

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

RUAN LARISSON TONINATTO VILELA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COAGULANTES RECUPERADOS DE LODO
DE ETA POR EXTRAÇÃO VIA ALCALINA-ÁCIDA**

Ilha Solteira
2020

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RUAN LARISSON TONINATTO VILELA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COAGULANTES RECUPERADOS DE LODO
DE ETA POR EXTRAÇÃO VIA ALCALINA-ÁCIDA**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia de Ilha-Solteira
– UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre. Área de
Concentração: Recursos Hídricos e
Tecnologias Ambientais

Orientadora: **Rosane Freire Boina**

Ilha Solteira

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

V699a Vilela, Ruan Larisson Toninatto.
Avaliação do desempenho de coagulantes recuperados de lodo de ETA por
extração via alcalina-ácida / Ruan Larisson Toninatto Vilela. -- Ilha Solteira:
[s.n.], 2020
71 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e
Tecnologias Ambientais, 2020

Orientador: Rosane Freire Boina
Inclui bibliografia

1. Reciclagem. 2. Toxicidade. 3. Alumínio. 4. Destinação. 5. Reutilização.

Raiane da Silva Santos

Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

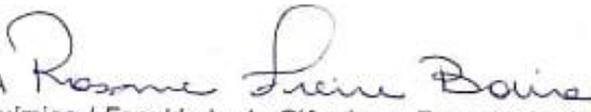
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação do desempenho de coagulantes recuperados de lodo de ETA por extração via alcalina-ácida

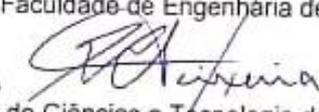
AUTOR: RUAN LÁRISSON TONINATTO VILELA

ORIENTADORA: ROSANE FREIRE BOINA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL, área: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:

Prof.^a. Dr.^a. ROSANE FREIRE BOINA 
Departamento de Química e Bioquímica / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - UNESP

Prof. Dr. TSUNAO MATSUMOTO 
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. SILVIO RAINHO TEIXEIRA 
Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - UNESP

Ilha Solteira, 21 de fevereiro de 2020

À minha mãe, Marly.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela saúde e integridade que me permitiram chegar até aqui. Que continuem me permitindo seguir em frente.

Agradeço à minha Mãe, Marly, pelo amor incondicional e cuidados durante todos os momentos da minha vida.

Agradeço à minha orientadora, Prof^a Dr^a Rosane Freire, pela paciência, ensinamentos e contribuições.

Agradeço aos meus colegas e amigos de pesquisa, pelos momentos de ajuda e descontração.

Agradeço aos técnicos e funcionários da central de laboratórios de química da FCT, pela contribuição direta e indireta.

Agradeço ao Prof^o Dr^o Sílvio Teixeira, pelas contribuições durante o desenvolvimento do trabalho e pelas considerações no exame de qualificação.

Agradeço ao Prof^o Dr^o Tsunao Matsumoto, pelas contribuições no exame de qualificação.

Agradeço ao Ms Eng^o Gilmar Peixoto, Gerente da Sabesp de Presidente Prudente, pelas contribuições no exame de qualificação e pelo apoio técnico junto à equipe da Sabesp no fornecimento do material de pesquisa.

Agradeço a colaboração da Prof^a Dr^a Juliana Sgorlon, Prof^a Dr^a Andrea Jabur e Mariane Gheller com material e informações.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Quando atingimos nosso ponto mais baixo, estamos abertos à maior mudança.

Aang

RESUMO

No processo de tratamento de água visando sua potabilidade é gerado um resíduo (lodo) cujo manejo e disposição são problemas de caráter urgente, principalmente, devido à escassez de soluções eficazes. Um desafio extra a esses problemas é que esse lodo pode possuir em sua composição uma concentração acentuada de alumínio (elemento com efeitos nocivos aos organismos e ao meio ambiente) devido ao coagulante utilizado no processo de tratamento. Recuperar e reutilizar os componentes coagulantes do lodo pode ser uma alternativa para a sua destinação. Assim, com esse propósito, será possível economizar no custo de dosagem com a reciclagem do produto obtido, além de possibilitar a diminuição do volume final do lodo devido à remoção de água durante o processo. O método consistiu na recuperação, via alcalina-ácida, do coagulante do lodo (desaguado) de duas ETAs distintas. Inicialmente, os lodos foram submetidos a extração em pH 12, com hidróxido de sódio (NaOH – 20%) e, posteriormente, extração em pH 2, testando o ácido sulfúrico (H₂SO₄ – 20%) e o ácido clorídrico (HCl – 20%). A proporção utilizada foi 1:10 (m:v). A reutilização dos coagulantes recuperados foi realizada em *Jar Test* utilizando água bruta de um dos pontos de captação do município de Presidente Prudente – SP. O efeito coagulante foi validado fazendo comparativo com o coagulante comercial PAC, por meio dos parâmetros turbidez (NTU) e cor (PCU), além da análise frente aos valores máximos permitidos (VMP) pelo Ministério da Saúde para os mesmos parâmetros. Os resultados mostraram que três dos quatro coagulantes obtidos, se destacaram por apresentarem eficiências de remoção de cor e turbidez de águas brutas, superiores a 99%, com muitos valores próximos ou iguais aos obtidos pelo PAC, além de estarem dentro dos VMP. Com esse trabalho, levando em consideração os parâmetros analisados, foi possível concluir que o método de recuperação possui potencial de ser uma destinação parcial do lodo, uma vez que no processo, além do coagulante recuperado, uma parcela sólida remanescente do lodo necessita de destinação adequada. Mais estudos são necessários para avaliar a viabilidade, econômica e técnica, desse método, levando em consideração os fatores que influenciam na qualidade do produto final obtido, e os diversos outros parâmetros que o validem.

Palavras-chave: Reciclagem. Toxicidade. Alumínio. Destinação. Reutilização.

ABSTRACT

In water treatment process, aiming at its potability, a residue (sludge) is generated, which management and disposal are urgent problems, mainly due to the lack of effective solutions. An extra challenge to these problems is that the sludge may have a high aluminum concentration in its composition (an element with harmful effects to organisms and the environment) due to the coagulant used in the treatment process. Recovering and reusing coagulant components of the sludge can be an alternative for its destination, since for this purpose it is possible to save the dosage cost by recycling the obtained product, in addition to reducing the final sludge volume due to the water removal during the process. The method consisted of recovering, through an alkaline-acid, coagulant from two different WTPs sludge. Initially, the sludge was subjected to extraction at pH 12, with sodium hydroxide (NaOH - 20%) and, later, extraction at pH 2, testing sulfuric acid (H₂SO₄ - 20%) and hydrochloric acid (HCl - 20%). The proportion used was 1:10 (m: v). The reuse of the recovered coagulants was carried out in Jar Test using raw water from one of the collection points in the city of Presidente Prudente - SP. The coagulant effect was validated by comparing it with the commercial coagulant PAC, using the parameters turbidity (NTU) and color (PCU), besides to the analysis compared with the maximum allowed values (MAV) by the Ministry of Health for the same parameters. The results showed that three of the four coagulants obtained, stood out for presenting efficiencies in removing color and turbidity from raw water, greater than 99%, with many values close to or equal to those obtained by the PAC, in addition to being lower than the MAV. With this work, taking into account the analyzed parameters, it was possible to conclude that the recovering method has the potential to be a partial sludge destination, since in the process, in addition to the recovered coagulant, a remaining solid needs an adequate destination. Further studies are needed to assess the viability, economical and technical, of this method, taking into account the factors that influence the quality of the final product obtained, and the various parameters that validate it.

Keywords: Recycling. Toxicity. Aluminum. Destination. Reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma esquemático da problemática do trabalho.	19
Figura 2 – Ilustração do sistema de tratamento de água convencional.	20
Figura 3 – Fluxograma da tecnologia de ciclo completo de tratamento de água.	21
Figura 4 – Ilustração esquemática da distribuição de água no lodo de ETA.	28
Figura 5 – Esquema de recuperação de coagulante por via ácida.	33
Figura 6 – Fluxograma das etapas do desenvolvimento do estudo econômico.	35
Figura 7 – Preparo do Lodo de ETA para os ensaios. A) adensamento gravitacional do lodo em meio filtrante (feltro + brita); B) destorroamento e secagem em estufa; C) lodo seco e peneirado.	37
Figura 8 – Fluxograma esquemático das principais etapas de realização do trabalho.	37
Figura 9 – Processo de homogeneização das amostras.	39
Figura 10 – Processo de recuperação do coagulante pela rota alcalina-ácida.	40
Figura 11 – Amostras após o processo de sedimentação, as três a esquerda são referentes ao CRL _S , as três a direita ao CRL _{Cl}	41
Figura 12 – Imagens de MEV dos lodos de ETA: A) e B) Lodo de Presidente Prudente com magnificação de 100X e 1000X respectivamente; C) e D) Lodo de Apucarana com magnificação de 100X e 1000X respectivamente.	47
Figura 13 – Coagulantes Recuperados do lodo da ETA de Presidente Prudente: A) Com utilização do ácido sulfúrico; B) Com utilização do ácido clorídrico.	49
Figura 14 – Remoção de cor e turbidez utilizando coagulante recuperado do lodo CRLP _{Cl} (pH 7, D = 2,0 mL/L). A) Fase de mistura rápida; B) Fase de mistura lenta; C) Fase de sedimentação.	59

Figura 15 – Imagens de MEV dos resíduos após processo de recuperação do coagulante com magnificação de 100X: A) e B) Lodo de Presidente Prudente após utilização do HCl e H₂SO₄ respectivamente; C) e D) Lodo de Apucarana após utilização do HCl e H₂SO₄ respectivamente.....62

Figura 16 – Imagens de MEV dos resíduos após processo de recuperação do coagulante com magnificação de 1000X: A) e B) Lodo de Presidente Prudente após utilização do HCl e H₂SO₄ respectivamente; C) e D) Lodo de Apucarana após utilização do HCl e H₂SO₄ respectivamente.....63

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Dados dos lodos de algumas ETAs da região metropolitana de São Paulo.....	24
Tabela 2 – Frações Granulométricas e Série Sólidos dos lodos de ETA.....	43
Tabela 3 – Caracterização das amostras quanto à sua composição por EDX.	45
Tabela 4 – Resultados da composição do lodo de ETA presentes na literatura, expressos em porcentagem.	46
Tabela 5 – Concentração de alumínio nos coagulantes recuperados (CR) e nos lodos de ETA.	48
Tabela 6 – Caracterização da água após ensaio de <i>Jar Test</i> com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 5,5; temperatura do ensaio 25°C ± 3°C. a) turbidez 11,9 NTU; cor 80 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.	50
Tabela 7 – Caracterização da água após ensaio de <i>Jar Test</i> com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 6,0; temperatura do ensaio 25°C ± 3°C. a) turbidez 17,7 NTU; cor 150 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.	51
Tabela 8 – Caracterização da água após ensaio de <i>Jar Test</i> com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 6,5; temperatura do ensaio 25°C ± 3°C. a) turbidez 19,7 NTU; cor 180 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.	52
Tabela 9 – Caracterização da água após ensaio de <i>Jar Test</i> com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 7,0; temperatura do ensaio 25°C ± 3°C. a) turbidez 19,7 NTU; cor 180 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.	53
Tabela 10 – Caracterização da água após ensaio de <i>Jar Test</i> com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 7,5; temperatura do ensaio 25°C ± 3°C. a) turbidez 19,7 NTU; cor 180 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.	54

Tabela 11 – Caracterização da água após ensaio de <i>Jar Test</i> com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 8,0; temperatura do ensaio 25°C ± 3°C. a) turbidez 19,4 NTU; cor 180 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.	55
Tabela 12 – Caracterização da água após ensaio de <i>Jar Test</i> com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 8,5; temperatura do ensaio 25°C ± 3°C. a) turbidez 19,4 NTU; cor 180 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.	56
Tabela 13 – Frações Granulométricas dos resíduos após o processo de recuperação do coagulante.	60
Tabela 14 – Caracterização dos lodos de ETA dos resíduos após o processo de recuperação do coagulante, quanto à composição por EDX.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRLA _{Cl}	Coagulante recuperado do lodo da ETA de Apucarana com utilização de ácido clorídrico
CRLA _S	Coagulante recuperado do lodo da ETA de Apucarana com utilização de ácido sulfúrico
CRLP _{Cl}	Coagulante recuperado do lodo da ETA de Presidente Prudente com utilização de ácido clorídrico
CRLP _S	Coagulante recuperado do lodo da ETA de Presidente Prudente com utilização de ácido sulfúrico
EDX	Espectrometria de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de tratamento de água
ETE	Estação de tratamento de esgoto
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente
LS	Lodo Seco
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma técnica brasileira
PAC	cloreto de polialumínio
PNRS	Política nacional de resíduos sólidos
Sisnama	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
Suasa	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
VMP	Valores Máximos Permitidos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1	Tratamento de água	19
3.1.1	<i>Coagulação</i>	21
3.1.2	<i>Floculação e Decantação/Flotação</i>	23
3.2	Resíduos do processo de tratamento de água	23
3.2.1	<i>Aspectos legais</i>	25
3.2.2	<i>Toxicidade dos lodos de ETA</i>	26
3.3	Gerenciamento do lodo de ETA	27
3.3.1	<i>Adensamento e desaguamento do lodo de ETA</i>	28
3.3.2	<i>Alternativas de destinação para o lodo de ETA</i>	29
3.4	Recuperação de coagulantes	32
3.4.1	<i>Método de recuperação via ácida</i>	32
3.4.2	<i>Método de recuperação via alcalina</i>	33
3.4.3	<i>Método de recuperação via alcalina-ácida</i>	34
3.4.4	<i>Viabilidade econômica da recuperação de coagulantes</i>	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	Ensaio de Caracterização	38
4.2	Recuperação dos compostos coagulantes	39
4.3	Reciclagem dos coagulantes recuperados de lodo	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1	Caracterização Inicial do Lodo de ETA	43
5.2	Caracterização dos Coagulantes Recuperados	47

5.3	Desempenho de ação dos Coagulantes Recuperados.....	49
5.4	Caracterização do sólido remanescente após o processo de recuperação do coagulante	59
6	CONCLUSÃO	64
7	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável à manutenção da vida. Suprir todas as atividades relacionadas ao desenvolvimento humano é um grande desafio, pois além da disponibilidade em quantidade, é necessária qualidade satisfatória para cada finalidade a qual é destinada.

As águas retiradas de um manancial de captação para o consumo humano, dificilmente estão de acordo com os parâmetros de qualidade exigidos por legislação, como no caso do Brasil, a Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017). Sendo assim, é necessário o tratamento prévio da água antes de utilizá-la.

O ciclo convencional do tratamento adotado para a potabilidade das águas em Estações de Tratamento de Água (ETAs) envolvem coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção (AHMAD, AHMAD, ALAM, 2016a). Nesse sistema é gerado um resíduo (lodo) com alto teor de umidade, geralmente acima de 80% (TANTAWY, 2014), cuja gestão é um problema devido, principalmente, à grande quantidade produzida: mais de 2 milhões de m³ diariamente somente no Brasil (KATAYAMA, 2012; BRASIL, 2019).

A disposição desse lodo em aterros sanitários requer grandes áreas, operação adequada e processos de deságue prévio do material, tornando essa alternativa um método dispendioso (SILVA *et al.*, 2015b; ACHON, BARROSO, CORDEIRO, 2008). Além disso, tal prática contraria a ordem de prioridades da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual estabelece que medidas como a reutilização e reciclagem devam ser adotadas para esse tipo de resíduo (BRASIL, 2010).

Diversos estudos sobre o uso alternativo do lodo de ETA já foram desenvolvidos, como a incorporação dele em material cerâmico (TEIXEIRA *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2015a) e em concreto (TAFAREL *et al.*, 2016), porém eles não apresentaram propostas viáveis para atender o montante gerado. A inexistência de uma solução sustentável, economicamente e ambientalmente, resulta em uma prática que é muito comum em ETAs em funcionamento no

Brasil: lançar esses resíduos diretamente nos corpos hídricos próximos (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013).

Somada a essa problemática, sais de alumínio convencionalmente têm sido utilizados em todo o mundo no processo de coagulação e floculação. Logo, o lodo produzido em um processo de tratamento de água que utiliza esses sais possui grande quantidade desse elemento em sua composição (ZHAO *et al.*, 2011).

Os efeitos adversos da presença do alumínio de forma não natural no meio ambiente ainda estão sendo estudados. Algumas pesquisas já mostraram resultados com efeitos nocivos em plantas (SINGH *et al.*, 2017), em peixes (OLIVEIRA *et al.*, 2017) e em humanos, em que houve uma importante relação da presença do alumínio com disfunções neurológicas como a doença de Alzheimer (PROLO *et al.*, 2007; EXLEY, 2016).

No Brasil, causar poluição de qualquer natureza que resulte em dano ao meio ambiente e à saúde humana é caracterizado como crime ambiental (BRASIL, 1998). Portanto, o ato de lançar os resíduos de tratamento de água, com elevado teor de alumínio residual, diretamente em corpos hídricos pode ser considerado um ato criminoso. Evidenciando, então, a necessidade de soluções práticas e efetivas para a gestão do lodo de ETA.

Devido às propriedades coagulantes dos compostos metálicos presentes no lodo de ETA, diversos estudos foram conduzidos para avaliar a reutilização desses resíduos, tanto a aplicação direta (JANGKORN *et al.*, 2011; XU *et al.*, 2015) quanto a aplicação dos compostos isolados do lodo (AHMAD *et al.*, 2016). O processo de recuperação do coagulante conduz a uma redução significativa do volume de lodo e melhora das características de desidratação (TSUTIYA; HIRATA, 2001), facilitando a gestão do resíduo remanescente do processo.

Dentre os métodos existentes de extração desses compostos, Xu *et al.* (2009) destacaram que a digestão ácida possui a melhor relação de eficiência e custo, porém, para aplicar esse método, o processo de solubilização dos

compostos metálicos não é seletivo, podendo, então, solubilizar compostos contaminantes também (KEELEY; JARVIS; JUDD, 2014).

Keeley *et al.* (2015) desenvolveram um trabalho no qual foi utilizada uma rota alcalina-ácida na extração de compostos coagulantes de lodo de tratamento de água a base de ferro, e obtiveram resultados interessantes, devido à diferença de solubilidade em meio alcalino.

Do exposto, este trabalho visou estudar a rota alcalina-ácida de extração, em lodo de duas ETAs que utilizam coagulante a base de alumínio. A proposta de extrair os compostos metálicos, potencialmente tóxicos, está aliada à sua utilização como coagulante, um produto com valor agregado que pode diminuir custos com a dosagem do produto comercial.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o processo de recuperação, via alcalina-ácida, dos compostos coagulantes a base de alumínio do lodo de duas estações de tratamento de água e analisar a reciclagem dos produtos obtidos desse processo na remoção de turbidez e cor de águas brutas.

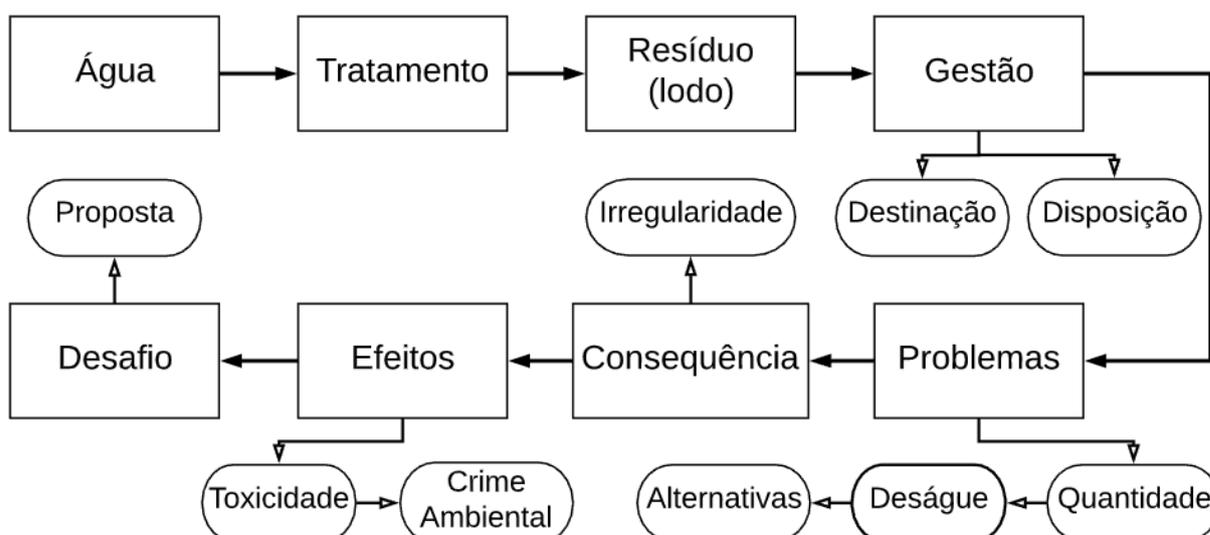
2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar previamente o lodo proveniente das ETAs em estudo quanto à composição elementar e textural;
- Analisar a concentração de alumínio presente nos coagulantes recuperados e sua efetividade de atuação na coagulação;
- Caracterizar o sólido final após os processos de recuperação proposto.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, são abordados os assuntos mais importantes referentes à problemática do trabalho, a qual está apresentada no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma esquemático da problemática do trabalho.



Fonte: Próprio autor.

3.1 Tratamento de água

A potabilização da água bruta para fins de consumo humano é feita por meio do tratamento da água, que consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias com potencial de causar dano à saúde (LIBÂNIO, 2010).

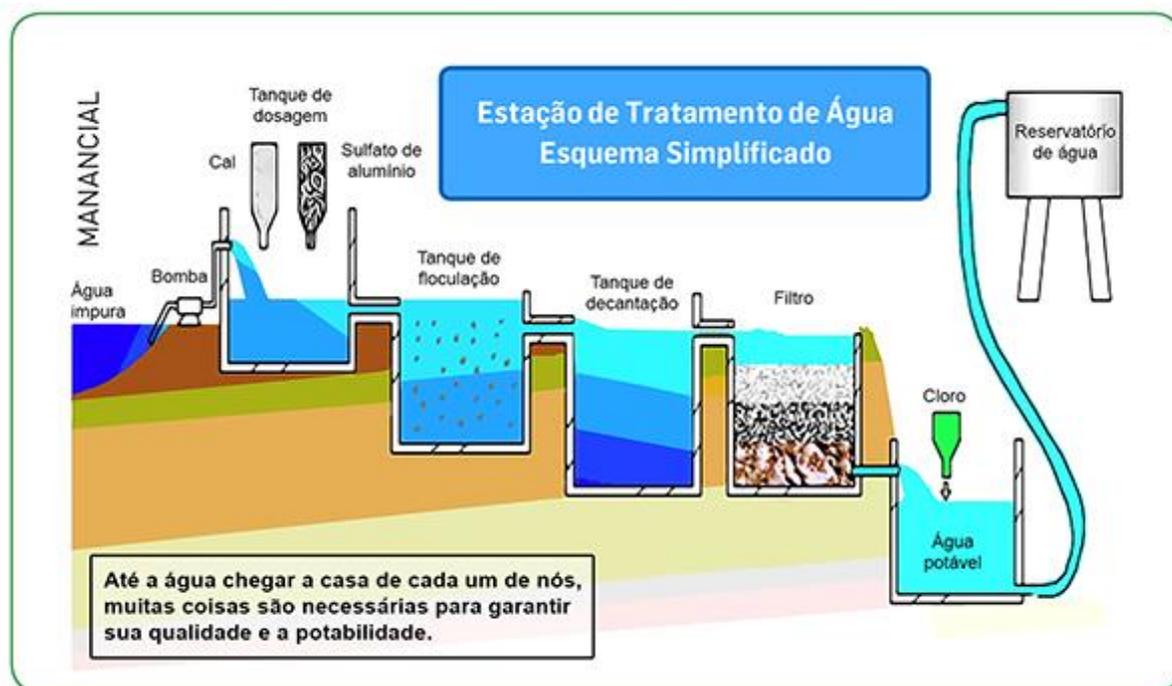
Segundo Libânio (2010), as tecnologias de tratamento disponíveis visam à adequação da água bruta aos limites estabelecidos pela legislação vigente, com menores custos e impactos ambientais. Sendo assim, elas devem se pautar em premissas fundamentais que são:

- Característica da água bruta;
- Custos de implantação, operação e manutenção;
- Manuseio e confiabilidade dos equipamentos;
- Flexibilidade operacional;

- Localização geográfica e características da comunidade;
- Disposição final do lodo gerado.

No processo de potabilização das águas brutas, exemplificado na Figura 2, após a captação, as tecnologias podem apresentar, basicamente, três fases: clarificação, filtração e desinfecção. A desinfecção possui a função de neutralizar os microrganismos presentes na água, como bactérias e vírus. A filtração remove sólidos dissolvidos e suspensos, e uma parcela de microrganismos. A clarificação tem o objetivo de reduzir o aporte de partículas aos filtros, portanto ela tem a função primordial de remover sólidos suspensos e dissolvidos (LIBÂNIO, 2010).

Figura 2 – Ilustração do sistema de tratamento de água convencional.



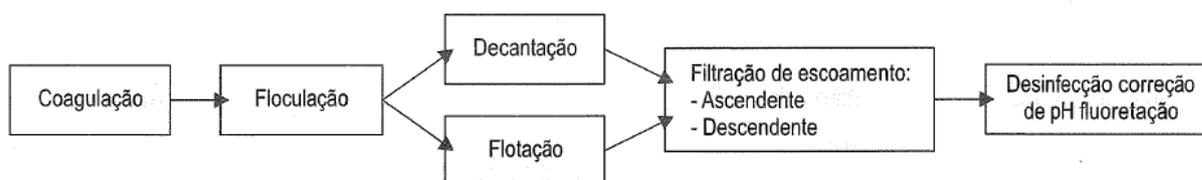
Fonte: Viana (2018).

A qualidade da água bruta norteia quais fases do tratamento são necessárias para adequação ao padrão de potabilidade, podendo estar adequada após a desinfecção apenas, ou demandar as três fases à medida que for verificada menor qualidade da água (LIBÂNIO, 2010).

Quando são utilizadas as três fases do tratamento, ela é tida como tecnologia de ciclo completo, denominada, também, de tratamento

convencional. A Figura 3 ilustra o fluxograma típico de um tratamento convencional, no qual a fase de clarificação está dividida em etapas de suas operações unitárias principais: Coagulação, floculação e decantação ou flotação.

Figura 3 – Fluxograma da tecnologia de ciclo completo de tratamento de água.



Fonte: Libânio (2010).

3.1.1 Coagulação

A coagulação é um processo que consiste na desestabilização das partículas coloidais e suspensas, ou neutralização de substâncias húmicas realizada pela conjunção de reações químicas e ações físicas, com duração de poucos segundos, entre o coagulante, usualmente sais de alumínio ou ferro, a água e as impurezas presentes (DI BERNARDO; PAZ, 2008a; LIBÂNIO, 2010).

As reações químicas ocorrem por um processo denominado hidrólise, no qual os íons metálicos de ferro e alumínio, com carga positiva, formam fortes ligações com átomos de oxigênio, liberando os átomos de hidrogênio. Desse processo, são formadas as espécies hidrolisadas de ferro e alumínio, podendo culminar no precipitado do hidróxido do metal em função da dosagem (LIBÂNIO, 2010).

Seguida das reações químicas, ocorrem as ações físicas, em que as espécies hidrolisadas ou os precipitados formados, são transportados, na etapa de mistura rápida, para que haja o contato com as impurezas presentes na água, causando, em função da magnitude da dosagem e pH, a desestabilização ou envolvimento nos precipitados. Dessa forma, a colisão dessas partículas desestabilizadas, na fase de floculação, forma aglomerados

maiores que podem ser removidos nas etapas posteriores (DI BERNARDO; PAZ, 2008a; LIBÂNIO, 2010).

O processo de coagulação é realizado na unidade de mistura rápida, a qual pode ser hidráulica (vertedores Parshall, etc.), mecânica (câmara com agitador) ou especial (misturadores estáticos) (DI BERNARDO; PAZ, 2008a). Nas estações de ciclo completo a eficiência da coagulação influi no desempenho das demais etapas do tratamento, favorecendo a qualidade do efluente, aumentando a duração dos filtros e reduzindo os custos (LIBÂNIO, 2010).

Existem quatro mecanismos de coagulação: compressão da dupla camada, neutralização, varredura e formação de pontes químicas. Os mecanismos mais importantes para as ETAs são a neutralização e a varredura. No primeiro, a coagulação ocorre devido à neutralização da carga das impurezas em decorrência do precipitado com carga positiva ou de espécies hidrolisadas positivas. Na varredura, as dosagens de coagulante são relativamente altas, causando um emaranhamento das impurezas com o excesso de precipitados de ferro ou alumínio (DI BERNARDO; PAZ, 2008a).

Os principais fatores que podem interferir no processo de coagulação são o pH e a alcalinidade da água bruta, a natureza e a distribuição dos tamanhos das partículas causadores de cor e turbidez, a uniformidade de aplicação dos produtos químicos na água e o tipo de coagulante (LIBÂNIO, 2010).

A definição do tipo de coagulante em uma ETA deve pautar-se em fatores relacionados à adequabilidade à água bruta, à tecnologia de tratamento e à análise global de custos que envolvem, além do custo do coagulante propriamente dito, os produtos, operações e manutenção decorrentes dessa escolha. Além disso, outro aspecto que tem sido, progressivamente, considerado relevante é a quantidade e característica dos resíduos gerados no tratamento, as quais dependem das características da água bruta e dos produtos utilizados no processo (LIBÂNIO, 2010).

Segundo Bratby (2006), os sais de alumínio e ferro são os coagulantes mais comuns utilizados, e sua popularidade é devida, além de sua efetividade, à sua disponibilidade fácil e custos, relativamente, baixos. Dentre as variações desses sais, o sulfato de alumínio é tido como o mais utilizado no mundo (BRATBY, 2006), além dele, outros coagulantes metálicos comuns são o cloreto férrico, sulfato ferroso clorado, sulfato férrico e, também, o cloreto de polialumínio (PAC), que a partir de 1990 ganhou maior destaque por apresentar bons resultados para amplo espectro de pH de coagulação (LIBÂNIO, 2010).

3.1.2 Floculação e Decantação/Flotação

A floculação e a decantação são etapas subsequentes à coagulação, e são operações unitárias que compõem juntas a fase de clarificação do tratamento da água.

Na fase de floculação, são fornecidas condições, em termos de tempo e agitação, para que ocorra o choque entre as partículas desestabilizadas pelo processo de coagulação. Dessa forma, aglomerados maiores, denominados flocos, são formados e se tornam mais susceptíveis de remoção na unidade seguinte (DI BERNARDO, PAZ, 2008a; LIBÂNIO, 2010).

Na fase de decantação ou flotação ocorre a separação das fases líquida e sólida. A primeira ocorre por meio do fenômeno físico da sedimentação, no qual os flocos formados apresentam movimento descendente devido à ação da gravidade e sua efetividade depende de condições adequadas de tempo e escoamento (DI BERNARDO, PAZ, 2008a). Na segunda, são introduzidas bolhas de ar que carregam as partículas aderidas para a superfície. A flotação é utilizada em casos mais específicos que a decantação, portanto, são menos comuns em ETAs convencionais (DI BERNARDO; PAZ, 2008a; LIBÂNIO, 2010).

3.2 Resíduos do processo de tratamento de água

Os resíduos do processo de tratamento de água, chamados de lodo de ETA, são produtos da remoção dos sólidos presentes na bruta junto à água que os transportam. São, comumente, caracterizados por apresentarem alto teor de umidade, textura “gelatinosa”, resistência às operações de

adensamento e desidratação, e comportamento tixotrópico, ou seja, apresenta-se em um estado mais sólido quando em repouso, e mais líquido quando agitado (BRATBY, 2006).

Nesses resíduos podem estar contidos os materiais sólidos causadores de turbidez, sejam eles orgânicos ou inorgânicos, algas, bactérias, vírus, coloides, precipitados da água bruta junto aos produtos coagulantes adicionados durante o processo de tratamento (CRITTENDEN *et al.*, 2012). Devido à relação das características do lodo de ETA com a qualidade da água bruta e os produtos utilizados no processo de tratamento, a composição desses lodos podem variar de acordo com o local em que ETA está instalada (CRITTENDEN *et al.*, 2012).

A Tabela 1 traz as principais informações do estudo realizado por Tsutiya e Hirata (2001) sobre resíduos gerados em decantadores de ETAs de municípios próximos à região metropolitana de São Paulo – SP. Nela, é possível notar a diferença na composição desses resíduos.

Tabela 1 – Dados dos lodos de algumas ETAs da região metropolitana de São Paulo.

Parâmetro	Guaraú	ABV	Rio Claro	Rio Grande	Teodoro Ramos	Alto Cotia
Alumínio (mg/kg)	6386	7505	6690	83821	123507	95541
Cobre (mg/kg)	23	1109	14833	25	2791	< 5
Ferro (mg/kg)	32712	281508	449774	32751	41259	30080
Fluoreto (mg/kg)	152	86	150	42	46	38
Manganês (mg/kg)	3146	1684	6756	136	5181	453
Sódio (mg/kg)	6609	1027	41482	563	3222	433
Zinco (mg/kg)	59	57	75	47	145	66
Organoclorados (ppb)	ND	0,02	0,02	-	-	ND
Sólidos totais (mg/L)	24957	17412	14486	11043	5518	10692

ND: não detectado; (-) não informado.

Fonte: Tsutiya e Hirata (2001).

3.2.1 Aspectos legais

De acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), os lodos de ETA são classificados como resíduos sólidos, podendo ser enquadrados como perigosos ou não perigosos dependendo da comprovação de periculosidade de seus componentes.

Partindo dessa classificação, a Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) traz conceitos que diferem resíduos sólidos de rejeitos, em seu art. 3º é definido:

“XV - rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;” (BRASIL, 2010).

“XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;” (BRASIL, 2010).

Para os resíduos sólidos, segundo a PNRS, deve ser dada uma destinação final ambientalmente adequada, enquanto para os rejeitos, a disposição final ambientalmente adequada, que também são conceitos diferentes definidos no art. 3º como:

“VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar

danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;” (BRASIL, 2010).

“VIII - disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;” (BRASIL, 2010).

A PNRS tem por objetivo e ordem de prioridades na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Considerando as diretrizes da PNRS, a gestão do lodo de ETA no Brasil, em sua maioria, não está adequada. Achon e Cordeiro (2015) fizeram um levantamento de dados referentes à destinação e tratamento dos resíduos em 22 ETAs, e constataram que 86% delas lançam o lodo sem tratamento em corpos d'água.

Segundo a Lei nº 9433/1997 (BRASIL, 1997), que institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos, o lançamento em corpo de água de resíduos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final, estão sujeitos à outorga. Esse lançamento de resíduos em corpos d'água, no Brasil, é regulado pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2011) que complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005), e se comprovado ato irregular causador de dano ao meio ambiente, caberá punição civil, administrativa e criminal, de acordo com a Lei nº 9605/1998 – Lei de Crimes Ambientais (BRASIL, 1998).

3.2.2 Toxicidade dos lodos de ETA

O impacto do lançamento do lodo de ETA em cursos de água pode ser considerado, no mínimo, como antiestético, tendo em vista o aumento da turbidez e da cor que causam no corpo receptor (GUIMARÃES, 2005).

Embora o potencial de causar dano dependa das características do lodo e dos cursos d'água receptores, o efeito tóxico desse resíduo vem sendo muito associado ao alumínio residual presente em sua composição. Segundo Vitorello, Capaldi, Stefanuto (2005), os minerais contêm grandes quantidades de alumínio em sua composição, maior parte em forma de aluminossilicatos e óxidos presentes nas frações argilosas, que não apresentam perigo tóxico. O problema decorre de ambientes ácidos que solubilizam o alumínio, tornando-se potencialmente tóxicos para as plantas.

Segundo Messias (2013), o descarte do lodo de ETA em corpos hídricos deve ser evitado, uma vez que foram comprovados os efeitos de toxicidade, principalmente, em organismos aquáticos.

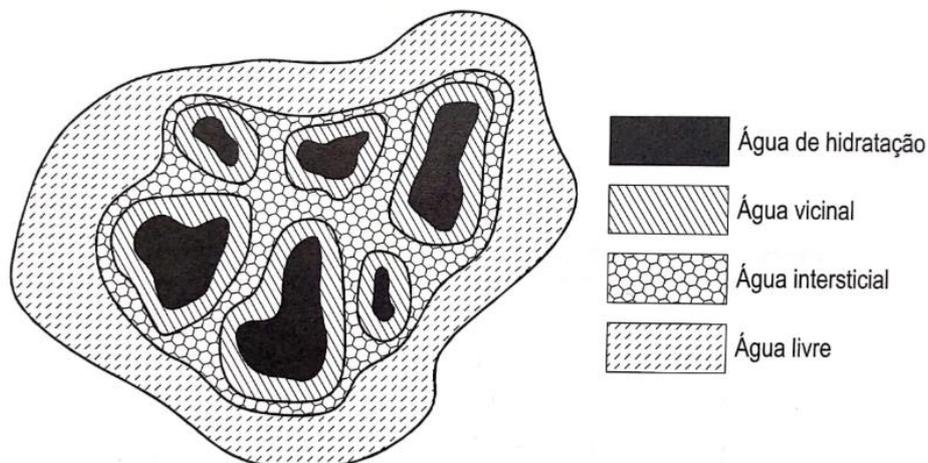
Em humanos, a maioria das condições de exposição existentes ao alumínio, não é abertamente tóxico. Porém, existem estudos, tanto os recentes quanto os mais antigos, que relacionam a presença do alumínio a doenças neurológicas. Todavia, desde que não há um posicionamento definitivo, seria sensato adotar precauções e reduzir a exposição a esse metal (ALFREY; LEGENDRE; KAEHNY, 1976; PROLO *et al.*, 2007; EXLEY, 2013).

3.3 Gerenciamento do lodo de ETA

Gerenciamento de resíduos é um termo utilizado para descrever o planejamento, desenvolvimento e operação de instalações que podem ser destinadas ao reuso ou disposição final dos lodos de ETA. Geralmente, as despesas com o transporte e a disposição final dos resíduos compõem a maior parte dos custos com gerenciamento do lodo de ETA. A solução mais eficaz desse problema é a redução do volume de lodo, via remoção de água, e reciclagem de seus compostos (CRITTENDEN *et al.*, 2012).

A Figura 4 ilustra o esquema de distribuição de água no lodo de ETA, dentre as frações apresentadas, a fração de água livre é a mais fácil de ser removida, entretanto, as demais frações são retiradas somente mediante a utilização de polímeros e métodos específicos (DI BERNARDO, PAZ, 2008b)

Figura 4 – Ilustração esquemática da distribuição de água no lodo de ETA.



Fonte: Di Bernardo e Paz (2008b).

3.3.1 Adensamento e desaguamento do lodo de ETA

O adensamento e o desaguamento ou desidratação, são operações subsequentes com a finalidade de aumentar a concentração de sólidos totais no lodo de ETA por meio da remoção de água e, conseqüente, redução do volume a ser disposto (DI BERNARDO; PAZ, 2008b).

A água presente no lodo de ETA na etapa de adensamento é mais fácil de ser removida, o que demanda processos mais simples e de menor custo relativo. Portanto, o adensamento é feito para remover o máximo de água possível do lodo, tornando-o mais adequado para a etapa seguinte de desaguamento ou disposição, se assim for planejado (RICHTER, 2001).

O adensamento pode ser feito por gravidade, por flotação e por processos mecanizados, cada qual com a sua vantagem e desvantagem para ser avaliada conforme o desempenho e os custos, a fim de que se escolha a melhor alternativa (DI BERNARDO; PAZ, 2008b).

O desaguamento, que reduz ainda mais o volume de lodo, pode ser feito por meio de lagoa de adensamento, leito de secagem, centrífuga, filtro prensa de esteira, filtro prensa de placas e filtro prensa parafuso. Assim como no

adensamento, cada técnica possui suas peculiaridades, vantagens e desvantagens, e devem ser bem avaliadas para a escolha da alternativa de melhor desempenho em relação aos custos (DI BERNARDO, PAZ, 2008b).

3.3.2 Alternativas de destinação para o lodo de ETA

Soluções que sejam viáveis economicamente e ambientalmente, para a destinação final do lodo de ETA, continuam sendo um grande desafio para as empresas de saneamento no Brasil (DI BERNARDO; PAZ, 2008b). Dentre as alternativas existentes, podem ser destacadas:

Fabricação de bloco cerâmico e tijolo

A destinação do lodo de ETA para esse fim deve ser precedida de estudos das características do lodo, junto com ensaios de moldagem e queima para comprovar a sua viabilidade técnica. Os lodos que contém principalmente argila e silte são mais indicados na fabricação de tijolo (DI BERNARDO; PAZ, 2008b).

Em algumas localidades a retração do lodo pode chegar a 20%, limitando a proporção em que o lodo pode ser incorporado (TSUTIYA; HIRATA, 2001). Também há possibilidade de altos índices de perda de massa ao fogo devido à presença acentuada de matéria orgânica em algumas localidades.

- Silva *et al.* (2015b) estudaram a incorporação de lodo de ETA que utiliza PAC como coagulante, na fabricação de blocos cerâmicos. Observaram que a absorção de água aumentou com a incorporação do lodo, embora ainda atendessem às especificações técnicas normativas. Concluíram que a incorporação pode ser feita em até 13,9% de lodo para aplicação real dos blocos.
- Teixeira *et al.* (2006) utilizaram dois lodos de ETA distintos, um a base de ferro e outro a base de alumínio, na incorporação de material cerâmico estrutural. Concluíram que o lodo de ETA pode ser incorporado na produção de tijolos e telhas, embora essa incorporação, em geral, piore as propriedades físicas e tecnológicas do material. Foi

observado que é possível incorporar até 10% de lodo a base de alumínio e 20% de lodo a base de ferro, para queimas a partir de 950° C.

Fabricação de cimento e incorporação do lodo em matriz de concreto

Na fabricação do cimento Portland, geralmente, são utilizados calcário, xisto e argila. O calcário contém baixas concentrações de sílica, ferro e alumínio e correspondem à cerca de 70% a 80% do material bruto utilizado. O lodo de ETA normalmente possui esses elementos em sua composição, podendo ser adicionados para solucionar essa deficiência (DI BERNARDO; PAZ, 2008b).

As principais características que o lodo de ETA pode apresentar e que podem comprometer e inviabilizar a fabricação de cimento são: altas concentrações de matéria orgânica, antracito ou carvão ativado, sulfato, permanganato de potássio e metais pesados (TSUTIYA; HIRATA, 2001).

- Tafarel *et al.* (2016) estudaram a incorporação do lodo de ETA em concreto. Observaram que houve um aumento da absorção de água na ordem de 8%. Concluíram que a incorporação de até 5% não causa diminuição significativa da resistência axial à compressão.

Aplicações agrícolas

Segundo Tsutiya e Hirata (2001), alguns benefícios associados a aplicação dos lodos de ETAs em solos agrícolas são: melhoria estrutural do solo, ajuste de pH, adição de traços de minerais, aumento da capacidade de retenção de água e melhoria das condições de aeração do solo. Entretanto, a baixa concentração de matéria orgânica e de nutrientes presentes no lodo de ETA torna essa alternativa desinteressante.

Auxiliar para clarificação de água com baixa turbidez

A melhoria na sedimentabilidade em águas com baixa turbidez pode ser alcançada com a utilização de auxiliares de floculação. Os lodos de ETA podem assumir a função de serem esses auxiliares, tornando-se uma alternativa de baixo custo (TSUTIYA; HIRATA, 2011).

- Xu *et al.* (2015) utilizaram o lodo de ETA a base de alumínio como auxiliar de coagulação de águas de baixa turbidez. Concluíram que a reciclagem do lodo como auxiliar, além de efetivo, tem potencial econômico, ao reduzir o volume de dosagem dos coagulantes em até 50%, e reduzir o volume de lodo para disposição.

Disposição do lodo de ETA em ETE

O lançamento de lodos de ETAs em sistemas coletores de esgotos e seu encaminhamento à ETE é uma prática comum realizada em todo o mundo. Dentre as vantagens, podem ser citadas: controle de H₂S, aumento da eficiência dos decantadores primários e maior eficiência na remoção de fósforo, principalmente quando os lodos são a base de alumínio e ferro (TSUTIYA; HIRATA, 2001).

Dentre as principais desvantagens, destacam-se: possibilidade de sobrecarga dos coletores e dos decantadores primários, monitoramento contínuo para não limitar a contração de nutrientes essenciais ao desenvolvimento dos microrganismos nas ETEs, maior aporte de sólidos inorgânicos às ETEs, que acarretam em intensificação das atividades e os custos de operação e manutenção (TSUTIYA; HIRATA, 2001; MELO; BUENO, NAPOLITANO, 2003; DI BERNARDO; PAZ, 2008b).

- Peixoto (2008) realizou em seu trabalho a aplicação do lodo de ETA no adensador de uma ETE piloto baseada em uma ETE de lodos ativados. A simulação de aplicação foi realizada com cargas de 2000 mg/L a 4000 mg/L de lodo de ETA. Ele constatou que a aplicação de até 2000 mg/L não perturbava e não comprometia o processo de tratamento da ETE piloto. Além disso, houve uma observação que a aplicação do lodo de ETA contribuiu para uma melhora no adensamento do lodo de ETE.

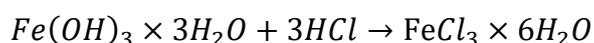
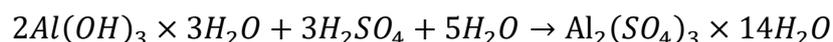
O desaguamento do lodo de ETA não é necessário para a disposição em ETEs. Porém, o envio do lodo da ETA para a ETE não resolve inteiramente o problema, apenas o transfere, pois as ETEs também geram resíduos que devem ser dispostos adequadamente (DI BERNARDO; PAZ, 2008b).

3.4 Recuperação de coagulantes

A recuperação de coagulantes também é uma forma de destinação do lodo de ETA que vem sendo estudada. Esta técnica consiste na solubilização de espécies de alumínio e ferro, que possuem potencial de coagulação. A solubilização envolve equações de equilíbrio entre o precipitado e as formas solúveis para diferentes valores de pH. Na maioria dos casos, o lodo é submetido a pH inferiores a 2 ou superiores a 10. As vantagens dessa técnica são devidas à drástica redução do volume de lodo e a possibilidade de reutilização dos compostos coagulantes (DI BERNARDO; PAZ, 2008b; GUIMARÃES, 2005).

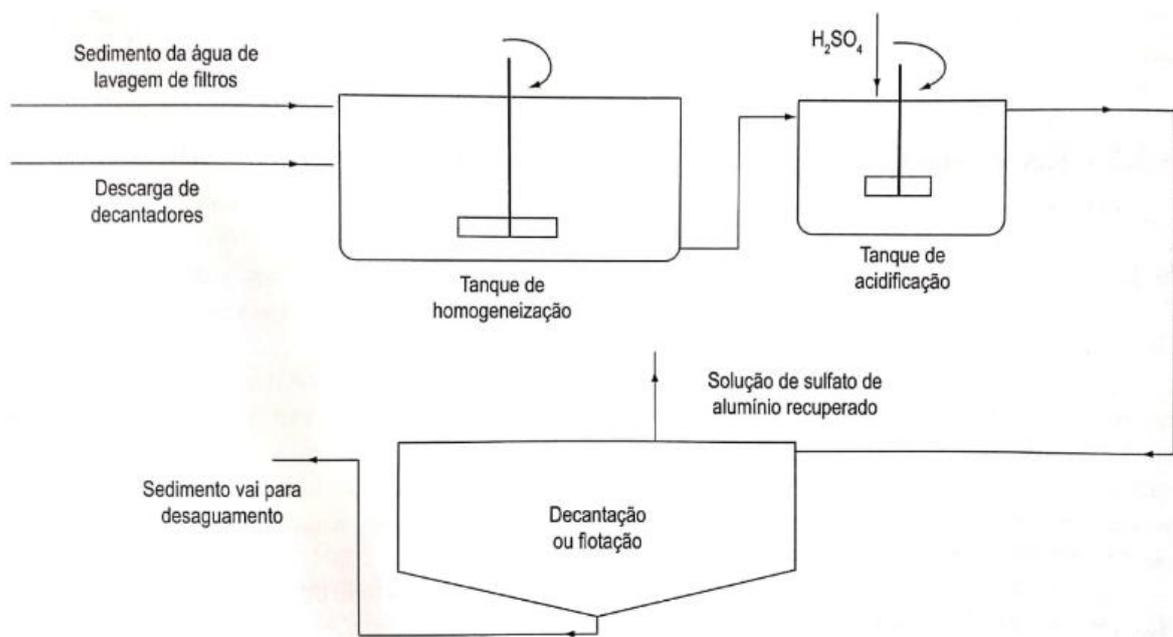
3.4.1 Método de recuperação via ácida

O método de recuperação por via ácida é o método mais utilizado. Segundo Xu *et al.* (2009) é um método muito eficiente com baixo custo. Esse método consiste na utilização de um ácido, popularmente o ácido sulfúrico ou clorídrico, em lodos contendo alumínio ou ferro. Dessa forma, ocorre a solubilização dos hidróxidos precipitados seguindo as seguintes reações (DI BERNARDO, PAZ, 2008b):



A Figura 5 ilustra o esquema de recuperação via ácida com utilização do ácido sulfúrico e lodo a base de alumínio. Inicialmente o lodo é homogeneizado, em seguida ele passa pelo processo de acidificação, onde os hidróxidos são solubilizados, e por último a separação do líquido, onde está contido o coagulante recuperado, da fase sólida.

Figura 5 – Esquema de recuperação de coagulante por via ácida.

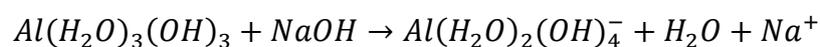


Fonte: Di Bernardo e Paz (2008b).

Diversos estudos feitos ao longo do tempo em localidades diferentes comprovaram a boa eficiência de recuperação de coagulante pelo método de recuperação ácida e um bom desempenho dos coagulantes produtos dessa recuperação (KING, CHEN, WEEKS, 1975; XU *et al.*, 2009; AHMAD *et al.*, 2016). Porém, a limitação para que haja ampla utilização dessa técnica continua sendo referente à não seletividade do processo, que acaba solubilizando produtos indesejados (GUIMARÃES, 2005).

3.4.2 Método de recuperação via alcalina

Esse método é realizado da mesma forma que o método de recuperação via ácida, entretanto, uma base é utilizada no lugar de um ácido, geralmente hidróxido de sódio, e a solubilização ocorre em pH elevado. O processo é descrito pela seguinte reação (DI BERNARDO; PAZ, 2008b):



Masschelein *et al.* (1985) estudaram a alcalinização para recuperação de coagulante de lodo a base de alumínio, foram analisadas duas bases no

processo, o NaOH e o Ca(OH)_2 . Eles verificaram que os intervalos de pH ótimos foram de 11,4 a 11,8 para o NaOH e de 11,2 a 11,6 para o Ca(OH)_2 . A partir dos resultados, foi observado que a recuperação de aluminatos atingiu 80% com a utilização do NaOH e menos de 50% com a utilização do Ca(OH)_2 .

3.4.3 Método de recuperação via alcalina-ácida

No trabalho de Keeley *et al.* (2015) foram estudadas diversas formas de purificação do coagulante recuperado do lodo de ETA a base de ferro. Dentre os processos adotados, destaca-se o pré-tratamento alcalino pela maior simplicidade, se comparado aos outros processos. Essa fase alcalina teve o objetivo de solubilizar matéria orgânica, deixando o lodo mais “puro” para o processo de acidificação.

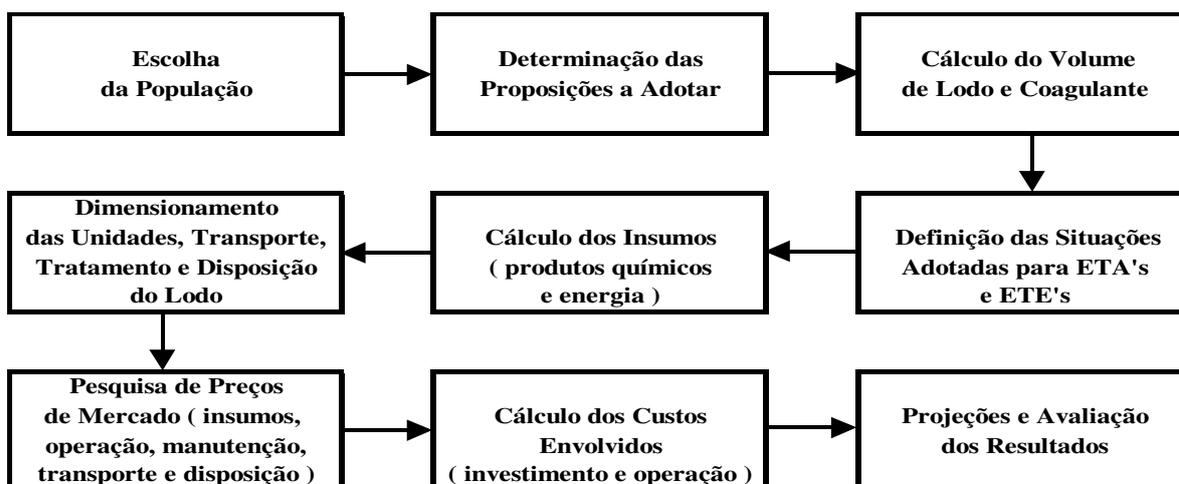
Embora os resultados do processo alcalino-ácido proposto por Keeley *et al.* (2015) tenham mostrado uma redução de 57% de matéria orgânica, se comparado ao processo de acidificação, a extração de ferro diminuiu em 47%.

3.4.4 Viabilidade econômica da recuperação de coagulantes

Os custos de implantação, operação e manutenção de sistemas de recuperação de coagulantes do lodo de ETA podem ser compensados pela economia de reciclagem dos coagulantes obtidos, além da diminuição dos custos de transporte e disposição final do lodo, uma vez que no processo há redução significativa do volume (GUIMARÃES, 2005).

Um estudo realizado por Gonçalves, Brandão, Barreto (1999) analisou a viabilidade econômica da regeneração de sulfato de alumínio de lodos de ETA. Foi levada em consideração a redução da demanda de coagulante e a redução do volume de lodo para transporte e disposição final. As etapas do estudo estão apresentadas no fluxograma da Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma das etapas do desenvolvimento do estudo econômico.



Fonte: Gonçalves, Brandão e Barreto (1999).

Foi concluído que para as populações de 20.000 e 50.000 habitantes, a regeneração de coagulantes e sua reutilização na própria ETA ou em ETE é economicamente viável, considerando-se as proposições definidas neste estudo.

Portanto, a regeneração e a reciclagem de coagulantes é uma possibilidade bastante atrativa, especialmente em situações onde existe proximidade geográfica entre as estações de tratamento de água e de esgoto, fazendo com que a co-disposição seja uma opção a ser considerado (GONÇALVES; BRANDÃO; BARRETO, 1999).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado nas dependências da Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, FCT – UNESP, na Central de Laboratórios Didáticos de Química e Bioquímica.

As amostras de lodo em estudo foram provenientes da Estação de Tratamento de Água de Presidente Prudente (SP) e de Apucarana (PR) e foram cedidas gentilmente pelas empresas de saneamento gestora. As ETAs operam em ciclo completo utilizando o PAC como agente coagulante principal. As amostras foram coletadas pela equipe de cada empresa durante do período de lavagem dos decantadores.

Para deságue, as amostras de Lodo de Apucarana passaram por processo de centrifugação, realizado na própria estação. O Lodo de Presidente Prudente passou por adensamento gravitacional (sistema filtrante), realizado nas dependências da universidade (Figura 7A). Após o adensamento, o lodo foi encaminhado para uma estufa de secagem a 100°C até que fosse observada a ausência de umidade. Durante o processo de secagem o lodo foi destorroado paulatinamente para aumentar a superfície de exposição (Figura 7B). Por fim, o lodo foi triturado em um moinho de facas locado no Laboratório de Caracterização de Resíduos Sólidos – UNESP/FCT, e passado na peneira com abertura de malha de 2 mm (Figura 7C) e denominado lodo seco (LS). As porções necessárias para cada ensaio de caracterização inicial foram separadas, e o restante foi reservado para o ensaio de recuperação do coagulante.

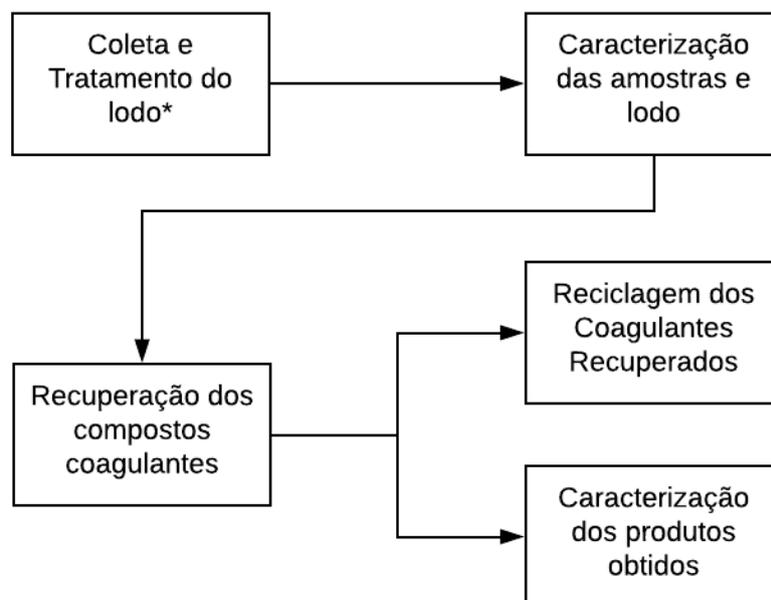
Figura 7 – Preparo do Lodo de ETA para os ensaios. A) adensamento gravitacional do lodo em meio filtrante (feltro + brita); B) destorroamento e secagem em estufa; C) lodo seco e peneirado



Fonte: Próprio autor.

A Figura 8 ilustra um fluxograma com as principais etapas do trabalho com o LS que englobam a caracterização do lodo, os ensaios de recuperação do coagulante, testes de ação dos coagulantes recuperados, e por fim, caracterização dos produtos obtidos.

Figura 8 – Fluxograma esquemático das principais etapas de realização do trabalho



Nota: * Etapa realizada apenas com o lodo da ETA de Presidente Prudente.

Fonte: Próprio autor.

4.1 Ensaios de Caracterização

Inicialmente, o lodo sem deságue foi submetido à análise de composição do teor de sólidos, resíduo fixo e resíduo volátil, seguindo as recomendações NBR 10664/1989 – Método J, Método L e Método M.

As frações areia, silte e argila do LS foram determinadas seguindo o compito analítico do Método da Pipeta – Dispersão Total (EMBRAPA, 1997). O procedimento foi realizado do no Laboratório de Solos da FCT – Unesp. A morfologia e a composição foram determinadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia por Raio X (EDX).

A análise de MEV foi realizada no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LabMMEV – UNESP/FCT) e foi conduzida em Microscópio Eletrônico de Varredura Carl Zeiss, modelo EVO LS15, a temperatura ambiente. As amostras foram depositadas no amostrador sobre fita de carbono e não necessitou de recobrimento com ouro. A EDX foi realizada em equipamento Shimadzu (EDX-7000), locado no Laboratório de Caracterização de Resíduos Sólidos – UNESP/FCT.

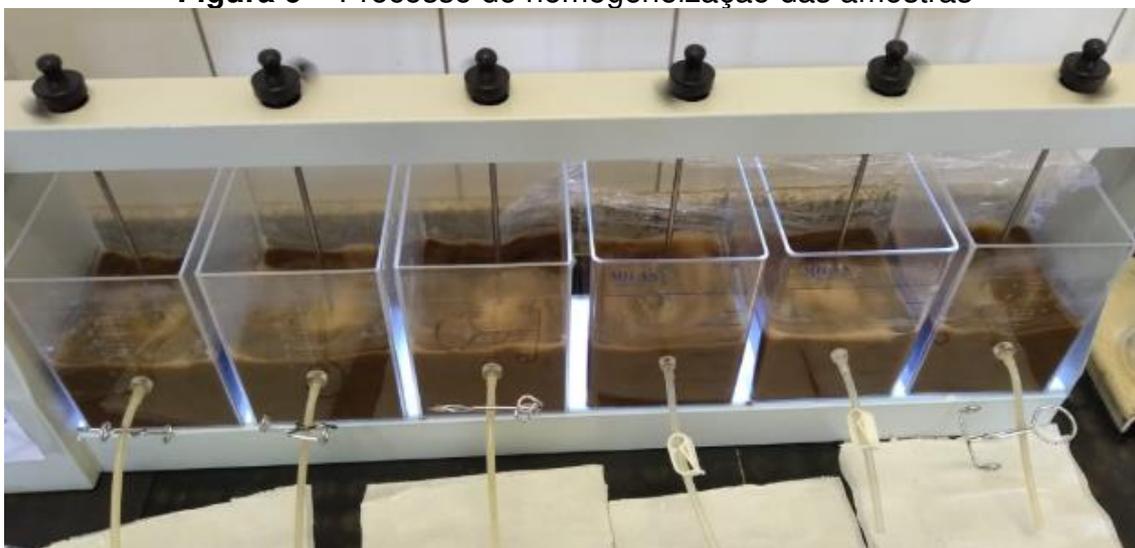
Amostras líquidas dos coagulantes recuperados do lodo foram analisadas quanto à concentração de alumínio na solução sobrenadante. A análise foi feita por Espectroscopia de Absorção Atômica utilizando o equipamento Perkin-Elmer modelo AAnalyst200 locado na Central de Laboratórios Didáticos de Química e Bioquímica – UNESP/FCT. Além disso, foi utilizado o método EPA 3050B (USEPA, 1996) para digerir amostras dos dois lodos e submetê-las à mesma análise.

O sólido remanescente após o processo de recuperação do coagulante (lodo secundário) foi adensado, seco em estufa ($\pm 100^\circ \text{C}$), triturado em almofariz com pistilo e peneirado (malha de 2 mm) para ensaios finais de caracterização, quais sejam: análise granulométrica (areia, silte e argila), caracterização de superfície e composição elementar seguindo os mesmos procedimentos analíticos aplicados para o LS.

4.2 Recuperação dos compostos coagulantes

O método de recuperação dos compostos coagulantes do lodo de ETA pela rota alcalina-ácida foi adaptado do procedimento descrito por Keeley *et al.* (2015). Inicialmente, o LS foi homogeneizado em água destilada em proporção de 100g de lodo para 1L de água (Figura 9). A mistura foi homogeneizada em agitador mecânico, por 24 horas a temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$), evitando o depósito de material ao fundo do recipiente e atentando-se à manutenção do volume (1L).

Figura 9 – Processo de homogeneização das amostras



Fonte: Próprio autor.

Na etapa de alcalinização, elevou-se o pH das amostras a 12 pela adição de hidróxido de sódio ($\text{NaOH} - 20\%$). A mistura foi agitada mecanicamente por 24 horas, a temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$), atentando-se à manutenção do volume inicial (1L) e do pH, fazendo correções quando necessárias.

Para a etapa de acidificação, o pH foi reduzido a pH 2 por duas vias distintas: pela adição de ácido sulfúrico ($\text{H}_2\text{SO}_4 - 20\%$) e pela adição de ácido clorídrico ($\text{HCl} - 20\%$). Permaneceram em agitação mecânica constante por 24 horas, a temperatura ambiente ($25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$), atentando-se à manutenção do volume inicial (1L) e do pH, fazendo correções quando necessárias.

A Figura 10 ilustra a etapa acidificação do processo de recuperação do coagulante pela rota alcalina-ácida, a qual foi realizada com a utilização de dois ácidos distintos.

Figura 10 – Processo de recuperação do coagulante pela rota alcalina-ácida



Fonte: Próprio autor.

Após a rota de recuperação, as amostras passaram por um período de sedimentação de 12 horas. A solução sobrenadante (± 500 mL) foi vertida cuidadosamente para um béquer e passou por filtração (filtro qualitativo). O produto final dos processos empregados resultou em dois potenciais coagulantes recuperados de cada um dos dois lodos estudados: o de Presidente Prudente por ácido clorídrico (CRLP_{Cl}) e por ácido sulfúrico (CRLP_S) (Figura 11), e o de Apucarana por ácido clorídrico (CRLA_{Cl}) e por ácido sulfúrico (CRLA_S).

Os ensaios de recuperação com o lodo da ETA de Presidente Prudente foram realizados em triplicata enquanto que com o lodo da ETA de Apucarana em duplicata devido à disponibilidade quantitativa dos materiais.

Figura 11 – Amostras após o processo de sedimentação, as três a esquerda são referentes ao CRL_S, as três a direita ao CRL_{Cl}



Fonte: Próprio autor.

4.3 Reciclagem dos coagulantes recuperados de lodo

Para os ensaios de reciclagem, foi utilizado o equipamento *Jar Test* Milan modelo 303m, comparando o desempenho dos coagulantes recuperados dos lodos (CRLP_{Cl}, CRLP_S, CRLA_{Cl} e CRLA_S) com o desempenho do coagulante comercial PAC, na remoção de turbidez e cor de águas brutas.

A água bruta utilizada nos ensaios foi coletada no Balneário da Amizade localizado em Presidente Prudente - SP, um dos pontos de captação da ETA do município. O coagulante comercial PAC foi, gentilmente, fornecido pela empresa de saneamento.

As dosagens utilizadas no ensaio foram em volume de coagulante por volume de água. Inicialmente, foi definida uma variação de dosagem de 1 mL/L a 20 mL/L, em intervalos de 5 mL/L, a qual foi sendo adequada à medida em que os testes com os coagulantes recuperados foram sendo executados. A finalidade dessa adequação era de se chegar ao intervalo de dosagens ótimo.

As dosagens do PAC foram as mesmas que as utilizadas para os coagulantes recuperados. Entretanto, à medida que os testes foram sendo executados, a concentração do PAC foi sendo adequada para que tivesse um desempenho ótimo no intervalo de dosagens definidos.

Em cada dosagem, o desempenho foi testado entre pH 5,5 e pH 8,5, em intervalos de 0,5. As soluções utilizadas para manutenção de pH foram soluções de NaOH (0,1N e 1N) e H₂SO₄ (0,1N e 1N). Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

O ciclo de operação do *Jar Test* era composto por três fases. A fase de mistura rápida foi realizada a 120 rpm, por 4 minutos; a mistura lenta ocorreu a 40 rpm, por 20 minutos; e, por último, a fase de sedimentação por 30 minutos. Todos os ensaios foram conduzidos em temperatura ambiente (25°C ±3°C). Após o período de sedimentação, uma alíquota do sobrenadante foi retirada para leitura de turbidez (Del Lab, modelo DLT-VW) e cor (HANNA, modelo HI 96727). O material sólido resultante foi separado para os ensaios de caracterização.

Devido às diferenças nas características iniciais das amostras de água bruta coletadas, para analisar os melhores resultados em termos de eficiência remoção de cor e turbidez, foi utilizada a Equação 1.

$$E = \left(1 - \frac{P_f}{P_i}\right) \times 100 \quad (1)$$

Em que, E é a eficiência em porcentagem, P_f é a leitura final do parâmetro e P_i é a leitura inicial do parâmetro, sejam esses parâmetros a cor ou turbidez.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes à caracterização inicial dos lodos empregados no trabalho, à efetividade da via de recuperação proposta quanto à ação coagulante na remoção de cor e turbidez de águas brutas, e à análise crítica dos produtos finais obtidos.

5.1 Caracterização Inicial do Lodo de ETA

Na Tabela 2 encontram-se os resultados obtidos nos ensaios de fração granulométrica e fração sólida (totais, fixos e voláteis).

Tabela 2 – Frações Granulométricas e Série Sólidos dos lodos de ETA.

Lodo de ETA	Frações Granulométricas (%)			Sólidos (%)		
	Areia	Silte	Argila	Totais	Fixos	Voláteis
PP	17,19	36,51	46,30	25,55	80,71	19,29
Apucarana	57,22	10,38	32,40	27,19	79,47	20,53

Nota: Observações. PP: Presidente Prudente.

Fonte: Próprio autor.

Em relação à granulometria, foi possível observar que o lodo da ETA de Presidente Prudente possui maior presença das frações silte (36,51%) e argila (46,3%). Essa característica pode estar relacionada ao mês de coleta de amostra (Janeiro/2019), um período considerado chuvoso. O lodo da ETA de Apucarana, que foi coletado no início do mês de Outubro (2019), período de transição de seca para chuvoso, possui uma característica média entre arenoso (57,22 %) e argiloso (32,40 %).

As informações relacionadas ao mês de coleta do lodo são importantes devido à variação ao longo do ano à medida que as estações, chuvosa e seca, mudam, como observado no caso das frações granulométricas no trabalho de Teixeira *et al.* (2011). Isso ocorre porque as chuvas arrastam parte do solo e matéria orgânica para dentro dos cursos d'água, as partículas finas (argila e silte) ficam em suspensão e são levadas para a ETA, enquanto a parte mais pesada (areia) sedimenta ao fundo (TEIXEIRA, 2006). Durante o período de seca, com o nível d'água mais baixo, a fração arenosa é levada em maior

quantidade durante a captação da água bruta, devido à proximidade da bomba com a areia no fundo da caixa de coleta (TEIXEIRA, 2006).

O teor de sólidos das amostras de lodo (Tabela 1) foi avaliado quanto a composição percentual mássica geral, a fração mineral e orgânica. O teor de sólidos totais também fornece, indiretamente, o teor de umidade desses materiais. Os resultados mostram pouca presença de material sólido (< 27,2%), ou seja, um alto valor de umidade: aproximadamente 75% para o lodo da ETA de Presidente Prudente e 73% para o de Apucarana.

Da porção sólida remanescente, aproximadamente 80% é composta por fração mineral, o que torna esse material um resíduo potencialmente inerte. A matéria orgânica pode ter origem natural ou antrópica. A de origem natural está relacionada aos processos biológicos e aos organismos que fazem parte deles. Já o de origem antrópica, provém das atividades antropogênicas, sejam elas domésticas ou industriais. Portanto, há oscilações das quantidades de matéria orgânica presente nos lodos de ETA dependendo do ponto de captação da água.

Botero *et al.* (2009) analisaram a quantidade de matéria orgânica no lodo da ETA de três municípios diferentes e determinaram uma variação de 20,5% a 68,9%, sendo o teor mais elevado pertencente ao lodo da ETA de Manaus – AM, a qual capta água do Rio Negro, popularmente conhecido por apresentar águas escuras devido à alta concentração de resíduos orgânicos (substâncias húmicas).

Santos (2014) destacou, ainda, que algumas características específicas dos corpos d'água podem ser alteradas com o tempo. Portanto, épocas de amostragem diferentes também influenciam na oscilação das características do lodo de ETA. Na ETA de Piracicaba, a variação do teor de matéria orgânica foi entre 1,49 e 23,46%, como constataram os trabalhos de Santos (2014), Messias (2013) e Bitencourt (2016).

A Tabela 3 mostra a composição elementar dos lodos de ETA. É possível notar que em ambos (Presidente Prudente e Apucarana) há a predominância dos elementos silício (Si) (51,85% e 28,12%), alumínio (Al)

(34,94% e 21,87%) e ferro (Fe) (8,43% e 42,58%), porém, em proporções diferentes se comparados um ao outro. Juntos, os três elementos compõe mais de 90% da composição de cada amostra de lodo.

Tabela 3 – Caracterização das amostras quanto à sua composição por EDX.

Amostra	Elemento (%)								
	Si	Al	Fe	Ti	K	S	Ca	Mn	Outros
PP	51,85	34,94	8,43	1,67	1,51	0,62	0,56	0,21	0,21
Apucarana	28,12	21,87	42,58	3,39	0,31	0,54	1,51	0,95	0,73

Nota: Observações. PP: Presidente Prudente.

Fonte: Próprio autor.

Embora os coagulantes utilizados nas ETAs possam contribuir com o aumento da quantidade desses metais no lodo, especialmente o Al, grande parte pode ser proveniente da própria composição do solo da bacia hidrográfica na qual o manancial de captação está inserido.

O lodo da ETA de Apucarana apresenta níveis elevados de ferro, mesmo que no processo de tratamento da água seja utilizado o PAC, tal ocorrência é devida ao fato de que os solos da região são ricos nesse metal (BHERING, 2007).

O silício é oriundo dos minerais, que possuem em sua composição básica os silicatos associados a outros elementos, inclusive metais como o alumínio e ferro. No geral, o alumínio é o metal mais abundante em solos brasileiros (MIGUEL *et al.*, 2010), mas existem particularidades de cada região que podem contribuir para o aumento da quantidade de outros elementos. Paixão *et al.* (2008) e Alves (2019) notaram uma concentração acentuada de ferro no lodo e relacionaram ao local de amostragem: predominância do minério de ferro.

A Tabela 4 mostra a composição elementar do lodo de diversas regiões compreendidas nos estados do Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Minas Gerais e Paraná. Não há padronização dos ensaios, apresentaram os resultados em forma de óxidos, e, também, contabilizaram a perda de massa

ao fogo. No trabalho de Alves (2019) foram estudados os lodos de ETA de dois locais distintos.

Tabela 4 – Resultados da composição do lodo de ETA presentes na literatura, expressos em porcentagem.

Elemento	Autores						Alves (2019)
	Delgado (2016)	Dandolini (2014)	Paixão <i>et al.</i> (2008)	Tartari <i>et al.</i> (2011)	Martins (2014)		
Si	28,15	27,04	12,60	21,10	50,80	10,85	27,48
Al	35,55	18,08	8,60	31,60	32,60	4,54	31,53
Fe	26,65	26,92	73,00	18,60	11,50	71,50	35,91
Ti	0,955	1,52	-	2,20	1,50	-	0,99
K	0,985	1,00	-	0,30	1,60	0,45	1,05
S	3,6	0,54	-	2,80	-	0,13	0,45
Ca	0,445	1,04	5,20	-	0,30	9,97	0,51
Mn	0,275	0,32	0,50	-	-	1,35	1,55
Outros	3,39	0,56	0,10	3,00	1,70	1,21	0,53
Perda ao fogo	-	22,98	-	20,40	-	-	-

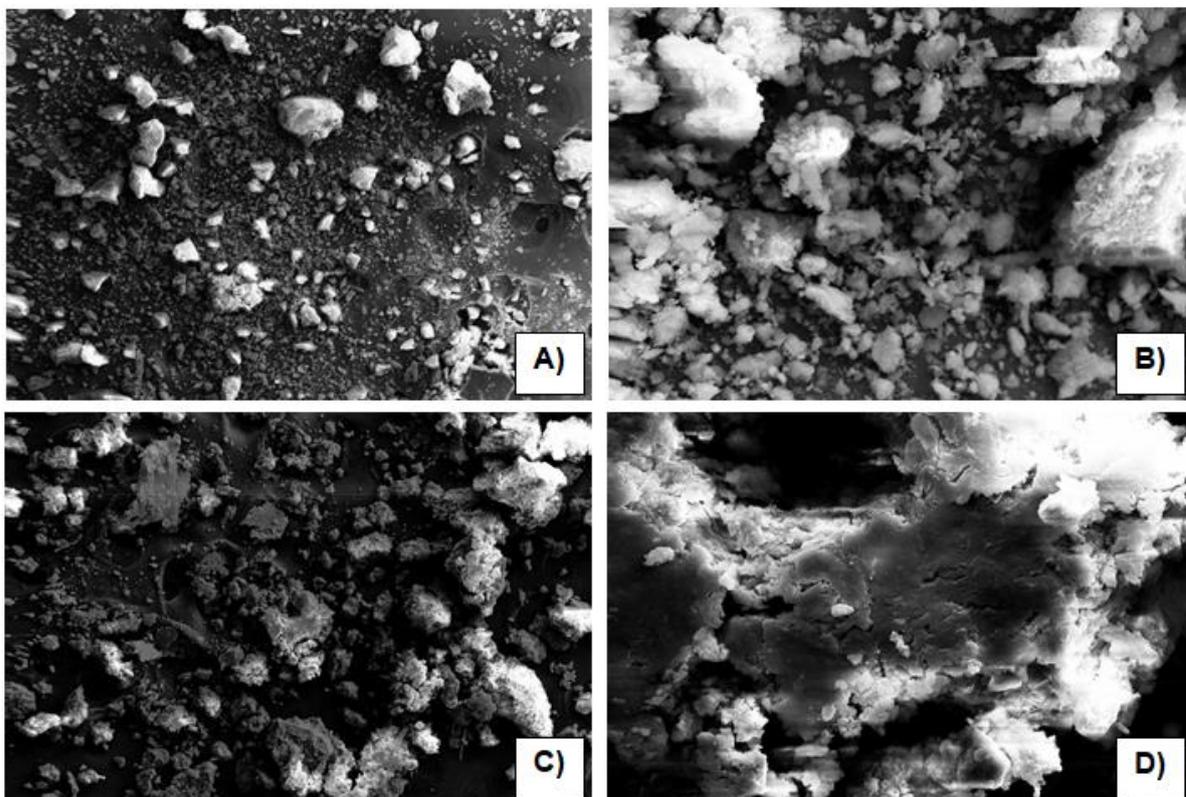
Nota: (-) não apresentou dados.

Fonte: Próprio autor.

Comparando os valores obtidos nos estudos anteriores apresentados na Tabela 3 com os valores dos resultados obtidos dos lodos estudados neste trabalho, é possível observar a predominância dos mesmos elementos, silício, alumínio e ferro. Porém em proporções diferentes. O tipo de solo da região de coleta das amostras e os produtos utilizados durante o tratamento da água bruta são as justificativas mais comuns utilizadas pelos autores citados para explicar a presença de tais elementos no lodo de ETA.

Na Figura 12 estão ilustradas as imagens obtidas por MEV dos lodos de ETA em duas ampliações distintas, 100X e 1000X. É possível observar, principalmente nas imagens em 100X (Figura 12A e 12C), partículas de diversos tamanhos diferentes, evidenciando uma larga distribuição granulométrica, o que reforça os resultados apresentados anteriormente.

Figura 12 – Imagens de MEV dos lodos de ETA: A) e B) Lodo de Presidente Prudente com magnificação de 100X e 1000X respectivamente; C) e D) Lodo de Apucarana com magnificação de 100X e 1000X respectivamente



Fonte: Próprio autor.

Com as imagens em 1000x (Figura 12B e 12D), é possível analisar a superfície das partículas, nota-se que não é uma superfície regular com padrões de formação bem definidos. Essas características também foram observadas em Soares *et al.* (2014) e Silva *et al.* (2015b), em análise superficial do lodo de ETA a base de alumínio. Segundo Yang *et al.* (2006), os compostos de alumínio no lodo de ETA não possuem distinção de formas, embora os hidróxidos de alumínio apresentem estrutura regular. Mesmo não tendo sido observados padrões de formações bem definidos nos dois lodos, é nítido que existe uma diferença entre eles.

5.2 Caracterização dos Coagulantes Recuperados

A Tabela 5 mostra o valor de concentração (mg/L) de alumínio presente nas amostras de lodo de ETA que passaram pelo processo de recuperação do

coagulante pela rota alcalina-ácida, bem como os valores de concentração obtidos nos produtos desse processo.

Tabela 5 – Concentração de alumínio nos coagulantes recuperados (CR) e nos lodos de ETA.

Amostra	Concentração (mg/L)
Lodo PP	7380,00 ± 591,14
CRLP _{Cl}	798,07 ± 17,46
CRLP _S	772,17 ± 43,88
Lodo Apuc.	7252,00 ± 84,85
CRLA _{Cl}	980,90 ± 12,02
CRLA _S	1022,00 ± 14,14

Nota: Observações. PP: Presidente Prudente; Apuc: Apucarana.

Fonte: Próprio autor.

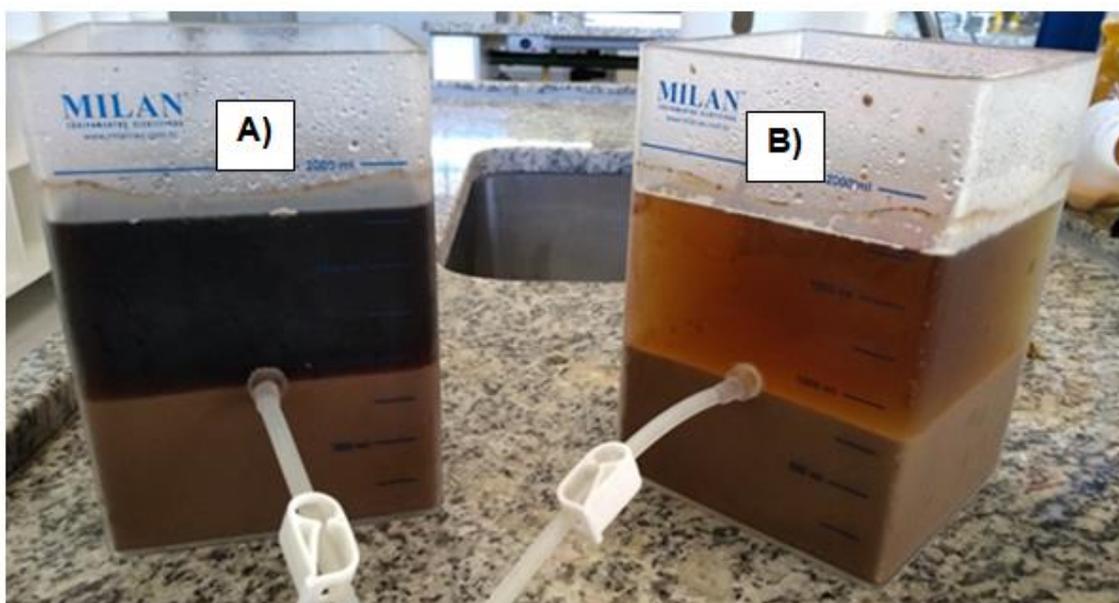
Comparando a concentração de alumínio dos coagulantes recuperados com a dos lodos de ETA, percebe-se que os coagulantes possuem valores que podem variar de 9% a 14% da quantidade de alumínio presente nos lodos de origem. Isso não indica que esses valores sejam a eficiência de recuperação do coagulante, pois, como já foi discutido anteriormente, o alumínio é um metal presente naturalmente nos minerais do solo.

Se comparados quanto à concentração de alumínio, o CRLP_{Cl} e o CRLP_S possuem uma diferença de 25,9 mg/L, e o CRLA_{Cl} e o CRLA_S possuem uma diferença de 41,1 mg/L, nota-se que não houve uma diferença muito expressiva, evidenciando que os dois ácidos (H₂SO₄ e HCl) tiveram um desempenho semelhante no processo de solubilização dos cátions. Por outro lado, na comparação entre os coagulantes recuperados de cada local, os CRLP_(S e Cl) apresentaram concentrações inferiores ao CRLA_(S e Cl).

Na Figura 13 é possível observar os aspectos visuais dos coagulantes recuperados após o processo alcalino-acido. Embora a imagem refira-se apenas ao resultado obtido do lodo de Presidente Prudente, o aspecto visual

do resultado obtido com o lodo de Apucarana foi bem semelhante. Nota-se que o produto obtido com a utilização do ácido sulfúrico (Figura 13A) possui uma coloração mais escura e um aspecto mais turvo. Por outro lado, o produto obtido com a utilização do ácido clorídrico (Figura 13B) possui um aspecto mais claro e transparente. Tal diferença, possivelmente, seja decorrente da solubilização de mais impurezas pelo ácido sulfúrico, que é um ácido mais forte.

Figura 13 – Coagulantes Recuperados do lodo da ETA de Presidente Prudente: A) Com utilização do ácido sulfúrico; B) Com utilização do ácido clorídrico



Fonte: Próprio autor.

5.3 Desempenho de ação dos Coagulantes Recuperados

As Tabelas de 6 a 11 mostram os resultados obtidos com a utilização dos coagulantes recuperados na remoção de cor e turbidez em águas brutas. Os resultados obtidos com a utilização do PAC, como parâmetro comparativo, também estão apresentados nessas Tabelas.

As informações referentes às condições iniciais do ensaio e da água bruta coletada estão discriminadas na legenda de cada Tabela, sendo: a) Informações específicas da água bruta utilizada na aplicação do CRLP_{Cl},

CRLP_S e PAC em D = 2,0 mL/L; b) Informações específicas da água bruta utilizada na aplicação do CRLA_{Cl}, CRLA_S e PAC exceto em D = 2,0 mL/L.

Após os testes de desempenho dos coagulantes recuperados nas dosagens definidas inicialmente, foi possível estabelecer as dosagens definitivas. A dosagem variou de 0,5 mL/L a 2,5 mL/L, em intervalos de 0,5 mL/L, e a concentração do PAC foi fixada em 1%.

Os resultados foram analisados frente aos Valores Máximos Permitidos (VMP) para qualidade da água tratada, estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017). Esses valores são de 0,5 uT (unidade de turbidez) para turbidez e 15 uH (unidade Hazen) para cor. As unidades de turbidez (uT e NTU) e cor (uH e PCU), possuem escala 1:1. Os resultados que apresentaram valores abaixo dos VMP estão destacados em negrito.

Tabela 6 – Caracterização da água após ensaio de *Jar Test* com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 5,5; temperatura do ensaio 25°C ± 3°C. a) turbidez 11,9 NTU; cor 80 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.

D (mL/L)	CRLP _{Cl}	CRLP _S	CRLA _{Cl}	CRLA _S	PAC
Turbidez (NTU)					
0,5	7,41* ± 5,36	3,96 ± 0,01	1,30 ± 0,09	1,56 ± 0,08	0,76 ± 0,03
1,0	2,90 ± 0,31	3,06 ± 0,28	1,16 ± 0,16	1,69 ± 0,07	0,83 ± 0,12
1,5	X	6,62 ± 4,47	0,99 ± 0,01	2,24 ± 0,30	0,23 ± 0,14
2,0	3,04 ± 0,16	8,84 ± 0,36	1,02 ± 0,52	2,90 ± 0,39	2,29 ± 1,63
2,5	3,39 ± 0,16	5,50 ± 0,11	1,20 ± 0,32	2,70 ± 0,01	0,38 ± 0,41
Cor (PCU)					
0,5	65* ± 35	35 ± 7	0 ± 0	20 ± 0	5 ± 7
1,0	30 ± 0	30 ± 9	10 ± 0	10 ± 0	5 ± 7
1,5	X	55 ± 35	20 ± 0	25 ± 7	0 ± 0
2,0	35 ± 7	80 ± 0	5 ± 7	35 ± 7	20 ± 14
2,5	40 ± 0	50 ± 0	10 ± 0	20 ± 0	0 ± 0

Nota: (*) Permanência de flocos suspensos; (X) Não apresentou coagulação e floculação.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Caracterização da água após ensaio de *Jar Test* com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 6,0; temperatura do ensaio $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. a) turbidez 17,7 NTU; cor 150 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.

D (mL/L)	CRLP _{Cl}	CRLP _s	CRLA _{Cl}	CRLA _s	PAC
	Turbidez (NTU)				
0,5	2,44 ± 0,24	2,06 ± 0,46	1,87 ± 0,30	1,14 ± 0,35	1,04 ± 0,16
1,0	1,74 ± 0,35	4,89 ± 0,19	0,81 ± 0,17	0,87 ± 0,54	0,21 ± 0,02
1,5	8,23 ± 0,70	6,42 ± 0,06	1,23 ± 0,12	0,77 ± 0,04	0,51 ± 0,60
2,0	X	6,28 ± 0,12	4,46 ± 0,04	1,16 ± 1,41	0,95 ± 0,01
2,5	X	6,09 ± 0,45	5,80 ± 0,48	0,22 ± 0,01	0,09 ± 0,01
Cor (PCU)					
0,5	25 ± 7	30 ± 0	10 ± 0	10 ± 14	5 ± 7
1,0	20 ± 0	40 ± 0	5 ± 7	5 ± 7	0 ± 0
1,5	65 ± 7	55 ± 7	10 ± 0	5 ± 7	5 ± 7
2,0	X	55 ± 7	30 ± 0	5 ± 7	20 ± 0
2,5	X	50 ± 0	40 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

Nota: (X) Não apresentou coagulação e floculação.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Caracterização da água após ensaio de *Jar Test* com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 6,5; temperatura do ensaio $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. a) turbidez 19,7 NTU; cor 180 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.

D (mL/L)	CRLP_{Cl}	CRLP_s	CRLA_{Cl}	CRLA_s	PAC
	Turbidez (NTU)				
0,5	6,20 ± 0,92	2,82 ± 0,04	1,59 ± 0,04	0,87 ± 0,13	1,37 ± 0,02
1,0	3,51 ± 2,69	3,25 ± 1,17	0,52 ± 0,25	0,55 ± 0,18	0,14 ± 0,07
1,5	2,67 ± 2,26	1,81 ± 0,47	0,48 ± 0,06	0,49 ± 0,16	0,09 ± 0,01
2,0	2,12 ± 0,64	2,45 ± 0,17	0,37 ± 0,04	0,41 ± 0,47	1,15* ± 1,50
2,5	X	4,24 ± 0,24	0,80 ± 0,66	0,76 ± 0,01	0,13 ± 0,06
Cor (PCU)					
0,5	35 ± 7	20 ± 0	20 ± 0	0 ± 0	20 ± 0
1,0	20 ± 14	30 ± 0	10 ± 0	5 ± 7	0 ± 0
1,5	20 ± 14	20 ± 0	0 ± 0	5 ± 7	0 ± 0
2,0	15 ± 7	30 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	10* ± 14
2,5	X	35 ± 7	5 ± 7	0 ± 0	0 ± 0

Nota: (*) Permanência de flocos suspensos; (X) Não apresentou coagulação e floculação.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 – Caracterização da água após ensaio de *Jar Test* com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 7,0; temperatura do ensaio $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. a) turbidez 19,7 NTU; cor 180 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.

D (mL/L)	CRLP _{Cl}	CRLP _s	CRLA _{Cl}	CRLA _s	PAC
	Turbidez (NTU)				
0,5	4,70 ± 0,22	1,79 ± 0,16	1,82 ± 0,18	2,53 ± 0,01	0,82 ± 0,16
1,0	0,74 ± 0,08	0,54 ± 0,01	0,59 ± 0,42	0,09 ± 0,00	0,09 ± 0,00
1,5	1,14 ± 0,62	1,07 ± 0,59	0,28 ± 0,13	0,09 ± 0,01	0,09 ± 0,00
2,0	0,09 ± 0,00	1,35 ± 0,32	0,08 ± 0,00	0,11 ± 0,03	0,09 ± 0,00
2,5	0,68 ± 0,03	4,83 ± 1,00	0,08 ± 0,00	0,13 ± 0,07	0,08 ± 0,00
Cor (PCU)					
0,5	35 ± 7	25 ± 7	10 ± 0	30 ± 0	10 ± 0
1,0	10 ± 0	25 ± 7	0 ± 0	0 ± 0	10 ± 0
1,5	15 ± 7	30 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
2,0	5 ± 7	35 ± 7	0 ± 0	5 ± 7	10 ± 0
2,5	20 ± 0	40 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 – Caracterização da água após ensaio de *Jar Test* com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 7,5; temperatura do ensaio $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. a) turbidez 19,7 NTU; cor 180 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.

D	CRLP_{Cl}	CRLP_s	CRLA_{Cl}	CRLA_s	PAC
(mL/L)	Turbidez (NTU)				
0,5	9,29 ± 0,77	2,47 ± 0,47	3,37 ± 0,17	2,44 ± 0,74	1,52 ± 0,04
1,0	1,34 ± 0,28	1,89 ± 0,16	0,17 ± 0,11	0,33 ± 0,16	0,41 ± 0,04
1,5	1,05 ± 0,62	1,53 ± 0,67	0,09 ± 0,00	0,09 ± 0,00	0,13 ± 0,06
2,0	0,32 ± 0,10	2,62 ± 0,64	0,08 ± 0,00	0,12 ± 0,02	0,09 ± 0,00
2,5	0,09 ± 0,00	1,79 ± 0,63	0,08 ± 0,00	0,15 ± 0,08	0,09 ± 0,00
	Cor (PCU)				
0,5	70 ± 14	30 ± 0	35 ± 7	30 ± 14	15 ± 7
1,0	25 ± 7	20 ± 0	0 ± 0	5 ± 7	5 ± 7
1,5	15 ± 7	25 ± 7	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
2,0	10 ± 0	30 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
2,5	5 ± 7	20 ± 0	0 ± 0	5 ± 7	0 ± 0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 – Caracterização da água após ensaio de *Jar Test* com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 8,0; temperatura do ensaio $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. a) turbidez 19,4 NTU; cor 180 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.

D	CRLP_{Cl}	CRLP_s	CRLA_{Cl}	CRLA_s	PAC
(mL/L)	Turbidez (NTU)				
0,5	7,78 ± 0,70	2,44 ± 0,09	X	5,29 ± 1,95	1,46 ± 0,06
1,0	0,74 ± 0,13	0,62 ± 0,30	0,52 ± 0,02	0,32 ± 0,09	0,38 ± 0,04
1,5	0,88 ± 0,02	1,62* ± 1,50	0,09 ± 0,00	0,09 ± 0,00	0,09 ± 0,00
2,0	0,51 ± 0,59	3,07* ± 3,45	0,08 ± 0,00	0,09 ± 0,00	0,10 ± 0,01
2,5	0,08 ± 0,01	2,97 ± 0,20	0,09 ± 0,01	0,14 ± 0,06	0,08 ± 0,00
	Cor (PCU)				
0,5	70 ± 0	40 ± 0	X	45 ± 7	20 ± 0
1,0	20 ± 0	20 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
1,5	20 ± 0	25* ± 7	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
2,0	15 ± 7	35* ± 21	0 ± 0	0 ± 0	20 ± 0
2,5	10 ± 0	30 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

Nota: (X) Não apresentou coagulação e floculação.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 – Caracterização da água após ensaio de *Jar Test* com os coagulantes recuperados e o PAC. Condições iniciais: pH 8,5; temperatura do ensaio $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. a) turbidez 19,4 NTU; cor 180 PCU. b) turbidez 11,4 NTU; cor 90 PCU.

D (mL/L)	CRLP _{Cl}	CRLP _S	CRLA _{Cl}	CRLA _S	PAC
Turbidez (NTU)					
0,5	8,51 ± 0,34	2,54 ± 0,58	X	X	1,80 ± 0,23
1,0	0,91 ± 0,02	0,44 ± 0,30	0,78 ± 0,11	0,34 ± 0,10	0,56 ± 0,04
1,5	0,45 ± 0,23	1,10 ± 0,35	0,20 ± 0,16	0,13 ± 0,06	0,14 ± 0,06
2,0	0,08 ± 0,00	2,45 ± 1,10	0,09 ± 0,01	0,09 ± 0,00	0,09 ± 0,00
2,5	0,08 ± 0,01	3,30 ± 0,93	0,08 ± 0,00	0,18 ± 0,05	0,09 ± 0,00
Cor (PCU)					
0,5	80 ± 0	50 ± 0	X	X	15 ± 7
1,0	30 ± 0	30 ± 0	5 ± 7	0 ± 0	0 ± 0
1,5	30 ± 0	30 ± 0	5 ± 7	0 ± 0	0 ± 0
2,0	15 ± 7	40 ± 14	0 ± 0	0 ± 0	30 ± 0
2,5	20 ± 0	35 ± 7	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

Nota: (X) Não apresentou coagulação e floculação.

Fonte: Próprio autor.

Analisando os coagulantes recuperados do lodo da ETA de Presidente Prudente, observou-se que o CRLP_{Cl} apresentou melhores resultados na remoção de turbidez em pH a partir de 7,0, chegando a uma eficiência de remoção de até 99,6% em pH 8,0 e D = 2,5 mL/L, e em pH 8,5 e D = 2,0 e 2,5 mL/L. Para remoção de cor, o CRLP_{Cl} apresentou melhores resultados em pH 7,0 (D = 2,0 mL/L) e pH 7,5 (D = 2,5 mL/L), chegando a um eficiência de remoção de 97,2%.

O CRLP_S, assim como o CRLP_{Cl}, apresentou resultados melhores para remoção de turbidez em pH a partir de 7,0 chegando a uma eficiência de remoção de 97,7% em pH 8,5 e D = 1,0 mL/L. Por outro lado, na remoção de cor, a melhor eficiência de remoção foi de 88,8%, observada em diversas condições, pH 6,5 (D = 0,5 e 1,5 mL/L); pH 7,5 (D = 1,0 e 2,5 mL/L) e pH 8,0 (D = 1,0 mL/L).

De acordo com os VMPs (PC MS nº 005/2017), os valores de turbidez atendidos com a utilização do CRLP_{Cl} foram nas condições de pH 7,0 (D = 2,0 mL/L); pH 7,5 (D = 2,0 e 2,5 mL/L); pH 8,0 (D = 2,5 mL/L) e pH 8,5 (D = 1,5 a 2,5 mL/L). Os valores de cor foram atendidos para as condições de pH 6,5 (D = 2,0 mL/L); pH 7,0 (D = 1,0 a 2,0 mL/L); pH 7,5 (D = 1,5 a 2,5 mL/L); pH 8,0 (D = 2,0 e 2,5 mL/L) e pH 8,5 (D = 2,0 mL/L). Com a utilização do CRLP_S, somente o valor de turbidez para a condição de pH 8,5 (D = 1,0 mL/L) foi atendido. Esses valores mencionados podem ser considerados como bons resultados, tendo em vista que atendem a exigência da legislação, principalmente nas condições em que os parâmetros são atendidos simultaneamente.

Analisando os coagulantes recuperados do lodo da ETA de Apucarana, observou-se que o CRLA_{Cl} apresentou melhores resultados na remoção de turbidez em pH a partir de 7,0, chegando a uma eficiência de remoção de até 99,3% em pH 7,0 (D = 2,0 e 2,5 mL/L); pH 7,5 (D = 2,0 e 2,5 mL/L); pH 8,0 (D = 2,0 mL/L) e pH 8,5 (D = 2,5 mL/L). Na remoção de cor, o CRLA_{Cl} chegou a apresentar eficiência de remoção de 100% nas condições de pH 5,5 (D = 0,5 mL/L); pH 6,5 (D = 1,5 e 2,0 mL/L); pH 7,0 (D = 1,0 a 2,5 mL/L); pH 7,5 (D = 1,0 a 2,5 mL/L); pH 8,0 (D = 1,0 a 2,5 mL/L) e pH 8,5 (D = 2,0 e 2,5 mL/L).

O CRLA_S também apresentou melhores resultados na remoção de turbidez em pH a partir de 7,0, chegando a atingir uma remoção de turbidez de até 99,2% em pH 7,0 (D = 1,0 e 1,5 mL/L); pH 7,5 (D = 1,5 mL/L); pH 8,0 (D = 1,5 e 2,0 mL/L); pH 8,5 (D = 2,0 mL/L). Na remoção de cor, a melhor eficiência observada foi de 100%, nas condições de pH 6,0 (D = 2,5 mL/L); pH 6,5 (D = 0,5; 2,0 e 2,5 mL/L); pH 7,0 (D = 1,0; 1,5 e 2,5 mL/L); pH 7,5 (D = 1,5 e 2,0 mL/L); pH 8,0 (D = 1,0 a 2,5 mL/L) e pH 8,5 (D = 1,0 a 2,5 mL/L).

Analisando os resultados frente aos VMPs, com a utilização do CRLA_{Cl}, os valores de turbidez foram atendidos nas condições de pH 6,5 (D = 1,5 e 2,0 mL/L); pH 7,0 (D = 1,5 a 2,5 mL/L); pH 7,5 (D = 1,0 a 2,5 mL/L); pH 8,0 (D = 1,5 a 2,5 mL/L) e pH 8,5 (D = 1,5 a 2,5 mL/L). Para o parâmetro cor, os valores atendidos foram nas condições de pH 5,5 (D = 0,5; 1,0; 2,0 e 2,5 mL/L); pH 6,0 (D = 0,5 a 1,5 mL/L); pH 6,5 (D = 1,0 a 2,5 mL/L); pH 7,0 (D = 0,5 a 2,5 mL/L); pH 7,5 (D = 1,0 e 2,5 mL/L); pH 8,0 (D = 1,0 a 2,5 mL/L) e pH 8,5 (D = 1,0 a 2,5

mL/L). Na utilização do CRLA_S, os valores de turbidez atendidos foram nas condições de pH 6,0 (D = 2,5 mL/L); pH 6,5 (D = 1,5 e 2,0 mL/L); pH 7,0 (D = 1,0 a 2,5 mL/L); pH 7,5 (D = 1,0 a 2,5 mL/L); pH 8,0 (D = 1,0 a 2,5 mL/L) e pH 8,5 (D = 1,0 a 2,5 mL/L). Para cor, os valores atendidos foram nas condições de pH 5,5 (D = 1,0 mL/L); pH 6,0 (D = 0,5 a 2,5 mL/L); pH 6,5 (D = 0,5 a 2,5 mL/L); pH 7,0 (D = 0,5 a 2,5 mL/L); pH 7,5 (D = 1,0 e 2,5 mL/L); pH 8,0 (D = 1,0 a 2,5 mL/L) e pH 8,5 (D = 1,0 a 2,5 mL/L). Como foi observado anteriormente, esses valores mencionados podem ser considerados como bons resultados, tendo em vista que atendem a exigência da legislação, principalmente nas condições em que os parâmetros são atendidos simultaneamente.

Analisando a utilização do PAC, observou-se que seu melhor desempenho de remoção de turbidez foi de 99,5% nas condições de pH 7,0 (D = 2,0 mL/L); pH 7,5 (D = 2,0 mL/L); pH 8,0 (D = 2,0 mL/L) e pH 8,5 (D = 2,0 mL/L). Para o parâmetro cor, o desempenho de remoção foi de 100% nas condições de pH 5,5 (D = 1,5 e 2,5 mL/L); pH 6,0 (D = 1,0 e 2,5 mL/L); pH 6,5 (D = 1,0; 1,5 e 2,5 mL/L); pH 7,0 (D = 1,5 e 2,5 mL/L); pH 7,5 (D = 1,5 a 2,5 mL/L); pH 8,0 (D = 1,0; 1,5 e 2,5 mL/L) e pH 8,5 (D = 1,0; 1,5 e 2,5 mL/L).

Com exceção do CRLP_S, todos os coagulantes recuperados apresentaram, em seus melhores desempenhos de remoção de cor e turbidez, resultados tão bons quanto o PAC, principalmente os de Apucarana. Embora os coagulantes recuperados tenham potencial de atingir índices de potabilidade da água, considerando os parâmetros cor e turbidez, sua aplicação seria mais conveniente em outros processos que também utilizam coagulação, como ETEs e indústrias, devido ao rigor dos padrões exigidos para seus efluentes ser menor se comparado aos padrões de potabilidade da água (BRASIL 2011; BRASIL 2017).

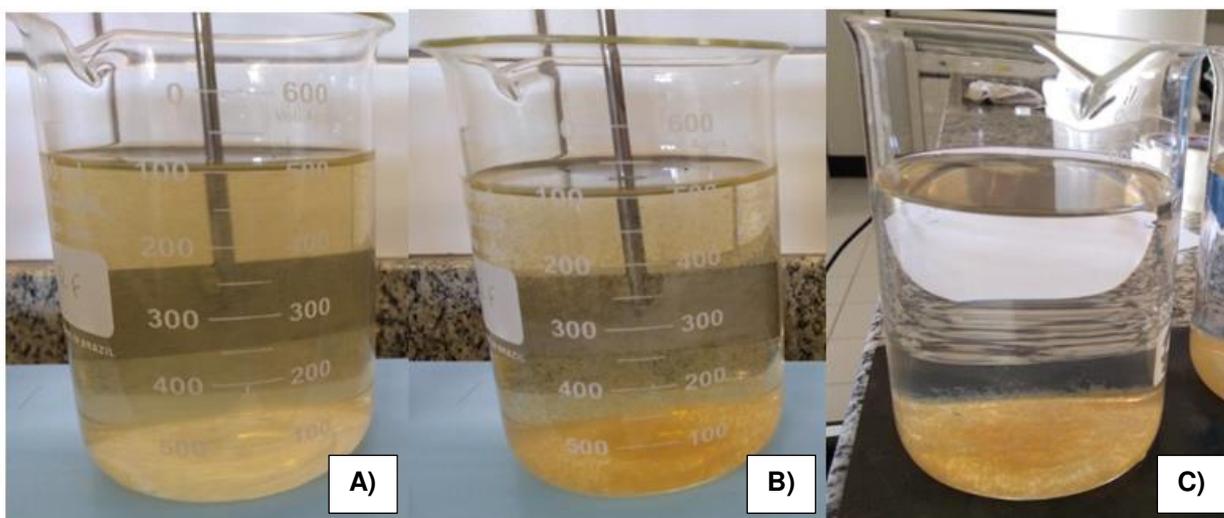
Ahmad *et al.* (2016) e Freitas *et al.* (2016), realizaram em seus trabalhos a recuperação de coagulante, a base de alumínio, por via ácida e avaliaram o desempenho do coagulante na remoção de turbidez de águas brutas. Ahmad *et al.* (2016) expressaram os resultados em porcentagem de remoção e conseguiram, em seu melhor desempenho, até 98,5%, considerado pelos autores como uma boa performance, e é um resultado, relativamente, próximo

ao obtido neste trabalho. Já Freitas *et al.* (2016), mostraram os valores mínimos de turbidez atingidos com a utilização do coagulante recuperado, e, no melhor desempenho, foi possível reduzir a turbidez até $0,33 \pm 0,07$ NTU, valor acima dos melhores resultados obtidos neste trabalho, mas dentro do VMP.

Keeley *et al.* (2015), que tiveram como parte de seu trabalho a utilização da rota alcalina-ácida para recuperação de coagulante de um lodo a base de ferro, testaram, além de outros parâmetros, o desempenho do coagulante na remoção de turbidez, chegando a reduzir a turbidez até 0,4 NTU.

Na Figura 14 é possível observar o desempenho do CRLP_{Cl} (pH 7, D = 2,0 mL/L) em que foi obtido um bom resultado, para exemplificar o desempenho da utilização dos coagulantes recuperados na remoção de cor e turbidez.

Figura 14 – Remoção de cor e turbidez utilizando coagulante recuperado do lodo CRLP_{Cl} (pH 7, D = 2,0 mL/L). A) Fase de mistura rápida; B) Fase de mistura lenta; C) Fase de sedimentação.



Fonte: Próprio autor.

5.4 Caracterização do sólido remanescente após o processo de recuperação do coagulante

A Tabela 13 mostra o resultado da granulometria dos resíduos do lodo de ETA após o processo de recuperação do coagulante, ao lado de cada

resultado está apresentado redução ou incremento comparado ao lodo inicial. Nota-se que em todos os casos houve uma diminuição da porcentagem da fração argila. Essa observação é importante, pois os compostos mais susceptíveis a solubilização durante o processo alcalino-ácido estão contidos, principalmente, na fração argilosa, inclusive os hidróxidos formados pelo processo de coagulação e floculação no tratamento de água.

Tabela 13 – Frações Granulométricas dos resíduos após o processo de recuperação do coagulante.

Lodo de ETA	Areia (%)		Silte (%)		Argila (%)	
PP pós HCl	49,07	+31,88	37,53	+1,02	13,40	-32,90
PP pós H ₂ SO ₄	47,99	+30,80	19,61	-16,90	32,40	-13,90
Apuc. pós HCl	59,74	+2,52	20,06	+9,68	20,20	-12,20
Apuc. pós H ₂ SO ₄	56,16	-1,06	33,24	+22,86	10,60	-21,80

Nota: Observações. PP: Presidente Prudente; Apuc.: Apucarana.
Fonte: Próprio autor.

A Tabela 14 mostra a composição elementar dos resíduos do lodo de ETA após o processo de recuperação do coagulante. De fato, observou-se redução do alumínio no material sólido final após o processo de recuperação para o lodo de Presidente Prudente, passando de 34,94% na matriz original para 25,60% e 23,19% respectivos à utilização do HCl e do H₂SO₄ na via ácida do processo. Porém, não foi observada essa diminuição no lodo de Apucarana.

Tabela 14 – Caracterização dos lodos de ETA dos resíduos após o processo de recuperação do coagulante, quanto à composição por EDX.

Amostra	Elemento (%)								
	Si	Al	Fe	Ti	K	S	Ca	Mn	Outros
P. Prudente	51,85	34,94	8,43	1,67	1,51	0,62	0,56	0,21	0,21
PP pós HCl	47,56	25,60	19,42	2,75	3,06	0,23	0,55	0,28	0,55
PP pós H ₂ SO ₄	44,45	23,19	15,92	2,71	3,10	9,52	0,43	0,22	0,46
Apucarana	28,12	21,87	42,58	3,39	0,31	0,54	1,51	0,95	0,73
Apuc. pós HCl	33,77	23,38	37,34	3,39	0,25	0,21	0,47	0,34	0,85
Apuc. pós H ₂ SO ₄	29,94	21,20	38,72	3,72	0,30	4,61	0,56	0,30	0,65

Nota: Observações. PP: Presidente Prudente; Apuc.: Apucarana.
Fonte: Próprio autor.

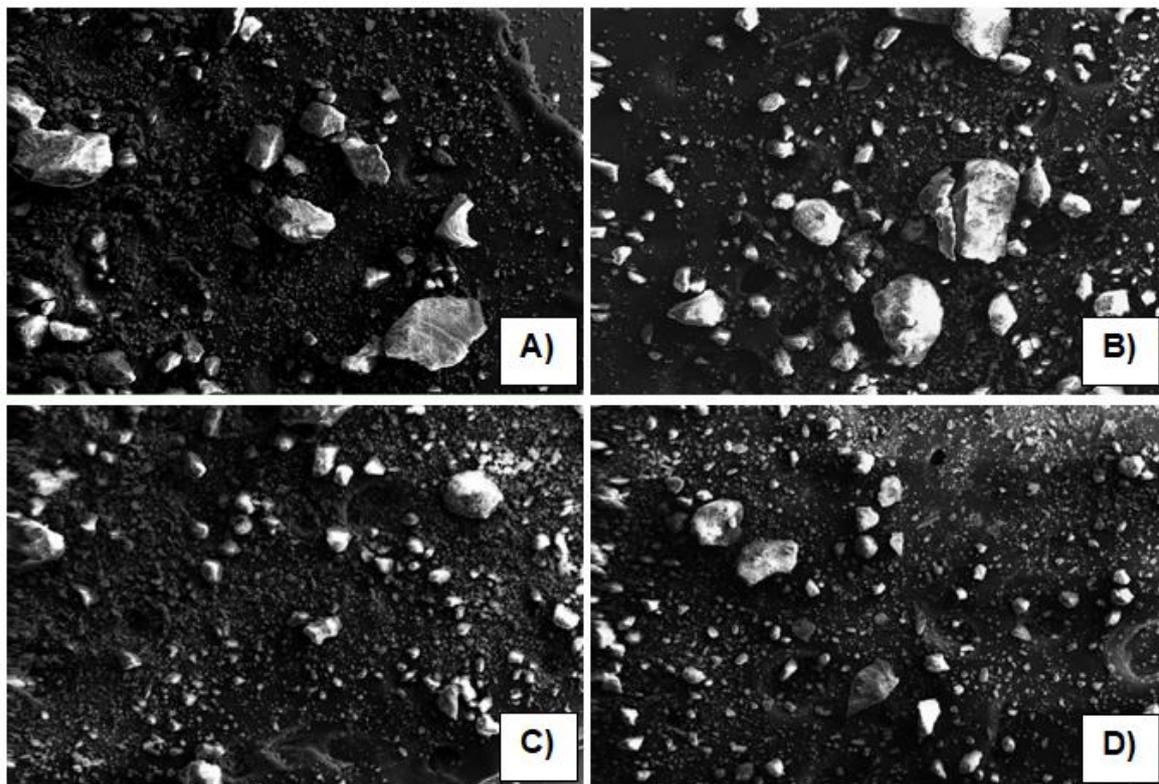
No lodo de Apucarana, o qual possuía níveis elevados de ferro, houve uma maior diminuição para esse elemento, de 42,58% para 37,34% e 38,72% respectivos à utilização do HCl e do H₂SO₄ na via ácida do processo. Os compostos de alumínio estavam presentes no CRLA_S e CRLA_{Cl}, indicando que eles foram, em parte, solubilizados e extraídos do lodo. Contudo, o processo de recuperação utilizado pode ter favorecido a solubilização do ferro, formando compostos como o sulfato férrico e o cloreto férrico, o que explicaria o melhor desempenho de ação nos ensaios de coagulação da água bruta.

No trabalho de Keeley *et al.* (2015), o processo alcalino-ácido foi eficiente em recuperar compostos de ferro como coagulante, portanto, existe uma grande possibilidade de que compostos de ferro do lodo da ETA de Apucarana tenham sido solubilizados e extraídos também.

A Figura 15 mostra as imagens de MEV em magnificação de 100X dos resíduos de lodo de ETA após o processo de recuperação do coagulante. Com essas imagens, é possível observar no resíduo do lodo de Presidente Prudente, uma diminuição da fração mais fina, comprovado pela análise granulométrica, ainda que o resíduo apresente uma diversidade grande de tamanhos de partículas. No mais, não apresentou mudanças significativas se comparado ao lodo de antes do processo.

Já o resíduo do lodo da ETA de Apucarana apresentou mudanças mais visíveis se comparado ao lodo antes do processo de recuperação do coagulante, ele passou a apresentar um aspecto bem mais semelhante ao do lodo de Presidente Prudente. É possível notar, também, uma diminuição da fração mais fina, como observado nos resultados apresentados anteriormente.

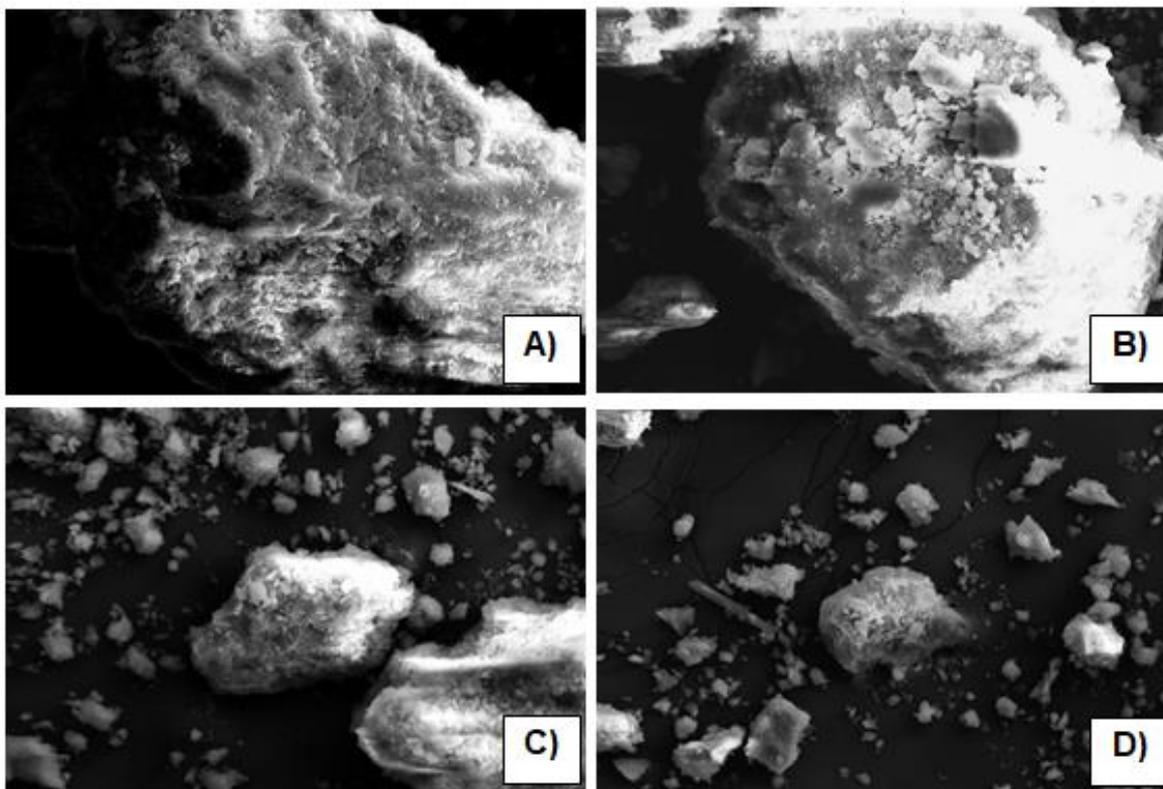
Figura 15 – Imagens de MEV dos resíduos após processo de recuperação do coagulante com magnificação de 100X: A) e B) Lodo de Presidente Prudente após utilização do HCl e H₂SO₄ respectivamente; C) e D) Lodo de Apucarana após utilização do HCl e H₂SO₄ respectivamente.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 16 mostra as mesmas imagens de MEV apresentadas na Figura 9, porém em magnificação de 1000X. Com isso é possível observar melhor a superfície das partículas dos resíduos do lodo de ETA, os quais continuam apresentando uma superfície irregular e sem padrões definidos, assim como os lodos de ETA antes do processo de recuperação do coagulante.

Figura 16 – Imagens de MEV dos resíduos após processo de recuperação do coagulante com magnificação de 1000X: A) e B) Lodo de Presidente Prudente após utilização do HCl e H₂SO₄ respectivamente; C) e D) Lodo de Apucarana após utilização do HCl e H₂SO₄ respectivamente.



Fonte: Próprio autor.

Comparados, os quatro resíduos possuem características em comum: são grãos de superfície irregular com algumas partículas, ainda menores, incrustadas.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste trabalho com a utilização dos coagulantes recuperados do lodo, conclui-se que:

- O CRLP_{Cl} apresentou resultados satisfatórios nas condições de pH 7,0 e D = 2,0 mL/L; pH 7,5 e D = 2,0 e 2,5 mL/L; pH 8,0 e D = 2,5 mL/L; pH 8,5 e D = 2,0 mL/L; por atender simultaneamente os dois parâmetros analisados frente ao VMP;
- O CRLP_S não apresentou resultados que atendessem simultaneamente os dois parâmetros frente ao VMP;
- O CRLA_{Cl} apresentou resultados satisfatórios nas condições de pH 6,5 e D = 1,5 e 2,0 mL/L; pH 7,0 e D = 1,5 a 2,5 mL/L; pH 7,5 e D = 1,0 a 2,5 mL/L; pH 8,0 e D = 1,5 a 2,5 mL/L; pH 8,5 e D = 1,5 a 2,5 mL/L; por atender simultaneamente os dois parâmetros analisados frente ao VMP;
- O CRLA_S apresentou resultados satisfatórios nas condições de pH 6,0 e D = 2,5 mL/L; pH 6,5 e D = 1,5 e 2,0 mL/L; pH 7,0 e D = 1,0 a 2,5 mL/L; pH 7,5 e D = 1,0 a 2,5 mL/L; pH 8,0 e D = 1,0 a 2,5 mL/L; pH 8,5 e D = 1,0 a 2,5 mL/L; por atender simultaneamente os dois parâmetros analisados frente ao VMP.

No processo, o volume de lodo é reduzido, aproximadamente, em 50% com a retirada da solução sobrenadante contendo os compostos coagulantes, após sedimentação espontânea. Tal fato, aliado à reciclagem dos compostos coagulantes recuperados, evidenciam o potencial de destinação final para o lodo de ETA que a proposta do trabalho possui.

7 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho não são suficientes para validar o método como uma destinação final para o lodo de ETA. Para sua viabilidade, recomenda-se:

- Ampliar o número de parâmetros avaliados com a utilização dos coagulantes recuperados no tratamento de águas brutas, e avaliar sua aplicabilidade em outros sistemas, uma vez que o uso de coagulantes não é restrito ao tratamento de água;
- Analisar mais detalhadamente o coagulante recuperado pelo processo alcalino-ácido, especificando e distinguindo quais compostos solubilizados são desejados ou não;
- Analisar mais detalhadamente o resíduo sólido final após o processo alcalino-ácido, apontando quais as melhores alternativas viáveis para sua destinação de forma adequada ambientalmente;
- Ampliar a aplicação do método alcalino-ácido em mais lodos de ETA, principalmente os que possuem características destoantes dos que foram estudados neste trabalho;
- Avaliar a viabilidade econômica de aplicação do método em escala real, levantando os custos de implantação e operação, bem como o retorno obtido dos produtos gerados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10.004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10664**: águas: determinação de resíduos (sólidos): método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1989.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Leito de drenagem: Sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água. **Eng. Sanit. Ambient.**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 54-62, 2008.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Eng. Sanit. Ambient.**, São Paulo, v. 82, n. 2, p. 115-122, 2013.

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. Destinação e Disposição de lodo gerado em ETA: Lei 12.305/2010. *In*: EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO - EEMS, 19., 2015, Poços de Caldas. **Anais [...] [S. l.]**: ASSEMAE, 2015.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; AHAD, A.; ALAM, M. Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 182, p. 606-611, 2016.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of water treatment plant's sludge and its safe disposal options. International Conference on Solid Waste Management, 51IconSWM 2015. **Procedia Environmental Sciences**, London, v. 35, p. 950-955, 2016.

ALFREY, A. C.; LEGENDRE, G. R.; KAEHNY, W. D. The Dialysis encephalopathy syndrome: possible aluminum intoxication. **The New England Journal of Medicine**, London, v. 294, n. 4, p. 184-188, 1976.

ALVES, H. C. **Análise laboratorial de lodos desidratados de estações de tratamento de água da região metropolitana de Belo Horizonte – MG para uso em pavimentação**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

BHERING, S. B. **Mapas de solos do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007.

BITENCOURT, G. A. **Caracterização ecotoxicológica de lodo gerado em estação de tratamento de água**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências: Biologia na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

BOTERO, W. G.; SANTOS, A.; OLIVEIRA, L. C.; ROCHA, J. C. Caracterização do lodo gerado em estação de tratamento de água: perspectiva de aplicação agrícola. **Quim. Nova**, São Paulo, v. 32, n. 8, p. 2018-2022, 2009.

BRASIL. Casa Civil. **Lei 9.433**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, DF, 1997.

BRASIL. Casa Civil. **Lei 9.605**. Institui a Lei de Crimes Ambientais. Brasília, 1998.

BRASIL. Casa Civil. **Lei 12.305**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília, 2017.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2017**. Brasília, 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357**. 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, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº430**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357. Brasília, 2011.

BRATBY, J. **Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment**. 2. ed. [S. l.]: IWA publishing, 2006.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBOGLOUS, G. **MWH's water treatment: principles and design**. London: John Wiley & Sons, 2012.

DANDOLINI, I. **Reciclagem do lodo de estação de tratamento de água: produção de coagulante por lixiviação ácida**. 2014. Dissertação (Mestre em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DE JULIO, M.; OROSKI, F.I.; SANTOS, M.N.O.; DE JULIO, T.S. Reúso do coagulante recuperado do lodo de ETA no tratamento terciário do efluente de lagoa de polimento precedida de reator RALF. **Revista SABESP**, São Paulo, v. 185, 2010.

DELGADO, J. V. C. **Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de tecnologias de tratamento de água.** São Carlos: LDIBE, 2008a. v. 1.

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de tecnologias de tratamento de água.** São Carlos: LDIBE, 2008b. v. 2.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.

EXLEY, C. Human exposure to aluminium. **Environ. Sci.: Processes Impacts**, [s. l.], v.15, p.1807-1816, 2013.

EXLEY, C. The toxicity of aluminium in humans. Morphologie, 2016.
FREITAS, V.O.; BARBOSA, F.; CAGLIARI, A.; SOUZA, T.R.; VIEIRA, M.; ROSA, G.S. Recuperação do alumínio presente no lodo de ETA de Bagé para sua reutilização como coagulate. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016, Campinas. **Anais [...]** Campinas: Galoá, 2016.

GONÇALVES, R. F.; BRANDÃO, J. T.; BARRETO, E. M. S. Viabilidade econômica da regeneração do sulfato de alumínio de lodos de estações de tratamento de água. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro, ABES, 1999.

GUIMARÃES, N. C. **Regeneração 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 da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

JANGKORN, S.; KUHAKEW, S.; THEANTANOO, S.; KLINLA, H.; SRIWIRIYARAT, T. Evaluation of reusing alum sludge for the coagulation of industrial wastewater containing mixed anionic surfactants. **Journal of Environmental Sciences**, London, v. 23, n. 4, p. 587-594, 2011.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). Escola Politécnica da 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.**, New York, v. 44, n. 24, p. 2675-2719, 2014.

KEELEY, J.; JARVIS, P.; SMITH, A. D.; JUDD, S. J. Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment. **Water Research**, Amsterdam, v. 88, p. 502-509, 2015.

KING, P. H.; CHEN, B. H. H.; WEEKS JR, R. K. **Recovery and reuse of coagulants from treatment of water and wastewater**. Virginia: Virginia Water Resources Research Center, 1975. (Bulletin, 77).

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Átomo, 2010.

MARTINS, B. E. D. B. S. **Avaliação da influência do coagulante contido no lodo gerado na ETA em corpos cerâmicos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências: Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MASSCHELEIN, W. J.; DEVLEMINCK, R.; GENOT, J. The feasibility of coagulant recycling by alkaline reaction of aluminium hydroxide sludges. **Water Res.**, Amsterdam, v. 19, n. 11, p. 1363-1368, 1985.

MELO, A. A.; BUENO, R. C. R.; NAPOLITANO, V. P. O. Impactos do recebimento de lodo de ETA em uma ETE. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. **Anais** [...] Joinville: ABES, 2003.

MESSIAS, T. G. **Avaliação ecotoxicológica de lodo gerado por estação de tratamento de água**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências: Química na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

MIGUEL, P. S. B.; GOMES, F. T.; ROCHA, W. S. D.; MARTINS, C. E.; CARVALHO, C. A.; OLIVEIRA, A. V. Efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismos de tolerância, sintomas, efeitos fisiológicos, bioquímicos e controles genéticos. **CES Revista**, [s. l.], v. 24, 2010.

OLIVEIRA, V. M.; ASSIS, C. R. D.; COSTA, H. M. S.; SILVA, R. P. F.; SANTOS, J. F.; CARVALHO JR, L. B.; BEZERRA, R. S. Aluminium sulfate exposure: A set of effects on hydrolases from brain, muscle and digestive tract of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Comp. Biochem. Phys. C.**, London, v. 191, p. 101-108, 2017.

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENORIA, J. A. S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, São Paulo, v. 54, p. 63-76, 2008.

PEIXOTO, G. J. **Avaliação da Aplicação de Lodo de ETA no Adensador de Lodo de uma ETE de Lodos Ativado**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais). Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

PROLO, P.; CHIAPPELLI, F.; CRASSO, E.; ROSSO, M.G.; NEAGOS, N.; DOVIO, A.; SARTORI, M.L.; PEROTTI, P.; FANTO, F.; CIVITA, M.; FIORUCA, A.; VILLANUEVA, P.; ANGELI, A. Aluminium blunts the proliferative response and increases apoptosis of cultured human cells: Putative relationship to Alzheimer's disease. **Bioinformation**, [s. l.], v. 2, 2007.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estação de tratamento de água**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

SANTOS, J. R. P. **Potencial de biodegradação de resíduos por *Pleurotus spp.*** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências: Microbiologia Agrícola). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SILVA, C. A.; SILVA, A. A.; NISHI, L.; SILVA, M. F.; REZENDE, L. C. S. H.; BERGAMASCO, R. Incorporação de lodo de tratamento de água na fabricação de painéis de madeira aglomerada. **ENGEVISTA**, Niterói, v. 17, n. 3, p. 398-406, 2015a.

SILVA, E. M.; MORITA, D. M.; LIMA, A. C. M.; TEIXEIRA, L. G. Manufacturing ceramic bricks with polyaluminum chloride (PAC) sludge from a water treatment plant. **Water Science and Technology**, v. 71, n. 11, p. 1638-1645, 2015b.

SINGH, S.; TRIPATHI, D.K.; SINGH, S.; SHARMA, S.; DUBEY, N.K.; CHAUHAN, D.K.; VACULÍK, M. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. **Environ. Exp. Bot.**, London, v. 137, 2017.

SOARES, L.A.; SCALIZE, P.S.; ALBUQUERQUE, A.J.C. Caracterização de resíduo de ETA visando sua disposição na saída de lagoas de estabilização. **REMOA**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 3154-3163, 2014.

TAFAREL, N. F.; MACIOSKI, G.; CARVALHO, K. Q.; NAGALLI, A.; FREITAS, D. C.; PASSIG, F. H. Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 974-986, 2016.

TANTAWY, M. A. Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. **Materials Research Bulletin**, Amsterdam, v. 61, p. 415-421, 2014.

TARTARI, R.; DIAZ-MORA, N.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, p. 288-293, 2011.

TEIXEIRA, S. R. **Caracterização de argilas usadas para produção de cerâmica vermelha e estudo das alterações de suas propriedades pela adição de resíduos sólidos**. 2006. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

TEIXEIRA, S.R.; SOUZA, S.A.; SOUZA, N.R. ALÉSSIO, P.; SANTOS, G.T.A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**, São Paulo, v. 52, p. 215-220, 2006.

TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; SOUZA, A. E.; ALÉSSIO, P.; SOUZA, A. S.; SOUZA, N. R. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, v.53, p.561-565, 2011.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais [...]** João Pessoa: ABES, 2001.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils**: Method 3050B. [*S. l.: s. n.*], 1996.

VITORELLO, V. A.; CAPALDI, F. R.; STEFANUTO, V. A. Recent advances in aluminium toxicity and resistance in higher plants. **Braz. J. Plant Physiol.**, [*s. l.*], v.17, n.1, p.129-143, 2005.

XU, GR.; YAN, Z.C.; WANG, Y.C.; WANG, N. Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment. **Journal of Hazardous Materials**, London, v. 161, p. 663-669, 2009.

XU, Y.; CHEN, T.; XU, R.; HE, L.; CUI, F. Impact of recycling alum sludge on coagulation of low-turbidity source waters. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 15, p. 1-8, 2015.

YANG, Y.; TOMLINSON, D.; KENNEDY, S.; ZHAO, Y.Q. Dewatered alum sludge: A potential absorbent for phosphorus removal. **Water Science Technology**, [*s. l.*], v. 54, n. 5, p. 207-213, 2006.

ZHAO, Y. Q.; BABATUNDE, A. O.; HU, Y. S.; KUMAR, J. L. G; ZHAO, X. H. Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment. **Process Biochemistry**, London, v. 46, p. 278-283, 2011.