



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DA RECUPERAÇÃO DE SULFATO DE ALUMÍNIO E
CLORETO FÉRRICO POR VIA ÁCIDA A PARTIR DO LODO GERADO NOS
DECANTADORES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

Ana Carolina Alves Santana

Belo Horizonte

2021

Ana Carolina Alves Santana

**VIABILIDADE TÉCNICA DA RECUPERAÇÃO DE SULFATO DE ALUMÍNIO E
CLORETO FÉRRICO POR VIA ÁCIDA A PARTIR DO LODO GERADO NOS
DECANTADORES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientador: Prof. Me. Túlio Cesar Floripes Gonçalves

Belo Horizonte

2021

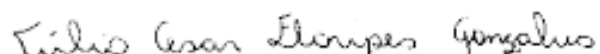
ANA CAROLINA ALVES SANTANA

**VIABILIDADE TÉCNICA DA RECUPERAÇÃO DE SULFATO DE ALUMÍNIO E
CLORETO FÉRRICO POR VIA ÁCIDA A PARTIR DO LODO GERADO NOS
DECANTADORES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA: Uma Revisão
Bibliográfica**


Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 10 de setembro de 2021

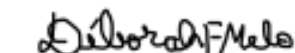
Banca examinadora:



Túlio Cesar Floripes Gonçalves – Presidente da Banca Examinadora
Prof. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, CEFET/MG – Orientador



Clarisse de Oliveira Carmo
Profª. Mestre em Engenharia Civil



Déborah de Freitas Melo
Profª. Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder esta oportunidade, por me guiar nos momentos difíceis, por colocar pessoas maravilhosas na minha vida e permitir mais uma experiência cheia de aprendizado e crescimento.

Aos meus pais e irmão que sempre estiveram ao meu lado, agradeço pela inspiração, palavras de incentivo e carinho que me sustentaram ao longo desta caminhada.

Ao meu noivo pela compreensão e companheirismo que sempre me trouxeram força e acalento nos momentos difíceis. Aos demais familiares pelas orações e por acreditarem na minha capacidade e apoiarem os meus sonhos.

Aos meus amigos, em especial a Gabriela Campos, Bruna, Isabela e Rafaela pela amizade sincera, por compartilharem das minhas conquistas e por me inspirarem a levar a vida com mais leveza.

Ao meu orientador Túlio pela paciência, dedicação, orientação durante a pesquisa e pelos conhecimentos compartilhados que levarei por toda vida.

Ao ETA Rio das Velhas pela colaboração e fornecimento das amostras indispensáveis para realização deste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica pela oportunidade e por proporcionar tantas atividades acadêmicas que contribuíram, não só para o meu crescimento profissional, mas pessoal também.

RESUMO

SANTANA, A.C.A. **Revisão bibliográfica de estudos viabilidade técnica da recuperação de Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico por via ácida a partir do lodo gerado nos decantadores de Estações de Tratamento de Água.** 2021. p. 54. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

O tratamento de água é um processo essencial para a preservação dos recursos naturais e promoção de qualidade de vida a população. O Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) é um resíduo gerado na etapa de coagulação do tratamento de água convencional, composto principalmente por sólidos e metais, que quando descartado de maneira irregular pode ocasionar poluição ambiental e riscos à saúde humana. A recuperação de coagulante presente no LETA por via ácida é uma alternativa em estudo, que consiste na acidificação do lodo, para promover a separação do Resíduo de Lodo Acidificado e do Coagulante recuperado. Este método é capaz de reduzir o volume e a massa do resíduo a ser descartado, possibilitando a reutilização dos coagulantes recuperados, o que pode reduzir significativamente os custos com reagentes químicos e os impactos ambientais. O presente estudo tem como foco a revisão bibliográfica de estudos de viabilidade técnica da recuperação de sulfato de alumínio e cloreto férrico por via ácida a partir do lodo gerado nos decantadores de estações de tratamento de água. A metodologia utilizada possui uma etapa experimental, que consistiu na coleta, análise de umidade e calcinação do lodo advindo do sistema produtor do Rio das Velhas, localizado no município de Nova Lima/MG. Os resultados obtidos nos estudos de eficiência do processo de recuperação dos coagulantes, percentual de redução do volume do lodo, características físico-químicas do reagente recuperado e eficiência em relação ao coagulante comercial em primeiro uso foram levantados e comparados. A recuperação por via ácida de fato promoveu a regeneração do coagulante utilizado nas ETA's pesquisadas. O coagulante recuperado apresentou eficiência próxima ao do coagulante comercial, entretanto, após o teste de tratamento, observou-se inconformidades nos parâmetros de pH. É importante salientar, que este método de recuperação exige grandes quantidades de ácido, que devem ser levadas em consideração caso se deseje aplicar o método em escala industrial.

Palavras-chave: Lodo, Tratamento de água, Via Ácida, Coagulante Recuperado, Coagulante Comercial.

ABSTRACT

SANTANA, A.C.A. **Literature review of technical feasibility studies of the acid recovery of Aluminum Sulfate and Ferric Chloride from the sludge generated in the decanters of Water Treatment Stations.** 2021. p. 54. Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering)- Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

Water treatment is an essential process for preserving natural resources and promoting the population's quality of life. Sludge from the Water Treatment Plant (SWT) is a residue generated in the coagulation stage of conventional water treatment, mainly composed of solids and metals, which when discarded in an irregular manner can cause environmental pollution and risks to human health. The acid recovery of coagulant present in SWT is an alternative under study, which consists of the solubilization of metal hydroxides through pH adjustment, which promotes the separation of the Acidified Sludge Residue and the recovered Coagulant. This method is able to reduce the volume and mass of the residue, enabling the reuse of recovered coagulants, reducing significantly, the costs with chemical reagents and environmental impacts. The present study focuses on the bibliographical review of technical feasibility studies for the recovery of aluminum sulfate and ferric chloride by acid from the sludge generated in the decanters of water treatment plants. The methodology used has an experimental stage, which consisted of the collection, moisture analysis and calcination of the sludge coming from the Rio das Velhas production system, located in the municipality of Nova Lima/MG. The results obtained in the efficiency studies of the coagulant recovery process, percentage of reduction in the sludge volume, physicochemical characteristics of the recovered reagent and efficiency in relation to the commercial coagulant in the first use were surveyed and compared. The recovery via acid promoted the regeneration of the coagulant used in the researched ETA's. The recovered coagulant showed efficiency close to that of the commercial coagulant, however, after the treatment test, nonconformities were observed in the pH parameters. Importantly, this recovery method requires large amounts of acid, which must be considered if you want to apply the method on an industrial scale.

Keywords: Water treatment, Sludge, Acidic route, Recovered coagulant, Commercial coagulant.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos.....	14
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Estação de Tratamento de Água Convencional.....	15
3.2	Coagulação	16
3.2.1	<i>Sulfato de Alumínio</i>	18
3.2.2	<i>Cloreto Férrico</i>	19
3.3	Características gerais do Lodo gerado em ETA	21
3.3.1	<i>Aspectos legais</i>	23
3.4	Impactos e tratamento dos LETA	25
3.4.1	<i>Vias de recuperação</i>	27
4.	METODOLOGIA	30
4.1	Estação de Tratamento de Água Rio das Velhas	30
4.2	Materiais e equipamentos.....	32
4.3	Coleta das amostras	32
4.4	Ensaio de Remoção de Umidade e Matéria Orgânica	33
4.5	Dados secundários.....	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1	Ensaio de remoção de Umidade.....	36
5.2	Estudos de recuperação de coagulantes	39
5.3	Eficiência de recuperação	44
5.4	Eficiência no tratamento da água bruta.....	46
5.5	Avaliação da redução do volume do lodo.....	49
6.	CONCLUSÃO	50
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Estação de tratamento de água convencional.....	16
Figura 2-Estação de tratamento de água convencional.....	18
Figura 3-Diagrama de equilíbrio heterogêneo do Al (OH) ₃	19
Figura 4-Diagrama de solubilidade do Ferro.....	20
Figura 5-Diagrama de equilíbrio heterogêneo do Fe (OH) ₃	21
Figura 6-Lodo de ETA in natura	22
Figura 7-Fluxograma do processo de regeneração por via ácida.	28
Figura 8-Esquema da recuperação seletiva de alumínio de resíduos de ETA pelo processo Donnan.	29
Figura 9-Fluxograma do Sistema de Produção Rio das Velhas/ MG.	30
Figura 10-Equipamentos necessários para realização da pesquisa.....	32
Figura 11-Lodo in natura produzido na ETA Rio das Velhas.....	33
Figura 12-Amostras de lodo coletado da UTR Rio das Velhas antes do processo de secagem.	36
Figura 13-Amostras de lodo coletadas na UTR Rio das Velhas, após secagem em estufa.	37
Figura 14- Resultado da remoção de cor aparente e turbidez em ensaios jartest	46
Figura 15-Resultados dos parâmetros de pH e turbidez da água bruta e com o coagulante comercial e recuperado (1).....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características de lodos provenientes de tratamento com adição de Sulfato de Alumínio.....	22
Tabela 2- Características típicas de lodos de sais de ferro.....	23
Tabela 3- Reações de hidróxidos de Al e Fe com ácido sulfúrico e clorídrico.....	28
Tabela 4- Peso dos cadinhos sem amostras de lodo, antes e após secagem em estufa.....	38
Tabela 7- Peso dos cadinhos após calcinação.....	38
Tabela 8- Principais informações dos estudos selecionados.....	41
Tabela 9- Resultados de pH e turbidez para água bruta e tratada com os coagulantes comercial e recuperado.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Ca (OH)₂- Hidróxido de Calcio

ETA- Estação de Tratamento de Água

ETE- Estação de Tratamento de Efluente

Fe- Ferro

FeCl₃- Cloreto Férrico

Fe (OH)₃- Hidróxido de Ferro (III)

H⁺- Íon Hidrogênio

H₂O- Água

LETA- Lodo Gerado em Estação de Tratamento de Água

NaOH- Hidróxido de Sódio

NBR- Norma Brasileira

SST- Sólidos Suspensos Totais

UTR- Unidade de Tratamento de Resíduos

1. INTRODUÇÃO

O Tratamento da Água é um conjunto de procedimentos físicos e químicos que possibilita o acesso à água em condições adequadas para o consumo, bem como a sua utilização nos diversos setores econômicos, como a indústria. Apesar de essencial, os custos elevados com reagentes e disposição final dos resíduos tornam o processo de tratamento oneroso. Sendo assim é de extrema importância o desenvolvimento de pesquisas que visem ao reaproveitamento dos reagentes utilizados e à minimização dos impactos relacionados à atividade.

O Brasil possui cerca de 7500 unidades de tratamento de água e 75% do volume de água tratada advém de estações de tratamento convencionais (PINHEIRO *et al.*, 2014). Nas estações convencionais, o tratamento de água ocorre através da desestabilização das partículas coloidais, microrganismos e demais substâncias prejudiciais à saúde humana. Estas partículas formam agregados com tamanho e peso capaz de promover a sua remoção, de modo a adequar os seus parâmetros de potabilidade conforme a Portaria nº 888 de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021).

O sistema de tratamento de água convencional ocorre em fases, a saber: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, e, por fim, a fluoretação. Na etapa de coagulação são adicionados reagentes químicos, como sulfato de alumínio e cloreto férrico, que juntamente com a agitação da água promovem a desestabilização elétrica das partículas. Em seguida as partículas desestabilizadas são agitadas lentamente para formação de flocos, estes agregados são removidos nas etapas de sedimentação e decantação. Para a clarificação final, a água decantada vai para os tanques de filtragem que retém os sólidos não removidos nas etapas anteriores. Por fim a água passa por desinfecção e fluoretação (GUIMARÃES, 2005).

O resíduo retirado na etapa de sedimentação, advindo do processo de transformação da água bruta em água tratada chama-se lodo. As características desse resíduo variam de acordo com a composição da água bruta e a cadeia de processos ao qual é submetido. De maneira geral, o lodo é composto por água, sólidos, substâncias orgânicas e sais metálicos, como os hidróxidos de alumínio, ferro e dos coagulantes utilizados no seu tratamento (RICHTER, 2001).

De acordo com a NBR 10004/2004, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água (LETA) são classificados como resíduos sólidos, portanto devem ser dispostos e receber tratamento adequado. Dentre as alternativas adequadas de tratamento e disposição final em

aterro sanitário, a codisposição como bio sólidos, a disposição controlada no solo, a aplicação na indústria (fabricação de tijolos e materiais de construção), a incineração e o reaproveitamento do coagulante presente no lodo (DANDOLINI, 2014).

É importante salientar que algumas unidades de tratamento de água trabalham em consórcio com as Estações de Tratamento de Esgoto- ETEs, e encaminham o lodo gerado é encaminhado para tratamento nestas ETEs. Dos municípios brasileiros que produzem lodo no tratamento de água, somente 3% o destinam de maneira adequada para aterros sanitários, 2,38 % encaminham para processos de reaproveitamento e 89,9% dispõem o resíduo em rios, mares, terreno ou realizam a sua queima (IBGE, 2008).

A gestão inadequada dos LETA além de prejudicar os aspectos organolépticos da água, pode acarretar o aumento da concentração de metais tóxicos em águas fluviais, uma vez que são encontrados metais como cromo, níquel, chumbo, mercúrio, zinco, cádmio, cobre e ferro em sua composição. A presença destes elementos, por sua vez, causa danos irreparáveis aos organismos bentônicos (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

As elevadas concentrações de sólidos suspensos nos lodos também são preocupantes, pois estes são responsáveis pela diminuição da luminosidade do meio líquido. Outro efeito do despejo inadequado desses resíduos está relacionado a carga orgânica contida no lodo, que contribui para a criação de condições anaeróbicas e ocasiona a redução da qualidade da água e na morte de peixes e algas (FRANCISCO *et al.*, 2011).

Diante dos altos custos com a disposição final dos resíduos, a necessidade de preservar a vida útil de sistemas como aterro sanitário, bem como os impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado, faz-se necessária a busca de soluções econômicas e sustentáveis para o tratamento e disposição final de lodos gerados em ETA's.

A técnica de recuperação de coagulantes é uma alternativa de tratamento destes resíduos, uma vez que cerca de 50 a 75% de sua composição se dá por hidróxidos de ferro e alumínio. Este método além de reduzir o volume e massa do resíduo a ser descartado, possibilita a reutilização dos coagulantes recuperados, reduzindo significativamente os custos com reagentes químicos e os impactos ambientais (GUIMARÃES,2005).

A recuperação de coagulantes pode ocorrer por três processos distintos: via ácida, alcalina e iônica, porém a recuperação por via ácida vem se mostrando mais eficiente quando aplicada em grande escala (WESTHERHOFF *et al.*, 1974 apud GUIMARÃES, 2005). A recuperação por via ácida, consiste basicamente na acidificação do resíduo com a utilização de ácidos, esta técnica promove a solubilização de sais metálicos e possibilita a melhor sedimentação do resíduo final (SOUZA, 2016).

Sabe-se que estudos realizados em escala piloto com o Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico, mostraram que os coagulantes recuperados apresentaram características similares ao coagulante comercial. Além disso, por meio de testes realizados com a água bruta, os coagulantes reaproveitados apresentaram eficiência próxima a 90% na remoção de DBO, DQO, SST, turbidez, fósforo total e solúvel. Demonstrando, assim, a viabilidade do emprego destes reagentes em processo de coagulação industrial, como no tratamento de água e de efluentes (FREITAS *et al.*, 2005; SOUZA, 2016).

Portanto, tendo em vista a mitigação de impactos ambientais e a redução de custos com o processo de tratamento, o presente trabalho realiza uma revisão bibliográfica sobre a recuperação de sulfato de alumínio e cloreto férrico, por via ácida, proveniente de decantadores de Estações de Tratamento de Água.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliação de estudos de viabilidade da recuperação de sulfato de alumínio e cloreto férrico, por via ácida, presente no lodo dos decantadores de ETA's.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar e comparar os resultados de eficiência do processo de recuperação dos coagulantes por via ácida;
- Avaliar o percentual de redução do volume do lodo gerado após a acidificação do resíduo;
- Avaliar as características físico-químicas do coagulante recuperado;
- Comparar a eficiência do coagulante recuperado com a eficiência do coagulante comercial na remoção de cor e turbidez de água bruta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Estação de Tratamento de Água Convencional

A água é um elemento essencial para a manutenção da vida no planeta, desenvolvimento social e econômico, visto que ao longo da história a ocupação dos espaços condicionou-se pela presença de recursos hídricos. O aumento da urbanização e da demanda por água causaram efeitos negativos a qualidade da água, portanto para que esta apresente padrões adequados para o consumo humano, bem como para preservação dos mananciais, é necessário o seu tratamento prévio.

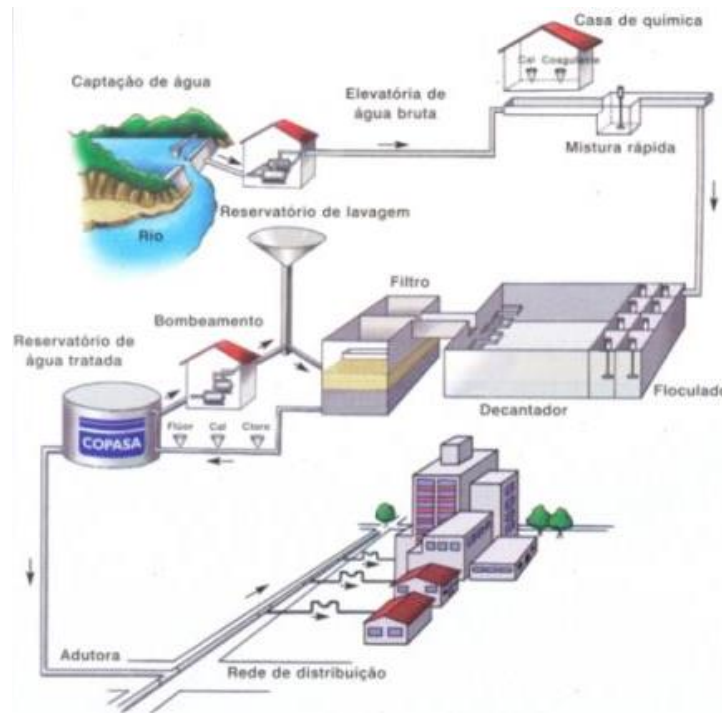
Devido a sua propriedade de solvente universal, a água carrega consigo impurezas como: sólidos dissolvidos em forma ionizada, gases dissolvidos, compostos orgânicos dissolvidos e matéria orgânica em suspensão, como microrganismos. As cargas negativas presentes na superfície destas partículas permitem que estas permaneçam estáveis em suspensão por longos períodos (MELLO *et al.*, 2012).

A distribuição de água com má qualidade pode causar doença e oferecer riscos à saúde pública. As doenças de veiculação hídrica são transmitidas pelo contato, ingestão de água contaminada, bem como pelo contato com vetores que se desenvolvem na água. São doenças de veiculação hídrica: Leptospirose, amebíase, cólera, giardíase, Febre Tifoide, Hepatite A, Ascariíase, Tricuríase, Ancilostomíase, febre amarela, dengue, dentre outras, demonstrando, assim, a importância da necessidade de tratamento da água (PAVANELLI, 2001).

O tratamento da água pode ocorrer através de um sistema convencional, que de maneira geral, consistem no conjunto de processos físicos, químicos e biológicos, que conferem a água padrões de potabilidade compatíveis ao exigido pela legislação. Segundo PINHEIRO *et al.* (2014), 75% do volume de água tratada no Brasil advém das estações de tratamento convencionais.

Nessa tecnologia os métodos de tratamento compreendem as etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração, seguida da correção do pH, desinfecção e fluoretação (BOTERO *et al.*, 2009). A **Figura 1** ilustra as instalações de uma ETA do tipo convencional e o sistema de abastecimento como um todo.

Figura 1-Estação de tratamento de água convencional.



Fonte: COPASA (2021?).

Dentre as diversas etapas realizadas no tratamento convencional, destaca-se a coagulação. Esta é uma das primeiras e mais importantes etapas do tratamento de água, pois é responsável pela desestabilização das partículas em suspensão ou coloidais, que causam cor e turbidez à água. Falhas neste processo comprometem as etapas posteriores e prejudicam o atendimento dos padrões de potabilidade exigidos pela legislação.

3.2 Coagulação

As águas superficiais e residuárias apresentam impurezas, sendo estas compostas por frações de sólidos em suspensão não sedimentáveis, microrganismos, bem como gotículas de líquidos imiscíveis. As impurezas citadas são denominadas de colóides, pois possuem dimensões na faixa de 10^{-6} a 10^{-3} mm e elevada área superficial (MENDES, 1989), que são responsáveis por conferirem características estéticas à água como cor e turbidez (FRANCO, 2009).

Segundo Pavanelli (2001), o processo de coagulação era bastante conhecido e utilizado pelas civilizações antigas. No Egito antigo e na Índia utilizava-se farinhas e castanhas moídas para a remoção de partículas coloidais, já na China era utilizado o alume, que era um tipo de sulfato, para o tratamento das águas. De fato, o método empregado na China impulsionou a criação do modelo de coagulação utilizado atualmente.

A elevada área superficial específica que os coloides apresentam, possibilita que estes fiquem suspensos no meio, favorecendo a adsorção de íons que conferem carga às partículas. Estas cargas, por sua vez, criam forças repulsivas entre os coloides impedindo a sua agregação e posterior sedimentação (GUIMARÃES, 2013). Portanto é importante que as interações de repulsão e atração destas partículas sejam interrompidas para a sua remoção do meio.

A coagulação é um processo que realiza a desestabilização das partículas coloidais. As forças de repulsão entre as partículas presentes no meio são reduzidas mediante a adição de reagente químico, normalmente sais metálicos de ferro e alumínio ou polímeros, que seguidos de agitação rápida tornam a solução mais homogênea e permite o contato do reagente com as impurezas presentes na solução.

Por sua vez, os sais metálicos adicionados no processo, se dissociam por meio do fenômeno de hidrólise. As partículas hidrolisadas, são carregadas positivamente e minimizam as cargas negativas presentes na superfície das partículas em suspensão que antes impediam a agregação das mesmas (FRANCO, 2009). As impurezas posteriormente aglutinam-se e são retiradas nos processos de sedimentação e filtração (PAVANELLI, 2001).

A desestabilização dos coloides acontece por meio de mecanismos de compressão de camada difusa, adsorção e neutralização de cargas, varredura e formação de pontes, que podem ser desencadeados de forma singular ou em associação. O mecanismo de compressão de camada difusa acontece quando a desestabilização das partículas coloidais se dá pela adição de íons de carga contrária. As forças de repulsão entre os coloides são reduzidas pelas forças de atração, que reduzem a densidade e o volume da camada difusa da partícula favorecendo a formação do floco (GUIMARÃES, 2013).

A adsorção e neutralização de carga ocorre quando as espécies hidrolisáveis são adsorvidas pela superfície das partículas em suspensão. Este processo é estequiométrico e está diretamente ligado a relação entre a dosagem do coagulante e a concentração coloidal. A Varredura ocorre pela formação de precipitados de hidróxidos metálicos agregados aos coloides, advindos da reação entre o pH e a dosagem de coagulante. Este mecanismo de remoção produz flocos com melhor decantabilidade, sem envolver a neutralização das cargas (FRANCO, 2009).

O mecanismo de adsorção e formação de pontes se desenvolve pela utilização de polímeros de cadeia longa como coagulantes. Este tipo de coagulante possui sítios ionizáveis, esta

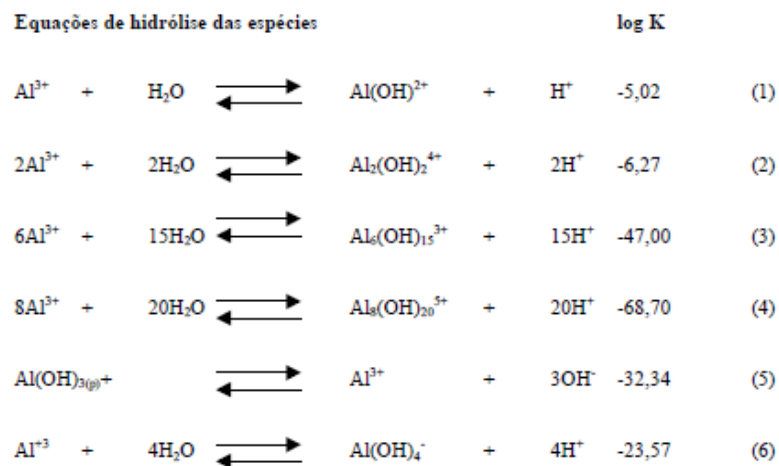
propriedade possibilita que as partículas coloidais se adsorvam ao longo de suas cadeias poliméricas (PAVANELLI, 2001).

Dentre os produtos mais utilizados na etapa de coagulação, cabe destacar o uso de sais metálicos como o Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico, devido ao conhecimento dos mecanismos envolvidos no processo de coagulação e a facilidade de aquisição, estocagem e manutenção nas ETAs.

3.2.1 Sulfato de Alumínio

O Sulfato de Alumínio é um sal proveniente da reação entre o Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) e o Hidróxido de Alumínio ($Al(OH)_3$), possui fórmula molecular $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$. Apresenta peso molecular de 342,16 g/mol e decompõe-se à temperatura de $600^\circ C$. Normalmente este coagulante é encontrado na forma líquida e apresenta coloração incolor quando puro (PAVANELLI, 2001). A **Figura 2** apresenta as reações de hidrólise na temperatura de $25^\circ C$, sendo possível observar que algumas espécies hidrolisadas estão presentes em determinada faixa de pH.

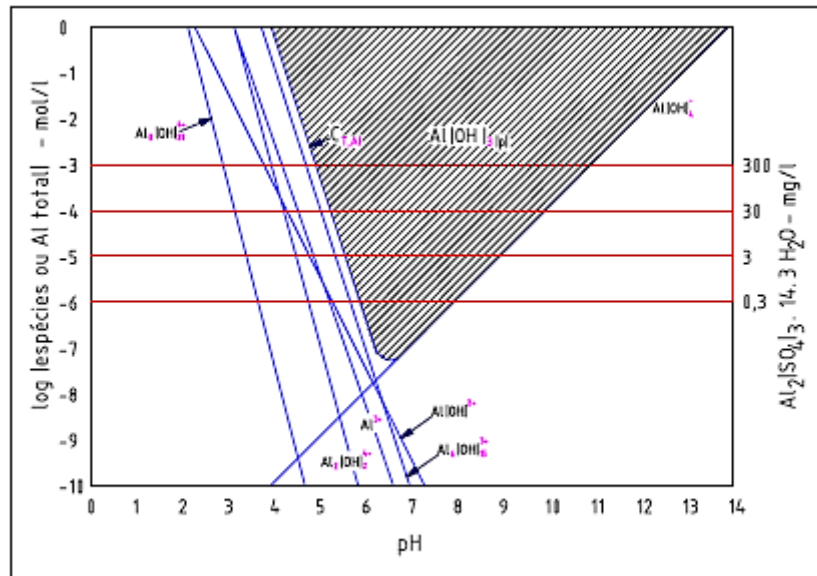
Figura 2-Estação de tratamento de água convencional.



Fonte: Pavanelli (2001).

Este reagente é empregado no tratamento de água e esgoto como agente floculante, bem como na manufatura de papéis, indústria têxtil e de cosmética, sendo este um dos reagentes mais utilizados comercialmente nas ETA's brasileiras, devido ao baixo custo e eficiência. Sua coagulação efetiva acontece em faixa de pH entre 5,5 a 8,0. A **Figura 3** apresenta o diagrama de espécies hidrolisadas por faixa de pH (FRANCO,2009).

Figura 3-Diagrama de equilíbrio heterogêneo do $\text{Al}(\text{OH})_3$.

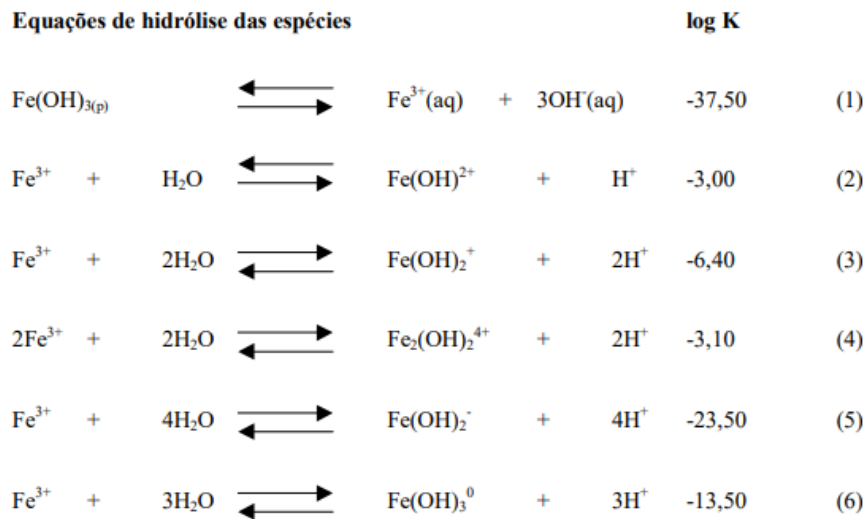


Fonte: Di Bernardo (1993) apud Franco (2009).

3.2.2 Cloreto Férrico

O Cloreto de ferro (III), também conhecido como Cloreto Férrico, é um composto químico amplamente utilizado na indústria e no tratamento de esgoto. Representado pela fórmula molecular $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, o cloreto férrico apresenta características corrosivas, portanto é importante que este seja manipulado com equipamentos de segurança e recipientes que garantam o seu armazenamento seguro.

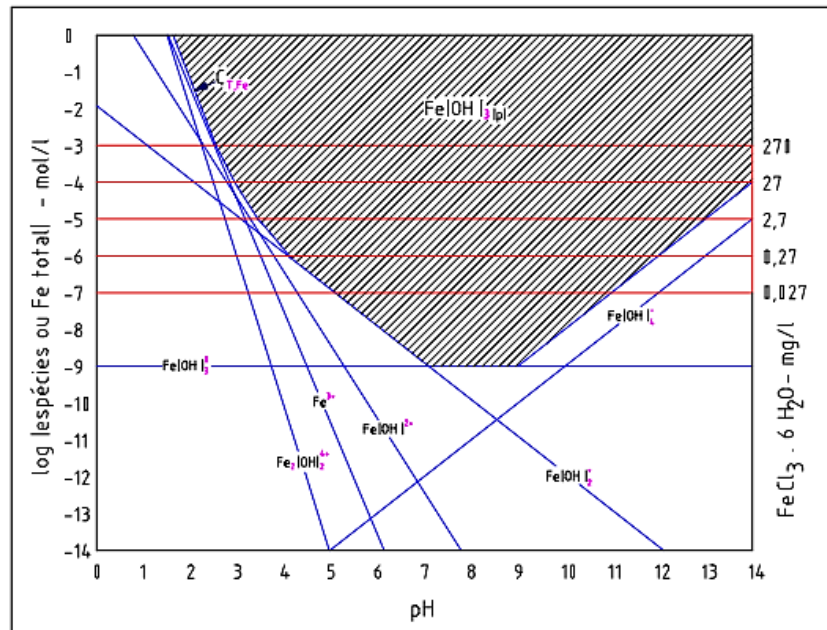
O composto pode ser encontrado na fase sólida, apresentando coloração amarela, ou na fase de solução aquosa, de cor marrom. Em contato com a água o cloreto férrico sofre hidrólise, fazendo com que os complexos formados adquiram cargas positivas. Durante o processo de coagulação usando sais de ferro, os coloides carregados negativamente podem interagir com as espécies hidrolisadas positivas do metal, formando complexos insolúveis ou podem ser adsorvidas pelo contato do reagente com a alcalinidade do lodo (FRANCO, 2009). A **Figura 4** apresenta as reações de hidrólise na temperatura de 25 °C.

Figura 4-Diagrama de solubilidade do Ferro.

Fonte: Pavanelli (2001).

Ressalta-se que devido à baixa solubilidade dos hidróxidos férricos formados, eles podem agir sobre ampla faixa de pH, conforme mostra a **Figura 5**. A formação de seus flocos é mais rápida, devido ao seu alto peso molecular, comparado ao do alumínio. Portanto, os flocos são mais densos e o tempo de sedimentação é menor. Segundo Pavanelli (2001) esta característica confere ao coagulante maior capacidade de remoção de turbidez, DBO, fosfatos e metais pesados nas águas superficiais contaminadas. Portanto é muito comum a utilização do cloreto férrico no tratamento de águas mais turvas, sendo essa uma de suas principais vantagens comerciais em relação aos demais coagulantes existentes.

Figura 5-Diagrama de equilíbrio heterogêneo do $\text{Fe}(\text{OH})_3$.



Fonte: Di Bernardo (1993) apud Franco (2009).

Entretanto, em detrimento do seu alto custo em relação aos demais coagulantes existentes no mercado e do grande volume de lodo produzido, ainda é um reagente pouco aplicado nas Estações de Tratamento de Água (CHIARAMONTE, 2020).

3.3 Características gerais do Lodo gerado em ETA

Conforme já mencionado anteriormente, o processo convencional de tratamento de água possui como objetivo principal a retirada de impurezas presentes na água captada. Estas impurezas são provenientes da formação geológica do manancial e das atividades poluidoras presentes na região de influência (PINHEIRO *et al.*, 2014). Entretanto, ao fim deste processo, obtêm-se um subproduto que recebe o nome de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA).

O LETA é basicamente produto da coagulação da água bruta, portanto é constituído, principalmente de água, sólidos em suspensão e precipitados químicos que formam uma massa de partículas orgânicas e inorgânicas, densa e viscosa (**Figura 6**), que normalmente, correspondem de 0,2 a 0,5 % do volume de água tratado (RICHTER, 2001).

Figura 6-Lodo de ETA in natura

Fonte: Buselatto *et al.* (2019).

É importante salientar, portanto, que as características qualitativas e quantitativas do lodo podem sofrer variações de acordo com o gerenciamento do processo de tratamento, dependendo da: qualidade da água bruta, tecnologia de tratamento aplicada, características da coagulação, floculação e filtração, uso de oxidante, periodicidade de limpeza de decantadores e filtros, o uso e a ocupação do solo da área da bacia hidrográfica, bem como do seu ciclo hidrológico (MATTOS & GIRARD, 2013).

O lodo de sais de alumínio possui coloração marrom, sua aparência varia conforme a concentração de sólidos. Quando a concentração de sólidos está na faixa de 0-5% o lodo apresenta aparência líquida; 8-12% semi-sólido; 12-25% argila ou barro suave. Suas principais características são apresentadas na **Tabela 1**:

Tabela 1-Características de lodos provenientes de tratamento com adição de Sulfato de Alumínio

Sólidos Totais(%)	Al ₂ O ₃ .5H ₂ O (%)	Inorgânicos (%)	Matéria Orgânica (%)	pH	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
0,1 - 4	15 - 40	35 - 70	15 - 25	6 - 8	30 - 300	30 - 5000

Fonte: Richter (2001).

Segundo Franco (2009), os lodos obtidos por meio da aplicação de sulfato de alumínio são gelatinosos e mais resistentes a desidratação, portanto, possuem uma difícil sedimentação ou flotação. Já os lodos a base de ferro são mais densos e por isso, mais fáceis de serem manuseados.

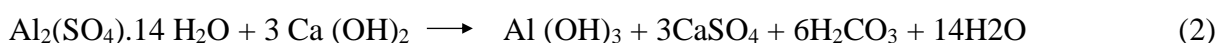
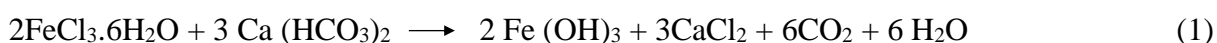
O lodo proveniente da coagulação com Cloreto Férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) apresenta as seguintes características, conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2-Características típicas de lodos de sais de ferro

Sólidos totais (%)	Fe (%)	Voláteis (%)	pH
0,25 – 3,5	4,6 – 20,6	5,1 – 14,1	7,4 – 9,5

Fonte: Richter (2001).

Segundo Richter (2001) e Franco (2009), em águas com alcalinidade natural, a reação com Cloreto férrico e Sulfato de Alumínio acontecem conforme as equações 1 e 2 abaixo:



Cerca de 1 mg/L de cloreto férrico produz 0,4 mg/L do precipitado $\text{Fe} (\text{OH})_3$, que é parte constituinte do lodo, podendo haver maior produção no período chuvoso, uma vez que há uma piora na qualidade das águas dos mananciais e conseqüente necessidade de maior aplicação do reagente para o tratamento (RODRIGUES, 2012).

Quando mal gerenciados e descartados de maneira inadequada, os sais de ferro e alumínio presentes no lodo podem disponibilizar íons solúveis que comprometem a saúde humana e da fauna e flora aquática. Portanto, observa-se a necessidade do emprego de técnicas que visem a recuperação e minimização dos impactos associados a presença do reagente citado ao LETA.

3.3.1 Aspectos legais

No Brasil as Estações de Tratamento de Água são consideradas pelo Ministério Público como indústrias, portanto elas são responsáveis pelo tratamento e disposição final adequada de seus resíduos (MOREIRA *et al.*, 2017). Segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), que dispõe sobre a classificação dos Resíduos sólidos, são definidos como resíduos sólidos, qualquer substância nos estados sólido e semissólido, provenientes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, incluindo os lodos

provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

De acordo com a norma, os resíduos sólidos são classificados quanto a sua periculosidade da seguinte forma:

Resíduos classe I – Perigosos: aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, pode apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices e riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Resíduos classe II A – Não inertes: aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I e II B, podendo apresentar propriedade como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Resíduos classe II B – Inertes: são aqueles que, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Os lodos gerados nas estações de tratamento de água, são classificados como resíduos de Classe II A, não inerte, portanto, de modo a atender as instâncias da norma, estes não devem ser lançados nos corpos d'água sem tratamento prévio.

Outro aspecto importante diz respeito ao limite aceitável e padrões de lançamento de efluentes. No âmbito federal, o CONAMA estabeleceu através das Resoluções nº 357/05 e nº 430/11 (CONAMA, 2005, 2011), sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como as condições e padrões de lançamento de efluentes. A nível estadual cita-se a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/08 (COPAM, 2008).

A DN COPAM nº153, de 26 de julho de 2010, convoca os municípios para o licenciamento das Estações de tratamento de água e respectivas Unidades de Tratamento de Resíduos (UTRs). De maneira complementar, a DN COPAM 217/2017, estabelece os critérios para classificação

e definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos utilizadores de recursos ambientais no estado de Minas Gerais (COPAM, 2010, 2017).

A Lei nº 9605 mais conhecida como Lei de Crimes Ambientais, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, em seu Capítulo V – seção III “Da Poluição e outros crimes Ambientais”, classifica como crime, no artigo 54, “causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora” e prevê no parágrafo 2º, inciso V, prevê pena de reclusão de um a cinco anos (BRASIL, 1998).

3.4 Impactos e tratamento dos LETA

Tendo em vista a legislação que regula as atividades e descarte de resíduos com potencial poluidor, um dos maiores desafios enfrentados pela indústria de saneamento diz respeito ao tratamento adequado, redução de geração e reaproveitamento do LETA. Em média no Brasil, são produzidos cerca de 150 a 200 mil toneladas de LETA por ano, em contrapartida os custos associados à destinação e tratamento adequado do resíduo são muito altos, na maioria dos casos (FONTES *et al.*, 2016).

Em um estudo realizado por Saraiva Moreira *et al.* (2009) apud Moreira *et al.* (2017), verificou-se que das 175 ETA's analisadas nos municípios mineiros, 87% das estações lançavam o lodo em corpos d'água sem nenhum tratamento prévio, 6% não informaram, e apenas 3% possuíam unidade de tratamento de resíduos (UTR), 2% das estações lançavam seus efluentes brutos (resíduos) na rede pluvial, 1% em ETE e 1% no solo. A nível nacional, a Pesquisa Nacional de Saneamento realizada no ano de 2008, apontou que somente 3% dos municípios brasileiros destinavam o LETA para aterros sanitários e 2,38% eram destinados a processos de reaproveitamento (fre, 2008), infelizmente o descarte do resíduo em cursos d'água tem sido a prática mais adotada nas unidades de tratamento de água brasileiras (GUIMARÃES, 2005).

Os LETA possuem concentrações consideráveis de sais metálicos, devido ao seu processo de tratamento. Quando em contato com os corpos d'água podem comprometer negativamente a vida aquática. Além disso, os lodos apresentam também alta turbidez e elevadas concentrações de sólidos, DQO e metais pesados, que são tóxicos à saúde humana (MOREIRA *et al.*, 2017). Os sólidos suspensos em conjunto com a alta carga orgânica presente no lodo, reduzem a

luminosidade necessária para as atividades fotossintéticas e a longo prazo podem ocasionar déficit nas concentrações de oxigênio dissolvido nos mananciais, ocasionando odores e na mortandade dos peixes (MATTOS e GIRARD, 2013).

O potencial tóxico gerado pelo resíduo de ETA é decorrente principalmente, das propriedades da bacia, qualidade da água bruta e tipo de tratamento utilizado (RODRIGUES, 2012). Entretanto, tendo em vista a gravidade dos impactos causados pela gestão inadequada deste resíduo, faz-se necessária a busca por alternativas mais sustentáveis de gerenciamento do mesmo.

Dentre as alternativas de disposição e reaproveitamento do LETA já estudadas até o momento cita-se: a sua utilização como insumo agrícola, incineração, uso na fabricação de cerâmica, recuperação de área degradada, recuperação do coagulante e disposição em aterro sanitário, sendo que esta última, a longo prazo contribui para a redução da vida útil do sistema e pode ocasionar na geração de lixiviado tóxico (MOREIRA *et al.*, 2017). Outra alternativa seria o lançamento em ETE, mas ainda assim esta prática não é a mais recomendada, pois a responsabilidade de tratamento e disposição final são transferidas a ETE. Portanto, é necessário a realização de estudos de avaliação de impacto e adequações operacionais nas estações antes do recebimento do resíduo (GUIMARÃES, 2005).

Diante disso, técnicas que busquem o tratamento adequado do LETA, como a recuperação dos hidróxidos presentes no lodo tem se mostrado bastante eficientes. Tendo em vista que cerca de 35% a 50% da composição do lodo são hidróxidos, a recuperação mostra-se vantajosa pois além de reduzir o volume do lodo a ser descartado em até 45%, promove a reciclagem dos produtos químicos dosados no tratamento e reduz a concentração de metais pesados que podem ser um problema ao meio ambiente (DANDOLINI, 2019).

A recuperação dos coagulantes pode ocorrer por via ácida, alcalina e troca iônica, sendo que a via ácida alcançou maior desenvolvimento quando aplicada em escala industrial. De maneira geral, a técnica é simples e consiste na solubilização dos hidróxidos precipitados. Nas décadas de 60 e 70 este método de recuperação já era utilizado no Japão e Estados Unidos (GUIMARÃES, 2005).

Estudos de viabilidade realizados com os coagulantes recuperados apontam que estes podem ser reutilizados no tratamento de efluentes industriais e água, reduzindo, portanto, os custos

operacionais das estações. Segundo estudo realizado por Oliveira *et al.* (2017), Souza e Freitas *et al.* (2016) com Sulfato de alumínio, verificou-se que o coagulante regenerado apresentou 88% de eficiência na remoção de turbidez, contra 52% de remoção do reagente comercial, além disso o coagulante recuperado foi capaz de reduzir 90% dos SST presente nas amostras. Sendo assim, os resultados mostraram que a solubilização dos hidróxidos presentes no LETA e posterior utilização do tratamento de efluentes, pode ser uma solução ao atual problema enfrentado pelas Estações de Tratamento de Água no que diz respeito a geração e redução de impactos ambientais.

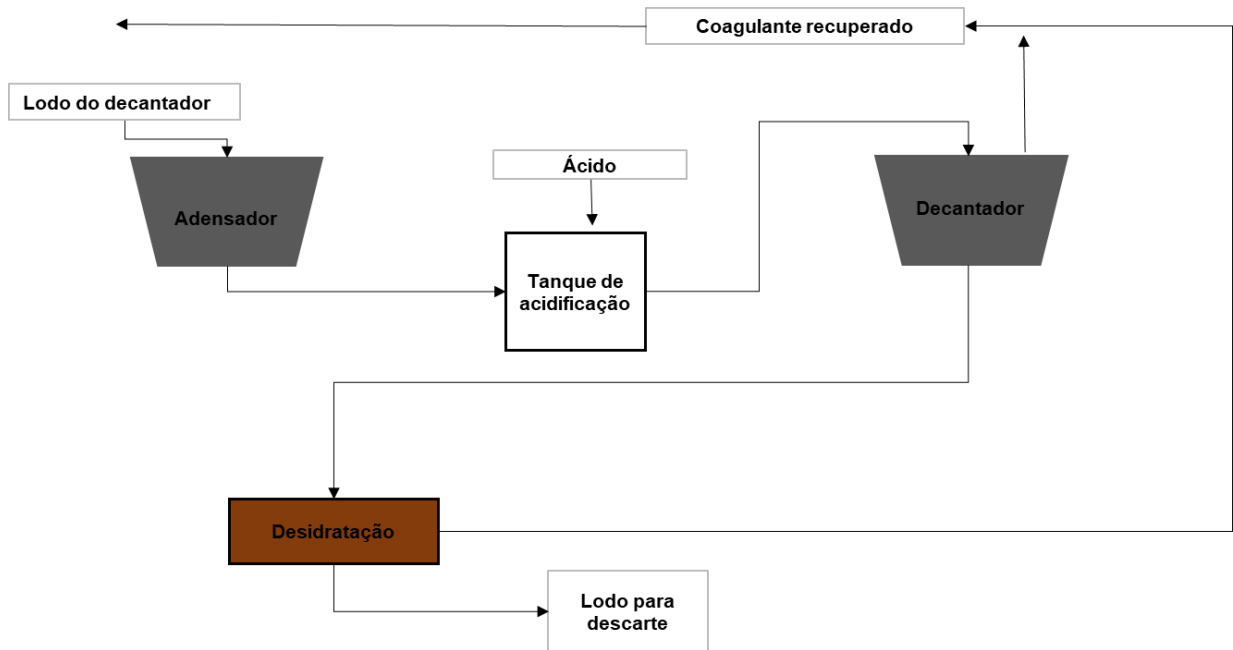
3.4.1 Vias de recuperação

Os hidróxidos presentes no lodo gerado em ETA, podem ser solubilizados por via ácida, alcalina e mediante troca iônica. Para melhor compreensão, os processos serão descritos separadamente a seguir.

3.4.1.1 Via ácida

A recuperação de coagulantes por via ácida é uma técnica que começou a ser estudada no século passado e começou a ser aplicada no Japão em 1975. Este processo consiste na solubilização de hidróxidos por meio da adição de ácido, normalmente ácido clorídrico ou ácido sulfúrico, ao lodo desidratado, de maneira a transformar os hidróxidos presentes no lodo em espécies químicas solúveis. O sobrenadante resultante da regeneração é separado para reuso e os sólidos encaminhados para destinação final adequada. Este processo está ilustrado na **Figura 7**.

Figura 7-Fluxograma do processo de regeneração por via ácida.



Fonte: Autora (2021).

A **Tabela 3** apresenta as reações envolvidas no processo.

Tabela 3-Reações de hidróxidos de Al e Fe com ácido sulfúrico e clorídrico

Tipo de resíduo	Ácido	Reação
Alumínio	H ₂ SO ₄	$2 \text{ Al(OH)}_3 + 3 \text{ H}_2\text{O} + 3 \text{ H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O} \longrightarrow \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{ H}_2\text{O}$
Ferro	H ₂ SO ₄	$2 \text{ Fe(OH)}_3 + 3 \text{ H}_2\text{SO}_4 + 3 \text{ H}_2\text{O} \longrightarrow \text{ Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9 \text{ H}_2\text{O}$
Ferro	HCl	$\text{ Fe(OH)}_3 + 3 \text{ HCl} + 3 \text{ H}_2\text{O} \longrightarrow \text{ FeCl}_3 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$

Fonte: Guimarães (2005).

No caso de lodos contendo hidróxido de ferro -Fe (OH)₃, esta técnica se torna mais complexa e onerosa. As etapas de redução do íon férrico (III) para íon ferroso (II) eleva o pH da solução, portanto para que a recuperação seja bem sucedida é necessário o uso de reagentes oxidantes, pois a forma final do ferro deve ser o íon férrico (III). Posteriormente a solução passa por filtração para a retirada de sólidos inertes e compostos orgânicos indesejáveis. Como limitação, este processo não solubiliza de forma seletiva as espécies químicas presentes no lodo, portanto metais como Mn e matéria orgânica natural podem ser solubilizados no processo e reduzir a eficiência do coagulante final regenerado (DANDOLIN, 2014).

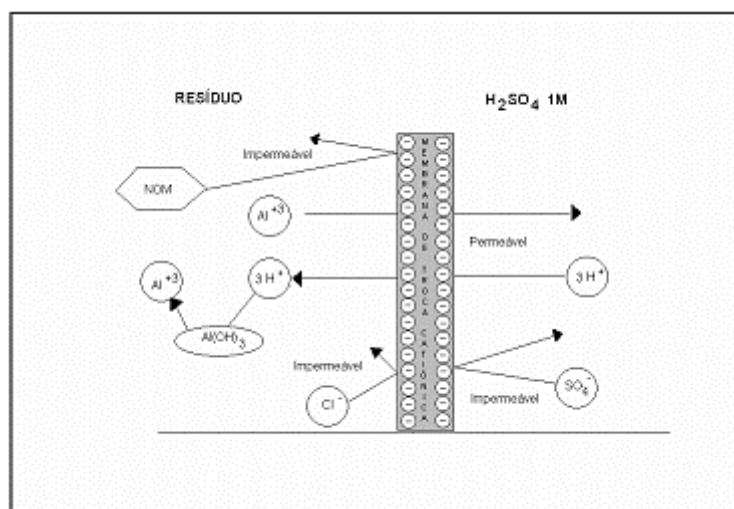
3.4.1.2 Via Alcalina

A via alcalina é um mecanismo que realiza a solubilização de hidróxidos em faixa de pH acima de 11. Pesquisas utilizando álcalis NaOH e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obtiveram recuperação em torno de 80 % e 30% respectivamente. Semelhantemente a recuperação por via ácida, a maior limitação deste processo está relacionada a não seletividade de recuperação dos compostos presentes no lodo (DANDOLIN, 2014).

3.4.1.3 Troca iônica

A recuperação de coagulantes por troca iônica consiste na utilização de membranas de troca iônica de estruturas homogêneas e heterogêneas em células de membrana *Donnan*. Estas células por sua vez, são divididas em duas câmaras pela membrana de troca catiônica, conforme ilustrado na **Figura 8**.

Figura 8-Esquema da recuperação seletiva de alumínio de resíduos de ETA pelo processo Donnan.



Fonte: Prakash *et al.* (2004) apud Guimarães (2005).

O pH baixo da solução permite o aumento da concentração de íons H^+ na solução, os íons metálicos migram, portanto, do lado esquerdo para o direito da célula, região de maior concentração de íons H^+ . Sulfatos, cloretos e matéria orgânica que possuem cargas negativas não atravessam a membrana. Diferentemente dos processos anteriormente citados, a troca iônica permite a solubilização seletiva dos compostos constituintes do LETA aumentando a qualidade do coagulante recuperado (GUIMARÃES, 2005).

4. METODOLOGIA

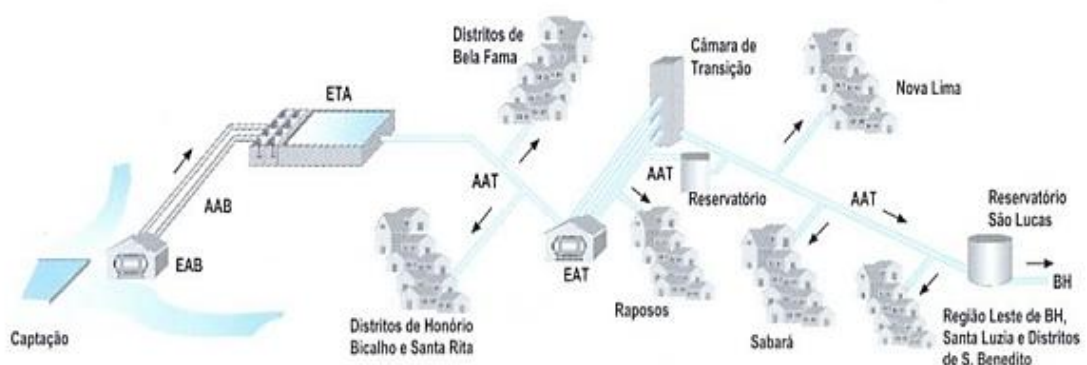
Inicialmente, o presente trabalho propunha-se a realizar análises experimentais de regeneração de Cloreto Férrico e Sulfato de Alumínio por via ácida no Laboratório de Química Ambiental (LQAM), localizado no Campus 1 do CEFET-MG. Foram realizados coletas e ensaios de remoção de umidade e matéria orgânica, conforme planejamento inicial, para posterior recuperação. Entretanto, devido ao cenário de Pandemia e impossibilidade de utilização dos laboratórios do Campus e finalização das etapas experimentais, foi necessária a migração da pesquisa para revisão bibliográfica visando a conclusão da monografia em tempo hábil.

Portanto, para melhor compreensão, neste capítulo será realizada a descrição da ETA Rio das Velhas, local onde foram realizadas as coletas, bem como das etapas experimentais dos ensaios de umidade e matéria orgânica do lodo adensado na UTR. Além disso, será descrita também a metodologia empregada no estudo de revisão.

4.1 Estação de Tratamento de Água Rio das Velhas

A ETA do sistema produtor do Rio das Velhas é do tipo convencional, portanto seu processo de tratamento conta com as etapas de oxidação, coagulação, floculação, decantação, filtração, fluoretação, desinfecção e estabilização. A **Figura 9** esquematiza, de maneira geral, como ocorre o sistema de produção.

Figura 9-Fluxograma do Sistema de Produção Rio das Velhas/ MG.



Fonte: ARSAE-MG (2013).

A captação do sistema é do tipo superficial, com tomada direta no rio das Velhas, localizada no distrito de Bela Fama, no município de Nova Lima- MG. A captação é composta por duas barragens em concreto armado, providas de comportas metálicas. O gradeamento é duplo e possui peneira rotativa para limpeza das grades.

Após a captação, a água bruta é conduzida para a ETA. O tratamento ocorre de maneira ininterrupta e possui capacidade máxima de tratamento de 8.000 L/s, a vazão média tratada é de 6.200 L/s. A unidade possui canal de chegada com medição por Calha Parshall e registrador secundário, 02 câmaras de mistura rápida na coagulação, 24 floculadores hidráulicos e mecanizados, 06 decantadores do tipo piscina, providos de raspadores de lodo, 24 unidades de filtração com leito simples de areia de fluxo descendente. Ressalta-se que a dosagem de reagentes químicos ocorre de forma mecanizada e automatizada (ARSAE-MG, 2013).

O sistema também é provido de uma Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR), que por sua vez, recolhe e trata adequadamente os lodos advindos das descargas dos decantadores e da lavagem dos filtros. A UTR é composta por 03 decantadores secundários, 02 adensadores, tanque de homogeneização. O LETA é desidratado por sistema de bag's e de forma mecânica por prensas roscas desaguadoras, posteriormente a esta etapa o lodo é encaminhado para aterro sanitário e a água residual é devolvida ao rio das velhas (ARSAE-MG, 2013).

4.2 Materiais e equipamentos

Para o desenvolvimento dos ensaios de remoção de umidade e matéria orgânica, foram necessários equipamentos e utensílios disponíveis no LQAM do Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental. Os recursos utilizados foram citados por etapa da metodologia, conforme **Figura 10** a seguir:

Figura 10-Equipamentos necessários para realização da pesquisa

ETAPA	RECURSO	QUANTIDADE	LOCAL DE AQUISIÇÃO
Coleta das amostras	Vasilhames de Plástico (5L)	3 unidades	Laboratório de Química Ambiental e Microbiologia (LQAM)
Ensaio de remoção de umidade	Cadinho de cerâmica; Espátulas; Estufa; Balança Analítica.	- 6 unidades; - 6 unidades; - 1 unidade; - 1 unidade.	Laboratório de Química Ambiental e Microbiologia (LQAM)
Ensaio de remoção de Matéria Orgânica	Cadinho de cerâmica; Mufla; Dessecador; Balança Analítica.	- 6 unidades; - 1 unidade; - 1 unidade; - 1 unidade.	Laboratório de Química Ambiental e Microbiologia (LQAM)

Fonte: Autora (2020).

4.3 Coleta das amostras

As coletas foram realizadas na Estação de Tratamento de Água do Rio das Velhas, localizada no município de Nova Lima. Considerando que os resíduos da ETA são adensados na UTR, foi estipulado que este seria o resíduo definido como objeto dos estudos de recuperação de coagulantes por via ácida. A **Figura 11** apresenta o resíduo da ETA Rio das Velhas.

Figura 11-Lodo in natura produzido na ETA Rio das Velhas.



Fonte: Autora (2020).

A frequência da coleta foi definida de forma a possibilitar a verificação da influência da sazonalidade nas características físico-químicas do lodo, e na qualidade do produto recuperado, portanto foram coletadas duas amostras no período de seca e duas no período chuvoso. Posteriormente às coletas, as amostras foram armazenadas em vasilhames de plástico, previamente higienizados, com capacidade de cinco litros.

4.4 Ensaio de Remoção de Umidade e Matéria Orgânica

Para a realização das análises do LETA, as amostras foram encaminhadas ao LQAM, localizado no campus 1 do CEFET-MG. Primeiro foi realizado ensaio de remoção de umidade, que consistia na secagem de 100g das amostras em estufa a 105°C por 1 hora, seguido de destorroamento e pesagem. Para o cálculo de percentual de umidade presente nas amostras foram utilizadas as equações 3 e 4, expressas abaixo:

$$U=100(Pa/Pt) \quad (3)$$

$$Pt= Pms +Pa \quad (4)$$

Onde:

U= teor de água em %;

Pa= peso da água;

Pt= peso total da amostra; e

Pms= peso da matéria seca.

Posteriormente, as amostras foram levadas a mufla pelo período de 1 hora a 550° C para remoção da matéria orgânica, posteriormente foi realizada a pesagem e acondicionamento, para realização dos testes de recuperação. É importante salientar que para a determinação do peso total da amostra e da matéria seca, foi necessário subtrair previamente o peso dos cadinhos vazios em cada caso. A cada composição bimestral, a amostra de lodo seria submetida à recuperação de coagulante por via ácida.

4.5 Dados secundários

Para a coleta de dados foi realizada uma pesquisa de revisão bibliográfica em consulta a publicações, artigos técnicos e científicos, teses e livros acerca do tema abordado. As principais plataformas de busca utilizadas foram a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), Google acadêmico e acervos de congressos científicos. Posteriormente, as informações mais relevantes como autor, título e principais resultados dos artigos selecionados foram apresentados em um quadro comparativo, para facilitação do entendimento e organização dos resultados.

Os principais dados levantados foram de eficiência do processo de recuperação dos coagulantes em questão, o percentual de redução do volume do lodo, as características físico-químicas do reagente recuperado, bem como sua eficiência em relação ao coagulante comercial. A apuração dos dados e comparação dos resultados obtidos nos estudos foram descritos no item resultados e discussões.

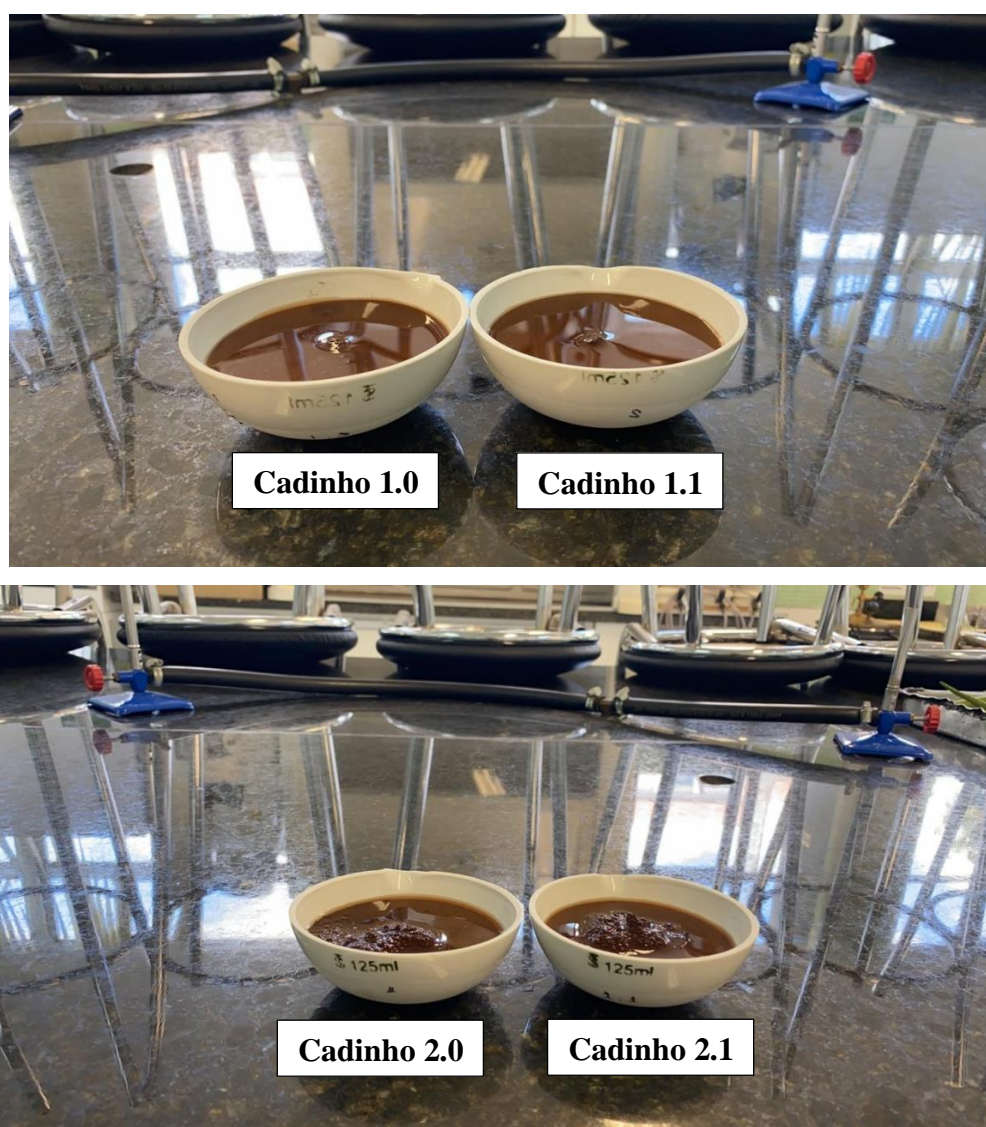
Ao todo foram selecionados seis artigos para revisão, publicados no período compreendido entre 2005 e 2020. Dentre os estudos escolhidos, dois são de pós-graduação a nível de mestrado, os demais foram retirados de acervo de Congressos e seminários, sendo estes o Congresso Brasileiro de Engenharia Química e Seminário de Pesquisa, Extensão e Inovação do IFSC.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaio de remoção de Umidade

Para o desenvolvimento dos ensaios de remoção de Umidade, as amostras coletadas nos dias 15/10/2020 e 04/02/2021 foram vertidas em cadinhos de porcelana, sendo que as amostras coletadas em fevereiro/21 são representadas pelos cadinhos de número 1, já as de outubro/20 pelos cadinhos de número 2. Ressalta-se que os ensaios foram realizados em duplicata, conforme a **Figura 12**. Os cadinhos 1.0 e 2.0 são referentes as análises de umidade e os cadinhos 1.1 e 2.1, para as de remoção de matéria orgânica.

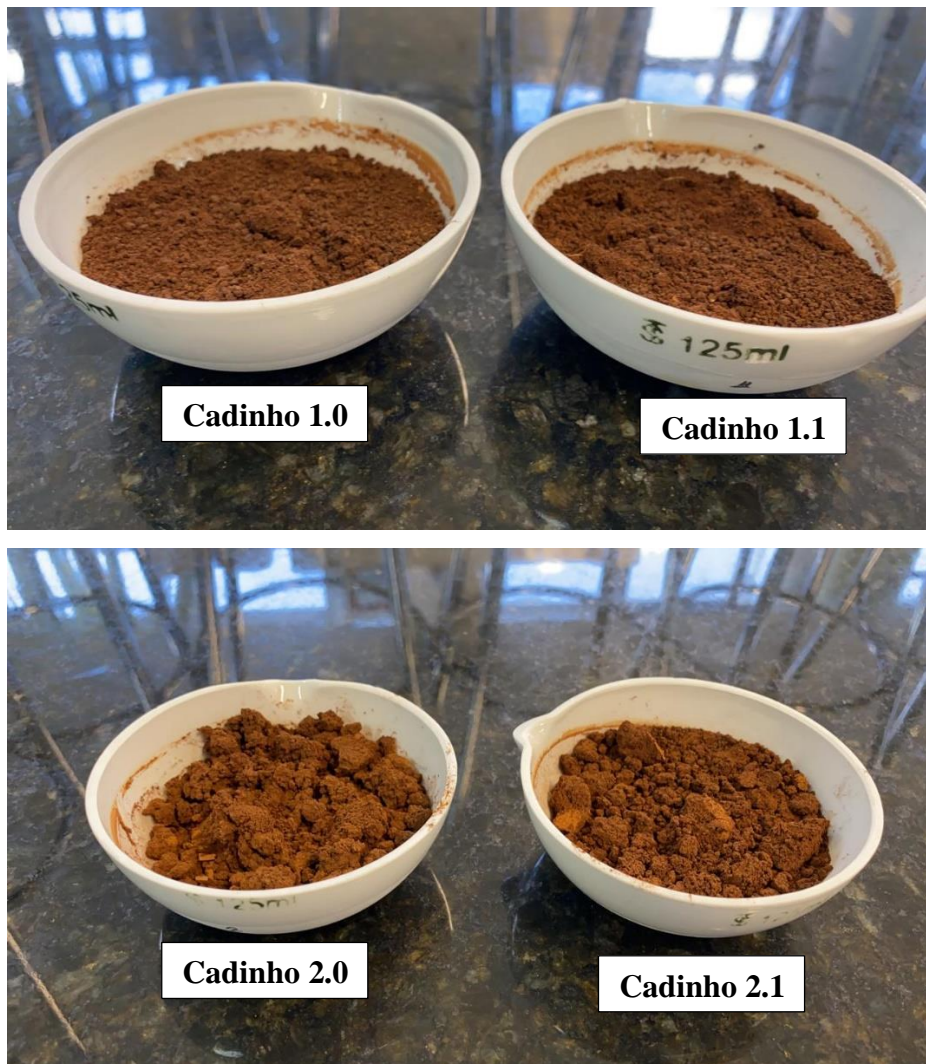
Figura 12-Amostras de lodo coletado da UTR Rio das Velhas antes do processo de secagem.



Fonte: Autora (2021).

A umidade representa o percentual de água contido na amostra, neste caso, optou-se por removê-la para melhor manuseio do lodo e para que a água nele contida, não interferisse no processo de recuperação do coagulante que seria realizado posteriormente. A **Figura 13** representa as amostras após o processo de secagem.

Figura 13-Amostras de lodo coletadas na UTR Rio das Velhas, após secagem em estufa.



Fonte: Autora (2021).

Os cadinhos foram pesados com e sem as amostras, antes e após o processo de secagem conforme expresso na **Tabela 4** abaixo:

Tabela 4-Peso dos cadinhos sem amostras de lodo, antes e após secagem em estufa

Recipiente	Peso	Peso antes da secagem	Peso após secagem
Cadinho 1.0	78,055g	178,055g	127,905g
Cadinho 1.1	83,347g	183,347g	131,651g
Cadinho 2.0	74,885g	174,885g	126,056g
Cadinho 2.1	74,440g	174,440g	122,547g

Fonte: Autora (2021).

As amostras presentes nos cadinhos 1.0 e 1.1 obtiveram, respectivamente 50,15% e 51,70% de teor de umidade. Já os cadinhos 2.0 e 2.1 48,83% e 51,90%. Posteriormente as análises de umidade, os cadinhos 1.1 e 2.1 foram levados a mufla a 550°C por 1 hora, para remoção de matéria orgânica. Após este processo os cadinhos foram pesados novamente, conforme **Tabela 5**.

Tabela 5-Peso dos cadinhos após calcinação

Recipiente	Peso
Cadinho 1.0	-
Cadinho 1.1	110,540g
Cadinho 2.0	-
Cadinho 2.1	100,670g

Fonte: Autora (2021).

A calcinação é um processo térmico que possibilita a remoção de matéria orgânica existente na amostra. Como o objetivo do experimento era a recuperação de Cloreto férrico presente no LETA, que por sua vez é um elemento inorgânico, foi necessário a remoção desta matéria a fim de garantir a maior pureza possível do coagulante recuperado. Ao realizar a subtração entre o peso da matéria seca e da amostra após calcinação, obteve-se para os cadinhos 1.1 e 2.1 os seguintes valores, 21,111 g e 21,877g. Cerca de 78,9% do peso da amostra de lodo contida no

cadinho 1.1 foi perdida em umidade e matéria orgânica, enquanto o cadinho 2.1 teve 78,1% de seu peso perdido.

Freitas *et al.* (2016) realizou análises de umidade com as amostras coletadas na ETA de Bagé, estas foram submetidas a estufa por 24 horas e apresentaram 93% de umidade antes da secagem 4% de umidade após o processo. Os Autores não realizaram testes de calcinação. Já as amostras de lodo adensado utilizadas por Chiaramonte (2020), foram analisadas por meio do teste de perda ao fogo e apresentaram 91,39% de umidade e 8,19% de matéria orgânica.

A diferença entre os percentuais obtidos em laboratório e pela literatura, podem ter ocorrido devido a diferença dos procedimentos dos ensaios. Apesar disso, pode-se inferir que em ambos os casos as análises de umidade e matéria orgânica contribuíram para redução do volume do resíduo e para o melhor manuseio do mesmo nas etapas posteriores.

5.2 Estudos de recuperação de coagulantes

Para a revisão da bibliografia proposta, foram selecionados seis artigos advindos de teses de mestrado e congressos. É importante salientar que mediante a falta de estudos na comunidade científica acerca da viabilidade de recuperação de cloreto férrico de LETA, dentre os artigos escolhidos, apenas o estudo de Guimarães (2005) e Demattos *et al.* (2001) retratam sobre este tema e foram realizados no mesmo sistema produtor de Rio Manso, os demais artigos abordam somente sobre o sulfato de alumínio.

Acerca da metodologia utilizada pelos autores, o critério para seleção era que a metodologia de recuperação do coagulante fosse por via ácida. O procedimento experimental consiste na umidificação do lodo analisado para umidades pré-definidas, e na acidificação das amostras homogêneas até que estas atingissem o pH desejado. Depois estas amostras foram agitadas e decantadas para que fosse possível a retirada do coagulante de interesse.

A metodologia utilizada por Menegaro *et al.* (2014) variou em relação aos demais, o ácido utilizado na recuperação era advindo da água de Drenagem Ácida de Mina (DAM). A DAM é oriunda do processo de beneficiamento do carvão, que ao sofrer lixiviação dá início a um processo de acidificação, além disso é rica em íons sulfato e por este motivo pode ser uma alternativa viável para a recuperação de $Al_2(SO_4)$.

Ressalta-se também que Guimarães (2005), Demattos *et al.* (2001), Souza *et al.* (2016), e Chiamonte (2020), testaram a eficiência do coagulante regenerado no tratamento da água bruta, levando em consideração o pH e remoção de turbidez. A **Tabela 6** apresenta as principais informações dos artigos escolhidos.

Tabela 6- Principais informações dos estudos selecionados

AUTOR	TÍTULO	METODOLOGIA	PRINCIPAIS RESULTADOS
Menegaro <i>et al.</i> , 2014	Regeneração de Sulfato de Alumínio a partir de lodo de ETA e Água de Drenagem Ácida de Mina.	Utilizou-se lodo obtido de uma estação de tratamento de águas do município de Lages-SC. As amostras foram secas e misturadas a diferentes proporções de DAM, determinação de concentração de sulfato foi feita pelo método 8051 (SulfaVer 4 Method)	Os resultados mostram que é possível remover 96,67% do alumínio presente no lodo de ETA com um excesso de 100% de sulfato em 28 minutos de contato. O lodo gerado praticamente não apresentou alumínio, podendo ser descartado sem problemas quanto à presença de metal na sua composição
Freitas <i>et al.</i> , 2016	Recuperação do Alumínio presente no lodo da ETA de Bagé para sua reutilização como coagulante.	Coleta, secagem e processamento do lodo advindo de decantador da ETA de Bagé. A recuperação do coagulante foi realizada por via ácida (Fulton, 1974), em seguida foi verificada a concentração de Al regenerada conforme Standard Methods. Por fim foram realizados testes de aplicabilidade em jar test, com agitação semelhante a da ETA.	O Alumínio recuperado representava 61% da concentração da amostra (6144,11 mg/L); O coagulante comercial apresentou 98,8% de eficiência na remoção de turbidez, já o recuperado apresentou em média 98,3%; A redução de turbidez foi muito semelhante e encontrou-se dentro dos padrões da Portaria 2914

AUTOR	TÍTULO	METODOLOGIA	PRINCIPAIS RESULTADOS
Chiaramonte, 2020	Estudo da viabilidade da recuperação de coagulante Sulfato de Alumínio em lodo de ETA	A metodologia consistiu na coleta das amostras de um Estação de Tratamento de água, caracterização e recuperação dos reagentes por via ácida (Fulton, 1974). Em seguida a concentração do coagulante foi medida e foram realizados testes de desempenho.	Com o método utilizado foi possível recuperar 97,42% do coagulante presente no lodo. A dosagem de coagulante recuperado que obteve melhor desempenho, foi de capaz de remover 98,7% de turbidez. Além disso, o volume do lodo gerado reduziu 77% após a aplicação do processo de regeneração
Guimarães, 2005	Recuperação de Coagulante a partir da Acidificação de Resíduos Gerados na Estação de Tratamento de Água do Rio Manso.	Coleta, secagem e processamento do lodo recolhido no barrilete de sucção da elevatória de lodo adensado da ETA Rio Manso. A recuperação do coagulante foi realizada por via ácida (Fulton, 1974), em seguida foi verificada a concentração de Al na amostra regenerada por leitura volumétrica. Por fim foram realizados testes de aplicabilidade em jar test, com agitação semelhante a da ETA	Os ensaios de solubilização reduziram o volume de lodo em 43,2%; As características do coagulante recuperado apresentaram características semelhantes ao comercial (remoção de cor e turbidez acima de 50%); A recuperação de sulfato de alumínio com a aplicação do recuperado na própria ETA, pode reduzir os gastos com o sulfato de alumínio comercial em torno de 25% a 80% na ETA RM, dependendo do método adotado para secagem do lodo.

AUTOR	TÍTULO	METODOLOGIA	PRINCIPAIS RESULTADOS
Souza <i>et al.</i> , 2016	Viabilidade técnica da regeneração de coagulante por via ácida a partir do lodo da ETA de uma indústria de corantes.	Coleta, secagem e processamento do lodo advindo de decantador da ETA de indústria de corantes do RJ. A recuperação do coagulante foi realizada por via ácida (Fulton, 1974), em seguida foi verificada a concentração de Al na amostra regenerada por espectrofotometria de absorção atômica. Por fim foram realizados testes de aplicabilidade em jar test, com agitação semelhante a da ETA.	O Alumínio recuperado na amostra apresentou concentração entre 632,1 - 680 mg/L; O coagulante regenerado apresentou em média 94,52% de eficiência na remoção de SST, características semelhantes ao comercial.
Demattos <i>et al.</i> (2001)	Redução do volume de lodo gerado em estações de tratamento de Água - a proposta de recuperação do coagulante pelo processo de acidificação no sistema rio manso	Foi realizada a coleta e acidificação das amostras, posteriormente estas foram filtradas e iniciou-se o processo de testes de floculação e decantação em aparelho jar test do reagente recuperado. Após os testes de laboratório passou-se aos testes com o aparelho piloto. Utilizou-se um reator com fabricado em fibra de vidro reforçada e foram realizados testes de desempenho na ETA de Brumadinho.	O volume do lodo analisado em laboratório teve 64% do seu volume reduzido e 92% foi recuperado em forma de coagulante. O lodo foi reduzido em 83% e o ferro foi totalmente solubilizado. A concentração do lodo remanescente foi a mesma do lodo inicial. Os resultados do teste de qualidade com o reagente recuperado foram os mesmos com o comercial.

Fonte: Autora (2021).

5.3 Eficiência de recuperação

Menegaro *et al.* (2014) obtiveram resultados de remoção de 96,67% do alumínio presente no lodo da ETA do município de Lages -SC, com dosagem de ácido apresentando 100% de excesso de sulfato equivalente a 12.800 mg/L em 28 minutos de contato e concentração inicial de alumínio igual a 1.160 mg/L. Os autores afirmaram que o lodo gerado após o processo não apresentou metais em sua composição, apontando conformidade em relação a este parâmetro.

O experimento realizado por Souza *et al.* (2016) na ETA de uma indústria de corantes no Rio de Janeiro, consistiu na coleta, acidificação do resíduo com H₂SO₄ e ensaios de sólidos totais em Jar Test e quantificação do alumínio por espectrometria de absorção atômica.

O lodo apresentou concentração inicial de 632,1 mg/L de alumínio. Os testes de regeneração neste caso foram realizados com 10 amostras. Após a sua acidificação obteve em média 68% de eficiência de recuperação de alumínio.

Para a avaliação do lodo resultante após a acidificação, Souza *et al.* (2016) analisaram a redução da massa total através da concentração de sólidos em suspensão. Os sólidos suspensos, são partículas sólidas que se mantêm em suspensão em água, como um coloide. A presença de sólidos aumenta a turbidez da água, podem conter matéria orgânica e metais presentes nos coagulantes.

Souza *et al.* (2016) obtiveram média de 94,52% de eficiência de remoção de sólidos suspensos, sendo que a amostra 1, obteve o melhor resultado com 96,27% de remoção.

A concentração de alumínio presente no lodo coletado por Freitas *et al.* (2016) foi de 6144,11 mg/l, representando cerca de 61% da composição da amostra, concentração muito maior em relação aos demais estudos citados. Os autores realizaram testes de regeneração com 8 amostras, ressalta-se que a metodologia empregada foi similar a utilizada por Souza *et al.* (2016), percentuais 5,66 e 13,94% de alumínio recuperado.

Ele observou que as amostras com pH 1 e 55% de umidade apresentaram teor mais elevado de alumínio, se comparado as com pH 2 e 95% de umidade. Em seu estudo realizou o teste estatístico ANOVA para verificar a influência do pH e umidade nos resultados de regeneração e concluiu que o pH, umidade e a interação entre estes parâmetros influenciaram significativamente na resposta do teor de alumínio.

O lodo coletado da ETA do Rio Manso por Guimarães (2005), apresentou concentração de Sólidos totais na faixa de a 9.790 a 48.408 mg/L e DQO 99 mg de O₂/L a 5.751 mg de O₂/L. O autor obteve concentração média Al₂O₃ no sulfato de alumínio recuperado de cerca de 1,1%, enquanto a concentração exigida no coagulante comercial é maior que 7,5%. Já o cloreto férrico recuperado teve concentração média de Fe⁺³, expresso como FeCl₃ de 1,97%, enquanto no comercial é exigido concentração superior a 38%. Em relação aos demais parâmetros como: acidez, teor de resíduo insolúvel, basicidade e densidade estavam próximos aos valores encontrados nos coagulantes comerciais.

Demattos *et al.* (2001) também realizou experimentos com o lodo do sistema de produção do Rio Manso e deram ênfase maior na recuperação de cloreto férrico, uma vez que era o coagulante com melhor performance na ETA. O lodo utilizado nos testes tinha 1,8% de Sólidos Totais, Concentração de Ferro de 0,68% e pH de 8,8 e obteve 92% de recuperação total como coagulante.

Após os testes em laboratório o autor realizou um teste com aparelho piloto, utilizando um reator fabricado em fibra de vidro. O lodo neste caso teve o ferro totalmente solubilizado, ou seja, foi possível recuperar todo o coagulante do lodo inicial no lodo remanescente.

A amostra de lodo utilizada por Chiaramonte (2020) possuía 16,67% de concentração de Al. O autor utilizou 6 amostras para o experimento e obteve 97,42% de eficiência de recuperação. Chiaramonte (2020) juntamente com Menegaro *et al.* (2014) apresentaram os melhores valores de eficiência no processo de recuperação por via ácida.

5.4 Eficiência no tratamento da água bruta

Em termos de remoção de turbidez e cor aparente, Guimarães (2005) concluiu que o sulfato de alumínio e o cloreto férrico recuperados apresentaram a mesma eficiência que os produtos comerciais. Os resultados de turbidez, exceto por uma amostra que foi analisada na faixa de pH inadequada, apresentaram valores de turbidez abaixo de 0,5 uT conforme determinado pela Portaria 05 (BRASIL, 2017) e **Figura 14**.

Figura 14- Resultado da remoção de cor aparente e turbidez em ensaios jarrest

Ensaio	Dosagem de coagulante mg/L	pH	Dosagem de cal mL/L	Água decantada		Água filtrada	
				Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)
28/07/04							
sulfato de alumínio recuperado	24	6,9	7	8,5	60	0,3	8
sulfato de alumínio comercial	24	6,9	5,5	9,5	60	0,2	8
02/11/04							
sulfato de alumínio recuperado	9	6,9	4,5	0,8	10	0,3	5
sulfato de alumínio comercial	9	6,9	4,5	0,7	9	0,3	5
20/02/05							
sulfato de alumínio recuperado	25	7,6	22,4	9,8	23	10	1
sulfato de alumínio comercial	25	7,6	20,6	20	70	35	7
22/12/04							
cloreto férrico recuperado	7	6,9	4,2	2,6	62	0,3	<1
cloreto férrico comercial	7	6,9	4,2	2,8	63	0,15	<1

Fonte: Guimarães (2005).

No sulfato de alumínio recuperado pelo autor, a concentração de Al_2O_3 foi 9 vezes menor que a exigida para o coagulante comercial e o cloreto férrico recuperado apresentou concentração de Fe^{+3} , expressa como $FeCl_3$, 27 vezes menor que do coagulante comercial, apesar disso observa-se que o desempenho em escala reduzida quanto a remoção de turbidez e cor aparente do coagulante com cloreto férrico foi melhor que o com alumínio. Entretanto, o autor afirma que foi necessário maiores volumes de coagulante recuperado para obtenção de eficiência similar ao do coagulante comercial no tratamento da água, consequentemente maiores custos com o ácido utilizado na recuperação.

Demattos *et al.* (2001) realizaram análise de qualidade de água com o coagulante recuperado em seu teste piloto. O coagulante foi levado à estação de tratamento de água da cidade de Brumadinho e aplicado por 10 hrs consecutivas. Observou-se que a qualidade da água tratada permaneceu inalterada, eles afirmaram ainda que foi possível observar uma melhora na turbidez da água decantada, entretanto não apresentou estes dados para comparação.

Os autores também realizaram uma avaliação da viabilidade técnica da solubilização do coagulante em grande escala. Ele concluiu que a técnica é viável, estimou-se uma recuperação de 95%, com economia diária de 7410 litros de coagulante, sendo que para a recuperação deste coagulante serão necessários 5170 litros de ácido clorídrico.

Freitas *et al.* (2016) obteve os resultados expressos na **Tabela 7**. Ele realizou os testes com quatro amostras com pH variando entre 1 e 2; e teor de umidade de 55% e 95%. Pode-se observar que o pH após o tratamento se encontrou abaixo do permitido pela legislação Portaria 05 (BRASIL, 2017), o autor afirma que a água bruta já apresentava um pH baixo e pode ter contribuído para este fenômeno. Em relação a turbidez, percebe-se que a sua eficiência do coagulante recuperado foi muito próxima a do comercial, exceto pela amostra 3 de pH 1/ U= 95%.

Tabela 7- Resultados de pH e turbidez para água bruta e tratada com os coagulantes comercial e recuperado

Amostra	pH	Turbidez (NTU)
Água Bruta	5,750±0,030	28,325±0,375
Coagulante Comercial	6,075±0,005 ^a	0,342±0,023 ^a
C. Rec. pH =1/U=55%	5,505±0,040 ^a	0,435±0,050 ^{a,b}
C. Rec. pH 2/U=55%	5,795±0,225 ^a	0,330±0,070 ^a
C. Rec. pH =1/U=95%	5,890±0,140 ^a	0,695±0,005 ^b
C. Rec. pH =2/U=95%	5,695±0,285 ^a	0,390±0,055 ^a

Fonte: Freitas *et al.* (2016).

Em contrapartida, nos ensaios de tratamento realizados por Chiaramonte (2020), os resultados de remoção de turbidez com o coagulante recuperado e comercial não foram eficientes, provavelmente devido a dosagem insuficiente dos coagulantes. Apenas a amostra 1 apresentou valores significativos de redução de turbidez e linearidade de pH (faixa de 4,23 a 4,42), porém ainda assim estavam em desconformidade com o permitido pela Portaria 05 (BRASIL, 2017) que determina pH na faixa de 6,0 a 9,5 e turbidez abaixo de 0,5 uT. A **Figura 15** apresenta os principais resultados obtidos pelo autor.

Figura 15-Resultados dos parâmetros de pH e turbidez da água bruta e com o coagulante comercial e recuperado (1)

	Dosagem de coagulante	pH – Água bruta 1	pH – Água bruta 2	Turbidez (NTU) - Água bruta 1	Turbidez (NTU) - Água bruta 2
Água bruta	-	6,94	6,74	8	49
Água bruta + CC ETA	2 mL	3,15	3,17	35	23
	8 mL	2,78	2,88	33	15,3
	12 mL	2,63	2,73	2,7	2,3
Água bruta + CR 1	2 mL	4,23	4,43	1,95	58
	8 mL	4,29	4,71	0,72	0,64
	12 mL	4,42	3,95	2,2	2,3

Fonte: Chiaramonte (2020).

O autor apontou que o pH do processo de coagulação depende da dose aplicada e alcalinidade da água bruta. O coagulante reage com a água acidificando o meio por causa da liberação de CO₂, portanto se a água bruta não possuir alcalinidade suficiente, o coagulante pode agir de modo a reduzir demasiadamente o pH da solução e impossibilitar o processo de coagulação. Diante disso, entende-se que este pode ter sido um dos motivos para os resultados encontrados pelo autor, porém ele não realizou esta investigação durante a pesquisa.

5.5 Avaliação da redução do volume do lodo

Em relação a redução do volume do lodo após o processo de recuperação, Guimarães (2005), verificou que os lodos ricos em alumínio, apresentaram redução média foi de 43,2%, quanto nos lodos ricos em ferro, a redução média foi de 42,5%, resultados bastante próximos. Foi observado também que os lodos de alumínio produziram muita espuma, essas microbolhas transportam as partículas de resíduos mais leves fazendo com que parte delas flutuem ao invés de sedimentarem, dificultando a separação do lodo não solubilizado, do lodo recuperado.

Os lodos de ferro apresentaram bolhas, porém em proporção menor, segundo o autor, este problema teria relação com a velocidade de agitação usada que foi de 500 rpm em ambos os casos. O autor apontou também, que para resultados de redução de volume do lodo acima de 60%, é necessária a dosagem elevada de ácido para o processo de acidificação.

O volume do lodo analisado em laboratório por Demattos *et al.* (2001) foi reduzido em 64%, já em seu teste piloto foi reduzido em 83%. Chiaramonte (2020) alcançou em todas as amostras uma redução média de 77,12% de LETA após a acidificação. Os autores não discorreram sobre a presença de espuma neste processo, não sendo possível a comparação entre os estudos.

6. CONCLUSÃO

No presente estudo foi possível realizar os testes de umidade e matéria orgânica das amostras coletadas na ETA Rio das Velhas, bem como realizar a revisão bibliográfica e comparação dos resultados obtidos nos estudos de recuperação de sulfato de alumínio e cloreto férrico. Diante disso infere-se que a sazonalidade exerce certa influência na qualidade do lodo e por consequência, na qualidade do coagulante recuperado.

No que tange a eficiência do processo de recuperação por via ácida, diante dos resultados expostos, observa-se que o processo de recuperação por via ácida se mostrou tecnicamente eficiente e promoveu a redução considerável do volume do lodo. A aplicação do coagulante recuperado no tratamento de água bruta foi eficiente na remoção de turbidez e cor aparente, porém os valores de pH não apresentaram conformidade com a legislação nos casos em que foram avaliados.

A mistura do lodo durante o processo de acidificação deve ser feita com critério, uma vez que demasiada agitação do resíduo acarreta a formação de espumas e contribui para flotação de partículas do resíduo, bem como para a qualidade do coagulante recuperado. Diante do exposto pelos estudos, a recuperação por via ácida seria uma alternativa viável em larga escala, porém deve-se realizar mais pesquisas de modo a compreender sobre a interferência entre os parâmetros de agitação, dosagem, sazonalidade e pH na qualidade final do produto recuperado. De forma a garantir maior eficiência e menores custos para a indústria.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas técnicas). **NBR 10004/2004, Resíduos sólidos-classificação**. Rio de Janeiro, 71p, maio de 2004.

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20. ed.. Washington: APHA,1998.

ARSAE-MG (Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais). **Relatório de fiscalização do Sistema Integrado de Abastecimento de Água da RMBH- Bacia do Rio das Velhas**. 2013. Belo Horizonte, Minas Gerais.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, 12 de fevereiro de 1998.

BRASIL. **Portaria de Consolidação nº5, de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2011. Disponível em: <http://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolidacao-n-5-de-28-de-setembro-de-2017.pdf>. Acesso: 26 ago. 2021.

BOTERO. W.G.; SANTOS. A.; OLIVEIRA. L.CL; ROCHA. J.C. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Revista Química Nova**, Alagoas, v. 32, nº 8. 2009.

BUSELATTO, D. M.; WENZEL, M, C.; ROCHA, G. H.; WEBBER, J.; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. **Revista Matéria**, Rio Grande do Sul, v.24, n.1. 2019.

CHIARAMONTE. R.C. **Estudo de viabilidade da recuperação do coagulante sulfato de alumínio em lodo de estação de tratamento de água (LETA)**. 2020. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Unidade Acadêmica de pesquisa e pós-graduação. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais). **Tratamento de Água**. [2021?]. Disponível em: <https://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/agua-de-qualidade/tratamento-da-agua>. Acesso em: 20 jun.2021.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, 17 de março de 2005.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução CONAMA nº430, 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. Brasília, 13 de maio de 2011.

COPAM (Conselho Estadual de Política Ambiental). **Deliberação Normativa nº 153, de 26 de julho de 2010**. Convoca municípios para o licenciamento ambiental de sistemas de tratamento de água e dá outras providências. Minas Gerais, 26 de julho de 2010.

COPAM (Conselho Estadual de Política Ambiental). **Deliberação Normativa nº 217, de 06 de dezembro de 2017**. Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locacionais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais no Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Minas Gerais, 06 de dezembro de 2017.

COPAM (Conselho Estadual de Política Ambiental). **Deliberação Normativa Conjunta nº 01, de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Minas Gerais, 05 de maio de 2008.

DANDOLINI, I; **Reciclagem do lodo de Estação de Tratamento de Água- Produção de coagulante por lixiviação ácida**. 2014. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DEMATOS, M.; COSTA, G. J; FONSECA, D. A.; BRAGA, J. P. C.; JANZEN, W. Redução do volume de lodo gerado em estações de tratamento de água – A proposta de recuperação do coagulante pelo processo de acidificação no Sistema Manso. In: **21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental** - Anais Eletrônicos I-047, João Pessoa: Paraíba, 2001.

FONTES, C.M.A.; TOLEDO FILHO, R.D.; BARBOSA, M.C. Cinza de lodo de esgoto (CLE) em concretos de alto desempenho: caracterização e aplicação. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**: Rio de Janeiro, v.9, nº6- maio, 989- 1006p. 2016.

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

FRANCO, E.S. **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 estação de tratamento de água**. 2009. 187f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

FREITAS, J.G.; FERREIRA FILHO.S. S.; PIVELI. R. P. Viabilidade técnica e econômica da regeneração de Coagulantes a partir de lodos de estações de Tratamento de água. **Revista Engenharia Ambiental e Sanitária**, São Paulo, v. 10, nº 2 - abr-jun, 137-145p. 2005.

FREITAS, V. O.; BARBOSA.F.; CAGLIARI. A.; SOUZA. T.R.; VIEIRA. M.; ROSA.G. S. Viabilidade Técnica da Regeneração de Coagulante por Via Ácida a partir do Lodo da ETA de uma Indústria de Corantes. In: **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2016, Fortaleza. Anais...Ceará: ABEQ, 2016.

GUIMARAES, N.C. **Recuperação de Coagulante a partir da Acidificação de Resíduos Gerados na Estação de Tratamento de Água do Rio Manso**. 2005. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GUIMARÃES, P. S. (2013). **Tratamento de Águas Residuárias Oriundas da Purificação do Biodiesel por Coagulação Empregando Sulfato de Alumínio e Quitosana: Avaliação Preliminar**. 2013. 77 p. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos- Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010.p. 105-107.

MATTOS, M. R. U.; GIRARD, L. Caracterização físico-química e ensaios de adensamento em coluna do lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Água de grande porte. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 28, p. 34-43, 2013.

MELLO, V. F. B.; ABREU, J. P. G.; FERREIRA, J. M.; JUCÁ, J. F. T.; MOTTA SOBRINHO, M. A. Variáveis no processo de coagulação /floculação/decantação de lixiviados de aterros sanitários urbanos. **Revista Ambi-Água**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 88-100, 2012.

MENDES, C.G.N. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor ariáveis**. 1989. 144 p. Tese de Doutorado Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade do Estado de São Paulo.

MENEGARO, D.A.; MIGUEL, T.F.; FIGUEIREDO, A.P.; SKORONSKI, E.; DOMINGUINI, L. Regeneração de Sulfato de Alumínio a partir de lodo de ETA e Água de Drenagem Ácida de Mina. In: **Seminário de Pesquisa, Extensão e Inovação do IFSC**. Santa Catarina, 2014.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº5, 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. Brasília, 2021.

MOREIRA, V. T. G.; DE PAIVA, G. S.; SOARES, A. F. S. Lodo de estação de tratamento de água (LETA): resíduo ou insumo?. **Revista PETRA**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, p. 17-37, jan./jul. 2017.

OLIVEIRA, A.B.; DA SILVA, H.P.M.; CAVALLINI, G.S.; QUEIROZ, S.C.B. Pós-tratamento de efluente sanitário por coagulação com íons de alumínio recuperados de lodo de ETA. **Revista de gest. sust. ambient.**, Florianópolis, v. 6, n. 2, p. 257 - 271, jul./set. 2017.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. São Carlos, SP. 233p. (Dissertação Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2001.

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**, Minas Gerais, v.19, n.3, pp. 204 -211, 2014.

RICHTER, C.A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. 1.ed. São Paulo: Edgar Blucher,2001. 2-3p.

RODRIGUES, L. P. **Incorporação de resíduo de estação de tratamento de água de Campos dos Goytacazes em corpos cimentícios para uso em tijolo solo-cimento**. 2012. 89 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos do Goytacazes – Rio de Janeiro.

SOUZA, A. B.; Meirelles Jr, R.; Mendes, M. F.; Pereira, C. S. S. Viabilidade Técnica da Regeneração de Coagulante por Via Ácida a partir do Lodo da ETA de uma Indústria de Corantes. In: **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2016, Fortaleza. Anais...Ceará: ABEQ, 2016