

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANA LUIZA FORGIARINI

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, MORFOLÓGICA E FÍSICO-QUÍMICA DE
LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE INDÚSTRIA DE
ALIMENTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Francisco Beltrão

2019

ANA LUIZA FORGIARINI

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, MORFOLÓGICA E FÍSICO-QUÍMICA DE
LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE INDÚSTRIA DE
ALIMENTOS**

Projeto referente ao Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial para a conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental da UTFPR, Campus Francisco Beltrão.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Fernanda Batista de Souza
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Michele Di Domenico

Francisco Beltrão

2019



TERMO DE APROVAÇÃO¹

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2

Caracterização mineralógica, morfológica e físico-química de lodo de Estação de tratamento de água de indústria de alimentos.

por

Ana Luiza Forgiarini

Trabalho de Conclusão de Curso 2 apresentado às 13:00 horas, do dia 28 de Junho de 2019, como requisito para aprovação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Banca Avaliadora:

Fernanda Batista de Souza
(Presidente da Banca)

Michele Di Domenico
(Membro da Banca)

Izadora Consalter Pereira
(Membro da Banca)

Denise Andréia Szymczak
(Professora responsável pelo TCC)

Wagner de Aguiar
(Coordenador do Curso de Engenharia Ambiental)

¹ O Termo de Aprovação encontra-se assinado na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

À Deus primeiramente, pelo dom da vida, proteção e sabedoria nos momentos de dificuldade.

À minha amada mãe, Janaina Aparecida Garcia da Rosa, por ser o meu alicerce de amor sem fim. Por todo os conselhos, incentivos, carinho, dedicação e confiança no decorrer de toda a minha vida. Sei que não mediu esforços para que esse nosso sonho pudesse se tornar realidade.

À minha irmã Eduarda Babinski pelo amor e compreensão dedicados a mim.

Ao Matheus Eduardo dos Santos, pelo apoio incondicional, pela paciência, carinho e compreensão de sempre.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Fernanda Batista de Souza, por todo carinho, atenção e dedicação em todos os nossos trabalhos juntas. Obrigada por compartilhar seu conhecimento comigo e acreditar no meu potencial para realização desses trabalhos.

À minha coorientadora Prof.^a Dr.^a Michele Di Domenico pelo apoio no desenvolvimento desse trabalho.

À minha querida amiga Prof.^a MSc.^a Izadora Consalter Pereira, pelo companheirismo na vida pessoal e acadêmica.

A todos os professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), câmpus Francisco Beltrão, por realizarem esse trabalho impecável de repassar seus conhecimentos com tanto amor, carinho e dedicação.

As minhas queridas amigas Joice Gnoatto Casanova, Yuna Koyanagi, Thays Cristiane Leonardi, Karla Faust Teixeira, Maria de Fátima Longo e Maria Clara de Oliveira pela ajuda e companheirismo, nesses anos de graduação. Obrigada pelos momentos de descontração e por deixarem os meus dias mais alegres.

As minhas supervisoras de estágio Nathalia Passaia Cividini e Andressa Buck pelos conselhos e auxílio na realização desse trabalho.

À indústria que gentilmente me cedeu o lodo para realização desse trabalho.

À Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), câmpus Pato Branco.

RESUMO

FORGIARINI, Ana Luiza. **Caracterização mineralógica, morfológica e físico-química de lodo de Estação de tratamento de água de indústria de alimentos.** 2019. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2019.

A grande maioria dos setores industriais demandam quantidade significativa de água. As indústrias de alimentos e bebidas fazem parte dos setores com maior necessidade de água para execução de seus processos produtivos. A água utilizada nesses processos deve estar adequada aos padrões de qualidade exigidos pela legislação. Para garantir a qualidade da água são realizados tratamentos físico-químicos em Estações de Tratamento de Água (ETA). O objetivo desse estudo foi realizar a caracterização mineralógica, morfológica e físico-química do lodo centrifugado da ETA de uma indústria de alimentos localizada no município de Dois Vizinhos – Paraná. Essa ETA utiliza processos convencionais de tratamento no qual a água passa pelas etapas de floculação - policloreto de alumínio (PAC) é utilizado como agente floculante - coagulação, decantação e filtração. São utilizados também o cloro gás, para desinfecção e, quando necessário, carbonato de sódio para correção de pH. O lodo passa pelos processos de centrifugação com foco na redução de volume, onde o lodo é desidratado e disposto para descarte. Nesse trabalho, para identificação dos compostos minerais presentes no lodo foi realizado a análise de Difração por Raios X (DRX), a caracterização morfológica foi realizada através da análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), enquanto que as características físico-químicas foram realizadas através das análises de Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ}), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FITR) e Espectrometria de Absorção Atômica (EAA). Na literatura é possível identificar diversas formas de reaproveitamento para o lodo de ETA, podendo-se citar o uso na indústria de cerâmica, construção civil, como adsorvente de metais pesados, para correção e adubação do solo e para impermeabilização do solo. As características encontradas nesse estudo foram comparadas com dados da literatura, sendo possível identificar as possíveis formas de reaproveitamento do lodo. Como resultados foi possível identificar que o Quartzo, a Calcita e a Hematita foram os principais compostos minerais encontrados, e que o tamanho médio dos cristalinos é de 10,40 nm. A superfície do lodo possui características ácidas, com pH_{PCZ} de aproximadamente 4 e uma DQO de 6150 mg O₂/L. Quanto a morfologia foi possível identificar que o lodo é constituído por grânulos com formas e tamanhos irregulares, distribuição larga das partículas e topografia de superfície irregular. Os grupos funcionais encontrados foram hidroxilas (– OH), carboxilas (C = O), aminas alifáticas (C – N), e ésteres, éteres, álcoois e ácido carboxílico representado pelo grupo C – O, validando a presença do mineral Calcita verificado pela análise de DRX. Comparando os resultados obtidos com a literatura, foi possível observar o potencial de aplicação do lodo dessa ETA na indústria de cerâmicas, usos na construção civil e adsorvente de metais pesados.

Palavras-chave: Lodo de ETA. Resíduos sólidos. Reaproveitamento

ABSTRACT

FORGIARINI, Ana Luiza. **Mineralogical, morphological and physico-chemical characterization of Food industry water treatment plant.** 2019. 57 f. Graduation in Environmental Engineering, Federal Technological University of Paraná. Francisco Beltrão, 2019.

The vast majority of industrial sectors require a significant amount of water. The food and beverage industries are among the sectors with the greatest need of water to carry out their production processes. The water used in these processes must be adequate to the quality standards required by the legislation. To guarantee the water quality, physicochemical treatments are carried out at Water Treatment Stations (ETA). The objective of this study was to perform the mineralogical, morphological and physicochemical characterization of ETA centrifuged sludge from a food industry located in the city of Dois Vizinhos - Paraná. This ETA uses conventional treatment processes, i.e., the water passes through the steps of flocculation, where aluminum polychloride (PAC) is used as flocculating agent, coagulation, decantation and filtration. Chlorine gas is also used for disinfection and, when necessary, sodium carbonate for pH correction. The sludge goes through centrifugal processes focused on volume reduction, where the sludge is dehydrated and left for disposal. In this work, in order to identify the mineral compounds present in the sludge, X-ray diffraction (XRD) analysis was performed, the morphological characterization was performed through the Scanning Electron Microscopy (SEM), while the physicochemical characteristics were performed through the analyzes of Zero Load Point (pH_{PCZ}), Chemical Oxygen Demand (COD), Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR), and Atomic Absorption Spectrometry (AAS). In the literature, it is possible to identify several forms of reuse for ETA sludge, mentioning the use in ceramic industry, civil construction, as adsorbent of heavy metals, for correction and fertilization of the soil and for waterproofing of the soil. The characteristics found in this study were compared with data from the literature, being possible to identify the possible forms of reuse for the sludge. As results it was possible to identify that Quartz, Calcite and Hematite were the main found mineral compounds, and that the average size of crystalline is 10.40 nm. The surface of the sludge has acidic characteristics, with pH_{PCZ} of approximately 4 and a COD of 6150 mgO_2/L . As for the morphology, it was possible to identify that the sludge consists of granules with irregular shapes and sizes, large particle distribution and irregular surface topography. The functional groups found were hydroxyl (-OH), carboxyl (C = O), aliphatic amines (C - N), esters, ethers, alcohols and carboxylic acid represented by the C - O group, validating the presence of the mineral Calcite found in the XRD analysis. Comparing the obtained results with literature, it was possible to observe the potential of application of this ETA sludge in the ceramics industry, civil construction and adsorbent of heavy metals.

Keywords: ETA sludge. Solid waste. Reuse.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do Lodo de ETA segundo a literatura	21
Tabela 2 – Resumo dos resultados de caracterização de lodo de ETA encontrados na literatura e sua forma de reaproveitamento.....	26
Tabela 3 - Características dos minerais do software de análise de DRX	39
Tabela 4 - DQO do lodo de ETA	43
Tabela 5 - Bandas do espectro FTIR e comparação com literatura	46
Tabela 6 - Composição química do lodo de ETA	47
Tabela 7 – Resumo das características e maneiras de reaproveitamento do lodo da ETA	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de água pela indústria em 2016.....	15
Figura 2 – Fluxograma do processo de tratamento de água.....	29
Figura 3 – Lodo centrifugado disposto em acondicionamento temporário para a destinação final	30
Figura 4 – Lodo seco e destorroado.....	31
Figura 5 – Lodo após peneiramento.....	31
Figura 6 – Difratoograma do lodo da ETA.....	37
Figura 7 – Difratoograma do lodo de ETA com identificação de minerais	38
Figura 8 – Composição mineralógica percentual do Lodo de ETA.....	39
Figura 9 – Morfologia geral da amostra com ampliação de 100x.....	40
Figura 10 – Grânulo do lodo da ETA com ampliação de 300x	41
Figura 11 – Superfície do grânulo de lodo de ETA com ampliação de 1200x	42
Figura 12 – Curva de calibração DQO	43
Figura 13 – Ponto de carga zero para o lodo de ETA	44
Figura 14 – Espectros de adsorção FTIR para o lodo de ETA.....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1	INDÚSTRIAS NO BRASIL	13
3.1.1	Indústrias de alimentos	14
3.1.2	Água nas indústrias	14
3.2	RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	16
3.2.1	Padrões de potabilidade da água	17
3.3	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA	18
3.3.1	Lodo de ETA	19
3.3.2	Formas de reaproveitamento para o lodo de ETA	22
4	MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1	PROCESSO DE GERAÇÃO E COLETA DO LODO	28
4.1.1	Identificação da indústria	28
4.1.2	Formação do lodo	28
4.1.3	Coleta e tratamento inicial do lodo	30
4.1.4	Digestão da amostra	32
4.2	ANÁLISES PARA CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO LODO	32
4.2.1	Difração de raios X (DRX)	32
4.3	ANÁLISES PARA CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO LODO	33
4.3.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	33
4.4	ANÁLISES PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO	33
4.4.1	Ponto de carga zero (pH _{PCZ})	33
4.4.2	Demanda química de oxigênio (DQO)	34
4.4.3	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	35
4.4.4	Espectrometria de absorção atômica (EAA)	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37

5.1	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	37
5.1.1	Difração de raios X (DRX)	37
5.2	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA	40
5.2.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	40
5.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	42
5.3.1	Demanda química de oxigênio (DQO).....	42
5.3.2	Ponto de carga zero (pH _{PCZ}).....	44
5.3.3	Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)	45
5.3.1	Espectrometria de absorção atômica (EAA).....	47
5.4	REAPROVEITAMENTO DO LODO	48
6	CONCLUSÃO.....	50
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

A partir do início do século XX a indústria de alimentos progrediu de forma significativa no Brasil, se tornando um setor industrial com grande relevância econômica para o país. Dentre as indústrias que se destacam nesse setor estão a de produção de sucos naturais, café, açúcar, óleo de soja e carnes.

De forma geral, as indústrias utilizam água nos seus processos produtivos. Seus usos, volume e qualidade variam de setor para setor, sendo contemplada nos processos desde matéria-prima à fonte de energia. A indústria de fabricação de alimentos é classificada com um dos setores produtivos com maior hidrintensividade, ou seja, alta demanda hídrica para realização dos processos produtivos.

Para a utilização da água de forma direta e indireta nos seus processos produtivos, as indústrias de alimentos devem seguir as normativas de potabilidade da água. Para garantir o cumprimento a esses padrões de qualidade, é necessário que a água seja encaminhada a processos de tratamento.

Geralmente esse tratamento é realizado pelos processos físico-químicos de coagulação e floculação, decantação, filtração e desinfecção em Estações de Tratamento de Água (ETA). As ETAs geram um resíduo, denominado lodo de ETA, constituído pelas impurezas presentes na água bruta e produtos químicos utilizados no tratamento. De acordo com a Resolução CONAMA n° 357 (BRASIL, 2005), esse lodo é classificado como material poluente e a NBR 10.004 (ABNT, 2004) o considera como resíduo sólido, o qual normalmente é destinado a aterros sanitários.

Para identificar possíveis alternativas para o reaproveitamento adequado desse material, esse estudo, apresenta a caracterização do lodo de ETA de uma indústria do ramo alimentício localizada no município de Dois Vizinhos - PR, através de análises de composição mineralógica e físico-químicas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as características mineralógicas, morfológicas e físico-químicas do lodo gerado na estação de tratamento de água de uma indústria do ramo alimentício, visando identificar as possíveis maneiras de reaproveitamento desse resíduo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Descrever as características mineralógicas do lodo a partir da análise de Difração por Raios X (DRX);
- Investigar as características morfológicas do lodo a partir da análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Avaliar as características físico-químicas do lodo a partir das análises de Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ}), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Espectrometria de Absorção Atômica (EAA);
- Identificar as possíveis formas de reaproveitamento desse material segundo a literatura;
- Avaliar, a partir da caracterização, qual a melhor forma de reaproveitamento aplicável ao lodo em estudo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 INDÚSTRIAS NO BRASIL

Segundo Suzigan (2000), a industrialização brasileira pode ser dividida em três fases. Na primeira fase, o desenvolvimento das indústrias estava ligado e, de certa forma, dependia da agricultura de exportação, seu progresso era restrito, focado nas indústrias tradicionais produtoras de bens e consumos e a política econômica era dominada pelos interesses da agricultura.

Na segunda fase, mudou-se a natureza do desenvolvimento industrial. Adquiriu-se maior dinamismo próprio pela expansão do mercado interno, substituição de importações e pelas exportações de produtos manufaturados. Nessa fase, ocorreu progresso substancial no padrão estrutural e tecnológico das indústrias, que mudaram baseados nas economias industrializadas.

A terceira fase, por sua vez, foi marcada pelo enfraquecimento industrial, devido a crises macroeconômicas. Com isso, o padrão de desenvolvimento das empresas regrediu e a política econômica focou-se na estabilização macroeconômica.

A nível estadual, pode-se mencionar três momentos importantes do desenvolvimento industrial. O primeiro foi marcado pela modelagem da infraestrutura econômica, o segundo fundamentado na modernização agrícola e agroindustrial e o terceiro foi onde ocorreram as mudanças mais expressivas, com a implantação da Cidade Industrial de Curitiba e da Refinaria de Petróleo de Araucária. Com isso, o Paraná se tornou mais atrativo para as indústrias, pois os custos agregados aos processos eram inferiores aos do estado de São Paulo (CÁRIO; PEREIRA; BROLLO, 2002; CAMPOS; MEDEIROS; TEIXEIRA, 2017).

Segundo Campos, Medeiros e Teixeira (2017), o setor da indústria de transformação brasileira se manteve constante na participação do PIB nacional, com aproximadamente 17%, nos anos de 2000 até 2017, demonstrando suma importância para a economia do país. No estado do Paraná, as indústrias de alimentos e bebidas fazem partes dos setores-chave da economia, pois o aumento na demanda final desse setor ocasiona o aumento do valor bruto da produção da economia, sendo desta forma, um setor estratégico para a economia global do Estado.

3.1.1 Indústrias de alimentos

No Brasil, o processamento de alimentos iniciou de forma tímida através do beneficiamento e moagem de cereais, laticínios e indústrias de bebidas. Esse setor da indústria avançou significativamente na virada para o século XX (ABIA, 2013).

Segundo relatório anual emitido pela Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (ABIA), a indústria de alimentos e bebidas representou 9,6% do PIB brasileiro em 2018, gerando 1,6 milhões de postos diretos de trabalho e processa 58% de toda a produção agropecuária do país. Quanto à exportação, os principais mercados contemplam a Ásia (35,9%), a União Europeia (19,2%) e o Oriente Médio (14%).

A indústria brasileira se destaca quanto à produção de alimentos. É reconhecida como maior produtor e exportador de suco de laranja e açúcar e maior produtor e segundo exportador no setor de carnes. Assim é segundo maior exportador mundial de café e óleo de soja (ABIA, 2018).

Nas indústrias, a água tem diversas aplicações desde a fabricação da matéria-prima, reagentes, solventes, uso em lavadores de gases e sólidos, transmissão de calor, agente de resfriamento, fonte de energia, entre outros. Portanto, é grande o consumo de água por indústrias de vários setores (TELLES e COSTA, 2007).

Com um consumo elevado de água, a indústria exerce um papel fundamental na cooperação da eficiência hídrica de sua cadeia produtiva. Algumas ações podem ser tomadas para o aumento dessa eficiência, como por exemplo, mudanças nos processos operacionais que demandam um consumo excessivo de água. Além disso, a lavagem, sanitização e implantação de novas tecnologias que exijam menor consumo de água, juntamente ao monitoramento do balanço hídrico, redução de perdas e reaproveitamento de água são outras ações a serem seguidas (LIMA, 2018).

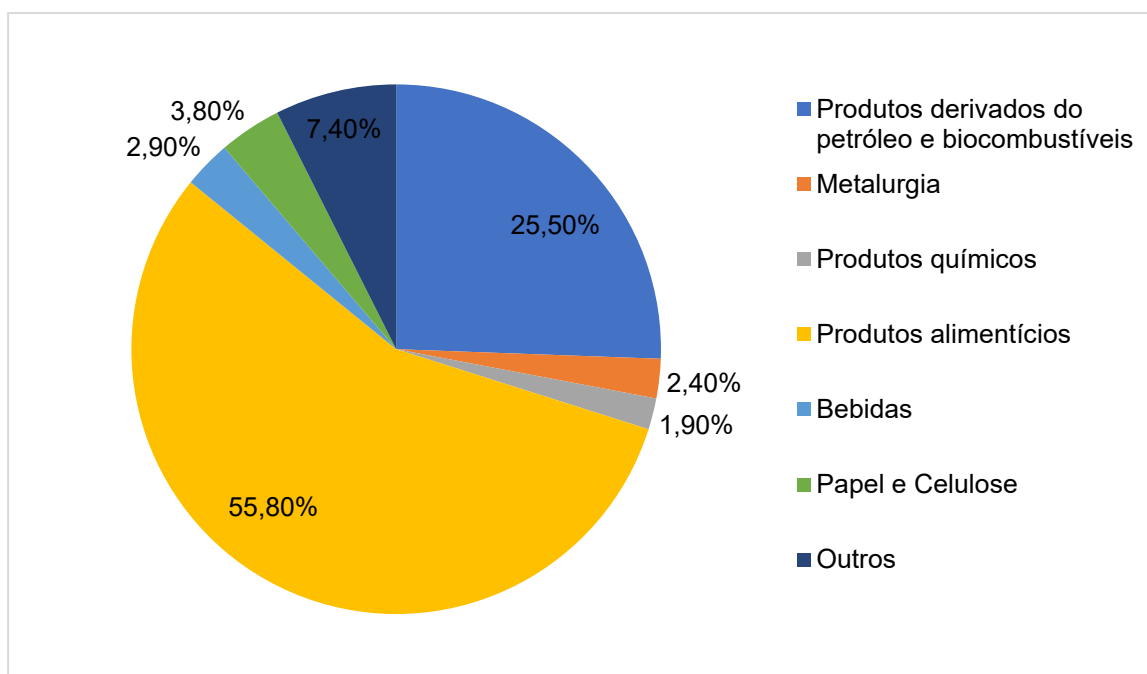
3.1.2 Água nas indústrias

Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA), as indústrias foram responsáveis pela retirada de 9,1% dos 2.083 m³/s de água retirada dos mananciais

do Brasil no ano de 2017 (BRASIL, 2018). Ficando atrás apenas da retirada para irrigação (52%) e para o abastecimento urbano (23,8%).

Em 2016, o consumo de água pelas indústrias correspondeu a 104,9 m³/s. No Brasil, as indústrias de fabricação de alimentos e de produtos derivados do petróleo e de biocombustíveis se destacam por serem os setores com maior hidrintensividade, ou seja, setores cujo processo produtivo demanda quantidade elevada de água. As indústrias com maior hidrintensividade no Brasil em 2016 são apresentadas na Figura 1 (BRASIL, 2017a).

Figura 1 – Consumo de água pela indústria em 2016



Fonte: Conjuntura 2017 (BRASIL, 2017b).

Segundo o relatório *Água na Indústria: usos e coeficientes técnicos*, da ANA (BRASIL, 2017b), dentre os segmentos das indústrias de fabricação de alimentos, em 2015, o abate e fabricação de produtos de carne se destaca quanto a retirada e consumo de água, com vazões de 13,48 m³/s e 1,68 m³/s respectivamente. Essa demanda hídrica se dispersa no território nacional, mas possui fortes concentrações nos estados da região sul do país.

A qualidade e quantidade de água utilizada por uma indústria irá depender da finalidade de uso. Para atingir a qualidade desejada para o processo é necessário,

dependendo das impurezas presentes na água, a realização de modificações nas propriedades da água (TELLES e COSTA, 2007).

3.2 RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Do ponto de vista global, apenas 2,6% da água existente no planeta é doce, e grande parte dessa água não está disponível porque está congelada. Com isso, apenas 0,3% do total das águas doces está disponível para utilização na forma de rios e lagos. Dentro desse pequeno percentual, o Brasil é um país privilegiado, pois detém em seu território nacional cerca de 14% das águas doces do planeta (BICUDO; TUNDISI; SCHEUENSTUHL, 2010).

Segundo Machado (2003), desde a década de 1990 as questões políticas da gestão dos recursos hídricos são discutidas no Brasil. Essas discussões levaram ao sancionamento da Lei nº 9.433 de 1997 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

A PNRH é baseada nos princípios de que a água é um recurso natural limitado, com valor econômico e de domínio público. Em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais. Além disso, a sua gestão deve proporcionar o uso múltiplo das águas (BRASIL, 1997).

Para Tsutiya (2006), os consumidores de água são classificados em quatro grandes categorias, doméstico, comercial, industrial e público. Essa classificação é necessária para o gerenciamento das demandas de água e também para definição de taxas de cobrança.

A água de uso doméstico corresponde a água utilizada nas áreas internas e externas das residências e seu consumo varia com as características socioeconômicas da região. Já a água comercial é destinada a pequenos e grandes consumidores e abrange inúmeras atividades como bares, hospitais, hotéis, lojas e clubes (TSUTIYA, 2006).

Nas indústrias a água é utilizada de diversas formas e, desta maneira, pode ser desmembrada em cinco grandes grupos. Esses grupos abordam água para consumo humano, para uso doméstico, água incorporada ao produto, água utilizada no processo produtivo e água perdida ou para usos não rotineiros. O volume de água utilizado, bem como sua finalidade, varia conforme o setor industrial. Enquanto que a

água para uso público é utilizada para manutenção das atividades do setor de serviços públicos. Atividades como irrigação de parques, limpeza de ruas, piscinas e torneiras de uso público (TSUTIYA, 2006).

Com o objetivo de controlar de forma quantitativa e qualitativa os usos das águas no Brasil, foi implantado o regime de outorga de direito de uso de recursos hídricos. Estão sujeitos a outorga a captação em corpo de água, a extração de água em aquífero, o lançamento de efluentes em corpos de água, o aproveitamento dos potenciais hidrelétricos assim como quaisquer outros usos que modifiquem o regime, a qualidade ou a quantidade de água presente no corpo hídrico (BRASIL, 1997).

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) definiu a existência de 12 regiões hidrográficas no território brasileiro (BRASIL, 2003). Essas regiões hidrográficas não coincidem com a organização político administrativa do país, portanto, são gerenciadas pela Agência Nacional de Águas (ANA) e órgãos gestores de recursos hídricos (BRASIL, 2018).

O município de Dois Vizinhos – PR está localizado na Região Hidrográfica Paraná, na subdivisão da bacia hidrográfica Iguaçu. Essa Região Hidrográfica apresenta grande importância nacional, pois é a região de maior desenvolvimento econômico do país, tendo destaque no setor industrial. Com isso, possui demanda elevada de recursos hídricos (BRASIL, 2015).

3.2.1 Padrões de potabilidade da água

A água destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos se caracteriza como água para consumo humano, assim como água utilizada para higiene pessoal, independente da sua origem (BRASIL, 2011).

Os procedimentos de controle de vigilância e de qualidade da água para consumo humano que devem ser seguidos, bem como o padrão de potabilidade são estabelecidos pela Portaria 2.914, de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

A água utilizada nas indústrias de produtos de origem animal deve seguir os parâmetros do padrão de potabilidade, expressos pela Portaria 2.914/2011 (BRASIL, 2011) e consolidados pela Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 (BRASIL, 2017).

Essas normativas estabelecem que para a água ser apta ao consumo humano deve apresentar, ausência de *Escherichia coli*, em 100 mL de água; Máximo de 1,0 Unidade de Turbidez (uT) em 95% das amostras para águas subterrâneas ou com tratamento de filtração lenta e 0,5 uT em 95% das amostras para filtração rápida; Assim como deve atender os valores de referência estabelecidos para cor, odor, pH, sólidos totais, concentração de produtos químicos, entre outros.

Além disso, está também deve estar disponível para inspeção industrial e sanitária regulamentadas pelo Decreto nº 9.013, de 29 de março de 2017 (BRASIL, 2017c). Esse decreto estabelece que, quando necessário, instalações de tratamento de água devem ser utilizadas para garantir o atendimento aos parâmetros.

3.3 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

A qualidade da água, superficial e subterrânea, está vinculada com variáveis naturais como regime de chuvas, escoamento superficial, geologia e vegetação da área e por variáveis antrópicas, como lançamento de efluentes e manejo do solo (BRASIL, 2018). Tanto as ações vinculadas as variáveis naturais quanto antrópicas geralmente tornam a água superficial poluída, fazendo-se necessário o uso de tratamentos para a obtenção dos níveis de qualidade exigidos de acordo com as diversas utilizações (BICUDO; TUNDISI; SCHEUENSTUHL, 2010).

Para Souza (2007), Estação de Tratamento de Água (ETA) é o conjunto de etapas pertinentes ao sistema de abastecimento de água responsável por garantir os padrões de qualidade da água. Elas possuem finalidades higiênicas, como remoção de microrganismos, substâncias tóxicas e substâncias orgânicas (correção de cor, odor, sabor e turbidez) e finalidade econômica, como redução de dureza e corrosividade.

Segundo Ahmad, Ahmad e Alam (2016, 2017), para o tratamento de águas superficiais normalmente são utilizados processos físico-químicos de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. Os produtos químicos comumente utilizados para otimizar os processos de coagulação são os sais de alumínio, como sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), ou sais de ferro, como sulfato ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) ou cloreto férrico (FeCl_3).

A coagulação compreende a etapa de desestabilização das partículas coloidais e suspensas, realizada pelo conjunto de ações físico-químicas, presentes na água entre o coagulante e as impurezas. Já a floculação é o conjunto de fenômenos físicos que objetiva a formação dos flocos a partir das partículas desestabilizadas na coagulação. A floculação é seguida pelo processo de decantação no qual são fornecidas condições para que os flocos se depositem no fundo do tanque pela ação da gravidade. Após a separação das partículas grosseiras na decantação, a água passa pelo processo de filtração (LIBÂNIO, 2008).

Libânio (2008), aponta que a filtração é o processo primordial para remoção de cor e turbidez no tratamento de águas. Ainda pode-se dizer que essa é a etapa mais relevante em ETAs convencionais, pois possibilita que falhas ocorridas em etapas anteriores sejam corrigidas. A última etapa dos tratamentos convencionais é a desinfecção, com o principal objetivo de isentar a água de microrganismos patogênicos. O cloro e seus compostos são os elementos mais empregados no tratamento de águas devido ao seu potencial de oxidação.

As etapas constituintes do tratamento de água geram um resíduo constituído pelas impurezas presentes na água bruta como areia, silte, argila e pelos produtos químicos utilizados no processo de tratamento. Esse resíduo é conhecido como Lodo de ETA e suas características variam conforme as características do tratamento (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016).

3.3.1 Lodo de ETA

Segundo Lustosa et al. (2017), o lodo gerado nas ETAs é proveniente da limpeza ou descargas dos decantadores e da lavagem dos filtros. A quantidade de lodo produzida depende de fatores como a quantidade de partículas sólidas presentes na água bruta, concentração de produtos químicos aplicados no tratamento, tempo de permanência do lodo nos tanques, além do método aplicado durante as limpezas, frequência e eficiência do processo de sedimentação.

O lodo *in natura* pode ser considerado líquido, tendo em vista que o teor de sólidos varia entre 0,1 a 4% na água de descarte dos decantadores, enquanto que a água de lavagem dos filtros possui teores sólidos ainda menores, entre 0,004 a 1%

(RICHTER, 2001). Essa variação no teor de sólidos depende da fonte de origem da água e do coagulante utilizado no processo.

Portanto, considerando que o lodo *in natura* possui um elevado teor de umidade, é indicado que se realize um tratamento no mesmo com o objetivo de reduzir cada vez mais o teor de umidade, obtendo assim, um resíduo com menor volume para disposição final (VON SPERLING, 2005).

Para Von Sperling (2005), as principais etapas para o tratamento do lodo de ETA são:

- Adensamento, responsável pela remoção de umidade e, conseqüentemente, redução de volume do lodo;
- Estabilização, remoção de matéria orgânica;
- Condicionamento, etapa de preparação para desidratação e adição de polímero, utilizada principalmente para desaguamento mecânico;
- Desaguamento, desidratação ou secagem, utilizado para remoção de umidade do lodo, reduzindo ainda mais o seu volume;
- Higienização, para remoção de eventuais organismos patogênicos; e por fim
- Disposição final, destinação final do lodo.

Como o lodo *in natura* apresenta forma líquida, a sua disposição final era comumente realizada a partir do lançamento do lodo sem tratamento prévio em corpos d'água. Como consequência disso, tal procedimento prejudicava a qualidade da água e propiciava o assoreamento dos corpos hídricos (COELHO, et al., 2015).

Como forma de reduzir a ocorrência desses lançamentos, a resolução CONAMA n° 357 (BRASIL, 2005), classifica esse material como poluente. Tornando assim necessário que seja realizada uma disposição ambientalmente adequada para esse resíduo.

Para realizar a destinação e disposição final correta do lodo, é necessário conhecer as suas características e principalmente as formas corretas de destinação em cumprimento às legislações vigentes. Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), o lodo proveniente dos sistemas de tratamento de água é considerado resíduo sólido.

Além disso, Oliveira (2004) e Ribeiro (2007) realizaram os ensaios para classificação desse resíduo segundo a NBR 10.004. Seus resultados indicam que o lodo de ETA é um Resíduo Classe II - A (não inerte), determinando que esse não apresenta características de periculosidade.

Entretanto, os lodos gerados nas ETAs podem ter características bastante variadas. Na Tabela 1 são apresentadas algumas características encontradas na literatura, para ETAs que têm como objetivo disponibilizar água para abastecimento público, portanto devem realizar tratamentos que tornem a água propícia ao consumo humano.

Mesmo sendo classificado como resíduo Classe II, o lodo pode apresentar concentrações elevadas metais de Ferro e Alumínio e outros elementos nocivos à saúde e ao meio ambiente. Portanto, deve-se tomar precauções quanto a destinação desses resíduos (RIBEIRO, 2007).

Portanto, a sua destinação e disposição final desse deve ser orientada pela Lei nº 12.305/10 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), (BRASIL, 2010). Além disso, o não cumprimento das legislações vigentes pode ser classificado como crime ambiental pela Lei 9.605 de fevereiro de 1998 (BRASIL, 1998).

Tabela 1 – Características do Lodo de ETA segundo a literatura

Autor	Ano de estudo	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH
Camargo, et al. (2014)	2011	-	2.671 a 2.975	6,6 a 8,1
Ribeiro (2007)	2006	-	26 a 41	-
	2005	-	30 a 67,9	-
Cordeiro (1993)	-	-	5.600	6,4
Vidal (1990)	-	173 a 449	1.176 a 3.487	6,0 a 7,4
Cordeiro (1981)	-	320	5.150	6,5
Nilsen (1974)	-	100	2.300	-
Albrecht (1972)	-	30 a 100	500 a 10.000	5,0 a 7,0
Neubauer (1968)	-	30 a 150	500 a 15.000	6,0 a 7,6

Fonte: Adaptado de CAMARGO, et al. (2014) e RIBEIRO (2007).

Segundo a PNRS (BRASIL, 2010), a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação, reaproveitamento e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes são consideradas destinações finais ambientalmente adequadas. Assim como a disposição em aterros, desde que os mesmos se enquadrem nas normas operacionais exigidas, para evitar danos à saúde e minimizar os impactos ambientais.

3.3.2 Formas de reaproveitamento para o lodo de ETA

Nesse item do referencial, serão apresentadas pesquisas que apontam usos alternativos para o lodo gerado nas ETAs. Além disso, serão apresentados os resultados obtidos nessas pesquisas quanto a caracterização do lodo e, se disponíveis, características dos tratamentos realizados na ETA de origem do lodo. Um resumo das análises realizadas nessas pesquisas, bem como seus resultados são apresentados na Tabela 2.

Alternativas de reaproveitamento ambientalmente adequado estão sendo estudadas para o lodo de ETA, como por exemplo, usos como adsorvente de metais pesados (SISWOYO, et al., 2019; YANG, et al., 2014), agregados a argila para fabricação de produtos cerâmicos e cimento (PINHEIRO; ESTEVÃO; SOUZA, 2014; CREMADES; CUSIDÓ; ARTEAGA, 2018; HAGEMANN; et al., 2019). A fabricação de tijolos (TEIXEIRA, et al., 2011; WOLFF; SCHWABE; CONCEIÇÃO, 2015), o uso para correção de solo (FAN, et al., 2014) e aplicação como base, sub-base e subleito de pavimentação de estradas (COELHO, et al., 2015) também são possíveis maneiras de reutilização do lodo.

Siswoyo, et al. (2019), demonstrou em suas pesquisas, que o lodo originado em ETA com processos convencionais de tratamento, utilizando alumínio como coagulante, pode ser utilizado como adsorvente de cádmio em águas poluídas. Os autores anteriormente citados avaliaram a eficiência de remoção do lodo sem tratamento, lodo tratado com ácido, lodo tratado com ácido e encapsulado em gel de alginato e lodo tratado com ácido e encapsulado em ágar. O lodo de ETA sem tratamento e o lodo tratado com ácido adsorveram rapidamente, em cerca de 30 min, mais de 90% do Cd^{2+} presente no efluente e após esse período, a remoção permaneceu relativamente constante. A remoção de Cd^{2+} pelos lodos encapsulados também foi em torno de 90%, embora a taxa de adsorção tenha sido mais lenta. Após o processo os adsorventes encapsulados foram separados mais facilmente da água.

Já Yang, et al. (2014), avaliaram as características do lodo de ETA e seu uso como adsorvente de fósforo. Foi observado que o lodo resultante de tratamentos com coagulantes ácidos é efetivo quanto a remoção de fósforo em águas residuais com taxas de remoção que podem chegar a 100%. Enquanto que o lodo de ETA sem adição de coagulantes ácidos obteve melhor desempenho no tratamento de esgotos domésticos de baixa concentração.

Pinheiro, Estevão e Souza (2014), realizaram a caracterização do lodo da ETA do município de Leopoldina – MG com foco na utilização pela indústria de cerâmica vermelha. A água tratada nessa ETA é captada no rio Pirapitinga, e passa pelo processo de tratamento que consiste na medição da vazão, com um medidor Parshall, seguida de floculação, decantação e filtração. Nessa ETA são utilizados sulfato de alumínio como coagulante, cal hidratada para correção do pH, cloro gasoso na desinfecção, e flúor para auxiliar no processo de tratamento e garantir que a água atenda o padrão de potabilidade. Foi observado o grande potencial do lodo gerado por essa ETA na incorporação em massas argilosas para fabricação de produtos de cerâmica vermelha, tendo em vista que seu comportamento químico-mineralógico é semelhante a argilas encontradas em regiões próximas ao município de Leopoldina – MG.

Se tratando da utilização do lodo de ETA na produção de tijolos, o lodo não apresentou resultados favoráveis quando usado na produção de tijolos dos tipos maciços e ocos. Porém, se testados quanto a produção de revestimento de interiores ou tijolos acústicos os resultados apresentaram-se significativos devido as suas características propiciarem bons materiais (WOLFF; SCHWABE; CONCEIÇÃO, 2015).

Em contrapartida, Teixeira, et al. (2011), observaram que o lodo pode ser utilizado para substituir até 10% das argilas utilizadas para produção de tijolos cerâmicos, desde que a temperatura de incineração seja inferior a 1000°C. Em temperaturas maiores, até 20% de lodo pode ser adicionado a matéria prima e utilizado na produção de telhas e tijolos. Nessas condições os materiais produzidos ficam dentro dos padrões estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras.

Outro tipo de reaproveitamento, menos estudado, porém, com grande potencial, é a utilização do lodo para correção de solo. Fan, et al., (2014), utilizaram lodo de ETA, cujos tratamentos utilizavam cálcio, para estabilização do solo contaminado com cobre. Ao final de suas pesquisas, foi possível concluir que ao integrar o lodo ao solo ocorreu um aumento na qualidade e rendimento de frutos, assim como reduziu o carregamento de cobre pelo escoamento superficial da água e elevou o pH do solo, confirmando a aplicabilidade da utilização do lodo para remediação de contaminação com cobre. Nesse estudo não foram realizadas análises de caracterização abrangente do lodo, porém, alguns dados são fornecidos. Esse lodo é constituído em sua grande maioria por argila (852 g/kg), silte (136 g/kg) e areia

(12 g/kg) e pH 9,1. Para realização da remediação do solo foram utilizadas 5 toneladas de lodo por hectare (FAN, et al., 2014).

Além disso, o lodo pode ser agregado ao solo para fins agrícolas. Botero, et al. (2009) avaliaram as características agrícolas de fertilidade, análise elementar, determinação de macro e micro-nutrientes, metais potencialmente tóxicos e biodisponíveis, do lodo de três estações de tratamento de água. As análises foram realizadas no lodo da ETA de Jaboticabal – SP, que utiliza cloreto férrico como floculante, e das ETAS de Taquatitinga-SP e Manaus – AM, que utilizam sulfato de alumínio como floculante. Através das análises foi identificado que os lodos apresentaram potencial agrícola. Entretanto, o potencial uso agrícola do lodo com sulfato de alumínio é reduzido, pois o alumínio não apresenta nenhuma função para o desenvolvimento das plantas. Sendo assim, deve-se levar em consideração as características da água bruta e do tipo de floculante utilizado no processo de tratamento antes de dispor esse resíduo no solo.

Já Coelho et al. (2015), estudaram a aplicação de lodo de ETA como base, sub-base e subleito de pavimento de estradas. O lodo bruto foi coletado na ETA Cafezal, localizada no município de Londrina – PR, seco em leito de drenagem e secagem ao ar para obter as características desejáveis para realização dos ensaios experimentais. Para o procedimento experimental, o lodo foi agregado em um solo argiloso e em um solo arenoso em proporções de 1:1 (solo-lodo) e 1:0,25 (solo-lodo) respectivamente. Para o solo argiloso, foram adicionados 6 e 10% de cimento, enquanto que para o solo arenoso não houve a adição de cimento. As misturas dos dois solos com o lodo apresentaram resultados positivos quanto ao uso como subleito, já para o uso como base de pavimento, apenas o solo com adição de lodo e 10% de cimento obteve resultados positivos.

Gonçalves, et al. (2017), também estudaram uma aplicabilidade alternativa para o lodo gerado na ETA Cafezal. Os autores analisaram a aplicabilidade do lodo seco, em leito de secagem, como incremento em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. Utilizando proporções de 1:0,5 e 1:1 (solo-lodo) para solo argiloso e 1:0,25 (solo-lodo) para solo arenoso, foi possível identificar que o coeficiente de permeabilidade dos materiais com agregados solo-lodo variou de 10^{-10} – 10^{-9} m/s. Sendo assim, observou-se que os materiais apresentaram baixa permeabilidade e podem ser indicados para usos em obras de aterro sanitário.

Alguns autores avaliaram a utilização do lodo seco para realização de suas pesquisas, entretanto, eventualmente é necessário realizar processos de tratamento no lodo para melhorar seus resultados. Conforme estudo realizado por Hagemann, et al. (2019), os autores utilizaram cinza do lodo como substituto de parcela do cimento Portland na produção de concretos. Como resultados, foi possível reduzir a utilização do cimento Portland em até 38,4% em concretos contendo 15% de lodo.

Tabela 2 – Resumo dos resultados de caracterização de lodo de ETA encontrados na literatura e sua forma de reaproveitamento

Utilização do lodo	Principais características encontradas					Referência
	Composição mineralógica	Análises térmicas	Composição química	Área da superfície	Grupos funcionais	
Indústria de cerâmica e construção civil	Os principais compostos encontrados foram caulinita e hematita. Além de indícios da presença de ilita e anatásio.	A curva apresenta três vales endotérmicos (100,5°; 291,7° e 519,9°) e um pico exotérmico (913,4°). Os eventos endotérmicos são acompanhados de intenso processo de transferência de massa.	SiO ₂ – 26,84% Al ₂ O ₃ – 26,33% Fe ₂ O ₃ – 24% TiO ₂ – 1,26%	-	-	(PINHEIRO; ESTEVÃO; SOUZA, 2014)
	Os principais compostos encontrados foram caulinita, mica, goethita e quartzo. Além de indícios de óxidos de ferro, titânio e gibbsita.	A curva apresenta quatro vales com perda de massa em todo das temperaturas de 65, 265, 315 e 500 °C	Fe Al Si Ti	-	-	(TEIXEIRA, et al., 2011)
	Os principais compostos encontrados foram caulinita e quartzo	A curva apresenta um pico endotérmico aproximadamente na temperatura de 150°C e outro pico endotérmico na faixa de temperatura entre 470 a 510°C. Enquanto que na faixa de temperatura de 300 a 370°C ocorre um pico exotérmico.	SiO ₂ – 44,7% Al ₂ O ₃ – 33,9% Fe ₂ O ₃ – 11,8%	46,9 m ² /g	- OH Si – O Al – OH	(HAGEMANN, et al., 2019)
	Os principais compostos encontrados foram caulinita e quartzo. Além de indícios de hematita ⁽³⁾ .	A curva apresenta picos de perda de massa nas temperaturas de 80; 284,1; 506,9 °C. Porém, o maior pico foi observado na temperatura de 813,8 °C ⁽³⁾ .	SiO ₂ – 37,5% Al ₂ O ₃ – 30,1% Fe ₂ O ₃ – 12,3%	-	-	(WOLFF; SCHWABE; CONCEIÇÃO, 2015)

Continuação Tabela 2.

Utilização do lodo	Composição mineralógica	Análises térmicas	Composição química	Área da superfície	Grupos funcionais	Referência
	-	-	Al – 70 g/kg Fe – 30 g/kg Ca – 5 g/kg	83,2 m ² /g	- OH C = O P – O – H	(SISWOYO, et al., 2019)
Adsorvente	Picos de difração indicam que os teores de Fe e Al eram hidróxidos de metais amorfos ⁽¹⁾ .	-	Al – 84,4 g/kg Fe – 40,3 g/kg P – 1,1 g/kg	32,8 m ² /g		
	Picos de difração em Al ₂ (SO ₄) ₃ e Fe ₂ (SO ₄) ₃ permitiu analisar que alguns dos teores de Al e Fe encontrados no solo são de substâncias solúveis ⁽²⁾ .	-	Al – 41,2 g/kg Fe – 10,2 g/kg P – 0,4 g/kg	9,3 m ² /g	P – O	(YANG, et al., 2014)

Fonte: Autoria própria, 2019

Legenda: (1) Lodo sem coagulante ácido;

(2) Lodo com coagulante ácido;

(3) Resultados obtidos coma análise de um composto com 50% de lodo de ETA.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 PROCESSO DE GERAÇÃO E COLETA DO LODO

4.1.1 Identificação da indústria

O lodo foi coletado em uma indústria do ramo alimentício localizada no município de Dois Vizinhos – PR. Essa indústria tem como principal atividade o abate de aves para exportação, porém, a unidade fabril conta também com uma fábrica de ração, fábrica de farinha, fábrica de óleo e dois incubatórios de aves. Além de áreas administrativas e de apoio. Nessas fábricas a água é utilizada para diversas finalidades, como a utilização direta no processo produtivo, em lavadores de gases e movimentação de materiais, bem como para consumo humano e doméstico.

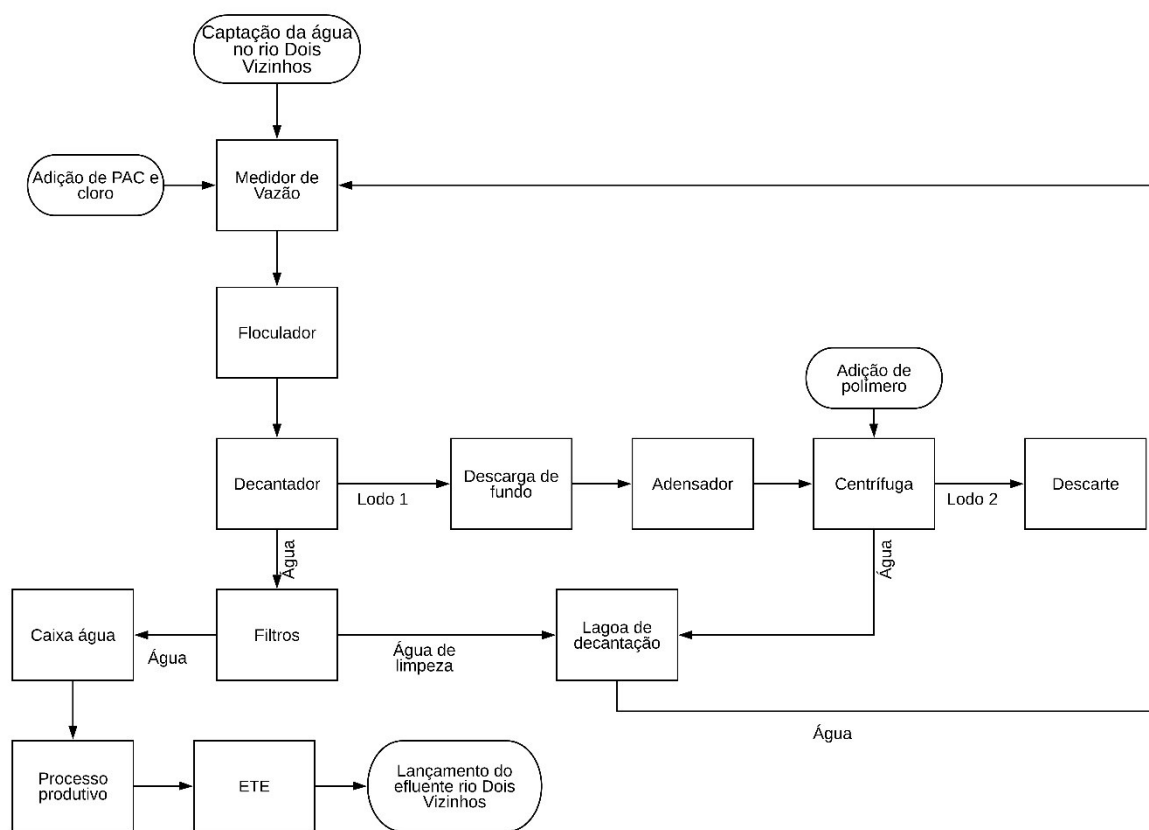
Sendo assim, essa unidade fabril demanda uma grande quantidade de água para suprir todas as suas necessidades. Desta maneira, em torno de 600 m³/h de água são captados do Rio Dois Vizinhos e tratados na ETA dessa indústria. Atualmente o lodo gerado na ETA é destinado a aterro sanitário.

4.1.2 Formação do lodo

A ETA de estudo é composta por 4 estações de tratamento completas com capacidade de tratamento de 650 m³/h de água bruta. O fluxograma do processo de tratamento de água é apresentado na Figura 2.

O processo se inicia com a medição da vazão em uma calha Parshal. Ainda na calha, é adicionado o coagulante inorgânico catiônico policloreto de alumínio (PAC) para auxiliar no processo de formação de flocos. Além do PAC, o cloro gás também é adicionado à água ainda na calha, como agente desinfetante, garantindo a redução dos microrganismos.

Figura 2 – Fluxograma do processo de tratamento de água



Fonte: Autoria própria, 2019.

Quando a água apresenta pH abaixo de 6,5, o que geralmente ocorre em períodos de chuvas prolongadas, é dosado carbonato de sódio na água bruta para adequação do pH próximo a neutralidade. Após a adição dos químicos à água bruta, inicia-se o processo de tratamento com a floculação/coagulação.

Na floculação/coagulação agitadores fazem com que o coagulante se misture homogeneamente a água e auxilie a formação dos flocos. Após esse processo, a água segue para os decantadores, onde os flocos com a matéria sólida irão se separar da água. Os decantadores usados na ETA são laminares, com ângulo de inclinação de 45°.

A água que sai dos decantadores é encaminhada para as câmaras de filtração, formadas por 4 filtros cada filtro é composto por 1 metro de camada filtrante. A camada filtrante inicia-se com carvão antracitoso, seguida por uma camada de areia. Além dessas camadas, os filtros possuem uma camada de pedras, composta por seixo fino, seguida de pedras de seixo médios e posteriormente seixo grande. A água enfim é coletada através de um fundo falso e levada para as caixas de água.

O resíduo sólido (lodo), formando no decantador, é encaminhado para um adensador através da descarga de fundo. O adensador tem como principal função forçar a deposição das partículas sólidas em seu fundo para redução do volume, necessária para melhorar a eficiência do processo de desidratação.

O lodo é bombeado do fundo do adensador para uma centrífuga, cuja função é desidratar o lodo e prepará-lo para descarte. Anteriormente ao processo de centrifugação, adiciona-se um polímero catiônico - Superfloc 8396 - como agente floculante. O lodo seco é acondicionado em um container de 5 m³ e destinado para um aterro sanitário industrial terceirizado.

4.1.3 Coleta e tratamento inicial do lodo

O lodo proveniente da ETA da referida indústria após o desaguamento em centrífuga, possui um teor de umidade que varia de 75 a 85%. O lodo foi coletado da caixa de acondicionamento temporário onde o resíduo fica até ser recolhido e encaminhado para disposição final, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Lodo centrifugado disposto em acondicionamento temporário para a destinação final



Fonte: Autoria própria (2019).

Portanto, após a coleta do lodo, o mesmo foi seco em estufa de secagem à 80°C até obtenção de massa constante. Os torrões secos foram posteriormente

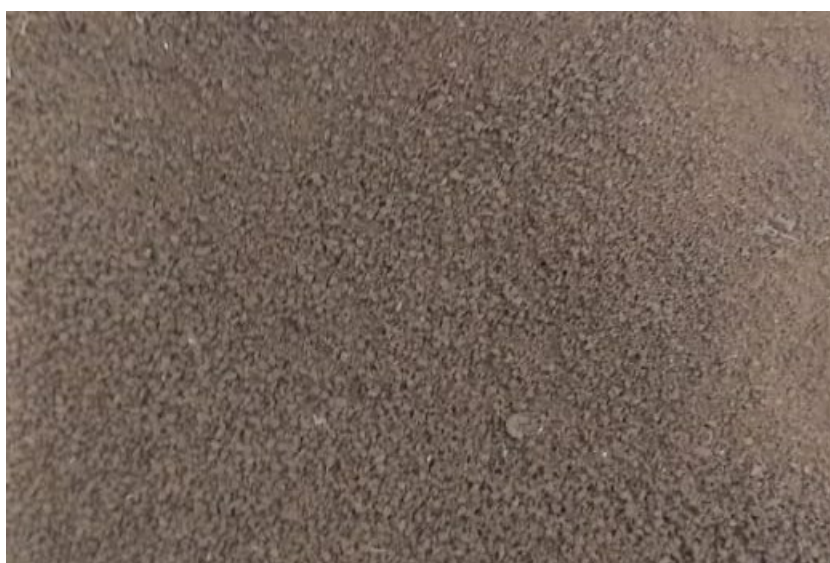
quebrados com o auxílio de pistilo e almofariz, conforme apresentados na Figura 4. Em seguida, o lodo foi peneirado em peneiras de 8, 10 e 30 mesh *Tyler*. O material selecionado para análise foi o com granulometria inferior a 600 (micrômetros) e é apresentado na Figura 5.

Figura 4 – Lodo seco e destorroado



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 5 – Lodo após peneiramento



Fonte: Autoria própria (2019).

4.1.4 Digestão da amostra

Realizou-se a digestão de amostras do lodo para que as análises de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Espectrometria de Absorção Atômica (EAA) fossem realizadas, uma vez que essas análises exigem amostras em estado líquido.

Para realização da digestão as amostras foram aquecidas em refluxo fechado à 140 °C após a adição de 5 mL de ácido nítrico (HNO₃), 15 mL de ácido clorídrico (HCL) e 5 mL de água destilada (H₂O) em 2,5 g de amostra de lodo.

O processo completo de digestão foi realizado em três etapas. (1) Inicialmente a temperatura do digestor foi elevada gradativamente até atingir 140 °C, (2) após atingir a temperatura a amostra foi mantida por 2 h em digestão e, por fim, (3) aguardou-se a amostra atingir a temperatura ambiente. Após digerida, a amostra foi filtrada em membranas de acetato de celulose para evitar a precipitação de possíveis metais contidos no lodo.

4.2 ANÁLISES PARA CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO LODO

4.2.1 Difração de raios X (DRX)

A partir da análise de difração de raios X (DRX) é possível identificar as características mineralógicas da amostra de lodo. Segundo Cavalcanti et al. (2016), com a identificação dos minerais presentes na estrutura dos materiais é possível analisar as suas aplicações industriais.

Esta análise foi realizada, no equipamento *Rigaku Miniflex 600*, à 40 keV e 15 mA, aplicando radiação de Cu K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), na Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Pato Branco. Os diagramas foram obtidos na faixa de varredura de 5 a 90° (2 θ), no modo *step scan*, passo de 0,02°, 1,0 s por passo.

O tamanho do cristalino das fases cristalinas (d, dado em Å), foi calculado pela equação de Scherrer (Equação 1). Enquanto que a composição mineralógica foi analisada através de software de que analisam a difração, com o banco de dados de compostos inorgânicos.

$$d = \frac{kx\lambda}{\cos(\theta) \times L} \quad (1)$$

Onde:

k é a constante adimensional de Scherrer, comumente assumida 0,9;

λ é o comprimento de onda dos raios X (1,5406 Å);

θ é o ângulo de difração; e

L é a largura à meia altura do pico de difração.

4.3 ANÁLISES PARA CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO LODO

4.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Através da microscopia de varredura (MEV) foi possível obter informações sobre topografia, textura e características da superfície dos materiais sólidos. Esta análise foi realizada, por meio do equipamento *Hitachi 3000*, com ampliações de 100, 300 e 1200 vezes, na Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Pato Branco.

4.4 ANÁLISES PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO

4.4.1 Ponto de carga zero (pH_{PCZ})

O ponto de carga zero ou pH_{pcz} reflete o pH em que a carga da superfície é nula, em outras palavras, significa o pH onde o número de cargas negativas é igual ao número de cargas positivas. Neste trabalho, o pH_{pcz} do lodo foi determinado a partir da adaptação do método descrito por Vijayakumar et al. (2009).

Para a determinação do pH_{pcz} foi adicionado 0,1 g de lodo em 9 Erlenmeyers com 50 mL de solução padrão de cloreto de sódio (NaCl) 0,1N. Os frascos foram vedados, de forma a evitar a entrada de CO₂ e a evaporação das soluções.

Posteriormente, corrigiu-se o pH dos experimentos com a adição de ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH). Os valores de pH analisados foram 2,5, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11. Os experimentos foram agitados em Shaker a 150 rpm, por 24 horas. Após o período de agitação, as amostras foram filtradas, em papel filtro, e registrou-se o pH final das mesmas. O ponto de carga zero foi identificado a partir da análise da faixa onde o pH se manteve constante, visualizada a partir do gráfico do pH final *versus* pH inicial.

4.4.2 Demanda química de oxigênio (DQO)

Através dessa análise foi possível definir a quantidade de oxigênio necessário para oxidar quimicamente toda a matéria oxidável (orgânica ou inorgânica) presente na amostra digerida de lodo. Esse experimento foi realizado utilizando o método 5220 D. do *Standard Methods* (APHA, 2017).

Inicialmente foram preparadas as soluções digestora, ácido sulfúrico reagente (catalítica) e padrão de biftalato de potássio. Para preparo da solução digestora foi adicionado em 500 mL de água destilada 10,216g de $K_2Cr_2O_7$, previamente seco à 150 °C por 2 h, 167 mL de ácido sulfúrico concentrado e 33,3g de $HgSO_4$. Em seguida, aguardou-se a solução atingir temperatura ambiente e avolumou-se para 1000 mL.

Na solução catalítica foi adicionado 5,06 g de Ag_2SO_4 em 500 mL de ácido sulfúrico concentrado. A solução foi deixada em repouso por 1 ou 2 dias para a completa dissolução. Por sua vez, a solução padrão de biftalato de potássio foi preparada diluindo-se 0,425g de $KHC_8H_4O_4$, previamente seco à 110 °C por 1 h, em 1000 mL de água destilada. Essa solução possui uma DQO teórica de 500 mg O_2/L .

Posteriormente, preparou-se a curva padrão. Adicionou-se em sequência a tubos de ensaio 1,5 mL da solução digestora, 3,5 mL da solução catalítica, diferentes volumes de água destilada e solução de biftalato de potássio. Em seguida, com os tubos de ensaio completamente vedados, cada tubo foi invertido 5 vezes para misturar completamente as soluções.

Os tubos foram levados a um bloco digestor onde ficaram por 2h à 150 °C. Passado esse período, as amostras foram retiradas do bloco digestor e aguardou-se que atingissem a temperatura ambiente. Em seguida, a absorbância das amostras foi lida em espectrofotômetro UV-vis no comprimento de onda de 600 nm.

Os valores de absorvância encontrados e concentração foram ajustados em um gráfico de dispersão para se obter a equação da reta e o valor de R^2 . Após a realização da curva padrão, foram realizados os experimentos com a amostra digerida do lodo de ETA. Foram adicionados aos tubos de ensaio 2,5 mL de amostra, na sequência, 1,5 mL de solução digestora e 3,5 mL de solução catalítica, esse procedimento foi realizado em triplicata.

Os tubos foram tampados e vedados, agitados 5 vezes e levados para digerir em bloco digestor por 2h à 150 °C. Após retirados do bloco digestor e resfriados a temperatura ambiente, a absorvância das amostras foi lida em espectrofotômetro com comprimento de onda de 600 nm. A concentração de DQO, em mg O_2/L foi obtida através da equação da reta encontrada no gráfico da curva padrão.

4.4.3 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Segundo Ruschel et al. (2014) através da FTIR é possível identificar os grupos funcionais de compostos presentes na amostra. Isto é possível, pois cada grupo gera uma banda no espectro infravermelho em sequências específicas.

A posição das bandas no espectro do infravermelho é apresentada em número de ondas (cm^{-1}) enquanto que a intensidade das bandas é apresentada em porcentagem de transmitância (%T). O comprimento de onda utilizado para a análise foi de 400 a 4000 cm^{-1} , pois essa é uma região característica de compostos orgânicos. A análise dos resultados foi embasada na tabela Analytical chemistry- Infrared Spectroscopy (2015) e no trabalho de Lopes e Fascio (2004).

Esta análise foi realizada utilizando o equipamento *Perkin Elmer Frontier*, na Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Pato Branco.

4.4.4 Espectrometria de absorção atômica (EAA)

A análise de Espectrometria de absorção atômica fornece, de forma quantitativa os elementos químicos presentes em determinada amostra. As técnicas de EAA mais utilizadas são a chama e o forno grafite. A chama é utilizada para análise

elementar em mg/L, enquanto que a forno grafite apresenta os restados em baixas concentrações de $\mu\text{g/L}$.

A digestão da biomassa foi realizada para obter uma amostra em estado líquido e possibilitar a determinação da quantidade de íons metálicos presentes no lodo. A análise foi realizada no Laboratório Multiusuários de Análises Químicas (LAMAQ) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Sede Ecoville, câmpus Curitiba.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

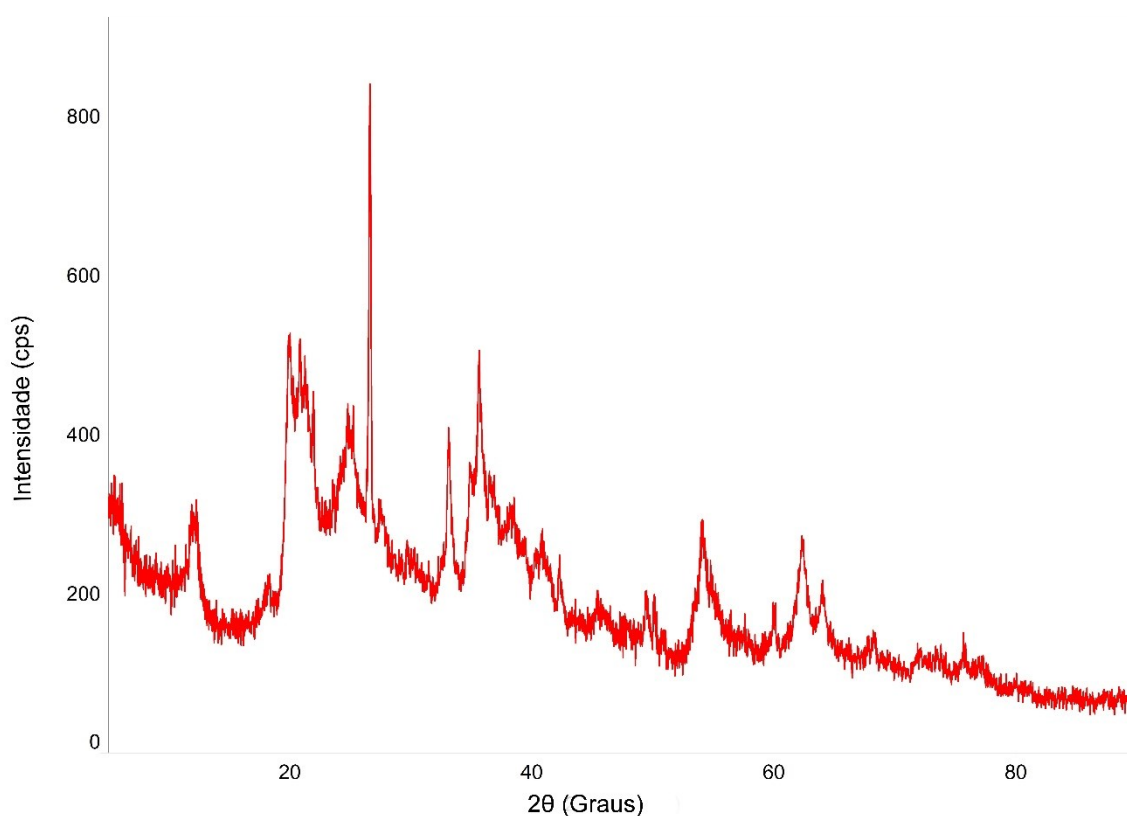
A amostra de lodo foi coletada com teor de umidade média de aproximadamente 77%. Portanto, para realização dessas análises de caracterização o lodo foi seco em estufa, triturado, peneirado e, se necessário, preparadas de acordo com as exigências específicas das análises.

5.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

5.1.1 Difração de raios X (DRX)

A partir da análise dos dados obtidos pela difração de raios X (DRX) é possível determinar a microestrutura do material. O difratograma do lodo de ETA é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Difratograma do lodo da ETA

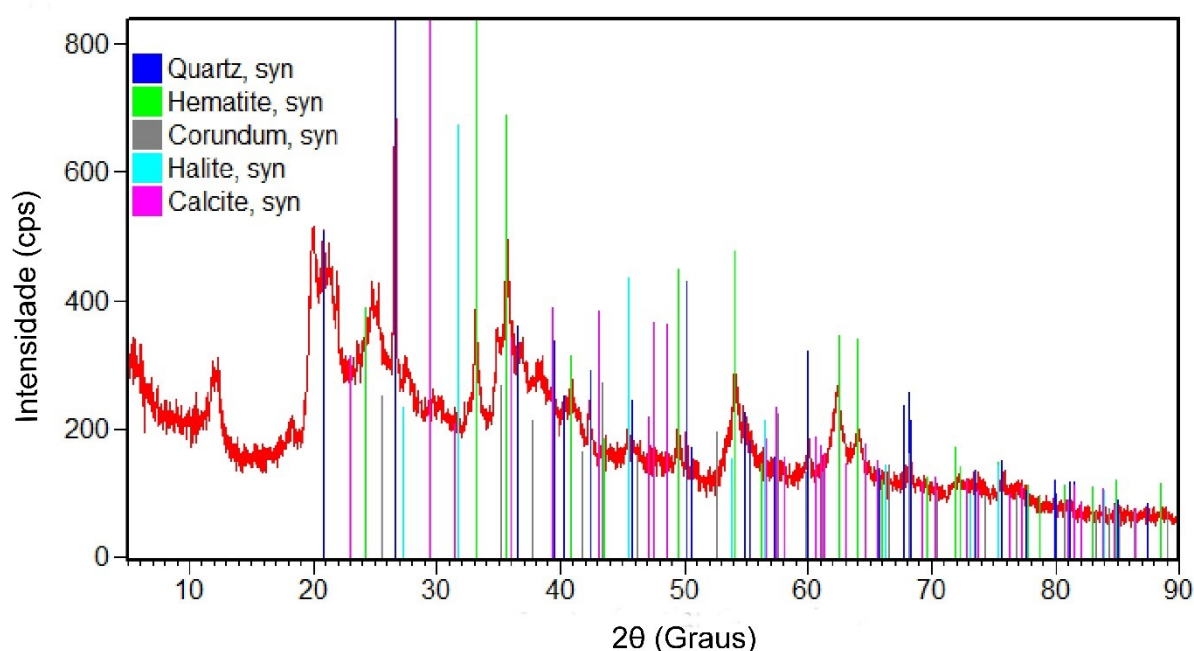


Fonte: Autoria própria (2019).

O cálculo do diâmetro médio do cristalino foi realizado pela equação de Sherrer (Equação 1). Utilizou-se do pico de maior intensidade, em que o ângulo de difração corresponde a $2(\theta)=26,637$, o valor da largura a meia altura do pico foi obtido com base nos valores de FWHM (*full width at half maximum*), $L=0,2$. O tamanho médio do cristalino foi de 10,40 nm.

A composição mineralógica do lodo é apresentada nas Figuras 7 e 8. Foi possível observar no lodo de ETA a presença de grande quantidade de Quartzo, mineral originado do dióxido de silício (SiO_2), Calcita, mineral a base de carbonato de cálcio (CaCO_3) e Hematita, mineral constituído de óxidos de ferro. Além de traços de Coríndon, mineral a base de óxido de alumínio (Al_2O_3), e Halita, mineral originado do cloreto de sódio (NaCl).

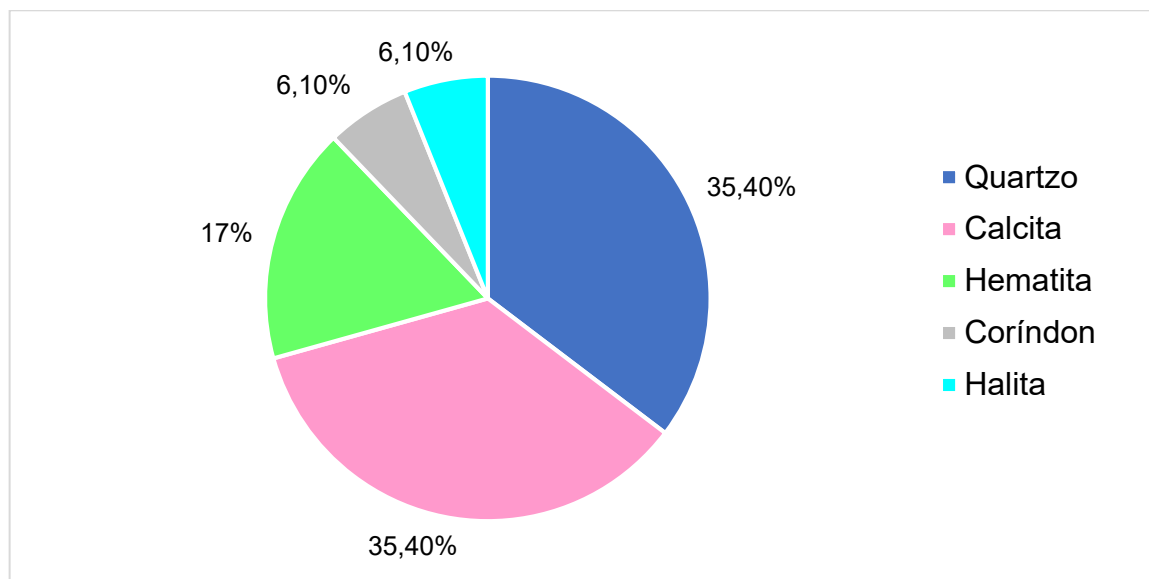
Figura 7 – Difratoograma do lodo de ETA com identificação de minerais



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 8 são apresentados os percentuais aproximados da distribuição dos minerais na amostra. O software relaciona os picos encontrados no difratograma da amostra com os picos da sua base de dados, determinando por semelhança a composição mineralógica do material. Os minerais utilizados da base de dados do software são apresentados na Tabela 3.

Figura 8 – Composição mineralógica percentual do Lodo de ETA



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 3 - Características dos minerais do software de análise de DRX

Mineral	Código de referência	Fórmula química
Quartzo	00-046-1045	SiO ₂
Calcita	00-005-0586	CaCO ₃
Hematita	00-033-0664	Fe ₂ O ₃
Coríndon	00-010-0173	Al ₂ O ₃
Halita	00-005-0628	NaCl

Fonte: Software de análise de DRX (2019).

Em outras pesquisas, que utilizaram o lodo de ETA como agregado em produtos cerâmicos e na construção civil como fabricação de tijolos, agregados em cimento (HAGEMANN; et al., 2019; WOLFF; SCHWABE; CONCEIÇÃO, 2015; PINHEIRO; ESTEVÃO; SOUZA, 2014; TEIXEIRA, et al., 2011) a composição mineralógica foi semelhante a observada nesse estudo. Além disso, foi identificado a presença de compostos de Alumínio e Ferro nos lodos utilizados como adsorvente de metais pesados (YANG, et al., 2014).

Grande porcentagem do lodo gerado na ETA é originado das partículas sólidas de solo carregadas pela água. É importante destacar que o mineral quartzo é comumente encontrado nos solos. A composição física, química e mineralógica do solo é determinada pelo processo geológico de sua formação, pela origem dos

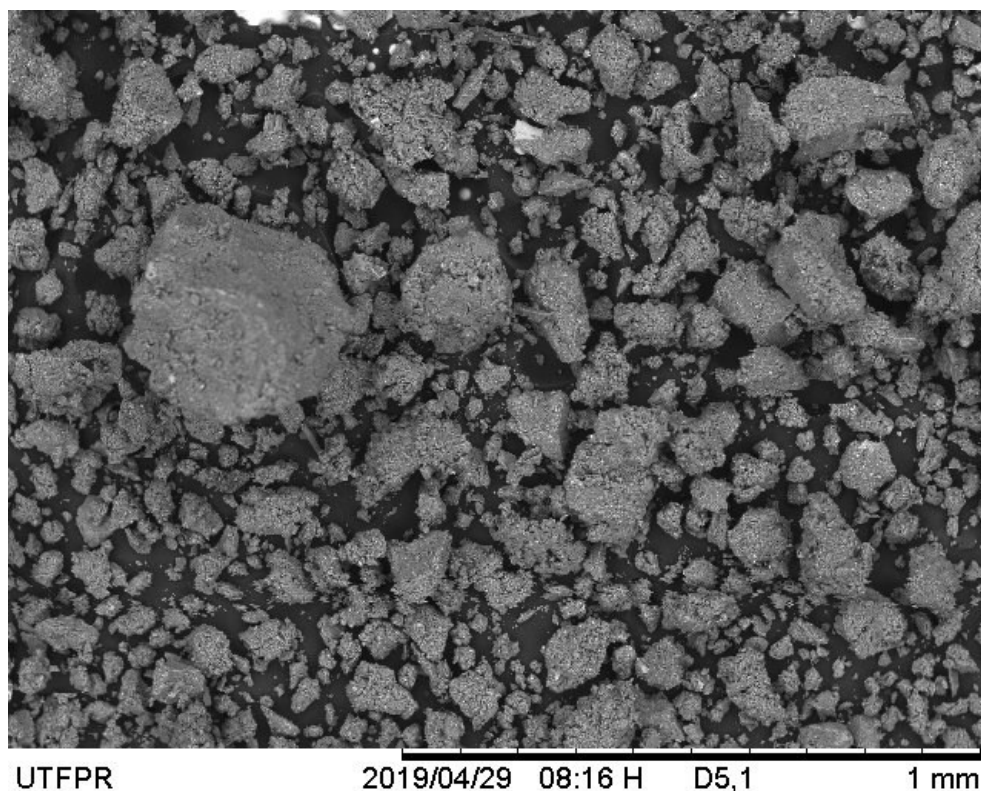
minerais, clima e relevo do local, assim como por interferências antrópicas (SILVA, 2009).

5.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

5.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Nas Figuras 9, 10 e 11 são apresentadas as morfologias do lodo de ETA mediante as fotomicrografias obtidas no MEV. A Figura 9 apresenta uma imagem geral da amostra, em pequena ampliação, 100 vezes, sendo possível observar que o lodo possui grânulos de tamanhos e formas irregulares, com larga distribuição de partículas; Tal aspecto também foi observado por Tartari, et al. (2011) e Oliveira, (2004).

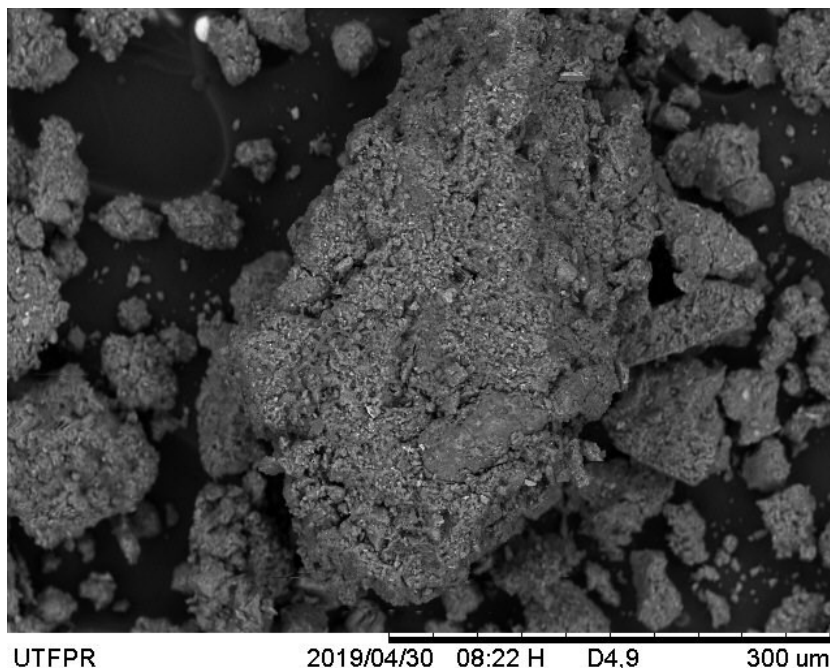
Figura 9 – Morfologia geral da amostra com ampliação de 100x



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 10, os grânulos do lodo são verificados com ampliação de 300 vezes. Com isso é possível confirmar a irregularidade no formato, dimensão e perfil dos grânulos que formam o resíduo.

Figura 10 – Grânulo do lodo da ETA com ampliação de 300x

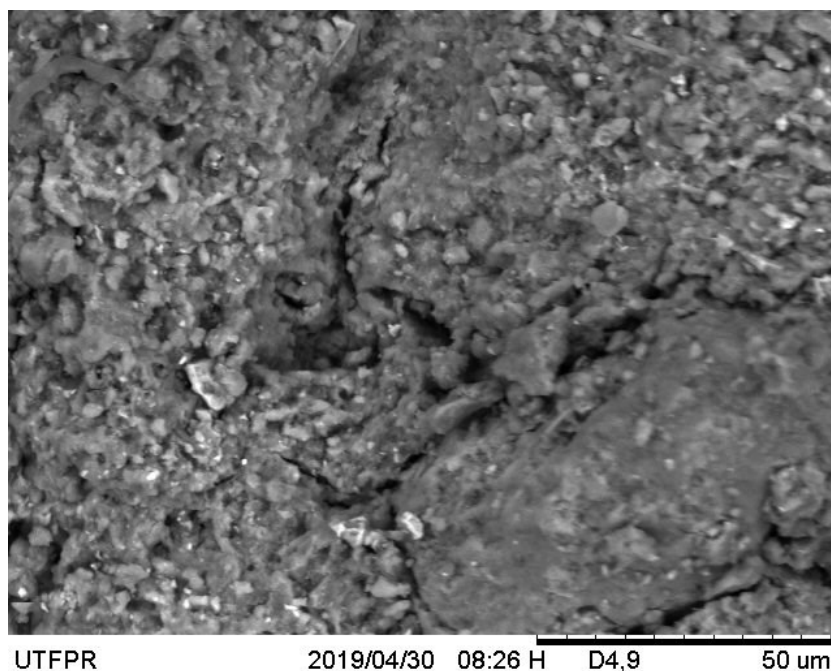


Fonte: Autoria própria (2019).

A superfície do grânulo é apresentada na Figura 11. Assim como Paixão, et al. (2008), pode-se observar a presença de partículas finas, com tamanho de micrômetros, na superfície do lodo. Observa-se também, que a superfície apresenta uma topografia irregular, cujos aglomerados de partículas aparentam possuir forças atrativas fracas.

Um aspecto do lodo observado por outros autores é a presença de estruturas lamelares (ARAÚJO, et al., 2015; TARTARI, et al., 2011), o que indica a presença do mineral de argila caulinita. Na Figura 11, cuja ampliação foi de 1200 vezes pode-se observar a presença dessas estruturas.

Figura 11 – Superfície do grânulo de lodo de ETA com ampliação de 1200x



Fonte: Autoria própria (2019).

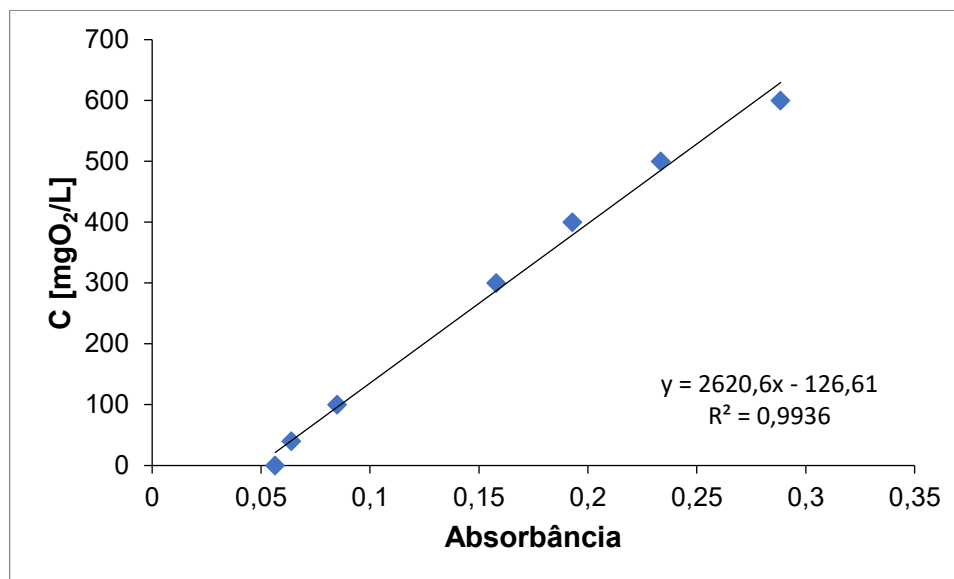
A estrutura morfológica encontrada no lodo da ETA nesse estudo se assemelha com a descrita em estudos que utilizaram o lodo com foco na reutilização em materiais de construção (ARAÚJO, et al., 2015) e blocos cerâmicos (TARTARI, et al., 2011; PAIXÃO, et al., 2008; OLIVEIRA, 2004). O lodo apresentou resultados positivos quando agregados a esses materiais.

5.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

5.3.1 Demanda química de oxigênio (DQO)

Para determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) da amostra foi obtida a curva de calibração das soluções plotando os dados de concentração de DQO (mgO_2/L) e absorvância (Figura 12). A partir da equação da reta determinada no gráfico foi possível quantificar a concentração de DQO da amostra.

Figura 12 – Curva de calibração DQO



Fonte: Autoria própria (2019).

A análise foi realizada em duplicata e assumiu-se o valor médio dos resultados como a concentração de DQO da amostra, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - DQO do lodo de ETA

Absorbância	Fator de diluição	DQO (mgO ₂ /L)
0,285	10x	6202
0,281	10x	6097
Média		6150

Fonte: Autoria própria (2019).

O valor de DQO encontrado confirma o fato descrito na legislação que o lodo de ETA não deve ser destinado a mananciais por possuir potencial poluidor. Para um resíduo ser destinado ao corpo d'água a sua concentração de DQO deve ser no máximo de 200 mg O₂/L (BRASIL, 2005).

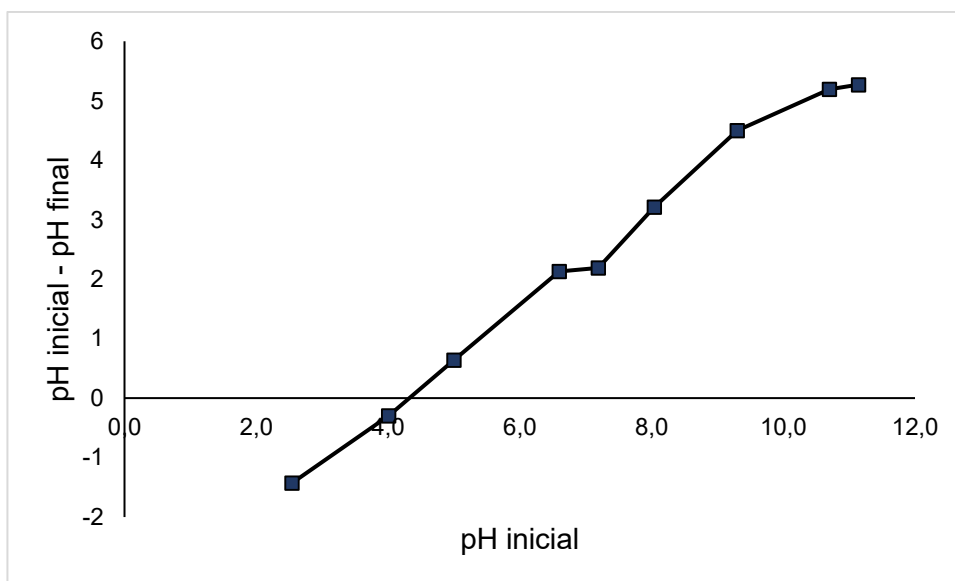
Os valores de DQO encontrados na literatura para o lodo da ETA são bem abrangentes. Camargo, et al. (2014) obtiveram concentrações de DQO entre 2671 a 2975 mg O₂/L. Enquanto que Ribeiro (2007) observou concentrações de 26 a 67,9 mg O₂/L. Portanto, resultados encontrados neste estudo se assemelham com os descritos na literatura por Cordeiro (1981, 1993), DQO de 5150 e 5600 respectivamente.

A qualidade da água bruta e os processos de tratamento realizados na ETA também influenciam na concentração de DQO do lodo. Essa ampla variação de características pode ser resultante dessas variáveis. Ribeiro (2007) também observou essa grande variação de concentrações na literatura.

5.3.2 Ponto de carga zero (pH_{PCZ})

Pela análise do pH_{pcz}, é possível identificar o pH onde a carga da superfície do material é nula, ou seja, o pH onde os sítios positivos e negativos são iguais. O ponto de carga zero encontrado para o lodo da ETA foi de aproximadamente 4 (Figura 13). Com isso, pode-se dizer que o lodo apresenta características ácidas.

Figura 13 – Ponto de carga zero para o lodo de ETA



Fonte: Autoria própria (2019).

O pH_{pcz} é um importante indicador das características de adsorção do material em análise. Segundo Garg e Prasad (2016), a adsorção de ânions é favorecida quando o pH da solução for inferior ao pH_{pcz}, pois a superfície dos materiais está carregada positivamente. Enquanto que, a adsorção de cátions é favorecida quando o pH da solução for maior que o pH_{pcz}, pois a superfície dos materiais está carregada negativamente.

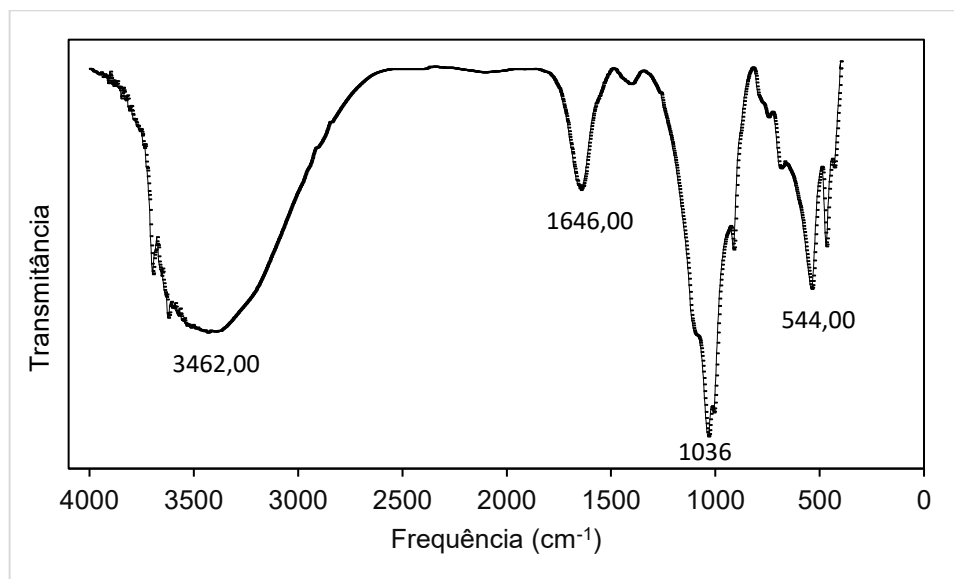
Pode-se dizer então, que a superfície do adsorvente é determinada principalmente pelo pH da solução. Sendo assim, o lodo pode ser utilizado como adsorvente de diversos materiais, desde que se leve em consideração a natureza do poluente que se deseja eliminar e faça ajustes no pH da solução quando necessário. A importância dessa análise pode ser observada nas pesquisas realizadas por Siswoyo, et al. (2019), que obtiveram remoção de aproximadamente 100% de Cd^{2+} em efluente sintético, de cádmio dissolvido, com pH 7.

5.3.3 Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)

Mediante a análise de FTIR foi possível observar os grupos funcionais que constituem o material. Segundo Siswoyo, et al. (2019), os grupos funcionais presentes no lodo desempenham função significativa na ligação de metais pesados. Na Figura 14 são apresentados os espectros de FTIR para o lodo de ETA, enquanto as principais bandas de adsorção, seus respectivos grupos funcionais, assim como uma breve comparação com a literatura, são apresentados na Tabela 5.

Observa-se pela Tabela 5, a presença de bandas de adsorção características dos grupos funcionais hidroxila ($-\text{OH}$) e carboxilas ($\text{C}=\text{O}$). Assim como aminas alifáticas ($\text{C}-\text{N}$) e o grupo $\text{C}-\text{O}$ que representa os ésteres, éteres, álcoois e ácido carboxílico.

Figura 14 – Espectros de adsorção FTIR para o lodo de ETA



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 5 - Bandas do espectro FTIR e comparação com literatura

Resultados desse estudo		Resultados bibliografia			
		(SISWOYO, et al., 2019)		(HAGEMANN, et al., 2019)	
Frequência (cm ⁻¹)	Grupo funcional	Frequência (cm ⁻¹)	Grupo funcional	Frequência (cm ⁻¹)	Grupo funcional
3626 – 3344	O – H	Aprox. 3442	O – H	3430 – 1630	O – H
1646	C = O	1641	C = O	Aprox. 1100	Si – O
1036	C – N C – O	1038 - 913	P – O – H	Aprox. 914	Al- OH

Fonte: Autoria própria (2019).

As bandas apresentadas entre 800 e 400 cm⁻¹ também podem ser atribuídas a flexão do grupo OH ou grupos de vibrações de alongamentos do grupo C – O (FANG, et al., 2010). As bandas na região próxima a 1090 cm⁻¹, além de serem atribuídas aos grupos funcionais presentes na Tabela 5, podem estar ligadas a vibrações de alongamentos do grupo P – O (YANG, et al., 2014).

Os grupos funcionais de C = O e C – O, encontrados nas bandas próximas as regiões de 1646 cm⁻¹ e 1036 cm⁻¹ são característicos do mineral Calcita. A partir da

análise de difração de raios X, foi identificado que a Calcita representa 35,4% da composição do lodo. Sendo assim, é possível validar os resultados obtidos no DRX.

Os grupos funcionais observados mediante a análise de FTIR nesse estudo se assemelham com os grupos funcionais observados por Siswoyo, et al. (2019) e Hagemann, et al. (2019). Esses autores utilizaram o lodo como agredado de argila na fabricação de materiais de construção e para adsorvente de metal pesado.

5.3.1 Espectrometria de absorção atômica (EAA)

Após a digestão da amostra de lodo, a análise foi executada pelo método de chama. Foi realizada a quantificação de metais de Ferro (Fe), Alumínio (Al) e Cálcio (Ca), tendo em vista a sua presença nos principais constituintes minerais encontrados no lodo a partir da análise de difração de raios X.

A Tabela 6 apresenta a concentração final desses metais na amostra digerida.

Tabela 6 - Composição química do lodo de ETA

Metal	Concentração (g/L)
Fe	18,1
Al	12,65
Ca	0,06

Fonte: Aatoria própria (2019).

A concentração de Fe encontrada no lodo corrobora o fato desse resíduo não poder ser destinado em corpos hídricos, tendo em vista que o limite máximo para lançamento em corpo hídrico é de 15,0 mg/L (BRASIL, 2011), e o teor encontrado é pelo menos 1000 vezes superior. Siswoyo, et al. (2019) e Yang, et al. (2014), caracterizaram o lodo de ETA, obtiveram concentrações bem inferiores desses metais, isto é, alumínio (Al) variando de 41,2 a 84,4 mg/kg e ferro (Fe) de 10 a 40 mg/kg, respectivamente em suas amostras.

As elevadas concentrações de Fe e Al validam os resultados encontrados na análise de DRX. Pois, os minerais Hematita e Coríndon, constituídos por Fe e Al respectivamente, foram encontrados na amostra de lodo. Além disso, a presença de cálcio na amostra apontada pela EAA também foi observada pela análise de DRX através do mineral Calcita.

Através da queima desse resíduo é possível incorporá-los de forma a não serem prejudiciais à saúde. Chen, Ma e Dai (2011) utilizaram o lodo para formação de clínquer de cimento, cimento em uma fase básica de fabricação, e observaram que após a queima a 1400°C por 40 minutos foi possível realizar a incorporação dos metais no cimento.

5.4 REAPROVEITAMENTO DO LODO

Segundo a literatura, o lodo pode ser destinado de diversas formas, sendo avaliado nesse estudo as possíveis formas de reaproveitamento desse material. A partir dessa caracterização é possível identificar quais as melhores alternativas de reaproveitamento. Um resumo das características que possibilitam essas destinações são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Resumo das características e maneiras de reaproveitamento do lodo da ETA

Maneira de reaproveitamento	Característica	Referência
Adsorvente	Ponto de carga zero ácido; Grupos funcionais de hidroxila (– OH) e carboxila (C = O); Composição mineralógica com a presença de Quartzo, Hematita e Coríndon.	(YANG, et al., 2014) (SISWOYO, et al., 2019).
Produtos cerâmicos (tijolos, telhas, etc.)	Estrutura morfológica com grânulos de tamanhos e formas irregulares, com larga distribuição de partículas, irregularidade no formato, dimensão e perfil dos grânulos. Com topografia irregular e estruturas lamelares; Composição mineralógica com a presença de Quartzo, Hematita e Coríndon.	(TARTARI, et al., 2011; PAIXÃO, et al., 2008; OLIVEIRA, 2004); (PINHEIRO; ESTEVÃO; SOUZA, 2014) (TEIXEIRA, et al., 2011).
Construção civil	Estrutura morfológica com grânulos de tamanhos e formas irregulares, com larga distribuição de partículas, irregularidade no formato, dimensão e perfil dos grânulos. Com topografia irregular e estruturas lamelares; Grupos funcionais de hidroxila (– OH) e carboxila (C = O); Composição química com a presença de Al e Fe.	(ARAÚJO, et al., 2015) (HAGEMANN, et al., 2019) (CHEN; MA; DAI, 2011)

Fonte: Autoria própria (2019).

Além das alternativas apresentadas na Tabela 7, estudos complementares devem ser realizados para avaliação de outras formas de reaproveitamento para o lodo de ETA. Como a utilização para correção de solo contaminado, agregado ao solo com finalidades agrícolas, impermeabilizante de solo e base, sub base e subleito de pavimentos de estradas.

6 CONCLUSÃO

As indústrias demandam diariamente grandes volumes de água para execução dos seus processos produtivos. O setor de produção de alimentos se destaca quanto a demanda de água necessária aos seus processos, sendo classificada como um dos maiores setores de hidrotensividade no Brasil. As indústrias de alimentos e bebidas estão espalhadas em todo o país, porém possuem fortes concentrações nos estados da região Sul do país.

O lodo de ETA é gerado em grande quantidade nas estações de tratamento e apresenta características variáveis de acordo com a qualidade da água bruta, processos de tratamento e finalidade de usos da água.

Quanto ao lodo em estudo, foi possível identificar a presença de Quartzo, Calcita e Hematita como principais características mineralógicas, além de traços de Coríndon, e Halita.

Já a morfologia do lodo foi semelhante a encontrada pela literatura, os grânulos possuem formas e tamanhos irregulares, assim como larga distribuição das partículas. Além disso a topografia da superfície é irregular e apresentam forças atrativas fracas.

O lodo apresentou uma DQO elevada, 6150 mg O₂/L, corroborando com a legislação que apresenta o lodo como potencial poluidor de mananciais. Além disso, possui um pH_{PCZ} de aproximadamente 4, demonstrando que a superfície do lodo possui características ácidas.

Os grupos funcionais identificados no lodo foram de hidroxila, carboxila, aminas alifáticas e cloretos. Assim como, picos presentes na região do grupo C – O que representa os ésteres, éteres, álcoois e ácido carboxílico. A presença dos grupos C = O e C – O corroboram os resultados encontrados no DRX quanto a presença do mineral Calcita

Além disso, foi identificada a concentração de metais de ferro (18,1 g/L), alumínio (12,65 g/L) e cálcio (0,06 g/L), concentrações essas, elevadas quando comparadas com a literatura. Entretanto, esses metais podem ser agregados a outros materiais em temperaturas elevadas.

A agregação do lodo em argilas vermelhas, fabricação de produtos cerâmicos, cimento e adsorventes de metais pesados são principais alternativas para o reaproveitamento do lodo de ETA encontradas na literatura. Porém, alguns estudos

também abordam a utilização como base para pavimentação de estradas, uso para correção e fertilização de solo e como impermeabilizante em aterros sanitários.

Comparando os resultados com a literatura, pode-se dizer, que o lodo estudado possui potencial de utilização na indústria de cerâmicas, construção civil e como adsorvente de metais pesados. Outras formas de reaproveitamento também podem ser realizadas, desde que, realizado estudo prévio de aplicabilidade.

REFERÊNCIAS

ABIA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS. Relatório anual 2018. ABIA, 2018.

ABIA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS. Livro comemorativo 50 anos da ABIA. **DBA Editora**, São Paulo, SP, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. **Environ Monit Assess**, v. 189, n. 453, p. 01-10, 2017. Disponível em: < <https://link-springer-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s10661-017-6166-1>>.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 1-13, 2016. Disponível em: < <https://www-sciencedirect.ez48.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S095965261600250X>>.

Analytical chemistry- Infrared spectroscopy. 2015. Tabela. Disponível em: < https://www.ceric-eric.eu/wp-content/uploads/2018/07/AnalyticalChemistry_IR.pdf>.

APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23 nd. Washington, DC: American Public Health Association. v. 1, 2017.

ARAÚJO, F. C. Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. **Cerâmica**, v. 61, p. 450-456, 2015. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?frbrVersion=4&script=sci_arttext&pid=S0366-69132015000400450&lng=en&tlng=en>.

BICUDO, C.E. de M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. Águas do Brasil: análises estratégicas. **Instituto de Botânica**, São Paulo, 2010.

BRASIL. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil – Informe anual. **Ministério do Meio Ambiente**, Agência Nacional de Águas, Brasília, 2018.

BRASIL. Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017. **Ministério da Saúde**. 28 set. 2017

BRASIL. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil – Informe anual. **Ministério do Meio Ambiente**, Agência Nacional de Águas, Brasília, 2017a.

BRASIL. Água na indústria: uso e coeficientes técnicos. **Ministério do Meio Ambiente**, Agência Nacional de Águas, Brasília, 2017b.

BRASIL. Decreto nº 9.013, de 29 de março de 2017. Regulamenta a Lei nº 1.283/50 e a Lei nº 7.889/89 que dispõe sobre a inspeção industrial e sanitária de produtos de origem animal. Presidência da república, Casa civil, Brasília, 2017c.

BRASIL. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial. **Ministério do Meio Ambiente**, Agência Nacional de Águas, Brasília, 2015.

BRASIL. Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011. **Ministério da Saúde**. 12 dez. 2011.

BRASIL. Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Presidência da república, Casa civil, Brasília, 02 ago, 2010.

BRASIL. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Ministério do Meio Ambiente**, Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). 18 mar, 2005.

BRASIL. Resolução nº 23, de 15 de outubro de 2003. **Ministério do Meio Ambiente**, Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). 17 dez, 2003.

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

BRASIL. Lei Nº9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Presidência da república, Casa civil, Brasília, 09 jan, 1997.

BOTERO, W. G.; SANTOS, A.; OLIVEIRA, L. C.; ROCHA, J. C. Caracterização de lodo gerado em estação de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Química Nova**, v.32, n.8, p.20018-2022. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000800007>

CAMARGO, R. P. L.; COSTA, O. S.; FERNANDES, I. L.; GÓIS, P. F.; SILVA, R. C.; SANTOS, G. A. Caracterização físico-química e bacteriológica dos resíduos de ETA: A importância do seu estudo. **Eclética Química**, v. 39, p. 81-90, 2014. Disponível em: <<http://revista.iq.unesp.br/ojs/index.php/eclética/article/view/81/51>>.

CAMPOS, A. C.; MEDEIROS, N. H.; TEIXEIRA, A. C. Avanços tecnológicos e ganhos de competitividade na indústria de transformação paranaense no período 2000-2012. **Acta Scientiarum: Humam and Social Sciences**, Maringá, PR, v.39, n.2, p.143-153, May-Aug., 2017. Disponível em: <<http://go-galegroup.ez48.periodicos.capes.gov.br/ps/i.do?&id=GALE|A504784977&v=2.1&u=capes&it=r&p=AONE&sw=w>>.

CÁRIO, S. A. F.; PEREIRA, L. B.; BROLLO, M. X. **Economia paranaense: estudo de setores selecionados**. Fundação Boiteux, Florianópolis, SC. 2002.

CAVALCANTI, L. F. M.; OLIVEIRA, F. M. C.; MELO, E. B.; FERNANDES, A.C. Identificação dos minerais do granito azul sucuru através da técnica da difração de raios x. **HOLOS**, a. 32, v. 7, p. 32-39, 2016. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/4450>>.

CHEN, H. X.; MA, X.; DAI, H. Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, n. 6, p.436-439. 2010. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946510000363>>.

COELHO, R. V.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; FONTENELE, H. B.; TEIXEIRA, R. S. Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária. **REEC – Revista eletrônica de engenharia civil**. v.10, n.2, p.11-22, 2015. Disponível em:< <https://doaj.org/article/e3bc746127f041e4980df3ce3dae9bf4>>.

CORDEIRO, J. S.; HESPANHOL, I. Disposição, tratabilidade e reúso de lodos de estações de tratamento de água. 1981 155p. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1981.

CORDEIRO, J. S. O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água. 1993. 342p. Tese (Doutorado). SHS – Escola de Engenharia de São Carlos/ USP. São Carlos, 1993.

CREMADES, L. V.; CUSIDÓ, J. A.; ARTEGA, F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 1071-1080. nov. 2018. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618324363>>.

FAN, J.; HE, Z.; MA, L. Q.; YANG, Y.; STOFFELLA, P.J. Impacts of calcium water treatment residue on the soil-water-plant system in citrus production. **Plant Soil**, v.374, p. 993-1004, 2014. Disponível em: < <https://link-springer-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11104-013-1881-z>>.

FANG, P.; CEN, C.; CHEN, D.; TANG, Z. Carbonaceous Adsorbents Prepared from Sewage Sludge and Its Application for Hg Adsorption in Simulated Flue Gas. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v.18, n.2, p.231–238, 2010. Disponível em:< <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S100495410860347X>>.

GARG, K. K.; PRASAD, B. Treatment of multicomponent aqueous solution of purified terephthalic acid wastewater by electrocoagulation process: Optimization of process and analysis of sludge. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 60, p. 383-393, 2016. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107015004794>>.

GONÇALVES, F. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista DAE**, jan. 2017.

HAGEMANN, S.E.; GASTALDINI, A. L. G.; COCCO, M.; JAHN, S. L.; TERRA, L. M. Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 916-926, 2019. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618340551>>.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Editora Átomo, Campinas, SP. 2.ed. 2008.

LIMA, E. P. C. **Água e Indústria: experiências e desafios**. Infinita Imagem, 1.ed. 2018.

LOPES, W. A; FASCIO, M. Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho. **Química Nova**, Salvador, v. 27, n. 4, 2004. Disponível em: <
http://www.scielo.br/scielo.php?frbrVersion=3&script=sci_arttext&pid=S0100-40422004000400025&lng=en&tlng=en>.

LUSTOSA, J. B.; BRACARESE, D. C.; CASTRO, F. M. S.; QUEIROZ, S. C. B.; SILVA, G. G. Tratamento e aproveitamento de água de lavagem de filtro em estação de tratamento de água. **Revista DAE**. maio. 2017. Disponível em: <
http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_206_n_1671.pdf>.

MACHADO, C. J. S. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. **Ambiente & Sociedade**, v.VI, n. 2, jul/dez. 2003. Disponível em: <
http://www.scielo.br/scielo.php?frbrVersion=2&script=sci_arttext&pid=S1414-753X2003000300008&lng=en&tlng=en>.

OLIVEIRA, E. M. S. Estudo da valorização e reciclagem de resíduos provenientes de estação de tratamento de águas em cerâmica vermelha. 2004. 127.f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ. ago, 2004.

PAIXÃO, L. C. C. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, v.54, p.63-76, 2008. Disponível em: ,
http://www.scielo.br/scielo.php?frbrVersion=3&script=sci_arttext&pid=S0366-69132008000100010&lng=en&tlng=en>.

PINHEIRO, B. C. A.; ESTEVÃO, G. M.; SOUZA, D. P. Lodo proveniente da estação de tratamento de água do município de Leopoldina, MG, para aproveitamento na indústria de cerâmica vermelha – Parte I: caracterização do lodo. **Revista Matéria**, v. 19, n.3, p. 204-211, 2014. Disponível em: <
http://www.scielo.br/scielo.php?frbrVersion=2&script=sci_arttext&pid=S1517-70762014000300204&lng=en&tlng=en>.

RIBEIRO, F. L. M. Quantificação e caracterização química dos resíduos da ETA de Itabirito – MG. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental ICEB – Campus - Morro do Cruzeiro. Ouro Preto – MG. 2007.

RICHTER, C. A. **Tratamentos de lodos de Estações de Tratamento de Água**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2001.

RUSCHEL, C. F. C.; HUANG, C. T.; SAMIOS, D.; FERRÃO, M. F. Análise exploratória aplicada a espectros de reflexão total atenuada no infravermelho com transformada de Fourier (ATR-FTIR) de blendas de biodiesel/diesel. **Química Nova**, v. 37, n. 5, p. 810-815, 2014. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?frbrVersion=4&script=sci_arttext&pid=S0100-40422014000500009&lng=en&tlng=en>.

SILVA, F. M. da.; CHAVES, M. S.; LIMA, Z. M. C. **Geografia Física II**. EDUFERN, Natal, RN, 2009. Disponível em: <http://www.ead.uepb.edu.br/arquivos/cursos/Geografia_PAR_UAB/Fasciculos%20-%20Material/Geografia_Fisica_II/Geo_Fis_II_A09_M_GR_SF_SI_SE_260509.pdf>.

SISWOYO, E.; QONIAH, I.; LESTARI, P.; FAJRI, J. A.; SANI, R. A.; SARI, D G.; BOVING, T. Development of a floating adsorbent for cadmium derived from modified drinking water treatment plant sludge. **Environmental Technology & Innovation**, v. 14, p. 01-09, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186418304024>>.

SOUZA, W. A. **Tratamento de águas**. CEFET/RN, Natal, 2007.

SUZIGAN, W. Industrialização brasileira em perspectiva histórica. **História econômica & história de empresas III**, v. 2, p. 7-25. 2000.

TARTARI, R. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. **Cerâmica**, v. 57, p. 288-293, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132011000300006&lng=en&tlng=en>.

TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; SOUZA, A. E.; ALESSIO, P.; 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, n. 4, p. 161-165, out, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131711001724>>.

TELLES, D. D; COSTA, R. H. P. G; **Reúso da água: conceitos, teorias e práticas**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. Departamento de engenharia hidráulica e sanitária da escola politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 3.ed. 2006.

VIJAYAKUMAR, G.; DHARMENDIRAKUMAR, M.; RENGANATHAN, S.; SIVANESAN, S.; Baskar, B.; ELANGO. K. P. Removal of Congo red from aqueous solutions by perlite. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 37, n. 4–5, p. 355–364, 2009. Disponível em: <<https://onlinelibrary-wiley.ez48.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1002/clen.200800228>>.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de engenharia sanitária e ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of Cleaner Production**, n. 96, p. 282-

298, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614006064>>.

YANG, L.; WEI, J.; ZHANG, Y.; WANG, J.; WANG, D. Reuse of acid coagulant-recovered drinking waterworks sludgeresidual to remove phosphorus from wastewater. **Applied Surface Science**, v. 305, p. 337-346, jun, 2014. Disponível em: < <https://www-sciencedirect.ez48.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0169433214006217>>.