilizado 1 mL de cultura liofilizada da bactéria *Vibrio fischeri* comercializada pela Umwelt, a qual foi devidamente reconstituída. Posteriormente, 100

μL da bactéria hidratada foram diluídos através da solução salina diluente (água destilada com Cloreto de Sódio (NaCl) a 2% (m/v), tendo sido distribuída em 16 cubetas, que receberam os elutriatos para execução do estudo, com concentração máxima inicial do ensaio definitivo de 90%.

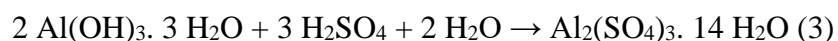
O preparo dos elutriatos foi realizado com duas amostras de LETA (lodo bruto e lodo após realização da recuperação de coagulante) observado o que segue na NBR 15469 (ABNT, 2021). Cada uma das amostras foi submetida à solução salina diluente, nas proporções de 1:4 e 1:10 (% v/v), para identificação da faixa ideal de trabalho, tendo sido na sequência levadas à agitação por 1 hora em mesa agitadora (modelo 109 Nova Ética) e posteriormente à centrifugação (modelo NT810 Nova técnica), onde há a separação dos sobrenadantes das amostras dos LETAS solubilizados, entendidos como os elutriatos objeto da análise em questão.

A partir disso, os elutriatos obtidos de cada uma das amostras de lodo, em ambas as proporções, foram transferidos para as cubetas onde estavam as bactérias, as quais foram levadas ao equipamento Microtox® da SDI, onde foi a medida a bioluminescência nos tempos de exposição de 0, 5, 15 e 30 minutos. O cálculo do percentual de efeito foi feito pelo software Microtox Omni 4.1, onde proporcionalmente são comparados os valores da emissão de luz nos tempos e calculado o decréscimo dela em relação ao controle.

Vale ressaltar que a realização do estudo utilizando duas proporções, 1:4 e 1:10, foi efetuada a fim de economizar tempo e recursos, uma vez que os efeitos das amostras de LETA em *V. fischeri* eram desconhecidos. Todavia, considerando que os efeitos ocasionados em ambas as proporções apontaram os mesmos resultados, para fins de condensação das informações, é apresentado neste estudo apenas o percentual de efeito da primeira proporção supracitada, i.e., 1:4. Do mesmo modo, apesar de terem sido observados os efeitos das amostras em três tempos diferentes, 5, 15 e 30 minutos, é apresentado apenas do último.

3.3 Recuperação de sulfato de alumínio contido no LETA por via ácida

O processo de regeneração de coagulante foi realizado conforme as metodologias de Fulton (1974) adaptadas por Freitas et al. (2005) e Keeley et al. (2014), que se basearam na reação descrita pela equação (3):



Após a etapa de preparação do lodo, que consistiu na homogeneização, secagem e peneiramento, as amostras foram separadas em 6 bécheres de 400 mL contendo 20 g de lodo e 20,62 mL de ácido sulfúrico a 10% (v/v), que foram devidamente homogeneizados através de agitação por agitador vórtex por 2 minutos, seguido de um repouso de 10 minutos (Keeley et al., 2014).

Passado o tempo de repouso, a mistura fora submetida à filtração à vácuo, utilizando-se papel de filtro de 0,19 mm da Unifil na forma original de círculo dentro do funil de Buchner acoplado a um kitassato de 500 mL, o qual foi acoplado a uma mangueira ligada à bomba de vácuo com compressor Prismatec 131, responsável pela passagem do filtrado.

O coagulante resultante do procedimento foi armazenado para realização de tratabilidade, e os sólidos remanescentes, entendidos aqui como LETA tratado, foram lavados com pelo menos 3 litros de água destilada, submetidos à filtração à vácuo, secos em estufa à 110 °C por 24 horas e posteriormente submetidos à nova caracterização de composição química (XRF e XRD).

3.4 Estudo de tratabilidade com coagulante recuperado

A análise da eficácia do coagulante recuperado foi realizada por meio de análise dos elementos químicos presentes no recuperado e inferência do potencial de uso do recuperado como agente coagulante para tratamento de água, por meio da comparação dos resultados obtidos com a utilização deste quanto à alteração das características físico-químicas da água bruta após realização de ensaio *jar test*, conforme metodologia descrita pela Funasa (2013). Para tanto, foram realizadas análises de pH, cor, turbidez e COD antes e após ensaio *jar test* com o coagulante recuperado e também com sulfato de alumínio de uso comercial, para fins de comparação.

3.4.1 Análise elementar do coagulante recuperado

Para análise dos elementos presente no coagulante recuperado, foi utilizada a técnica de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF), que consiste, basicamente, na detecção de elementos a níveis de traço em amostras líquidas, através da emissão de radiação incidente a ângulos muito rasos sobre uma superfície refletora de forma a se obter reflexão total (BELMONTE, 2005).

Para tanto, uma alíquota de 3,0 mL foi retirada da amostra de sulfato de alumínio recuperado e a ela foi adicionado um padrão interno (Gálio – Ga) com uma concentração de 10 mg.L⁻¹. Esta solução foi homogeneizada e, posteriormente, uma alíquota de 10 µL desta foi pipetada para um refletor de lucite, por meio do qual foi submetida à secagem em estufa, em um ambiente isolado de contaminação externa.

Após a secagem, a amostra fora submetida à análise de TXRF por equipamento comercial (Bruker) S2 Picofox com uma tensão de 50 kV, corrente de 700 µA com um tempo de aquisição de 1000 s. Todas as amostras foram realizadas no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas (LIETA) da UERJ, em triplicatas.

3.4.2 Água bruta

Para viabilização do presente trabalho, em 17/01/2023, foi realizada coleta de água bruta proveniente de um córrego do município de Mesquita, localizado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (667035.15 m E; 7481180.27 m S), para realização de estudos de eficiência do coagulante recuperado.

A água foi coletada e armazenada em uma bombona de plástico de 20 L, onde permaneceu armazenada à temperatura ambiente até sua utilização.

3.4.3 Ensaio de *Jar test*

Primeiramente, foi realizado um teste da quantidade mínima de coagulante (comercial e recuperado) a ser adicionada à água bruta para que seja iniciado o processo de formação de coágulos no meio. O método consistiu na utilização de um bécher de vidro de 250 mL, preenchido com 100 mL de água bruta, no qual foi adicionado aos poucos o coagulante por meio de uma bureta graduada com suporte, com auxílio de agitador macro magnético da Quimis, modelo Q261-22. O pH considerado para o presente estudo fora aquele presente na água bruta.

Obtida a quantidade mínima de coagulante a ser aplicada em 100 mL de água bruta para que seja iniciado o processo de coagulação, foram distribuídas cerca de 1000 mL de água bruta para 12 bécheres de vidro de 2000 mL dispostos no equipamento de *jar test* Phipps & Bird, modelo 7790-400. Para cada bécher, foi separado, através de provetas de tamanho variados, as quantidades equivalentes de coagulante a serem testados (em mL), tendo em vista as porcentagens de 25%, 50%, 75%, 100%, 150% e 200% sobre o valor encontrado no teste

anterior, entendidos aqui como intervalo de dosagens ótimo, as quais seguem descritas na Tabela 1 (adaptado de EPA, 2002).

Tal metodologia se fez necessária, tendo em vista que e, no momento da realização do ensaio, ainda não se era conhecida a concentração do coagulante recuperado, sendo as dosagens de cada coagulante nos jarros calculadas, posteriormente à estimativa da concentração de sulfato de alumínio no meio e as quantidades, em mL, utilizadas em cada jarro.

Tabela 1 - Dosagens dos coagulantes comercial e recuperado do LETA utilizados para realização dos ensaios de *jar test*. LETA = lodo de estação de tratamento de água.

	Porcentagem relacionada ao valor mínimo para início da coagulação (%)	Concentração da solução estoque do coagulante (g.L ⁻¹)	Volume de água bruta (mL)	Volume utilizado de coagulante (mL)	Dosagem de coagulante (mg.L ⁻¹)
COGULANTE COMERCIAL	25	20	1000	6,75	134,10
	50	20	1000	13,50	266,40
	75	20	1000	20,25	396,96
	100	20	1000	27,00	525,80
	150	20	1000	40,50	778,50
	200	20	1000	54,00	1246,68
COAGULANTE RECUPERADO	25	0,53 ¹	1000	0,75	0,37
	50	0,53 ¹	1000	1,50	0,73
	75	0,53 ¹	1000	2,25	1,10
	100	0,53 ¹	1000	3,00	1,47
	150	0,53 ¹	1000	4,50	2,20
	200	0,53 ¹	1000	6,00	2,93

¹Dosagem do coagulante recuperado do LETA com base na concentração de sulfato de alumínio recuperado estimado.

Dado início ao ensaio, sendo os jarros simultaneamente preenchidos com o coagulante, iniciou-se a etapa de mistura rápida, onde a solução é misturada com rotação de 300 rpm por 2 minutos. Passados os minutos mencionados, foi dado início à etapa de floculação, ou mistura lenta, com gradientes de velocidade decrescentes (60, 40 e 20 rpm), que ocorre em três etapas de 5 min. Por último, a etapa de sedimentação, ou repouso, em que o equipamento foi desligado e a solução foi mantida repousando por 20 minutos.

Após decantação dos finos, o sobrenadante foi remanejado para bécheres de vidro de 500 mL, os quais servirão de amostra para realização da caracterização da água após a

coagulação, através dos ensaios de potencial hidrogeniônico (pH), cor, turbidez e Carbono Orgânico Dissolvido (COD).

Todo o processo com o equipamento de *jar test* foi repetido com três jarros para cada coagulante, utilizando-se as quantidades destes que mais obtiveram formação de flocos visualmente.

3.4.4 pH

Para a medição do pH da água antes e após a realização dos ensaios de *jar test* com os coagulantes recuperado e de uso comercial, foram utilizadas 18 amostras de água, sendo 6 relacionadas à água bruta, 6 relacionadas à água posterior ao tratamento com coagulante recuperado e 6 referentes àquelas tratadas com sulfato de alumínio comercial, as quais foram submetidas a leitura por pHmetro (marca Quimis e modelo Q400AS) (APHA; AWWA; WEF, 2012).

3.4.5 Cor

Para análise da cor, fora utilizada nas amostras de água, conforme descrição presente no item 3.1.4, a metodologia descrita no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (método 2120 C), por meio do Espectrofotômetro DR-2800 da Hach, em que uma cubeta foi preenchido com 10 mL da água (APHA; AWWA; WEF, 1992).

3.4.6 Turbidez

As análises de Turbidez foram obtidas através da utilização de um turbidímetro digital de bancada TB- 1000 TecnoPON nas amostras de água, conforme descrição presente no item 3.1.4, pelo método nefelométrico descrito no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (método 2130 B), que compreende a medida da dificuldade de um feixe de luz atravessar certa quantidade de água, através da comparação entre o espalhamento de um feixe de luz ao passar pela amostra, e o espalhamento de um feixe de igual intensidade ao passar por

uma suspensão padrão, sendo quanto maior o espalhamento maior a turbidez (APHA; AWWA; WEF, 1995).

Para calibração do aparelho, foram utilizados 5 soluções-padrão, sendo estas 0, 1, 0.8, 8.0, 80 e 800 NTU.

3.4.7 Carbono Orgânico Dissolvido (COD)

Para a determinação da concentração de Carbono Orgânico dissolvido (COD) foram utilizadas nas amostras de água, conforme descrição presente no item 3.1.4, as quais foram submetidas ao equipamento Shimadzu TOC-Vcpn, através do método direto descrito pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (método 5310 B), que consiste na quantificação do carbono orgânico por oxidação catalítica de alta temperatura com detecção infravermelha não dispersiva (APHA, 2012).

Inicialmente, para oxidação do carbono inorgânico da amostra, anteriormente à análise no analisador de carbono orgânico total, as amostras de água foram microfiltradas e misturadas com ácido clorídrico a 1M, até que o pH das mesmas reduzisse a 1.

Com o aquecimento das amostras de água à 900°C, ocorreu o borbulhamento com o ar sintético promovido pelo equipamento, de forma que o CO₂ oriundo da evaporação das amostras fora convertido e removido da solução, restando na amostra somente o carbono orgânico não purgável, encaminhado para o detector de infravermelho não dispersível, onde a quantidade desse fora medida e representada no computador acoplado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do LETA bruto

Variando os processos utilizados no tratamento e as características da água bruta, os resíduos de ETA podem apresentar características diferentes, o que faz com que cada um desses resíduos deva ser tratado e destinado de modos particulares. Para a escolha do melhor método de tratamento e destinação desse resíduo devem ser levados em conta os fatores que caracterizam o lodo de ETA, analisando-se os diversos parâmetros físico-químicos e/ou biológicos dos mesmos (ASSIS, 2014).

De acordo com Sodré (2012) e Rodrigues e Blanco (2018), o uso do solo na bacia está diretamente relacionada à qualidade da água, sendo a ocupação urbana associada, aquela em que consta na bacia utilizada pela ETA da UFV, associada à supressão da mata ciliar, um dos fatores principais para a aceleração de processos erosivos no local e de assoreamento dos corpos hídricos do mesmo, por meio do qual pode haver o carreamento de uma série de substâncias poluentes ao corpo d'água.

Dentre as consequências do assoreamento dos corpos hídricos ao meio ambiente, há o aumento de turbidez e outros constituintes no meio, que exigem do processo de tratamento de água, o aumento da dosagem de coagulante a ser aplicada (TEIXEIRA, 2022).

Por este motivo, as análises do pH do LETA da UFV resultaram em valores alinhados em uma faixa de 6,11 a 6,59, assumindo um caráter levemente ácido (Tabela 2), assim como encontrado nos trabalhos de Higashi, Camargo e Boscov (2021), Muchimbane (2016) e Roque, Montalvan e Boscov (2021), uma vez que a variação da aplicação do teor de coagulante durante o tratamento de água, sobretudo de sulfato de alumínio, está diretamente relacionada ao pH do meio, sendo o segundo menor à medida que a concentração do coagulante no meio aumenta (MENESES, 2005).

Tabela 2 - Resultado da caracterização físico-química do LETA da ETA da UFV

Amostra de LETA	pH	Umidade (%)	MO ¹ (%)
A	6,31	50,33	10,03
B	6,52	52,01	9,81
C	6,20	53,24	9,18
D	6,23	55,61	12,82
E	6,45	55,29	9,21
F	6,11	55,41	9,13
Média	6,34	53,85	9,98

¹ Matéria Orgânica

Em contrapartida, o teor de umidade encontrado, 53,85%, conforme consta na Tabela 2, apresenta-se relativamente mais baixo do que aqueles indicados em literatura, como as porcentagens de 72 e 75% apontados por Higashi, Camargo e Boscov (2021) e Forgiarini (2019), respectivamente. Contudo, de acordo com Tantawy (2015), a variação desse valor é normal, devido às diferentes metodologias de limpeza dos decantadores, o que explica a diferença entre os dados dos estudos e do presente trabalho, uma vez que o LETA já havia passado por desaguamento antes da análise. Apesar disso, é importante observar que o método de armazenamento do LETA pode ter afetado a umidade, uma vez que foi mantido em sacos de rafia em armários de laboratório.

Ainda assim, a quantidade de água no LETA ainda representa mais da metade da massa do lodo, resultando em um alto teor de umidade, implicando em um volume elevado e, conseqüentemente, custos significativos de transporte e descarte (MÜNCH & ODISI, 2022).

O teor de matéria orgânica no LETA estudado apresentou valores semelhantes aos relatados na literatura, com uma média de 9,98% em relação à massa do lodo bruto. Esse resultado, conforme evidenciado em estudos como os de Muchimbane (2016) e Botero (2008), sugere que este resíduo é predominantemente composto por elementos inorgânicos, reforçando a necessidade de uma análise mais detalhada dessa fração para uma compreensão mais aprofundada das características desse resíduo em estudo, como destacado por Kloc e Laird (2017).

Através da Tabela 3 e do Difratorograma, apresentado na Figura 5, podem ser conferidos os percentuais de elementos encontrados durante a análise de fluorescência de raios X referentes à parte inorgânica do LETA.

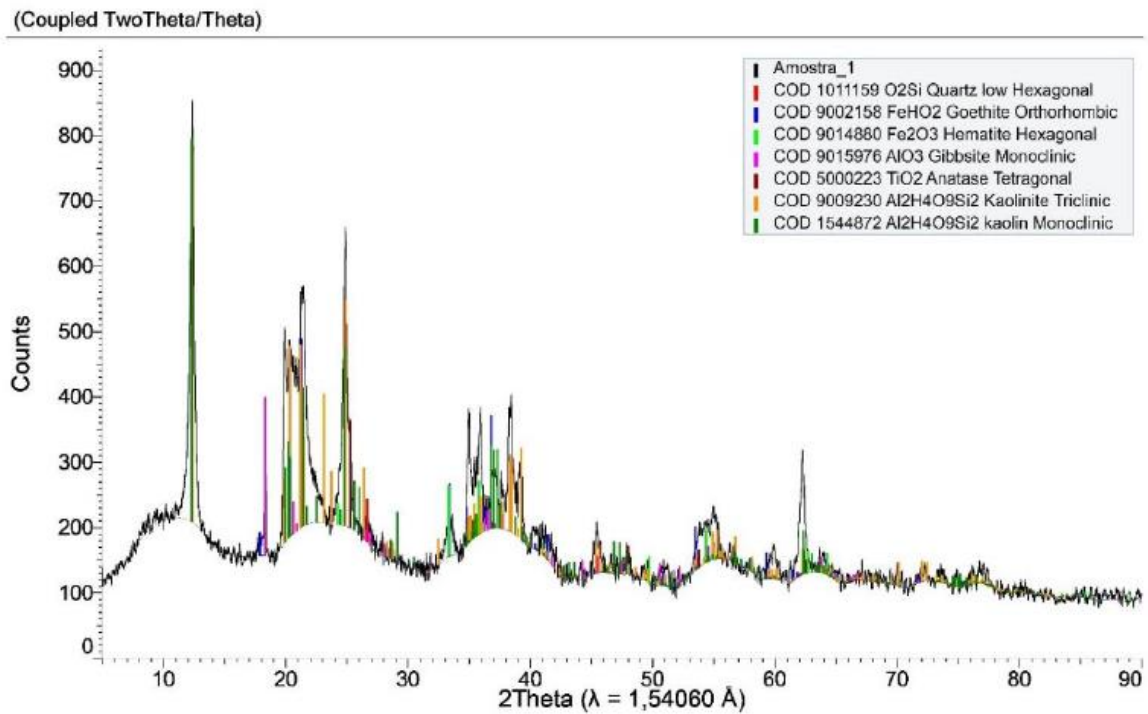
Tabela 3 - Percentual de óxidos identificados no LETA da UFV anterior e posterior ao tratamento por recuperação de coagulante do meio

Óxidos	LETA Bruto	LETA tratado	Erro relativo (%)
Al ₂ O ₃ (%)	37,74 ± 0,09	39,950 ± 0,07	16
SiO ₂ (%)	35,98 ± 0,04	35,730 ± 0,10	23
P ₂ O ₅ (%)	0,599 ± 0,009	0,550 ± 0,143	-
SO ₃ (%)	0,375 ± 0,097	0,091 ± 0,009	16
Cl (%)	0,353 ± 0,012	0,310 ± 0,008	-
K ₂ O (%)	0,216 ± 0,003	0,192 ± 0,003	18
CaO (%)	0,312 ± 0,002	0,330 ± 0,015	8
TiO ₂ (%)	1,783 ± 0,004	1,672 ± 0,003	7
MnO (%)	0,159 ± 0,002	0,156 ± 0,003	-
Fe ₂ O ₃ (%)	22,31 ± 0,05	20,86 ± 0,030	8

A análise de fluorescência de raios X aponta que o lodo é composto basicamente pelos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, assim como apontado pelos estudos de Brandão et al. (2022), Margem (2008), Santos (2018) e Forgiarini (2019). De acordo com Tartari et al. (2011), a concentração elevada destes óxidos no meio se deve à própria composição do material sedimentado no tratamento de água, proveniente da água bruta, e das reações destes com coagulante utilizado no processo de tratamento da água.

Conforme resultados obtidos por meio da difração de raios X (XRD), constantes no difratograma (Figura 5), os elementos encontrados no LETA apresentam-se majoritariamente sob as fases Caulinita, Goethita, Hematita, mineral constituído de óxidos de ferro, e Gibbissita, assim como apontado nos resultados de Forgiarini (2019), Santos (2018) e Silva et al (2019).

Figura 5 - Difratrograma resultante da análise de difração de raios X do LETA bruto.



A difração de raios X e a fluorescência de raios X são técnicas que se complementam. O fenômeno da difração de raios X (XRD) propicia a investigação de pequeníssimas estruturas da matéria, tornando possível a análise das informações estruturais, como composição química e a estrutura do cristal, enquanto fluorescência de raios X (FRX), proporciona, por meio da incidência de raios X em uma amostra, a identificação da composição e concentração de elementos presentes na mesma, após excitar os níveis eletrônicos dos átomos presentes, permitindo a compreensão do comportamento do objeto de análise a partir de sua composição química e estrutural (ASFORA, 2010; SILVA, 2013)

Através desta perspectiva, pode-se entender que parte dos óxidos encontrados estão disponíveis também em suas formas cristalinas, destacando-se a Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e a Gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) relacionadas ao óxido de alumínio encontrado na análise de fluorescência de Raios X, e Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e Hematita (Fe_2O_3), relacionadas à presença do óxido de Ferro, os quais podem estar associados às características da água bruta (PAIXÃO et al., 2008; PINHEIRO, ESTEVÃO & SOUZA, 2014).

Apesar da correlação entre os óxidos as frações minerais encontradas, também constam no LETA, uma parcela dos óxidos metálicos que não se encontram nessas frações, originados das reações dos elementos presentes na água bruta e o coagulante (FIGUEIREDO, 2004). Estes, quando lançados de forma indevida em corpos d'água ou solos, podem induzir toxicidade aos

organismos, afetando suas atividades metabólicas ou até mesmo gerando sua mortalidade (TAVARES et al., 2019 e BITENCOURT et al., 2020).

Analisando a Tabela 4, onde constam os resultados referentes ao ensaio de toxicidade aguda realizado com o organismos-teste *Vibrio fischeri*, pode-se perceber, que assim como apontado nos trabalhos de Barbosa (2000) e Santos, Rocha e Povinelli (2005), o LETA estudado apresenta-se como tóxico, tendo sido verificado um percentual de efeito de 30,24 % sobre a bioluminescência da bactéria.

Tabela 4 - Resumo comparativo entre os efeitos do LETA bruto e tratado, em diferentes quantidades sobre a produção de luminescência por *Vibrio fischeri* em razão do tempo de exposição dos organismos ao resíduo.

	Percentual de efeito (%)
Lodo bruto	30,24
Lodo tratado	85,22

De acordo com o trabalho realizado por Amaral (2012), que analisou a correlação entre fator de toxicidade e parâmetros físico-químicos para efluentes domésticos tratados por meio do sistema de correlação de Pearson, existe uma clara relação entre o fator de toxicidade da *V. fischeri* e a concentração de alumínio.

Do mesmo modo, Ma, Wang & Liu (2011) e Mutairi (2006), que analisaram a toxicidade de coagulantes utilizados no tratamento de águas residuais, relataram que a adição de coagulantes contendo Al ao efluentes, como Sulfato de Alumínio e PAC, foi capaz de conferir ao mesmo percentuais maiores de toxicidade em comparação àqueles em que houve a adição de outros tipos coagulantes, como cloreto férrico e sulfato férrico.

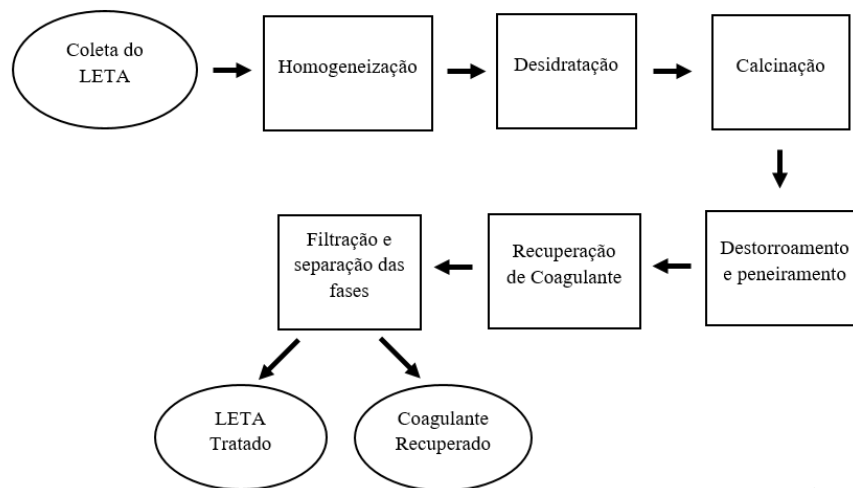
Júlio et al. (2009), que analisaram a concentração de alumínio e a toxicidade aguda por *V. fischeri* no lodo da ETA SANEPAR, encontraram valores de alumínio variando entre 30,5 e 200,9 mg.L⁻¹, sendo as amostras com as maiores concentrações destes, aquelas com maiores percentuais de efeito à bactéria, tornando razoável correlacionar a toxicidade do LETA do estudo à presença de alumínio no resíduo.

4.2 Recuperação de coagulante presente no LETA por via ácida

A realização dos ensaios de recuperação de coagulante por via ácida através do LETA resultou na formação de dois produtos, LETA tratado e sulfato de alumínio recuperado,

entendido como o material não solubilizado com a aplicação da metodologia, conforme consta na Figura 6. Seguem descritos nos tópicos abaixo as características de cada um dos produtos gerados após recuperação de coagulante presente no LETA por via ácida.

Figura 6 – Fluxograma simplificado do processo sugerido para Recuperação do Coagulante a partir do LETA.



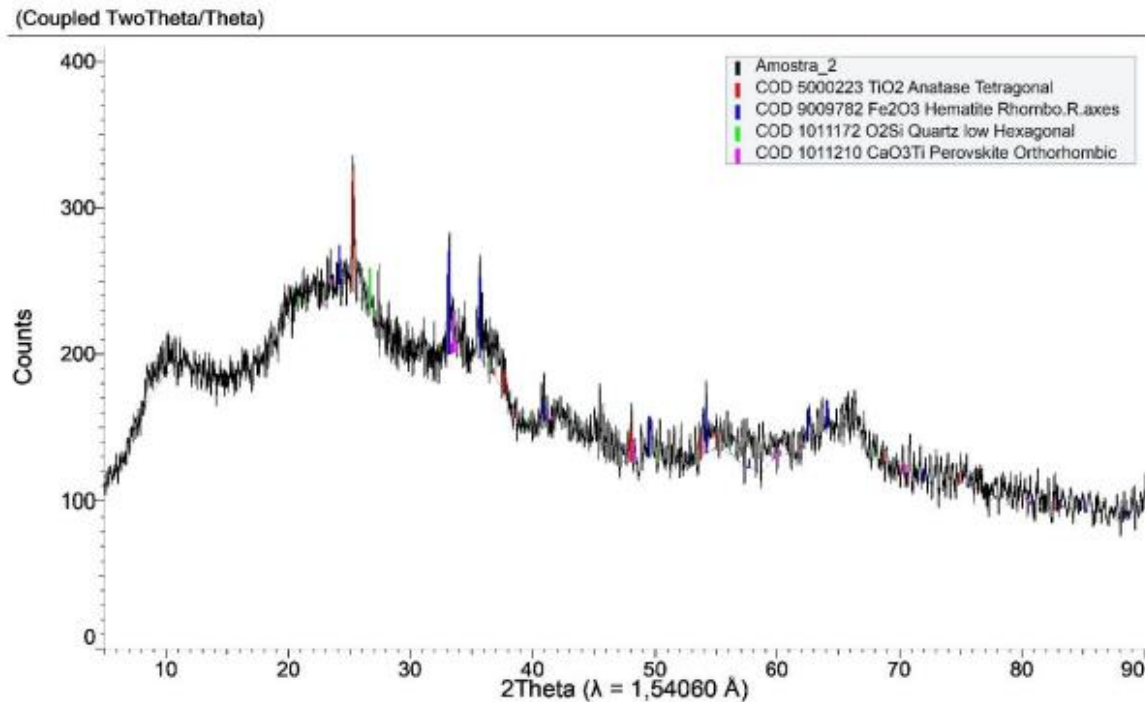
4.2.1 LETA excedente após recuperação de coagulante por via ácida

De modo geral, a recuperação de coagulante presente no lodo de Estação de Tratamento de Água, consiste na remoção dos hidróxidos metálicos presentes no lodo, formados pela reação entre a água bruta e o agente coagulante utilizado durante o tratamento de água, transformando-os em coagulantes novamente para reaproveitamento em Estações de Tratamento de Água e/ou Estações de Tratamento de Efluentes (GUIMARÃES, 2005; DANDOLINI, 2014; DEMATTOS et al., 2001).

Apesar da metodologia ter possibilitado a redução dos teores de umidade (53,85%) e da matéria orgânica (9,98%) presentes no LETA, conforme pode ser visualizado pelos dados apresentados na Tabela 3, o Al_2O_3 presente no LETA de estudo não obteve redução em sua porcentagem em relação à massa do resíduo após execução do processo de recuperação de coagulante. Apesar disso, em análise ao que consta no Difratrograma da amostra de lodo após tratamento por recuperação de coagulante por via ácida, não foram encontradas fases cristalinas relacionadas a este óxido na amostra, indicando que, mediante aplicação da metodologia de

recuperação, parte do alumínio metálicos (Al) presente no lodo, na forma cristalina, foram solubilizados pelo ácido.

Figura 7 - Difratoograma da amostra de lodo após tratamento.



A Tabela 5, corrobora para tal afirmação, uma vez que identificou, a constituição do LETA tratado como sendo majoritariamente (87,5%) por material amorfo, em comparação à composição do lodo bruto, que apresentou uma porcentagem de minerais em fases cristalinas e amorfas de modo mais balanceado.

Tabela 5 - Relação percentual entre parte cristalina e amorfa das amostras de LETA anterior e posterior ao tratamento por recuperação de coagulante do LETA.

Amostras	Cristalina (%)	Amorfa (%)
Lodo	48,7	51,3
Lodo tratado	14,3	85,7

As formas amorfas de óxido de alumínio são muito presentes em solos, onde são responsáveis pela agregação das partículas do solo em associação à matéria orgânica presente

no meio, estando estas inclusive, presentes em maior quantidade no horizonte A¹, provavelmente em virtude da complexação pela matéria orgânica (PEDROTTI et. al., 2003).

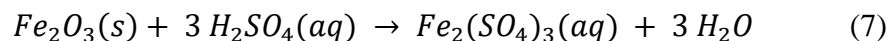
Por este motivo, entende-se que esta substância deve se apresentar em maior quantidade em solos cujo horizonte A seja expressivo, como nos Argissolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Nitossolos e Planossolos (EMBRAPA, 2023).

De acordo com o Mapeamento Geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu desenvolvido pela EMBRAPA (2013), de onde foi captada água para tratamento pela ETA da UFV, os tipos de solos presentes na região da bacia são Latossolos, Cambissolos e Gleissolos, fato que justifica a presença de elementos amorfos na composição do LETA, uma vez que sedimentos desses são carreados pelo curso hídrico, e, portanto, passam a constituir o LETA.

Costa et al. (2014), que estudaram sobre o efeito da temperatura de calcinação nas características estruturais e morfológicas dos óxidos de alumínio, relataram que entre as temperaturas de calcinação de 500 a 800°C as amostras obtidas dos óxidos de alumínio são amorfas, ou seja, ausente de fases cristalinas, as quais foram obtidas somente em temperaturas acima de 900°C. Um vez que neste trabalho utilizou-se metodologia de calcinação do LETA à 750 °C, é possível compreender também que parte do aumento de óxido de alumínio e de material amorfo no meio pode ter sido dada pela calcinação em baixa temperatura.

Apesar disso, conforme consta na tabela 3, outros óxidos apontados pelo XRF foram reduzidos do meio, destacando-se o Fe₂O₃, que obteve maior percentual de redução em relação aos demais óxidos, indicando que estes podem ter sido solubilizados no momento a recuperação de coagulante.

De acordo com Cardoso (2012), a reação entre o Fe₂O₃ com ácido sulfúrico é capaz de formar sulfato férrico, conforme demonstrado pela equação 7.



O sulfato férrico é um sal inorgânico comumente utilizado na produção de remédios, de pigmentos para tecidos, no condicionamento do espessamento e desidratação de lodo, catalisador de polimerização, na decapagem de metais, controle de pragas em plantações, em

¹ Seção do solo de constituição mineral à superfície do terreno, relativamente espesso, de cor escura, com alta saturação por bases e com agregação e grau de desenvolvimento predominantemente moderado ou forte (EMBRAPA, 2023)

produtos de ferro quelado, e no tratamento de água potáveis e de efluentes (MAZZA, 2019).

Desse modo, considerando que toda porcentagem reduzida do óxido de ferro presente no LETA foi solubilizada, além do sulfato de alumínio, também pode-se inferir que a recuperação de coagulante a partir do LETA foi capaz de recuperar também o sulfato férrico, outro sal metálico eficiente na coagulação de sólidos de água.

Independente disso, ainda que reduzidos, a presença de todos os óxidos metálicos identificados no LETA bruto se mantiveram, de modo que ainda são capazes de conferir ao LETA, toxicidade (TAVARES et al., 2019; BITENCOURT et al., 2020). Por esse motivo, mesmo diante da realização do procedimento de recuperação de coagulante a partir do resíduo da ETA, o LETA ainda manteve sua toxicidade, apresentando, inclusive, percentuais de efeito sobre a *V. fischeri* superiores ao resíduo bruto, conforme pode ser visto nos resultados que constam à Tabela 4.

De acordo com Pedretti e Medeiros (2022), esse fenômeno pode ocorrer devido à metodologia utilizada para recuperar o coagulante presente no LETA, que não assegura uma separação eficaz entre o sobrenadante e o resíduo insolubilizado resultante do processo de recuperação, podendo levar ao acúmulo de resquícios do ácido utilizado que, por sua vez, podem contribuir para o aumento dos efeitos de toxicidade.

Apesar disso, a bactéria utilizada para avaliação da toxicidade do LETA, *Vibrio fischeri*, é um organismo marinho, originalmente encontrado em zona costeira ou em mar aberto, de águas temperadas e subtropicais, em simbiose a outros animais, como peixes, teleósteos, lulas e camarões (Menezes, 2016). Portanto, considerando que em grande parte do país o LETA é destinado em solos e canais fluviais (KLOC e LAIRD, 2017), o presente resultado somente ilustra a capacidade de carregamento de toxicidade ao ambiente, haja vista que o parâmetro adotado se refere a uma relação que não ocorre naturalmente, fazendo-se necessária a realização de estudos que reflitam os efeitos que ocorrem na natureza.

4.2.1.1 Análise com base nos resultados obtidos e levantamentos bibliográficos a respeito da interferência do lodo nas mais principais estratégias de valorização do LETA

De modo geral, a metodologia de regeneração de coagulante presente no lodo da Estação de Tratamento da UFV foi capaz de reduzir a umidade e a concentração de matéria orgânica

em 53,85% e 9,98%, respectivamente, conferindo ao resíduo, um volume menor, e consequentemente a possibilidade de redução custos para destinação final do lodo.

Apesar disso, a tecnologia proposta não foi capaz de garantir a remoção completa do ácido sulfúrico do LETA não solubilizado. Por conta disso, e considerando os efeitos tóxicos desse produto à organismos aquáticos, bactérias, camundongos, humanos e outros animais relatados na Ficha de Informação de Produto Químico (FISPQ) da CETESB, mesmo diante da realização do tratamento proposto, o lodo ainda se apresenta como tóxico, tendo obtido, inclusive, maior percentual de efeito sobre a *Vibrio fischeri*, do que o LETA bruto (CETESB, 2015).

Tendo em vista esses aspectos, faz-se possível mensurar os efeitos desta metodologia nos principais métodos de reaproveitamento do LETA, conforme literatura.

4.2.1.2 Cerâmica

De acordo com Paixão et al. (2008) e Pessoa Júnior (2019), efeitos negativos nos produtos cerâmicos contendo LETA, como trincas e deformidades, responsáveis por limitarem a incorporação de lodo, podem ser ocasionados, dentre outros, pela falta de coesão entre o lodo e a argila utilizada no processo. Tal ocorrência se dá pela presença de materiais grosseiros como pedriscos e matéria orgânica, ou pela presença de hidróxidos metálicos no lodo, derivada da adição de sais durante o processo de coagulação, que por conferirem ao LETA certa resistência à desidratação, tornando-o gelatinoso e volumoso, pode vir a gerar microtrincas ao redor das partículas.

Outro aspecto relevante quanto à incorporação de LETA em produtos cerâmicos se deve à possibilidade de poluição atmosférica no momento da queima. Souza et al. (2008), que realizaram uma análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de ETA, levantaram que a adição do resíduo contribui para aumentar as emissões dos gases CO₂, CO e CH₄ durante o processo de queima de cerâmica, devido à concentração de matéria orgânica presente na amostra e ao vapor de água resultante da desidratação de hidróxidos e da desidroxilação da caulinita, que tende a aumentar a atividade dos componentes gasosos.

Considerando os efeitos da metodologia de recuperação de coagulante do LETA ao lodo, estima-se um aumento do percentual de incorporação do resíduo aos produtos cerâmicos. Esta alegação se faz, tendo em vista que através da aplicação desta metodologia, aspectos como excesso de umidade, presença de material orgânico e grosseiros no meio, bem como presença

de hidróxidos metálicos, responsáveis por ocasionar efeitos deletérios ao produto cerâmico, foram reduzidos.

Além disso, através da metodologia de tratamento proposta também pode-se estimar uma redução da contribuição do LETA nas emissões de gases poluentes, uma vez que o estudo apontou que a metodologia fora capaz de reduzir a concentração de matéria orgânica, dos hidróxidos e da caulinita presentes nas amostras, reduzindo a quantidade desses que a serem emitidos à atmosfera em forma de gases e vapores. Contudo, a metodologia não garantiu a remoção por completo dos itens mencionados, e, portanto, não é capaz de garantir que não sejam emitidos qualquer tipo de gases e vapores à atmosfera durante a queima do produto cerâmico contendo o LETA tratado.

Assim, entende-se que a utilização de LETA tratado pela metodologia de recuperação de coagulante a partir do lodo de ETA, pode ser interessante para melhoria da incorporação deste resíduo à cerâmica, todavia, faz-se importante analisar mais detalhadamente esta aplicação, tendo em vista que, apesar de possibilitar o aumento do percentual de incorporação do LETA à massa cerâmica, não garante que não sejam gerados poluentes atmosféricos quando da queima dos produtos feitos com o resíduo.

4.2.1.3 Argamassa

Aplicação em altas concentrações de LETA à argamassa podem tornar o material, e consequentemente os produtos elaborados a partir dele, desconforme àqueles padrões de qualidade exigidos em norma para que possam ser comercializados, alterando fatores como resistência à compressão axial e capacidade de absorção de água, tornando-os mais frágeis em relação às argamassas convencionais (SALES & SOUZA, 2006; LIESENFELD, BALZ & DAHMER, 2019; LAURINDO *et. al.*, 2020).

Silva Júnior, Vicente e Trevisan (2019), apontaram que a presença de alumínio à pasta de cimento pode vir a ocasionar na redução da densidade do produto e, dependendo da concentração aplicada, formação de bolhas e espaços vazios, ocasionados pela geração de gás hidrogênio no meio, levando a redução da resistência à compressão axial.

Conforme Ferreira et al. (2022), os efeitos acima mencionados se dão pelo fato de o lodo possuir em sua composição, partículas com formato geométrico irregular poligonal e lamelar, e de superfície com certa rugosidade, originada da presença de alumínio e silício no meio, que conferem à mistura, demanda água e aditivos plastificantes acima do convencional

para a obtenção de melhor trabalhabilidade do material e redução das chances de formação de bolhas e trincas no material.

A metodologia de recuperação de coagulante a partir do LETA, apesar de ter conseguido alterar a concentração de silício do lodo, não eximiu a presença deste no meio, nem mesmo conseguiu reduzir a concentração de alumínio no lodo. Assim, apesar do método possibilitar a transformação das características do resíduo em pauta, considerando as causas dos efeitos negativos do LETA à incorporação em argamassa, pode-se entender que ele pode não ser capaz de trazer benefícios à esta aplicação, sobretudo no que tange ao aumento da incorporação de lodo ao produto.

4.2.1.4 Concreto

Estudos como de Tafarel et al. (2016), Ramirez (2015) e Jamshidi, et al (2011), verificaram que a adição de lodo de ETA em concretos, apesar de conferirem ao produto, desempenho satisfatório quando aplicados em concentrações de até 10%, ocasiona ao mesmo, uma diminuição da resistência à compressão, comparado ao concreto usual.

No mesmo sentido, Hoppen et al. (2005) afirmam que adições de lodo acima de 5% podem causar um aumento considerável de absorção de água ao produto, tornando-o menos durável e mais vulnerável à penetração de íons cloreto e sulfato, que conferem ao material certo potencial corrosível ao longo do tempo.

Segundo Costa, Silva e Lyra (2022), estes efeitos devem-se à elevada quantidade de umidade e matéria orgânica tipicamente presentes em lodos de ETA que geram diversos impactos negativos à estrutura do material em que foi incorporado.

O tratamento do LETA por meio da recuperação de coagulante por via ácida fora precedido de etapas de secagem e queima em estufa e forno mufla, que reduziram, significativamente a umidade e matéria orgânica no meio, respectivamente. Por estes motivos, estima-se que a metodologia de tratamento proposta neste trabalho pode vir a melhorar a aplicabilidade do resíduo aos produtos de concreto. Todavia, como não se é conhecido os efeitos da aplicação do lodo após o uso do tratamento estudado, e como o tratamento não foi capaz de eximir do LETA toda a matéria orgânica, faz-se necessária aplicação de testes específicos com esta aplicação, para conferência do comportamento do material com o resíduo.

4.2.1.5 Uso de lodo de ETA como adsorvente para poluentes

Em diversas regiões do país o LETA vêm mostrando elevados teores de sódio (Na), cálcio (Ca), cádmio (Cd), cobre (Cu), zinco (Zn), níquel (Ni), mercúrio (Hg), cromo (Cr), e chumbo (Pb), além de alumínio (Al) e ferro (Fe), motivo pelo qual a aplicação do lodo de ETA como adsorvente para poluentes ainda se apresenta incipiente, uma vez que, após executada a adsorção do poluente, a destinação final do sólido resultante vira um problema, por sua elevada concentração de metais, que conferem ao mesmo, alto potencial de toxicidade (ALBUQUERQUE, 2013, BABATUNDE & ZHAO, 2007, RITTER, 2020).

Dentre os elementos supramencionados, a caracterização do LETA da ETA da UFV permitiu a confirmação da presença apenas do cálcio, alumínio e ferro, sobre as moléculas de CaO , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , respectivamente. Após a efetuação do tratamento do resíduo pela metodologia de recuperação de coagulante do LETA, esses óxidos, mesmo que em menores quantidades, ainda se fazem presentes do resíduo.

Ademais, conforme resultados encontrados com análise da toxicidade do LETA, mesmo após realização da recuperação de coagulante, o resíduo apresentou toxicidade, inclusive com percentuais de feito sobre a *V. fischeri*, mais elevados (85,22 % em relação à 30,24% do LETA Bruto).

Por estes motivos, tendo em vista que o tratamento proposto que não foi capaz de eliminar os elementos ditos em literatura como potencialmente maléficos à aplicação do LETA como adsorvente para poluentes, e que não fora capaz de reduzir o percentual de toxicidade do lodo, o mesmo não foi capaz de propor melhoria à aplicação em questão, mantendo-se como uma questão o seu descarte, tendo em vista a possibilidade de ocasionar danos ao meio ambiente.

4.2.1.6 Uso de lodo de ETA no solo

Segundo Shah et al. (2020), a adição de LETA ao solo pode vir a proporcionar melhorias às propriedades físicas do solo, aumentando a porosidade do solo, sua capacidade de retenção de umidade e sua coesividade.

Todavia, seu aproveitamento é inerente às características do resíduo em questão, que ditará a metodologia de aplicação mais adequada, de modo a evitar prejuízos ao meio ambiente. A depender do que compõe o LETA, a aplicação deste ao solo pode vir a gerar efeitos deletérios à biota local, afetando, como por exemplo, o desenvolvimento das raízes das plantas, reduzindo

sua superfície de contato com o solo e, conseqüentemente, a possibilidade de absorção de nutrientes e água (MORSELLI et al., 2022; BOTERO et al., 2009).

De acordo com o levantamento de Lucon (2012), esses efeitos podem ser dados pela presença de alumínio na forma de cátion trivalente hidratado $-Al^{3+}$, presente em solos ácidos, que ocasionam na dissolução das formas sólidas do alumínio presente no LETA, liberando suas formas iônicas para a solução do solo.

Conforme explicitado anteriormente, mesmo diante do tratamento do LETA, ainda constam em sua composição óxidos como SiO_2 , P_2O_5 , SO_3 , Cl, K_2O , CaO, TiO_2 , MnO, Fe_2O_3 e Al_2O_3 , tendo este último, inclusive, certo aumento em sua quantidade.

Desse modo, estando o LETA tratado ainda com presença de óxidos de alumínio, ditos como preocupantes à distribuição do lodo em solo, e que os solos brasileiros apresentam acidez acentuada e presença de minerais de argila e óxidos de alumínio e ferro, a aplicação desta metodologia ainda se mantém como preocupante, no sentido de poder vir a apresentar danos à ambiente em questão, tendo em vista a probabilidade de toxicidade do alumínio (LUCON, 2012).

Corroborando com tal afirmação, os resultados obtidos com a análise da toxicidade do LETA, mesmo após realização da recuperação de coagulante a partir do LETA, o apontou como tóxico, não sendo indicado, portando, à aplicação em questão, uma vez que essa propriedade pode vir a causar prejuízos ao meio ambiente.

Todavia, vale ressaltar que a *Vibrio fischeri*, bactéria a qual fora feita a análise de toxicidade, é uma bactéria marinha sugere-se para avaliação do potencial impacto do LETA quanto à sua toxicidade em solos, a realização de estudos quanto a este parâmetro em organismos semelhantes àqueles que podem ser afetados por esta metodologia, como por exemplo, estudos que utilizam sementes de *Lactuca Sativa* (alface).

4.2.2 Coagulante recuperado do LETA por via ácida

Na Tabela 6 é apresentado a caracterização química do coagulante recuperado via ácida. A análise espectroscópica TXRF revelou que o coagulante recuperado é constituído majoritariamente por enxofre (320 mg.L^{-1}) e alumínio (83 mg.L^{-1}). Resultados similares foram reportados no trabalho realizado por Dandolini (2014).

Tabela 6 – Composição química do coagulante recuperado do LETA obtidos por meio da análise de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF)

Elementos	Média ± Desvio Padrão (mg.L ⁻¹)	Coefficiente de Variação (%)
Al	83 ± 6	7
Si	27 ± 1	4
S	320 ± 6	2
K	12,8 ± 0,1	1
Ca	20,9 ± 0,2	1
Mn	16,8 ± 0,1	1
Fe	10,0 ± 0,1	1
Ni	0,252 ± 0,002	1
Cu	0,564 ± 0,004	1
Zn	0,556 ± 0,002	0,4

Tal característica se dá pela metodologia utilizada para recuperação do coagulante do LETA. O método de recuperação de coagulante do LETA por via ácida consiste, basicamente, na solubilização dos hidróxidos de alumínio e ferro presentes no lodo através da adição de ácido ao resíduo. Todavia, além dos hidróxidos mencionados, também compõem o LETA diversos outros compostos que acabam sendo solubilizados junto àqueles de interesse, passando a compor o coagulante recuperado (JULIO, SANTOS & OROSKI, 2009).

De todo modo, considerando que os metais encontrados estejam todos como sais, mediante reação com o ácido sulfúrico adicionado, e a estequiometria da molécula de Al₂(SO₄)₃, estima-se que o coagulante recuperado possua uma concentração de 0,53 g.L⁻¹ de sulfato de alumínio, valor 37 vezes menor ao do coagulante comercial utilizado nos ensaios de *jar test* do presente trabalho (20 g.L⁻¹) para análise da eficácia do coagulante recuperado.

Tais valores encontrados convergiram com aqueles relatados em literatura. Pedretti e Medeiros (2022), apontaram uma concentração de 0,68 g.L⁻¹ de sulfato de alumínio no coagulante recuperado, valor que, apesar de ser superior ao obtido no presente trabalho, apresentou-se cerca de mil vezes menor que a concentração do coagulante comercial utilizado na ETA de Palmitinho (RS), de onde foi recolhido o LETA objeto da investigação.

Todavia, mesmo com diferença na concentração de sulfato de alumínio entre o coagulante recuperado e o de uso comercial, estudos como de Guimarães (2005), apontam que, em termos de remoção de turbidez e cor aparente, aqueles recuperados a partir do LETA são capazes de apresentar resultados semelhantes aos obtidos pelos produtos comerciais. Os resultados da caracterização físico-química da água tratada após realização dos ensaios de *jar*

test com os coagulantes comercial e recuperado, apresentados na Tabela 7, corroboram esta afirmação, sendo possível constatar que, mesmo em dosagens menores, aquele recuperado do LETA foi capaz de apresentar resultados próximos com os obtidos com coagulante comercial em relação a remoção de cor e turbidez.

Tabela 7 - Resultados de pH, cor, turbidez e COD da água bruta antes e após ensaio de *Jar Test* realizados com os coagulantes comercial e recuperado do LETA.

	Parâmetros físico-químicos				
	pH	Cor (uH)	Turbidez (NTU)	COD (mg.L ⁻¹)	Dosagem de coagulante (mg.L ⁻¹)
Água Bruta	6,46	85	14.9	1,676	-
	6,62	69	9.2	1,139	-
	6,62	78	10.5	1,565	-
	6,62	76	9.8	3,002	-
	6,66	79	9.3	3,887	-
	6,67	80	9.7	2,776	-
Água tratada com coagulante comercial	4	17	1,97	1,194	66,15
	4.01	18	1,82	1,088	270,00
	3.73	18	2	1,725	405,00
	3.92	17	2.7	1,314	504,00
	3.89	20	2,9	2,447	810,00
	3.78	17	2,8	1,615	1080,00
Água tratada com coagulante recuperado	6.15	17	3,9	5,806	0,37*
	6.21	20	3,3	5,015	0,74*
	6.8	7	3,3	5,476	1,10*
	6.97	14	3,2	5,476	1,47*
	6.81	12	4,0	3,491	2,21*
	6.55	8	3,8	3,104	2,94*

*Valores estimados com base na concentração de sulfato de alumínio recuperado calculado através da concentração de alumínio encontrado no sobrenadante e estequiometria.

Conforme demonstrado na Tabela 7, as amostras de água tratada após uso do coagulante recuperado, em dosagens de 0,37 a 2,92 mg.L⁻¹, apresentaram valores de cor na faixa de 7 uH a 20 uH. Em comparação aos resultados obtidos na análise da água bruta, que variaram de 69 uH a 85 uH, pode-se estimar uma capacidade média de redução da cor de, aproximadamente, 83,30%. Esse valor é superior ao alcançado com o uso de coagulante comercial, estimado em

77,10%, com base nos valores obtidos ao tratar a água bruta, os quais variaram entre 17 uH e 20 uH, mesmo este tendo sido aplicado em dosagens superiores à do coagulante recuperado, variando de 134,10 a 1246,68 mg.L⁻¹.

Vilela (2020) obteve em seu estudo, valores de cor de 45 a 0 uH à água tratada utilizando-se coagulante recuperado por via ácida do LETA de Apucarana, em dosagens de 0,5 a 3,25 g.L⁻¹. Comparado ao valor de 90 uH encontrado para a água bruta utilizada no estudo, o trabalho em questão apontou que coagulante recuperado foi capaz de atingir teores de remoção de cor de 50 a 100%. Segundo o autor, este resultado indicou que o coagulante recuperado do LETA é eficiente para tratamento, tal qual o PAC de uso comercial, utilizado para comparação no estudo, que foi capaz de conferir à água valores de cor semelhantes àqueles obtidos com uso do recuperado, nas mesmas dosagens e condições ao coagulante recuperado. Apesar de não ter sido capaz de remover por completo a coloração da água, tal como no estudo mencionado, os teores de remoção de cor obtidos neste trabalho encontram-se entre aqueles obtidos por Vilela (2020), em consonância ao que consta em literatura.

No que diz respeito à turbidez, após a aplicação do coagulante recuperado na água bruta, em dosagens variando de 0,37 a 2,94 mg.L⁻¹, foram observados valores de 3,2 NTU a 4,0 NTU. Uma vez que a água bruta apresentava originalmente valores de turbidez entre 9,2 NTU e 14,4 NTU, os valores de turbidez encontrados após a aplicação do coagulante recuperado indicam que o mesmo foi capaz de reduzir pelo menos 55,67% da turbidez da água, em comparação com os valores iniciais.

No entanto, o efeito obtido com o coagulante recuperado foi inferior ao alcançado com a água bruta tratada com sulfato de alumínio comercial. O sulfato de alumínio comercial, aplicado em dosagens de 134,10 a 1246,68 mg.L⁻¹, conseguiu reduzir a turbidez para valores na faixa de 1,82 NTU a 2,9 NTU, indicando uma média de redução de turbidez de aproximadamente 76,30%, quando comparado aos valores de turbidez obtidos para a água bruta.

Ao comparar a redução de turbidez obtida com o uso do coagulante recuperado do LETA neste trabalho com resultados obtidos em outros estudos, nota-se que o valor alcançado por este foi inferior. Xu et al. (2009) alcançaram um percentual de redução da turbidez de 96% com a adição do coagulante recuperado em dosagens de 3 a 6 mg.L⁻¹, em efluentes, fazendo com que o valor inicial de turbidez, de 112 NTU passasse a ser de 3 NTU.

Dandolini (2014) e Guimarães (2005), também obtiveram resultados parecidos com o autor supramencionado, tendo o primeiro conseguido reduzir a turbidez de 54 NTU para 0,7 NTU (98 %) com a utilização de sulfato de alumínio recuperado, em comparação à 1,2 NTU

(97,7%) com produto comercial, e o segundo, de 20 NTU a 0,3 (98,5%) e 0,2 NTU (99%) com a utilização de produto recuperado e de uso comercial, respectivamente.

Conforme Sátiro et. al. (2020), para melhores resultados quanto à remoção de turbidez e cor da água bruta, o ideal é que sejam aplicadas menores doses de coagulante ajustado a um pH o mais próximo possível do natural. Águas com pH em condições extremas, ou seja, muito ácidas ou muito alcalinas, podem vir a afetar negativamente a cor ou a turbidez do meio (MARCHESAN et al, 2021).

Ahmad et al. (2016), relataram em seu trabalho que, valores de redução mínima de turbidez (23%) utilizando coagulante recuperado de LETA e sulfato de alumínio comercial, foram obtidos com aplicação de coagulante na dose de 2,6 mL.L⁻¹, em pH 3 da água bruta, enquanto aqueles referentes à redução máxima de turbidez (98,5%) ocorreram com a aplicação de doses de 12 mL.L⁻¹ do mesmo, em pH 7. Em condições de pH 6 e 7 para dosagens de coagulante recuperado de 8 mL.L⁻¹, foram alcançados teores de remoção de turbidez de 94,2%. Segundo Babatunde et al. (2008) e Kim et al. (2002), essa relação ocorre, devido ao fato de que em pH inferior a 4, a aplicação de sulfato de alumínio para remoção de turbidez do meio é afetada negativamente, tendo em vista que nessas condições, ocorre a dissolução do alumínio da molécula, impedindo a ação do mecanismo de adsorção do coagulante.

Desse modo, considerando as condições de pH aplicadas, é possível compreender os resultados encontrados, sobretudo no que condiz à aplicação do sulfato de alumínio de uso comercial, uma vez que nestes casos a faixa de pH ficou abaixo de 4, conforme apresentado na Tabela 7.

O decréscimo no pH da água bruta após a adição do coagulante de uso comercial pode ter sido causado pelas altas dosagens do mesmo, juntamente com a falta de correção do pH durante o ensaio. Isso se deve ao fato de que o sulfato de alumínio é capaz de reduzir o pH da água, devido ao seu comportamento em solução aquosa, onde libera íons de alumínio hidratados $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ que atuam como ácidos de Brønsted-Lowry, consumindo a alcalinidade presente na água, incluindo das hidroxilas (OH⁻), e formando H₃O⁺ (PIANTÁ, 2008).

Além disso, apesar de ter sido considerada para comparação a concentração estimada de sulfato de alumínio recuperado no coagulante, outros óxidos além do de alumínio, também foram solubilizados ao coagulante recuperado, conforme discutido no item anterior. Dentre estes, o óxido de ferro III, que possibilitou a recuperação de sulfato férrico ao coagulante, um importante agente coagulante no tratamento de águas e efluentes, que pode ter conferido ao coagulante recuperado maior eficiência de clarificação em menor dosagem (MAZZA, 2019).

Quanto à análise de COD das amostras de água tratadas pelos coagulantes de uso comercial e recuperado do LETA, pode-se observar, com base nos resultados apresentados na Tabela 7, que, mediante uso do coagulante comercial, a quantidade de carbono orgânico presente no meio foi reduzida de $1,693 \text{ mg.L}^{-1}$ para $1,564 \text{ mg.L}^{-1}$, sugerindo que, ainda que em pequena quantidade, o material orgânico dissolvido na água foi coagulado e removido. Tal interpretação não se aplica ao que fora encontrado em relação à aplicação do coagulante recuperado, uma vez que esta resultou em valores de COD de $3,104 \text{ mg.L}^{-1}$ e $5,806 \text{ mg.L}^{-1}$, o que equivale a um aumento na concentração de COD na água de $3,035 \text{ mg.L}^{-1}$ em média, indicando que a aplicação deste foi capaz de aumentar a presença de material orgânico no meio.

Segundo Bellaver (2019), dependendo de como ocorre o processo de calcinação, seja pelo tipo de forno, pelo tempo de queima ou da temperatura adotada, a metodologia pode não ser totalmente eficaz em remover a matéria orgânica do meio, podendo no lugar desta, ocasionar na volatilização de outros compostos. Assim, devido aos resultados encontrados com a análise de COD à água tratada com coagulante recuperado, pode-se presumir que, mesmo diante da efetuação de calcinação do LETA, anterior à etapa de recuperação do sulfato de alumínio do lodo, o resíduo poderia estar, ainda, contendo certa quantidade de matéria orgânica em sua composição, que devem ter sido solubilizados posteriormente, junto aos hidróxidos metálicos, passando a compor o coagulante recuperado, e posteriormente a água tratada com este.

É importante destacar que os resultados deste estudo divergem dos encontrados por Ishikawa et al. (2007) em relação ao COD da água tratada com o coagulante recuperado do LETA. De acordo com os autores supracitados, o coagulante recuperado do lodo da ETA municipal de Kitakyushu (Kyushu, Japão), foi capaz de reduzir a concentração de carbono orgânico presente no efluente de $79,6 \text{ mg.L}^{-1}$ para $26,43 \text{ mg.L}^{-1}$, quando aplicado em dosagem de $6,5 \text{ g.L}^{-1}$ (Concentração superior a utilizada neste estudo). Tal resultado foi explicado pelo próprio estudo como tendo ocorrido diante da presença de matéria orgânica contida no coagulante recuperado, que aumentou a quantidade de matéria sólida em suspensão, matéria orgânica e nutrientes no meio e que teriam sido sedimentadas em conjunto àqueles já presentes na água bruta pelo uso do coagulante.

Apesar disso, em ambos os estudos a presença da matéria orgânica solubilizada no coagulante recuperado é apontada. Por este motivo, alguns trabalhos, como de Keeley et al. (2014) não consideram segura a utilização deste para o tratamento de águas de abastecimento à população, indicando sua aplicação somente para o tratamento de águas residuárias, assim como recomendado por Chen et. al. (2012) e Franco (2009), devido à presença de metais como manganês, ferro, níquel, cobre e zinco, no coagulante recuperado, advindos da solubilização do

LETA, junto do alumínio, que podem ocasionar problemas de incrustação nas tubulações, cheiro forte e coloração à água e problemas à saúde humana.

Por conta disso, apesar do potencial observado para clarificação de água bruta, sobretudo quanto à remoção de cor e turbidez do meio ocasionado pelo coagulante recuperado do LETA da UFV, de modo a evitar possíveis danos relacionados à lixiviação de metais e de matéria orgânica à água, à saúde humana, indica-se a utilização deste apenas para aplicação em efluentes.

CONCLUSÕES

Ao analisar a caracterização físico-química do lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Universidade Federal de Viçosa, verificou-se que ele é composto principalmente por água (53,85%), (9,98%) e óxidos tais como Al_2O_3 (37,74 %), SiO_2 (35,98 %), P_2O_5 (0,599 %), SO_3 (0,375 %), Cl (0,353 %), K_2O (0,216 %), CaO (0,312 %), TiO_2 (1,783 %), MnO (0,159 %) e Fe_2O_3 (22,31 %), conferindo-lhe um potencial de toxicidade, conforme ensaio de ecotoxicidade com a *Vibrio fischeri*, que apontou um percentual de efeito de 30,24% sob a bactéria.

Quando submetido ao processo de recuperação do coagulante por via ácida, o LETA foi capaz de gerar dois produtos: o coagulante recuperado e o LETA tratado. O coagulante recuperado apresentou uma concentração de $0,53 \text{ g.L}^{-1}$ de sulfato de alumínio, que apesar de ser 37 vezes menor em comparação à do coagulante comercial utilizado no presente trabalho, apresentou resultados próximos aos obtidos ao mesmo quanto à clarificação da água bruta, apresentando cerca de 88 % e 55,67 % de redução da cor e de turbidez, respectivamente, da água bruta coletada em um córrego do município de Mesquita (RJ), em comparação às porcentagens de 77,10 e 76,30% alcançadas com uso do coagulante de uso comercial. Apesar disso, o uso do coagulante recuperado conferiu à água tratada um aumento da concentração de COD, de modo que sua utilização para o tratamento de água destinada ao consumo da população torna-se inviável.

O LETA restante à realização do processo de recuperação da recuperação de coagulante permaneceu com características semelhantes às do lodo bruto, com pequenas reduções nos teores de umidade (53,85%) e matéria orgânica (9,98%), bem como na concentração dos óxidos como SiO_2 (35,730 %), P_2O_5 (0,550 %), SO_3

(0,091 %), Cl (0,310 %), K₂O (0,192 %), CaO (0,330 %), TiO₂ %, (1,672 %), MnO (0,156 %) e Fe₂O₃ (20,86 %), acompanhada por um aumento na concentração de Al₂O₃ (39,950 %).

Ademais, mesmo com a recuperação do coagulante presente no LETA, o lodo tratado permaneceu tóxico, demonstrando inclusive um aumento no percentual de efeito para 85,22% sobre a bactéria *Vibrio fischeri*.

Devido às mudanças das características do LETA tratado, estima-se o aumento da porcentagem de incorporação do LETA em concreto e cerâmica, uma vez que o tratamento por recuperação de coagulante da ETA permitiu a redução de aspectos, tais como, teor de umidade, matéria orgânica e de óxidos metálicos, que limitavam sua aplicação nesses métodos. Tal ocorrência não se aplicou para métodos como a incorporação em argamassa, uso como adsorvente para poluentes e aplicação em solos, uma vez que, a recuperação de coagulante do LETA não foi capaz de eximir do resíduo a presença de hidróxidos metálicos presentes e sua toxicidade, fatores pontuados como capazes de impactar negativamente as alternativas de tratamento mencionadas.

Portanto, o processo de recuperação de coagulante por via ácida se mostra promissor como método de aprimoramento do reaproveitamento do lodo da ETA. Além de potencialmente melhorar os processos de incorporação desse resíduo nas indústrias de cerâmica e concreto, ele gera um coagulante eficaz para o tratamento de efluentes, garantindo a destinação adequada do lodo e a geração de produtos a partir dele. No entanto, é importante conduzir estudos detalhados sobre cada uma das estratégias para destinação do lodo após a recuperação de coagulante, a fim de avaliar sua viabilidade técnica e econômica.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar análise quanto à presença de sulfato de alumínio no coagulante recuperado;
- Otimizar o processo de recuperação de coagulante do LETA de forma a possibilitar maior seletividade dos óxidos a serem solubilizados;
- Estudar a viabilidade da realização do processo de regeneração de coagulante a partir do LETA sem a realização de prévia secagem e calcinação;
- Realizar ensaios de tratabilidade fornecida pelo coagulante recuperado em efluentes alcalinos;
- Realizar testes de toxicidade do LETA com metodologias que reflitam as características dos locais onde estes resíduos são dispostos, como toxicidade em *Lactuca sativa*; e

- Realizar estudos específicos para cada uma das metodologias de reaproveitamento posterior à recuperação de coagulante, para melhor avaliação quanto à viabilidade técnica e econômica dos procedimentos.

REFERÊNCIAS

- ACHON, L. C.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, S. J. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. *Engenharia Saniária e Ambiental*. V. 18. N. 2. 2013.
- ACHON, L. C.; MEGDA, R. C.; SOARES, V. L. Propostas de Aproveitamento de Lodos Gerados em ETAs. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. E. 2003.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Simultaneous modelling of coagulant recovery and reuse by response surface methodology. *Journal of Environmental Management*. V. 285. N. 1. 2021.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. *Journal of Cleaner Production*. V.124. Pág. 1-13. 2016.
- ALBUQUERQUE, A. de M. A. Avaliação de metais e radionuclídeos em amostras de água e lodo de Estações de Tratamento de Água da região metropolitana do Recife. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Energia Nuclear Comissão Nacional de Energia Nuclear Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste. Recife/PE. 2013.
- ALMEIDA, I. S. Avaliação de toxicidade de efluentes industriais utilizando organismos de três níveis tróficos. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ. 2013.
- ALVARENGA, A. J. Avaliação da formação de subprodutos da cloração em água para consumo humano. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2010.
- AMARAL, do C. G. K. Correlação entre fator de toxicidade e parâmetros físico-químicos para efluentes domésticos tratados. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba/PR. 2012.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22. Ed. Washington, D.C. 2012.
- AMERICAN WATER WORK ASSOCIATION – AWWA. *Research foundation: Water treatment plant waste management*. Journal AWWA. Denver/EUA. 1987.

- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). Management: Water Treatment Plant Residuals. New York: American Society of Civil Engineers. Pág. 294. 1990.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). Research T & P Committee on Sludge Disposal. Water Treatmentplant Sludges - an update of the state of art. Journal American Water Works Association. V. 10. N. 70. Pág. 548-554. 1978.
- ANDRADE, F. C.; SILVA, M. S.; OLIVEIRA, C. de F. Gestão ambiental em saneamento: Uma Revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de ETA e seus impactos na qualidade das águas. IBEAS. V Congresso brasileiro de Gestão Ambiental. 2014.
- ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C.; PEGORINI, E. S. Projeto interdisciplinar de pesquisa sobre eutrofização de águas de abastecimento público na Bacia do Altíssimo Iguaçu: subprojeto estudo das relações entre produção e composição do lodo gerado na estação de tratamento de água com parâmetros ambientais do lago Iraí. FINEP CT HIDRO. Pág. 23. Curitiba/PR. 2003
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; HOPPEN, C.; TAMANINI, C. R.; NEVES, P. S. Produção, composição e constituição de lodo de estações de tratamento de água (ETA). RIMA, ABES. Pág. 29-48. 2006.
- ARAÚJO, de G. L. A. Otimização do processo de tratamento de água de abastecimento do município de Crateús-CE. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal do Ceará. Crateús/CE. 2021.
- ARAÚJO, de P. I. Obtenção e Caracterização de Adsorventes Oriundos de LETA com Potencial Aplicação à Remoção de H₂S. Proveniente de ETE. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Química e Biológica. Universidade de Brasília. Instituto de Química. Brasília/DF. 2019.
- ASFORA, K. V. Fluorescência de raios x por dispersão de energia aplicada à caraterização de tijolos e sítios históricos de Pernambuco. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Departamento de Energia Nuclear. Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE. 2010.
- ASHBY, M. F. Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier. 2013.
- ASSIS, R. L. Avaliação do Impacto em Corpos D'água Devido ao Lançamento de Resíduos de uma Estação de Tratamento de Água de Juiz de Fora - MG. Trabalho de Conclusão de Curso. Programa de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora/MG. 2014.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.004: Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.664. Águas - Determinação de resíduos (sólidos) - Método gravimétrico - Método de ensaio. 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15411-3: Ecotoxicologia aquática — Determinação do efeito inibitório de amostras aquosas sobre a emissão da bioluminescência de *Vibrio fischeri* (ensaio de bactéria luminescente). Rio de Janeiro/RJ. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15469: Ecotoxicologia — Coleta, preservação e preparo de amostras. Rio de Janeiro/RJ. 2021
- BABATUNDE, A.; ZHAO, Y. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: An international review of beneficial reuses. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. V. 37. N. 2. Pág. 129-64. 2007.
- BABATUNDE, A.O.; ZHAO, Y.Q.; YANG, Y.; KEARNEY, P. Reuse of dewatered aluminium-coagulated water treatment residual to immobilize phosphorus: Batch and column trials using a condensed phosphate. *Chem. Eng. J.* 136, Pág. 108- 115. 2008.
- BANET, T.; MASSEY, M. S.; ZOHAR, I.; LITAOR, M. I.; IPPOLITO, J. A. Assessing modified aluminum-based water treatment residuals as a plant-available phosphorus source. *Chemosphere*. V. 247. 2020.
- BARBOSA, R. M.; POVINELLI, J.; ROCHA, O.; ESPÍNDOLA, E. L. G. A. Toxicidade de Despejos (lodos) de Estações de Tratamento de Água à *daphnia similis* (ceadocera, crustacea). Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária XXVII. Porto Alegre/RS. 2000.
- BATISTA, I. F.; MICHELAN, G. S. de D. C.; JESUS, É. P. S. E.; NILIN, J. Potential contribution of water treatment plant (WTP) sludge to river pollution. *Scientia Plena*. V. 17. N. 10. 2021.
- BELLAVER, B. G. Influência da temperatura de calcinação da casca de aveia para utilização como material cimentício suplementar. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre/RS. 2019.
- BELMONTE, P. dos E. Espectrometria por fluorescência de raios x por reflexão total: um estudo simulado utilizando o método de Monte Carlo. Tese de mestrado. Programa de Pós-

graduação de ciências em engenharia nuclear. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro/RJ. 2005.

BENLALLA, A.; ELMOUSSAOUITI, M.; DAHOU, M.; ASSAFI, M. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Applied Clay Science*. V. 118. P. 171-177. 2015.

BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D. da M. Lodos Produzidos na Estações de Tratamento de Água (ETAs): Desidratação em Leitos de Secagem e Codisposição em Aterros Sanitários. *RiMa. ABES/PROSAB*. Pág. 215 – 244. 2001.

BILIATTO, M. J. R.; CECCHINI JUNIOR, V. Métodos para tratamento e potencial reutilização do lodo oriundo de Estações de Tratamento de Água. *Revista Científica Multidisciplinar (RECIMA21)*. V. 3. N.10. 2022.

BISHOP, M. M.; ROLAN, A. T.; BAILEY, T. L.; CORNWELL, D. A. A. T. Testing of alum recovery for solids reduction and reuse. *Journal AWWA*. V.6. Pág. 76-83. 1987.

BITENCOURT, G.A.; APOLARI, J. P.; SOUZA, de G.; MONTEIRO, R. T. R. Lodo gerado em Estação de Tratamento de Água: Avaliação preliminar da toxicidade em plantas de milho. *Scientia Plena*. V. 16. N. 12. Pág. 11. 2020.

BOTERO, W. G. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Química. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química de Araraquara. 2008.

BOTERO, W.G.; SANTOS, A.; OLIVEIRA, L.C.; ROCHA, J.C. Caracterização de lodo gerado em Estações de Tratamento de Água: perspectivas de aplicação agrícola. *Química Nova*. V. 32. N. 8. Pág. 2018-2022. 2009.

BRAGA, P. F. Avaliação de desempenho de uma Estação de Tratamento de Água do município de Juiz de Fora – MG. Trabalho Final de Curso. Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Juiz de Fora/MG. 2014.

BRANDÃO, A.; ANDRADE, C.; RODRIGUES, C.; CAUX, L.; VELOSO, M. Estudo de Viabilidade para aplicação de lodo da Estação de Tratamento de Água e Agregado siderúrgico em estradas não pavimentadas como base estabilizadora de solo. *O Papel*. Vol. 83. N. 9. Pág. 59 – 73. 2022.

BRANDÃO, J.B. Recuperação de coagulantes através de solubilização pela via ácida de lodos de diversas ETAs no ES com posterior Reutilização no tratamento de águas para abastecimento e águas residuárias. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. 1998.

BRASIL. 1997. Lei n. 9433 de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 9 jan. 1997. Brasília/DF. 1997.

BRASIL. 2021. 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. Publicado no Diário Oficial da União em 07 de mai de 2021. Brasília/DF. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, 18 mar 2005. Brasília/DF. 2005.

BRASIL. Lei Nº9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Lei dos crimes ambientais. Presidência da república, Casa civil, Brasília, 13 fev, 1998.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Publicado no Diário Oficial da União em 03 de ago de 2010. Brasília/DF. 2010.

BRASIL. Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 2008. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Diário Oficial da União. 13 fev. 1998. Brasília/DF. 2008.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Publicado no Diário Oficial da União em 16 de mai 2011. Brasília/DF. 2011.

CABRAL JÚNIOR, C. M.; AZVEDO, de M. B. P.; CUCHIERATO, G.; MOTTA, M. F. J. Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo: Parte I – introdução e a indústria de cerâmica vermelha. Cerâmica Industrial. V. 24. N. 1. 2019.

CABRAL, L. A. V. Avaliação da incorporação do lodo da ETA UFV na manufatura de tijolos de solo-cimento. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa/MG. 2013.

CAMARGO, O. de N. C. Avaliação do lodo amarelo de ETA para incorporação em cerâmica vermelha. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais.

- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF. Campos dos Goytacazes/RJ. 2014.
- CARDOSO, M. Efeito do tipo de coagulante na produção de lodo de Estação de Tratamento de Água. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC. 2003.
- CASTÃO, E.S.; CASTRO, A. L. de. MESQUITA F., A.; ROCHA, G. A. da. SANTOS, S. R. dos. Reuso de lodo de estação de tratamento de água (ETA) na fabricação de tijolos cerâmicos. Congresso Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - FENASAN. 2017.
- CHEN, Y.; LI, H.; WANG, Z.; LI, H.; TAO, T.; ZUO, Y. Photodegradation of selected b-blockers in aqueous fulvic acid solutions: Kinetics, mechanism, and product analysis. *Water Research*. V. 46. N. 9. Pág. 2965–2972. 2012.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Ficha de Informação de Produto Químico: Ácido sulfúrico. 2015. Disponível em: <https://www.santos.sp.gov.br/static/files_www/conteudo/DadosAbertos/FISPQ%20%C3%81cido%20sulf%C3%BArico.pdf> Acesso em 27 de dezembro de 2023.
- CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos de Estação de Tratamento de Água (ETA). In: ANDREOLI, C.V. (coord.) Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final. RiMa / ABES / PROSAB. 2001.
- CORNWELL, D. A. Water treatment plant residuals. In: AWWA. *Water Quality and Treatment*. 5ª ed. Denver, USA:AWWA. 1999.
- COSTA, da M. V.; SILVA, da C. D.; LYRA, C. W. M. Incorporação do Lodo de Estação de Tratamento de Água em Concretos e Argamassas. VI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências – CONAPESC. 2022.
- COSTA, M.; LIRA, H.; RIBEIRO, P.; FREITAS, N. Avaliação do efeito da temperatura de calcinação nas características estruturais e morfológicas de aluminas sintetizadas pelo método Pechini. *Revista Matéria*. V. 19. N. 2. 2014.
- COUTO, P. M. V. Desenvolvimento e Caracterização de Materiais Cerâmicos Derivados do Processamento dos Resíduos de Estação de Tratamento de Água. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ. 2011.
- CREMADES, L.V.; CUSIDÓ, J. A.; ARTEAGA, F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *Journal of Cleaner Production*. V. 10. Pág.1071-1080. 2018.

DANDOLINI, I. Reciclagem do lodo de estação de tratamento de água produção de coagulante por lixiviação ácida. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Escola De Engenharia, Universidade Federal Do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS. 2014.

DANDOLINI, I. Reciclagem do lodo de estação de tratamento de água: produção de coagulante por lixiviação ácida. 2014. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal Do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS. 2014.

DAYTON, E. A.; BASTA, N.T. Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute. *Water Environment Research*. V. 73. N. 1. Pág. 52-57. 2001.

DEMATOS, M.; COSTA, J. G.; FONSECA, D. F.; BRAGA, J. P. C.; JANSEN, W. Redução do volume de lodo gerado em estações de tratamento de água: proposta de recuperação do coagulante pelo processo de acidificação no sistema Rio Manso. 21º congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental. 2001.

DIAS, R.; SOUSA, D.; BERNARDO, M.; MATOS, I.; FONSECA, I.; VALE CARDOSO, V.; NEVES CARNEIRO, R.; SILVA, S.; FONTES, P.; DAAM, M. A.; MAURÍCIO, R. Study of the Potential of Water Treatment Sludges in the Removal of Emerging Pollutants. *Molecules*. V. 26. 2021.

ECHART, C. L.; MOLINA, C. S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. *Ciência Rural*. V. 31. Nº 3. 2001.

ELIE, S. de D. H. C. Incorporação de resíduos de lodo da ETA no tijolo de solo – Cimento: uma alternativa sustentável. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS. 2023.

ELIE, S. de H. C. Incorporação de resíduos de lodo da ETA no tijolo de solo – Cimento: uma alternativa sustentável. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Departamento de Estruturas e Construção Civil. Santa Maria/RS. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Embrapa Solos: Sistema brasileiro de classificação de solos. Disponível em:

<<https://www.embrapa.br/solos/sibcs/horizontes-diagnostics>> Acesso em 27 de dezembro de 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Mapeamento geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu, escala 1:100.000. Boletim de pesquisa e desenvolvimento. N. 314. Disponível em:

<<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/100354/1/bolpd-314.pdf>> Acesso em 16 de outubro de 2023. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Solos brasileiros: Os solos do Brasil. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>> Acesso em 16 de outubro de 2023. 2023.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Stabilization/solidification of CERCLA and RCRA wastes. EPA 625/6-89/022. Cincinnati, Ohio. 1989.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Water Treatment Manuals: Coagulation, flocculation & Clarification. Environmental Protection Agency. Ireland/UE. 2002.

FANGMEIER, M.; HOEHNE, L. Avaliação de carvão ativado e de sílica como adsorventes para amostras com corantes e com sódio. Revista Destaques Acadêmicos. V. 4. N. 4. Pág.41-49. 2012.

FERNANDES, L. F.; SOUSA, A. C. Estação de Tratamento de Água em escala Piloto. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia/GO. 2020.

FERNANDES, P. E. Análise Comparativa de um Novo Conceito para Unidades de Desaguamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água: Estudo de Caso de Olímpia/Sp. Trabalho de Conclusão de Curso. Programa de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC. 2014.

FERRANTI, E. M. Desidratação do lodo de Estação de Tratamento de Água. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 2005.

FERRARI, N. T. Incorporação do lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) do município de Rio Claro-SP, na argila, para produção de cerâmica vermelha. Monografia. Bacharelado em Engenharia Ambiental. Instituto de geociências e ciências exatas. Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rio Claro/SP. 2007.

FERREIRA, G.; BARBOSA, K. T.; QUADRO, M. S.; TRINDADE, G. H.; BELTRAME, R.; MORSELLI, L. B. G. A.; ANDREAZZA, R. Emprego do lodo de uma estação de tratamento de água beneficiado como material suplementar ao cimento Portland. Engenharia Sanitária E Ambiental. V. 27. N 4. 2022.

FERREIRA, O. G. Abordagem Sistêmica do uso de lodo de ETE e ETA em Pavimentação. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal de São Carlos. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. São Carlos/SP. 2021.

- FIGUEIREDO NETO, A. Use of sludge treatment plant water in the production of tree seedlings to occurrence in the savanna. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharias. Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO. 2011.
- FIGUEIREDO, de A. J. G. Avaliação da presença de alumínio na água do sistema de abastecimento público da cidade de João Pessoa e Grande João Pessoa no estado da Paraíba e os possíveis riscos para a saúde da população. Dissertação de mestrado. Programa Regional de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2004.
- FONTANA, A.; TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; TEIXEIRA, W. G. Manual de Métodos de Análise de Solo. Embrapa Solos. Pág. 573. 2017.
- FORGIARINI, L. A. A caracterização mineralógica, morfológica e físico-química de lodo de Estação de Tratamento De Água de indústria de alimentos. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2019.
- FRANCISCO, A. A.; POHLMANN, M. H. P.; FERREIRA, A. M. Tratamento convencional de águas para abastecimento humano: uma abordagem teórica dos processos envolvidos e dos indicadores de referência. Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais (IBEAS).II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. 2011.
- FRANCO, S. E. Avaliação da influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em Estações de Tratamento de Água. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto/MG. 2009.
- FULTON, G.P. Recover alum to reduce waste-disposal costs. In: Processing Water treatment Plant Sludge. AWWA. P103-118. 1974.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). Manual Prático de Análise de Água. 4ª ed. Brasília/DF. 2013.
- GASTALDINI, A. L. G.; HENGEN, M. F.; GASTALDINI, M. C. C.; AMARAL, do F. D.; ANTOLINI, M. B.; COLETTI, T. The use of water treatment plant sludge ashes as a mineral addition. Construction and Building Materials. V. 94. Pág. 513–520. 2015.
- GHD. Smart Water Fund: 100S-42 Alum Sludge Reuse Investigation. Working Technical Report. Disponível em: <<https://water360.com.au/smart-water-fund/investigation-of-alum-recycling-and-reuse/>> Acesso em 06 de novembro de 2023. 2015.
- GHELLER, B. M. Estabilização e solidificação de resíduos de ETA em matrizes de concreto. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Apucarana/PR. 2021.

- GHIZONI, S.G. Fabricação de pastilhas cerâmicas com lodo proveniente de Estação de Tratamento de Água: estudo de caso, ETA Pato Branco, Paraná. Trabalho de Conclusão de Curso. Programa de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná/PR. 2013.
- GOMES, S.C.; ZHOU, J.L.; LI, W.; LONG, G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: a review. *Resources, Conservation and Recycling*. V. 145, p. 148-159. 2019.
- GUILARDUCI, S. V. V.; MESQUITA, de P. J.; MARTELLI, B. P.; GORGULHO, F. de H. Adsorção de fenol sobre carvão ativado em meio alcalino. *Química Nova*. V.29. N. 6. Pág. 1226 – 1232. 2006.
- GUIMARÃES, N. C. Regeneração de coagulante a partir da acidificação de resíduos gerados na estação de tratamento de água do Rio Manso. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2005.
- HE, H.; LI, Y.; HE, L. F. Aluminum toxicity and tolerance in Solanaceae plants. *South African Journal of Botany*. V. 123. Pág. 23 – 29. 2019.
- HENGEN, F. M. Caracterização de cinza de lodo de ETA para uso no concreto – (resistência a compressão axial). Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS. 2014.
- HIGASHI, A. J. R.; CAMARGO, DE C. M. I.; BOSCOV, G. E. M. Características Químicas do Lodo da ETA de Cubatão, São Paulo. 1º Encontro Nacional de lodo de Estação de Tratamento de Água: Conexões para inovação de tecnológica. P. 18 – 20. 2021.
- HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. Co-disposição de lodo centrifugado de estação de tratamento de água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. *Cerâmica*. V. 51. N. 318. Pág. 85-95. 2005.
- ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON. V. 1. 2011.
- ISHIKAWA, S.; UEDA, N.; OKUMURA, Y.; IIDA, Y.; BABA, K. Recovery of coagulant from water supply plant sludge and its effect on clarification. *Mater Cycles Waste Manager*. V.9. Pág. 167-172. 2007.
- JAMSHIDI, A.; MEHRDADI, N.; JAMSHIDI, M. Application of Sewage Dry Sludge as Fine Aggregate in Concrete. *Journal of Environmental Studies*. V. 37. N. 59. 2011.
- JOVELINO, R. J.; BRITO, de F. L. A.; MUNIZ, S. da C. A.; SILVA, da P. P. Estabilização/Solidificação: caracterização, classificação e aplicação no tratamento e

- gerenciamento de resíduos sólidos de laboratórios químicos. *Holos Environment*. V. 20. N. 04. Pág. 539-558. 2020.
- JULIO, de M.; SANTOS, dos O. N. M.; OROSKI I. F. Regeneração por Via Ácida do Coagulante Presente no Lodo da Estação de Tratamento de Água Pitangui Operada Pela Sanepar de Ponta Grossa/Pr. *Revista de Engenharia e Tecnologia*. V. 1. N. 1. Pág. 14 a 27. 2009.
- KATAYAMA, V.T. Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: Uma análise crítica. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012.
- KEELEY, J.; JARVIS, P.; JUDD, S. J. Coagulant recovery from water treatment residuals: a review of applicable technologies. *Crit. Rev. Env. Sci. Tec*. V. 44. N. 24. Pág. 2675-2719. 2014.
- KEELEY, J.; JARVIS, P.; SMITH, A. D.; JUDD, S. J. Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment. *Water Research*. V.88. Pág. 502-509. 2016.
- KIM, J. G.; KIM, J. H.; MOON, H.; CHON, C.; AHN, J.S. Removal capacity of water plant alum sludge for phosphorus in aqueous solution. *Chem. Spec. Bioavailab*. V. 14. Pág. 67-73. 2002.
- KLEEMANN, N.; TORRES, D. P.; RIBEIRO, A.S.; BAMBERG, A. L. Cold finger with semi closed reflux system for sample preparation aiming at Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, V and Zn determination in Drinking Water Treatment Sludge by MIP OES. *Analytica Chimica Acta*. V. 1096. Pág. 9-17. 2020.
- KLOC, A.; LAIRD, Y. Avaliação do impacto de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) na qualidade das águas do arroio Pilão de Pedra. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Ponta Grossa/PR. 2017.
- KYZAS, G. Z.; FU, J.; LAZARIDISS, N. K.; BIKIARIS, D. N.; MATIS.K. A. New approaches on the removal of pharmaceuticals from wastewaters with adsorbent materials. *Journal of Molecular Liquids*. V. 209. Pág. 87-97. 2015.
- LAURINDO, S. S.; ANTUNES, P. G. E.; SAVI, E. A.; SPECK, A. J.; PIVA, H. J. Estudo da adição do lodo de ETA - Estação de Tratamento de água em argamassas de revestimento. *Revista Mix Sustentável*. V.6. N.4. Pág. 19-28. 2020.
- LIBÂNIO, M. Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água. Átomo. 3ª. ed. 496 p. Campinas, São Paulo. 2010.

- LIESENFELD, T. B.; BALZ, A.; DAHMER, V. L. Comparação das possíveis destinações do Lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) na construção Civil. *Civil Construction*. Bioeconomia: Diversidade e Riqueza para o desenvolvimento sustentável. 2019.
- LIMA, M. R.; SEIBEL, N. F.; KATO, T. Importância da difração de raios X e colorimetria em alimentos. In: *AVANÇOS em Ciência e Tecnologia de Alimentos*. [S. l.]: Editora Científica Digital. V. 6. Cap. 15. Pág. 219-235. 2022.
- LUCON, M. I. Uso agrícola do lodo gerado em Estação de Tratamento de Água. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Área de Concentração em Gestão de Recursos Agroambientais. Instituto Agronômico. Campinas/SP. 2012.
- MA, X. Y.; WANG, X. C.; LIU, Y. J. Study of the variation of ecotoxicity at different stages of domestic wastewater treatment using *Vibrio-qinghaiensis* sp.- Q67. *Journal of Hazardous Materials*. V. 190. N. 1-3. Pág. 100-105. 2011.
- MACHADO, R. L. A. Avaliação do uso de lodo do tratamento físico-químico como auxiliar de coagulação para tratamento de água residuária de cervejaria. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina/PR. 2022.
- MANGUEIRA, V. S. E. Produção de carvão ativado a partir de endocarpo de coco da baía (*Cocos nucifera*) aplicado ao processo de adsorção do herbicida metribuzin. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa/PB. 2014.
- MANSOUR, M.S.M.; ABDEL-SHAFY, H.I.; AZAB, W.I.M.E. Innovative reuse of drinking water sludge for the treatment of petroleum produced water to enhance oil recovery. *Egyptian Journal of Petroleum*. V. 29. N. 2. Pág. 163-169. 2020.
- MARASCHIN, M. Agregação helicoidal e adensamento por filtração de lodo de uma Estação de Tratamento de Água. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de tecnologia. Santa Maria/RS. 2018.
- MARCHESAN, L.; CARISSIMI, E.; GRAEPIN, C.; BRACHER, H. G. Influência do pH inicial no tratamento de água por eletrocoagulação-flotação. *Revista Brasileira de Iniciação Científica (RBIC)*. IFSP Itapetininga. V.8,. E. 21046. Pág. 1-11. 2021.
- MARGEM, J. I. Caracterização e Incorporação de Lodo de Decantação de Estação de Tratamento de Água (E. T. A.) em Cerâmica Vermelha. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes/RJ. 2008.
- MARTINS, S. D. Produção e caracterização de material adsorvente a partir de lodo de Estação de Tratamento de Água para a remoção de disruptores endócrinos. Dissertação de

- mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” Faculdade de Engenharia. Ilha Solteira/SP. 2021.
- MAZZA, V. B. Otimização de processo para produção do coagulante sulfato férrico pela oxidação de sulfato ferroso com peróxido de hidrogênio. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ. 2019.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais (Ibracon). 2008.
- MENESES, de A. C. L. S. M. Presença de alumínio no efluente descartável gerado numa estação de tratamento de água e suas implicações na qualidade da água do corpo receptor. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal da Paraíba - PRODEMA/UFPB. João Pessoa/PB. 2005.
- MENEZES, J. P. C.; BITTENCOURT, P. R.; FARIAS, S. de M.; BELLO, P. I.; FIA, R.; OLIVEIRA, de C. F. L. Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. Engenharia Sanitária e Ambiental. V. 21. N. 3. Pág. 519–534. 2016.
- MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. O estado-da-arte sobre o uso de resíduos como matérias primas cerâmicas alternativas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 6. N. 2. Pág. 303-313. 2002.
- MINAS GERAIS. Decreto nº 45.181, de 25 de setembro de 2009. Regulamenta a Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009, e dá outras providências. Publicado no Diário do Executivo de Minas Gerais em 26 de set de 2009. Belo Horizonte/MG. 2009.
- MINAS GERAIS. Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos. Publicada no Diário do Executivo de Minas Gerais em 13 de jan de 2009. Belo Horizonte/MG. 2009.
- MINHO, U. G. Estudo da modelagem da adsorção em batelada do fármaco nimesulida em solução aquosa utilizando carvão ativado como adsorvente. Trabalho de Conclusão de Curso II. Bacharelado em Engenharia Química. Universidade Federal do Pampa. Bagé/RS. 2023.
- MONTEIRO, S. N.; ALEXANDRE, S. da I. J., MARGEM, I. J., RODRIGUEZ, S. J. R. Incorporation of sludge waste from water treatment. Construction and Building Materials. V. 22. P.1281-1287. 2007.
- MORAES, de M. S.; MOREIRA, D. A. da S.; SANTOS, J. T. de L. A.; OLIVEIRA, de A. P.; SALGADO, R. L. Avaliação microbiológica de fontes de água de escolas públicas e privadas

- da cidade de Santa Rita (PB). *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*. V. 23. N. 3. Pág. 431–435. 2018.
- MORAES, L. H. L.; MAZZA, C. F. Reações químicas em lodo de ETA para fins de aproveitamento. *Anais. 7º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade (SIGABI)*. Pág. 232-235. 2018.
- MORSELLI, L. B. G. A.; CARMO, L. A. G.; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. *Scientia Plena*. V. 18. N. 05. 2022.
- MOTTA SOBRINHO; da A. M.; TAVARES, R. G.; ARRUDA, V. C. M.; CORREA, M. M.; PEREIRA, L. J. R. Geração, tratamento e disposição final dos resíduos das estações de tratamento de água do estado de Pernambuco. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. V. 24. N. 4. Pág. 761-771. 2019.
- MUCHIMBANE, A. B. D. A. Avaliação da influência da disposição de lodo gerado por estação de tratamento de água (ETA) sobre a qualidade do solo e da água subterrânea na área da barragem Taiacupeba, Suzano, SP. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Recursos minerais e Hidrogeologia. Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-04052016-113822/>> Acesso em 15 de outubro de 2023. 2016.
- MÜNCH, A. P.; ODISI, F. Remoção de Umidade de Lodo Têxtil por Secagem Térmica. *Revista UNIFEBE. Edição Tecnologias: Engenharia, Produção e Construção*. V. 1. N. 27. 2022.
- MUNIZ, G.L. Qualidade da água do ribeirão São Bartolomeu avaliada pelo índice de qualidade da água em ponto de captação para abastecimento no período seco. *Revista HOLOS*. Ano 35. V.7. E. 5579. 2019.
- MUTAIRI, N. Z. Coagulant toxicity and effectiveness in a slaughterhouse wastewater treatment plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. V. 65. N. 1. Pág. 74-83. 2006.
- NAIR, T. A; AHAMMED, M. M. Influence of sludge characteristics on coagulant recovery from water treatment sludge: a preliminary study. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. V. 19. Pág. 1228–1234. 2017.
- NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. *Adsorção: Aspectos Teóricos e Aplicações Ambientais*. Fortaleza: Imprensa Universitária. 2014.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman Editora. 2013.

- OLIVEIRA de, C. R. Morfometria computacional de órgãos de frangos de corte submetidos a duas dietas distintas: suplementação mineral quelada versus suplementação mineral tradicional. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Bioinformática. Universidade de São Paulo. São Paulo/SP. 2008.
- OLIVEIRA, C. de F. Reaproveitamento e disposição final do lodo de estações de tratamento de água: estudo de caso da ETA de Itaguara - Minas Gerais. Monografia. Programa de Especialização em Saneamento e Meio Ambiente. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2011.
- OLIVEIRA, de M. F.; MALUTTA, S.; KRAUSE, V. R.; GENTIL, B. B.; SENFF, L. Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com o uso do lodo da estação de tratamento de água. *Brazilian Journal of Development*. V. 9. N. 8. Pág. 23496–23511. 2023.
- OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Cerâmica*. V. 50. Pág.324-330. 2004.
- PAIXÃO, C. C. L. Aproveitamento de Lodo De Estação de Tratamento de Água em Cerâmica Vermelha. Tese de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Engenharia dos Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto/MG. 2005.
- PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENORIO, J. A. S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. *Cerâmica*. Pág. 63-76. 2008.
- PEDRETTI, A. Avaliação do potencial de coagulante recuperado de lodo de ETA para uso em águas de baixa e elevada turbidez. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria. 2022.
- PEDRETTI, A.; MEDEIROS, R. C. Avaliação do potencial de coagulante recuperado de lodo de estação de tratamento de água para uso em águas de baixa e elevada turbidez. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*. V. 27. N. 6. Pág. 1177–1188. 2022.
- PEDROTTI, A.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M.; CARVALHO, R. Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. V. 27. N. 1. Pág. 1-9. 2003.
- PESSOA JÚNIOR, G. A. W. Incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água EM tijolo de argila cozida. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal do Amazonas. Manaus/AM. 2019.

- PIANTÁ, C.A.V. Empregos de coagulantes orgânicos naturais como alternativa ao uso do sulfato de alumínio no tratamento de água. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/ RS. 2008.
- PINHEIRO, B. C. A.; ESTEVÃO, G. M.; SOUZA, D. P. Lodo proveniente da estação de tratamento de água do município de Leopoldina, MG, para aproveitamento na indústria de cerâmica vermelha – Parte I: caracterização do lodo. *Revista Matéria*. V. 19. N. 3. Pág. 204-211. 2014.
- PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A.; BARON, O. Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba/PR. Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária Ambiental. 2003.
- RAMIREZ, K.G. Viabilidade do aproveitamento de resíduo de estação de tratamento de água (ETA) na confecção de concretos. Dissertação de Mestrado em Tecnologias Ambientais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira- PR. 2015.
- RANKOVIĆ, B.; SAGATOVA, A.; VUJČIĆ, I.; MAŠIĆ, S.; VELJOVIĆ, Đ.; PAVIĆEVIĆ, V.; KAMBEROVIĆ, Z. Utilization of gamma and e-beam irradiation in the treatment of waste sludge from a drinking water treatment plant. *Radiation Physics and Chemistry*. V. 177. 2020.
- REALI, M. A. P. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. *Noções Gerais de Tratamento de Disposição Final de Lodos de ETA*. Rio de Janeiro: ABES / PROSAB, 1999. Pág. 21-39. 1999.
- REIS, E. L. T.; COTRIM, M.; RODRIGUES, C.; PIRES, M. A. F.; BELTRAME FILHO, O.; CUTOLO, S. A.; ROCHA, S. M. Identificação da influência do descarte de lodo de Estações de Tratamento de Água. *Química Nova*. V. 30. 2007.
- RIBEIRO A. C. Y. Remoção de fósforo do esgoto tratado utilizando lodo de ETA e casca triturada de ovo como sorventes. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos Aplicados em Sistemas Agrícolas. Universidade Federal de Lavras. Lavras/MG. 2017.
- RICHTER, C.A. Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA. 2001.
- RITTER, T. M. Estudo do Lodo de ETA contendo alumínio para a adsorção de fósforo de esgotos sanitários previamente tratados em wetlands construídos. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC. 2020.

- RODRIGUES, B. C. Utilização de lodo de Estação de Tratamento de Água como matéria-prima na produção de cerâmica vermelha: efeitos da calcinação e moagem. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE. 2023.
- RODRIGUES, L. L.; BLANCO, C. J. C. Vazão de pico em uma bacia hidrográfica com diferentes níveis de urbanização em Santarém/PA. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*. V.9. N. 7. Pág. 62-75. 2018.
- RODRIGUES, V. B. Otimização de processo para produção do coagulante sulfato férrico pela oxidação de sulfato ferroso com peróxido de hidrogênio. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- ROQUE, A.; MONTALVAN, T. L. E; BOSCOV, G. E. M. Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da Estação de Tratamento de Água de Taiapuê. *Geotecnia*. Vº 151. N. 3. Pag. 33-52. 2021.
- ROSA, G. C. A. Estado nutricional relativo ao zinco e alumínio e sua correlação com o desenvolvimento cognitivo em crianças e adolescentes com síndrome de down da cidade de Campo Grande - MS. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em saúde e Desenvolvimento. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. 2015.
- SALES, A.; SOUZA, R. de F. Concretos e Argamassas Reciclados com Adição Conjunta e Exclusiva de LETAs e RCDs. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Materiais. V. 17. 2006.
- SANTANA, de E. J. Estudo do lodo da ETA Agrestina Nova para adição em componentes cerâmicos e na obtenção de argilas aniônicas. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE. 2019.
- SANTORE, R. C.; RYAN, A. C.; KROGLUND, F.; RODRIGUES, S. P. H.; STUBBLEFIELD, W. A.; CARDWELL, A. S. Development and application of a biotic ligand model for predicting the chronic toxicity of dissolved and precipitated aluminum to aquatic organisms. *Environ Toxicol Chem*. V. 37. N. 1. 2018.
- SANTOS, dos E. J. Aproveitamento do lodo de ETA: biodegradabilidade e implicações ecotoxicológicas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Biologia celular, molecular e Microbiologia. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro/SP. 2023.
- SANTOS, dos P. F. Caracterização e estudo da incorporação do lodo de ETA em argamassa. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). 2018.

- SANTOS, dos R. A. L.; MICHELAN, S. G. de C. G.; JESUS, de M. T. Verificação da produção de lodo de ETA em função da quantidade e da qualidade da água. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas – BIOENG.* V. 15. N. 2. Pág. 235-258. 2021.
- SANTOS, S. B. R.; ROCHA, O.; POVINELLI, J. Evaluation of water treatment sludges toxicity using the Daphnia bioassay. *Water Research.* V. 39. N. 16. Pág. 3909-3917. 2005.
- SÁTIRO, R. J.; ALBUQUERQUE, C. da V. M.; RAMOS, O. de R.; CARTAXO, B. S. da A.; SILVA, e P. de C. C. M.; SILVA, da S. F. Avaliação do tratamento de água de abastecimento do semiárido em sistema convencional seguido de adsorção de carvão ativado granular. *Brazilian Journal of Development.* V.6. N. 8. Pág. 62482-62494. 2020.
- SHAH, S. A. R.; MAHMOOD, Z.; NISAR, A.; AAMIR, M.; FARID, A.; WASEEM M. Compaction performance analysis of alum sludge waste modified soil. *Const Build Mater.* 2020.
- SILVA JÚNIOR, da P. G.; VICENTE, O. G.; TREVISAN F. M. Utilização de escória de alumínio como adição na argamassa: análise no estado fresco e endurecido. *Revista científica.* 2019.
- SILVA, A. L. Caracterização mineralógica por difração de raios X e determinação de terras raras por icp-ms de rochas da Região Sul da Bahia. *Dissertação de Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG.* 2013.
- SILVA, E. T.; MELO, W. J.; TEIXEIRA, S. T. Chemical attributes of a degraded soil after application of water treatment sludges. *Scientia Agricola.* V. 62. N. 6. 2005.
- SILVA, J. S. CHOQUE FERNANDEZ, O.J., COSTA, J.H.B., FIGUEIRA, B.A., LUZ, P. T. S., NOGUEIRA, M.H.P. Caracterização físico-química de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) com tratamento térmico a 650°C, e suas aplicações. *XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa.* 2019.
- SMIRDELE, J. J. Estudo de viabilidade para destinação final do lodo da ETA Laranjal/RJ. *Projeto de Graduação. Programa de graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro/RJ.* 2016.
- SODRÉ, F. F. Fontes difusas de poluição da água: características e métodos de controle. *Artigos Temáticos do AQQUA.* 2012.
- SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In *Fertilidade do solo.* eds. Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B. & Neves, J.C.L. Sbc. pp. 205-274. 2007.

- SOUZA de, M. L.; SCALIZE, S. P. Resistência específica do material sedimentado em ensaio de Jar Test, obtido com a adição de lodo de Estação de Tratamento de Água. Revista Brasileira de Engenharia Química. V. 29. N. 3.2013.
- SOUZA, C. D. R.; FERREIRA, I. B. P.; SILVA, O. C.; VERONEZE, G. M. Análise comparativa do cloreto férrico e sulfato de alumínio utilizado no processo de tratamento da água do Rio Solimões. Brazilian Journal of Development. V. 8. N. 2. Pág. 13056-13070. 2022.
- SOUZA, F. G. C.; CORDEIRO, J. S. Quantificação de sólidos em estação de tratamento de água convencional de ciclo completo com decantador de alta taxa. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. V. 23. 2005.
- SOUZA, F.R. Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto. Tese de Doutorado. Programa de Pós graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. São Carlos/SP. 2010.
- SOUZA, R. I. B.; SEGANTINI, A. A. S; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V.12. N.2. Pág. 205-212. 2008.
- SOUZA, V. P.; TOLEDO, R.; HOLANDA, J. N. F.; VARGAS, H.; FARIA Jr., R. T. Análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de água. Revista Cerâmica. V. 54. Pág. 351-355.
- SOUZA, V. P.; TOLEDO, R.; HOLANDA, J. N. F.; VARGAS, H.; FARIA JÚNIOR, R. T. Análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de água. Revista Cerâmica. V. 54. Pág. 351-355. 2008.
- STOLTE, S.; STEUDT, S.; AREITIOAURTENA, O.; PAGANO, F.; THÖMING, J.; STEPNOWSKI, P.; IGARTUA, A. Ionic liquids as lubricants or lubrication additives: An ecotoxicity and biodegradability assessment. Chemosphere. V. 89. N. 9. Pág. 1135-1141. 2012.
- STOMINSKY, P. M.; BORTOLOTTI, S. dos L. V.; ANDREAZZA, J. K. Estudo da remoção de desreguladores endócrinos utilizando adsorção como método de tratamento de água. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Engenharia Química. Centro Universitário SOCIESC. Joinville/SC. 2022.
- TAFAREL, N. F.; MACIOSKI, G.; CARVALHO, K. Q. Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. Matéria. V. 21. N. 4. Pág. 974-986. 2016.

- TAKADA, C. R. S.; SERRA, J. C. V.; MAFRA, W. A.; BORBA, K. C. A. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água no município de Palmas – TO. *Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal*. V.10. N. 2. Pág. 157-165. 2013.
- TANTAWY, M. A. Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. *Materials Research Bulletin*. V. 61. Pág. 415–421. 2015.
- TARTARI, R. Incorporação de lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha. 124f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Paraná. 2008.
- TARTARI, R.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A.; DÍAZ-MORA, N. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha. *Revista Cerâmica*, V. 57. N. 344. 2011.
- TAVARES, G. R. Atenuação do alumínio do resíduo de Estações de Tratamento de água por vermicompostagem e adsorção. Tese de doutorado. Programa de Pós -Graduação em Engenharia Civil. Cidade Universitária. Recife/PE. 2016.
- TAVARES, G. R.; SOBRINHO, M. da A. M.; PEREIRA, R. J. L.; CORREA, M. M.; ARRUDA, de M. C. V.; MELO, de C. R. R. Avaliação da toxicidade do lodo de Estação de Tratamento de Água e Esgoto, antes e após vermicompostagem, usando teste de germinação com semente de alface (*Lactuca sativa*). *Revista DAE*. N. 218. V. 67. Pág. 156-167. 2019.
- TEIXEIRA, J. M. M. Estudo da dosagem de coagulante natural no tratamento de água com elevada carga de sólidos e turbidez. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Sanitária. Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia. Universidade Federal do Amazonas - UFAM. 2022.
- TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. de; SOUZA, N. R. de; ALÉSSIO, P. E.; SANTOS G. T. A. Efeito da adição de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. *Cerâmica*. V.52. N. 324. Pág. 215 a 220. 2006.
- TEIXEIRA, S. T.; MELO, W. J.; SILVA, E. T. da. Aplicação de lodo da estação de tratamento de água em solo degradado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília. V. 40. N. 1. 2005.
- TOLEDO, de F. S. H. S., VENTURIN, N., DIAS, C. T. O uso de biossólidos no setor florestal. *Enciclopédia biosfera*. Centro Científico Conhecer. Goiânia. V.8. N.15. Pág. 2275 – 2294. 2012.

- TSUTIYA, T. M.; HIRATA, Y. A. Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária E Ambiental. V. 21. 2001.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE JATAÍ - UFJ. Licenciatura e física, regional Jataí: Fluorescência de Raios-X. Disponível em: <<https://fisica.jatai.ufg.br/p/19497-fluorescencia-de-raios-x>> Acesso em 27 de dezembro de 2023.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV). Programa de pós-graduação em engenharia civil: Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental. Disponível em: <<https://posengenhariacivil.ufv.br/laboratorio-de-engenharia-sanitaria-e-ambiental/>> Acesso em 15 de outubro de 2023. 2020.
- URBAN, C. R.; ISAAC, L. de R.; MORITA, M. D. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. Revista DAE. V. 67. N. 219. 2019.
- VERRELLI, D.I. Drinking Water Treatment Sludge Production and Dewaterability. Tese (PhD). Universidade de Melbourne. 2008.
- VILELA, T. L. R. Avaliação do desempenho de coagulantes recuperados de lodo de ETA por extração via alcalina-ácida. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Faculdade de Engenharia de Ilha-Solteira. Ilha Solteira/SP. 2020.
- WAGNER, F. L. Avaliação do lançamento de lodo de ETA Actiflor em ETE com reator - 48 - anaeróbico no município de Ponta Grossa – PR. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós - Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 2015.
- WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; LANDIM, A. B.; VITORINO, M. D.; SANTOS, W. L. A Substituição da Argila por Lodo de ETA na Produção de Cerâmica Vermelha. In. Anais do 510 Congresso Brasileiro de Cerâmica. ABC, Salvador – Ba. 12p. 2007.
- XU, G. R.; YAN, G. C.; WANG, Y. C.; WANG, N. Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment. Journal of Hazardous Materials. V.161. P. 663-669. 2009.
- ZHANG, Z.; PROVIS, L. J.; REID, A.; WANG, W. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. Construction & Building Materials. V.56. Pág.114. 2014.
- ZHAO, Y.; LIU, R.; AWE, O.W.; YANG, Y.; SHEN, C. Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals An explicit and comprehensive review. Chemical Engineering Journal. V. 353, p. 717-726. 2018.