

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

ETEC TRAJANO CAMARGO

Curso Técnico em Química

Marcelo de Mello

Marcio Nascimento Chaves

Mauricio Leonel

Rônaldo Corrêa Cantamissa

**USO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA
PRODUÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

Limeira – SP

2024

Marcelo de Mello
Marcio Nascimento Chaves
Mauricio Leonel
Rônalld Corrêa Cantamissa

**USO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA
PRODUÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico em Química da Etec Trajano Camargo, orientado pelo prof. Me. Edivaldo Luiz de Souza, como requisito parcial para a obtenção do título de Técnico em Química.

Limeira – SP

2024

Resumo

O presente trabalho de conclusão de curso da escola Etec Trajano Camargo, aborda o estudo da aplicação do lodo de estação de tratamento de água para produção de revestimentos cerâmico, realizando testes de resistência mecânica à tensão, de absorção de umidade; entre outros. O objetivo é aplicar o lodo da ETA de Limeira para produção e aplicação em placas cerâmicas visando a utilização de forma sustentável do lodo gerado no tratamento de ETA. Foram avaliados os efeitos dos teores de substituição de argila pelo lodo de ETA (2%, 5%, 10% 15% em massa) e das propriedades físico-químico e mecânicas (resistências à compressão axial e à absorção de água) em diferentes porcentagens. De uma forma geral, o presente estudo mostra que o lodo de ETA pode ser empregado como agregado miúdo em substituindo a argila, sendo uma alternativa válida e sustentável para uso na indústria cerâmica.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Indústria Cerâmica; Substituição; lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA); Compressão axial.

Abstract

The present course completion works of the Etec school. Trajano Camargo, addresses the study of the application of sludge from a water treatment plant for the production of ceramic tiles, performing tests on mechanical resistance to tension, moisture absorption; among others. The objective is to apply the sludge from the Limeira WTP for production and application in ceramic plates, aiming at the sustainable use of the generated sludge in the treatment of WTP. The effects of clay replacement levels by WTP sludge (2%, 5%, 10%, 15% by weight) and mechanical properties (strengths to axial compression and water absorption) in different percentages were evaluated. In general, the present study shows that WTP sludge can be used as fine aggregate to replace clay, being a valid and sustainable alternative for use in the ceramic industry.

Keywords: Sustainability; Industry ceramics; sludge from the Water Treatment Plant (WTP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema convencional de tratamento de água.....	12
Figura 2 Lugar de coleta.....	19
Figura 3 Corpos de prova após prensagem.....	22
Figura 4 Prensa utilizada.....	23
Figura 5 Argila utilizada.....	24
Figura 6 Resultados pós-queima.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Sequência de atividade desenvolvida na empresa Industria Cerâmica Fagnani Ltda.	21
Tabela 2 Resultados dos Ensaios - Amostra 1 (0% Lodo)	25
Tabela 3 Resultados dos Ensaios - Amostra 2 (5% Lodo)	26
Tabela 4 Resultados dos Ensaios - Amostra 3 (10% Lodo)	27
Tabela 5 Resultados dos Ensaios - Amostra 4 (15% Lodo)	29
Tabela 6 distribuição percentual das partículas de argila de acordo com o tamanho do peneiro.	31
Tabela 7 Plasticidade.....	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	9
2.1 Objetivo geral	9
2.2 Objetivos específicos.....	9
3. REVISÃO DA LITERATURA	10
3.1 Sistemas de tratamento de água.....	10
3.2 Características do lodo de ETA.....	12
3.3 Revestimento cerâmico	13
3.4 Lodo: tipos e descarte	14
3.5 Onde Pode Ser Descartado	16
3.6 Certificação ISSO	17
3.7 Indústria cerâmica de Limeira.....	18
4. METODOLOGIA.....	20
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

A água potável é essencial à saúde humana, um direito humano fundamental e um componente eficaz para a proteção à saúde.

O processo de potabilização da água gera um resíduo, o lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA), que se classifica pela norma ABNT NBR 10004:2004, como resíduo sólido Classe II A, não perigoso, não inerte, que pode ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, e que, portanto, deve receber um destino adequado conforme legislação ambiental brasileira. (ABNT NBR 10004, 2004).

As Estações de Tratamento de Água (ETAs) são empregadas em larga escala no tratamento de água doce bruta, visando obter água de qualidade satisfatória para o consumo humano, de acordo com os padrões de potabilidade e propriedades estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (OLIVEIRA, 2004). O processo intenso de tratamento químico e físico da água bruta resulta em uma quantidade significativa de lodo de ETA. O consumo de materiais vem crescendo paralelamente ao aumento da população, além dos descartes excessivos no meio ambiente. No final do século XX, o conceito de desenvolvimento sustentável foi introduzido, permitindo avaliar a sustentabilidade no setor da construção civil (HÄFLIGER, 2017).

A crescente demanda por água potável e o aumento populacional têm intensificado a operação das ETAs em todo o mundo. Essas estações desempenham um papel fundamental na purificação da água doce bruta, seguindo os rigorosos padrões de qualidade estabelecidos pela OMS (OLIVEIRA, 2004). No entanto, o tratamento intensivo resulta na geração significativa de lodo, um resíduo que requer atenção especial e representa um desafio ambiental importante, visto que seu descarte inadequado pode causar impactos negativos no meio ambiente (HAMMER, 2000).

O século XXI elevou a conscientização sobre a importância do desenvolvimento sustentável, refletindo-se também no setor da construção civil. Houve um aumento na preocupação com os impactos ambientais dessa indústria, incluindo o uso de materiais de construção (HÄFLIGER, 2017). Neste contexto, surge a questão da

possível utilização do lodo gerado nas ETAs como recurso na produção de revestimento cerâmico. Esta abordagem poderia contribuir para a redução do desperdício de resíduos e promover a sustentabilidade na indústria da construção. A pesquisa busca explorar essa possibilidade, examinando a viabilidade de produzir revestimento cerâmico de alta qualidade a partir do lodo de ETA, ao mesmo tempo que aborda as questões ambientais e os desafios técnicos associados a essa abordagem inovadora (HÄFLIGER, 2017).

A crescente conscientização sobre os impactos ambientais e a necessidade de promover práticas mais sustentáveis na indústria da construção tornam a pesquisa sobre a utilização do lodo gerado nas ETAs como recurso na produção de revestimento cerâmico particularmente relevante. Essa abordagem não apenas ajuda a reduzir o desperdício de resíduos, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado do lodo e ao processo de extração e beneficiamento da argila para produção de revestimento cerâmico. A busca por produzir revestimento cerâmico de alta qualidade a partir do lodo de ETA desafia a comunidade científica e a indústria da construção a desenvolver soluções inovadoras que podem abrir caminho para práticas mais sustentáveis e ecologicamente responsáveis. À medida que o século XXI avança, é imperativo explorar essas oportunidades para promover um equilíbrio entre o fornecimento de água potável e a conservação do meio ambiente (HÄFLIGER, 2017).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Aplicar o lodo da ETA da BRK de Limeira - SP para produção de revestimento cerâmico aplicando na construção civil.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar características físico-químicas do lodo a ser utilizado na elaboração das placas cerâmicas;
- Produzir revestimento cerâmico com a utilização de lodo de ETA e aplicar nos corpos de prova;
- Realizar testes sobre os corpos de prova constituídos de placas cerâmicas para determinar sua resistência mecânica à tensão;
- Realizar testes de perda ao fogo nos corpos de prova;
- Realizar testes de absorção de umidade; entre outros.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Sistemas de tratamento de água.

Todo o processo de tratamento da água bruta, proveniente de mananciais, para o consumo humano é realizado na unidade operacional da ETA (BITENCOURT, 2016). Nesse tratamento, a água passa por processos para transformar em água potável, ou seja, que está em conformidade com o padrão de potabilidade estabelecido na Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde, sendo convencionalmente realizadas as operações de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção (BRASIL, 2021).

A coagulação é a operação unitária que consiste na formação dos coágulos através das mudanças físico-químicas produzidas pela dispersão de um coagulante solúvel que se hidrolisa em partículas carregadas positivamente, anulando as cargas negativas dos coloides (Lima, 2016). Essa atividade é influenciada por fatores como temperatura, pH, alcalinidade, cor, turbidez, sólidos totais dissolvidos, força iônica e tamanho das partículas (PEREIRA, 2011).

O sulfato de alumínio é o coagulante mais utilizado nesse processo e que por meio de sua carga, é capaz de provocar a desestabilização de partículas. Outras substâncias também podem ser usadas como o cloreto férrico, sulfato ferroso, sulfato férrico e polímeros sintéticos (LIMA, 2016), mas nenhum deles se compara ao sulfato de alumínio quanto ao custo-eficiência.

Após a coagulação, ocorre o processo de floculação, que consiste no agrupamento das partículas eletricamente desestabilizadas (coágulos), de modo a formar outras maiores denominadas de flocos, sendo, portanto, suscetíveis a remoção por decantação (ou flotação) e filtração (PEREIRA, 2011).

A finalidade dessa etapa é apenas permitir o contato entre os coágulos, aumentando o tamanho dos flocos e conseqüentemente sua massa e densidade, o que acelera o processo de sedimentação, preparando a água para o processo subsequente de decantação (HELLER; PÁDUA, 2010).

A decantação é uma das técnicas mais antigas e simples de clarificação da água e utiliza da ação da força de gravidade sobre as impurezas, promovendo a sedimentação delas no fundo da unidade, e resultando na clarificação do sobrenadante (HELLER; PÁDUA, 2010). Essas impurezas são os flocos formados nas operações unitárias anteriores que são mais densas que a água e pela ação da gravidade apresentam um movimento descendente, depositando-se no fundo e formando um lodo (PEREIRA, 2011).

As partículas que não são removidas na decantação, sejam por seu pequeno tamanho ou por serem de densidade muito próxima à da água, deverão ser encaminhadas para a filtração (LIMA, 2016).

Lima (2016) considera a filtração como a operação unitária mais importante na cadeia de tratamento de água. Pereira (2011) define filtração como o processo que consiste na remoção das partículas suspensas e coloidais e dos microrganismos presentes na água que permeia através de um meio filtrante. É considerado como um processo final de remoção de impurezas na ETA, realizando uma espécie de "polimento" na água, logo, é o principal responsável pelo cumprimento do padrão de potabilidade.

Na filtração as impurezas são retidas no meio filtrante sendo necessária a lavagem dos filtros após certo período, geralmente, feita por meio da introdução de água com alta velocidade no sentido ascensional. A água utilizada na lavagem é descartada em cursos de água, mas também pode ser retornada ao início do processo de tratamento desde que haja uma avaliação da qualidade da água reusada (HELLER; PÁDUA, 2010).

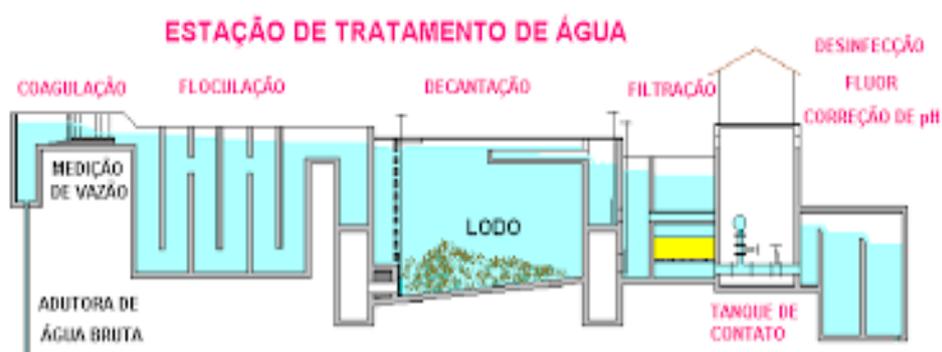
Após todo o processo de remoção de impureza, ocorre uma operação unitária de caráter corretivo e preventivo, a desinfecção. Corretivamente, a desinfecção objetiva a eliminação de organismos patogênicos que possam estar presentes na água, incluindo bactérias, protozoários e vírus. E preventivamente, é utilizada para manter um residual do desinfetante na água fornecida à população, para atuar preventivamente, caso ocorra alguma contaminação na rede de distribuição (HELLER; PÁDUA, 2010).

Os agentes desinfetantes podem ser físicos caracterizados pela aplicação de calor, irradiação e luz ultravioleta. Estes também podem ser químicos quando utilizam

oxidantes a base de cloro, bromo, lodo, ozônio, permanganato de potássio e peróxido de hidrogênio e os íons metálicos prata e cobre (PEREIRA, 2011).

A Figura 1 apresenta a sequência de etapas para purificação de água e obtenção de água potável.

Figura 1. Sistema convencional de tratamento de água.



Fonte: (ROTSCHILD, 2018).

A quantidade de lodo é dependente da qualidade físico-química das águas bruta e tratada e dos coagulantes e produtos utilizados no processo de sua potabilização. Desta forma, o volume gerado passa a ser diretamente proporcional à dosagem de coagulante utilizado no processo, o qual varia entre 0,2 e 5% do volume total de água tratada pela ETA (RICHTER, 2001).

A identificação de possíveis impactos ambientais, das formas de tratamento da água e de disposição final do lodo podem ser antecipadas pela determinação qualitativa e quantitativa de sua composição química, da distribuição e tamanho das partículas, da filtrabilidade e de sua resistência específica (CORDEIRO, 1993).

3.2 Características do lodo de ETA

O lodo é produzido durante as etapas de decantação e filtração do processo de tratamento convencional de água potável, consistindo principalmente de

microrganismos, matéria orgânica, resíduos do coagulante e óxidos químicos (RODRIGUES; CARNEIRO, 2023).

A composição do lodo de ETA é resultante do tipo de tratamento empregado e da qualidade da água. Estudos mostram que os teores de argila, silte e areia variam em função da época e tratamento dado ao lodo após a coleta (TEIXEIRA, 2004). Afirmam que o teor de areia presente no lodo tem relação com o nível do rio em que a água foi captada. Quando o nível do rio sobe, em períodos chuvosos, o teor de areia diminui (TEIXEIRA, 2004).

3.3 Revestimento cerâmico

A cerâmica é uma mistura de argila com outras matérias primas inorgânicas, sendo queimadas em altas temperaturas, produção de séculos e com um grande leque de aplicações para usos diários tais como louças cerâmicas, e usos estéticos (revestimento). Sua aplicação como revestimento cerâmico tem sua origem com as civilizações do Oriente Próximo (sudoeste asiático) (GASTALDINI; SICHIERI, 2017).

Destacam (OLIVEIRA; HOTZA, 2015) que o grande salto na produção de cerâmica aconteceu entre meados dos anos 70 e 80, devido ao importante passo tecnológico com seu método mais rápido de monoqueima por conta de seus ciclos, que originou grandes transformações principalmente na movimentação das placas cerâmicas.

De acordo com a (ANFACER 2014), a cerâmica é o material artificial de grande resistência mais antigo produzido pelo homem, há cerca de 10-15 mil anos. Produzida a partir da argila se torna muito plástica e fácil de moldar quando umedecida. Depois de submetida à secagem, a peça moldada é submetida a altas temperaturas (ao redor de 1.000° C), que lhe atribuem rigidez e resistência. Em alguns casos, fixa-se o esmalte na superfície. A cerâmica pode ser uma atividade artística com artefatos de valor estético ou uma atividade industrial com artefatos para uso na construção civil e engenharia (NAPOLI, 2015).

Segundo Franco (2008), com o progressivo desenvolvimento industrial, os revestimentos cerâmicos para utilização em paredes e pisos deixaram de ser privilégio

dos recintos religiosos e dos palácios, tornando-se acessíveis a todas as classes sociais.

As placas de revestimentos cerâmicos são usadas na construção civil para revestimento de paredes, pisos, bancadas e piscinas de ambientes internos e externos. Recebem designações tais como: azulejo, pastilha, porcelanato, grés, lajota, piso, etc. A tecnologia do porcelanato trouxe produtos de qualidade técnica e estética refinada, que em muitos casos se assemelham às pedras naturais (ANFACER, 2014).

Segundo a (ANFACER 2014), o Brasil é o segundo maior consumidor mundial de revestimentos cerâmicos e o segundo maior produtor. A cada dia a qualidade e a variedade desse material aumentam na mesma medida da sua utilização. Exemplo disso são as fachadas dos edifícios revestidas por cerâmicas de tipos e formatos variados.

Os revestimentos cerâmicos, além das vantagens e da durabilidade provada através dos séculos, possuem as qualidades que uma avançada tecnologia lhes confere. Eles se mostram apropriados para pequenos detalhes, ambientes interiores ou para grandes escalas ao ar livre. São oferecidos de maneira a satisfazer os mais variados gostos, como padronagens e texturas diversas (ANFACER, 2014).

3.4 Lodo: tipos e descarte

O descarte inadequado de lodo das Estações de Tratamento de Água (ETAs) em cursos d'água sem tratamento é uma prática cada vez mais questionada pelos órgãos ambientais devido aos riscos à saúde pública e à vida aquática. Estima-se que a produção de lodos de ETAs nos municípios operados pela Sabesp, no Estado de São Paulo, seja de aproximadamente 90 toneladas por dia, em base seca. A produção de lodo varia ao longo do ano, sendo maior no período chuvoso (novembro a março) devido à piora na qualidade das águas dos mananciais.

As normas ambientais específicas, como a Resolução CONAMA 375/2006, estabelecem critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto. Esses lodos devem passar por processos de redução de patógenos e atração de vetores para serem utilizados de forma segura na agricultura. Além disso, é necessário

realizar uma caracterização adequada do lodo para determinar a melhor forma de disposição final. As alternativas de disposição final mais viáveis economicamente e ambientalmente para o Estado de São Paulo incluem:

1. **Fabricação de Cimento e Tijolos:** Utilização do lodo como matéria-prima na fabricação de cimento e tijolos, aproveitando suas propriedades químicas.
2. **Disposição no Solo:** Aplicação do lodo em solos agrícolas, desde que sejam atendidos os requisitos de segurança e qualidade estabelecidos pela legislação.
3. **Compostagem:** Transformação do lodo em composto orgânico para ser usado como fertilizante.
4. **Recuperação de Coagulantes:** Uso do lodo para a recuperação de coagulantes usados no tratamento de água.
5. **Controle de H₂S:** Utilização do lodo para o controle de sulfeto de hidrogênio (H₂S) em processos industriais.

A gestão eficiente do lodo envolve custos significativos, especialmente no que diz respeito ao transporte e manuseio. O teor de umidade do lodo influencia diretamente esses custos, sendo que a redução da umidade pode diminuir significativamente o volume a ser transportado. Caminhões tanque são utilizados para o transporte de lodos úmidos, enquanto caminhões basculantes são usados para lodos sólidos.

Os lodos provenientes de Estações de Tratamento de Água (ETAs) podem ser classificados de acordo com a sua origem, características físicas, químicas e biológicas. A classificação do lodo é fundamental para determinar o tipo de tratamento adequado e a forma correta de disposição final. Segundo Von Sperling, 2007, os lodos podem ser classificados em:

1. **Lodo Primário:** Originado do processo de sedimentação primária, é composto principalmente por matéria orgânica e inorgânica em suspensão na água bruta.
2. **Lodo Secundário:** Resultado do tratamento biológico, composto majoritariamente por biomassa microbiana.
3. **Lodo Químico:** Formado pela adição de produtos químicos durante o tratamento da água, como coagulantes (sulfato de alumínio ou cloreto férrico), que precipitam as impurezas.

Os tipos de lodo gerados em ETAs podem ser caracterizados de acordo com o processo de tratamento utilizado:

1. **Lodo de Coagulação:** Resulta do processo de coagulação e floculação, onde coagulantes são adicionados para agregar partículas finas, formando flocos que são removidos por sedimentação.
2. **Lodo de Filtração:** Acumula-se nos filtros utilizados para remover partículas suspensas da água após a coagulação e sedimentação.
3. **Lodo de Lavagem de Filtros:** Gerado durante a lavagem dos filtros, quando a água utilizada para limpar os filtros remove os sólidos acumulados.

3.5 Onde Pode Ser Descartado

Os lodos de ETA podem ser descartados em diversos locais, dependendo de suas características e do tratamento a que foram submetidos. As principais opções de descarte são:

1. **Aterros Sanitários:** Devem ser utilizados para lodos que não apresentam riscos significativos de contaminação ambiental.
2. **Aplicação Agrícola:** Desde que atendam aos critérios estabelecidos pela legislação, os lodos podem ser utilizados como adubo orgânico.
3. **Indústria da Construção:** Utilização na fabricação de tijolos, cimento e outros materiais de construção, aproveitando as propriedades físicas e químicas do lodo (VON SPERLING, 2007).

O lodo de ETA possui uma composição química variada, que depende da qualidade da água bruta e dos produtos químicos utilizados no tratamento. Segundo Piveli e Kato (2005), as principais características químicas incluem:

1. **Matéria Orgânica:** Quantidade de matéria orgânica presente no lodo, que pode ser elevada devido à presença de substâncias húmicas e outros compostos orgânicos.
2. **Metais Pesados:** Concentrações de metais como alumínio, ferro, manganês e, em alguns casos, traços de metais tóxicos.

3. **Nutrientes:** Presença de nutrientes como nitrogênio e fósforo, que são essenciais para o crescimento das plantas, tornando o lodo potencialmente útil na agricultura.
4. **pH:** O pH do lodo pode variar, mas geralmente é neutro a ligeiramente ácido, dependendo dos produtos químicos utilizados no tratamento (PIVELI; KATO, 2005)

3.6 Certificação ISO

A certificação ISO (Organização Internacional para Padronização) é um reconhecimento internacional que atesta a conformidade de processos, produtos e serviços com padrões de qualidade, segurança e eficiência (ISO, 2024). Os tratamentos de lodo de ETA não possuem certificação ISO específica devido à variabilidade dos processos de tratamento e das características dos lodos gerados (DOE, 2020). Cada ETA pode utilizar diferentes métodos e tecnologias, tornando complexa a padronização de um único processo certificado. Ela geralmente é mais comum em processos industriais onde a uniformidade e repetibilidade dos processos são mais facilmente alcançadas (SMITH, 2019).

A norma ISO 10545-13 trata da resistência química das placas cerâmicas esmaltadas e não esmaltadas (ISO, 2024). Ela especifica os métodos de teste para determinar a resistência das placas a produtos químicos domésticos, ácidos e bases de baixa concentração, produtos de piscina, e outros produtos químicos agressivos (ISO, 2024). A resistência química é avaliada através da exposição das placas cerâmicas a essas substâncias e subsequente análise visual ou instrumental dos danos ou alterações causadas (DOE, 2021).

A norma ISO 10545-3 aborda a determinação da absorção de água das placas cerâmicas (ISO, 2024). Este teste é fundamental para classificar as placas cerâmicas em diferentes grupos de acordo com seu nível de porosidade e, conseqüentemente, suas aplicações adequadas (por exemplo, áreas secas, molhadas ou submersas). (SMITH, 2020). O método de teste consiste em medir a quantidade de água absorvida pelas placas cerâmicas quando submersas em água, utilizando métodos de pesagem antes e depois da imersão (ISO, 2024).

3.7 Indústria cerâmica de Limeira

Até os anos 1970, a urbanização no Estado de São Paulo era predominantemente caracterizada pela dualidade entre a região metropolitana, especialmente em torno da capital, e o interior mais rural e menos desenvolvido. No entanto, desde então, observou-se uma transformação significativa na rede urbana paulista, com a emergência de novas regiões metropolitanas, polos regionais e aglomerações urbanas. Essas mudanças refletem uma nova dinâmica espacial e exigem um entendimento mais aprofundado para a elaboração de políticas públicas eficazes (UNICAMP, 2022).

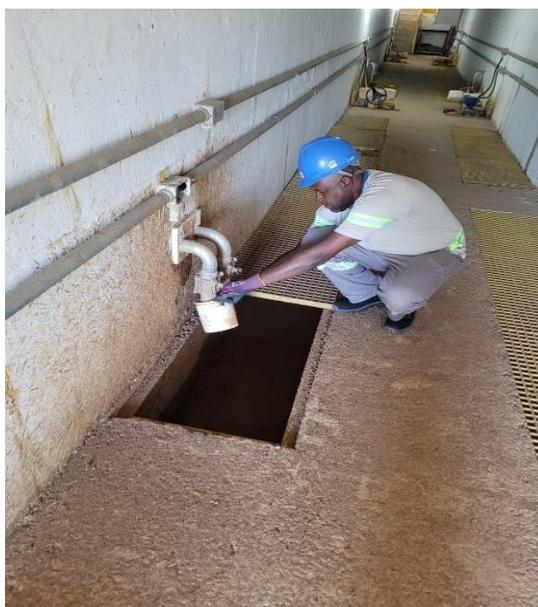
A partir das décadas de 1970 e 1980, o interior de São Paulo passou por uma industrialização acelerada, acompanhada por um renascimento da atividade agrícola. Esta industrialização não se limitou a um único setor, abrangendo desde a produção de cerâmica em cidades como Limeira até a expansão dos fluoretos. Embora medidas como essas tenham levado a uma diminuição dos níveis de poluentes no ar, os desafios persistem, especialmente em relação à implementação efetiva e ao monitoramento contínuo dessas medidas (FIOCRUZ, 2024).

A situação em Limeira e outras cidades do polo cerâmico de São Paulo sublinha a necessidade de uma abordagem mais holística e sustentável para o desenvolvimento industrial. É essencial que a indústria cerâmica não apenas cumpra as regulamentações existentes, mas também explore tecnologias mais limpas e processos de fabricação que minimizem os impactos ambientais.

4. METODOLOGIA

O estudo inicia com a coleta do lodo de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) localizada em Limeira, SP, administrada pela BRK Ambiental. Após a coleta, o lodo é seco em estufa a uma temperatura de 250°C até atingir umidade constante e posteriormente moído para alcançar a granulometria necessária. Paralelamente, a argila utilizada é extraída da mineradora Água Branca em Cordeirópolis, SP, sendo submetida a processos de purificação e peneiramento para assegurar a qualidade do material. A BRK é a concessionária responsável pelos serviços de água e esgoto em Limeira. A BRK gera aproximadamente 57.860 m³ de lodo por mês na Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade (BRK, s/d). Este lodo é um resíduo sólido que resulta das etapas de decantação e filtração do processo de tratamento da água. Para separar o lodo da água, a BRK utiliza tanques de adensamento em forma de pirâmide invertida, onde o lodo se acumula no fundo. O gerenciamento do lodo deve estar de acordo com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) para evitar descartes inadequados. A figura a seguir indica de onde o lodo foi coletado.

Figura 2 Lugar de coleta



Fonte: Os autores, 2024.

Para avaliar as propriedades das massas cerâmicas, foram realizados diversos ensaios, incluindo retração, perda ao fogo, absorção de água e calciometria, utilizando

amostras sem adição de lodo. O ensaio de retração mediu a redução nas dimensões das amostras após a secagem e queima, enquanto o ensaio de perda ao fogo determinou a quantidade de materiais voláteis e orgânicos eliminados durante a queima. Os testes foram realizados de acordo com as normas regulamentadoras (SOUZA *et al.*, 2018).

A absorção de água foi avaliada para identificar a porosidade das amostras, medindo a quantidade de água absorvida após a imersão em água. Por fim, a calcimetria foi realizada para quantificar o conteúdo de carbonatos presentes nas amostras, analisando sua decomposição durante a queima. Esses ensaios forneceram uma linha de base para comparar os efeitos da adição de diferentes proporções de lodo nas propriedades das massas cerâmicas. A umidade do lodo in natura foi medida em 71,13%. Os testes de caracterização do lodo e das amostras cerâmicas foram realizados no laboratório da indústria cerâmica Fagnani (MENDES *et al.*, 2020). A composição química da argila é um fator importante para determinar suas propriedades e comportamentos durante o processamento cerâmico. Geralmente, a argila usada para cerâmica contém os seguintes componentes principais:

- **Sílica (SiO_2):** Confere resistência e estabilidade dimensional.
- **Alumina (Al_2O_3):** Aumenta a resistência mecânica e a refratariedade.
- **Óxidos de Ferro (Fe_2O_3):** Influenciam a cor e a vitrificação.
- **Óxidos Alcalinos e Alcalino-Terrosos (Na_2O , K_2O , CaO , MgO):** Atuam como fundentes, reduzindo a temperatura de fusão.
- **Matéria Orgânica:** Pode estar presente e é eliminada durante a queima, influenciando a porosidade e a cor (SANTOS *et al.*, 2019).

As misturas de lodo de ETA com argila são preparadas em diferentes proporções (2%, 5%, 10% e 15% em massa de lodo seco e moído) utilizando um misturador mecânico durante 30 minutos para garantir uma distribuição homogênea do lodo na matriz argilosa. Os corpos de prova são então conformados usando uma prensa hidráulica com pressão de 20 MPa, seguindo as dimensões padrão para testes de resistência mecânica e absorção de água (SOUZA *et al.*, 2018). Os corpos de prova são secos em mufla a 250°C por 40 minutos e submetidos a um ciclo de queima em

forno industrial a uma temperatura de 1140°C, que inclui aquecimento gradual, patamar de temperatura e resfriamento controlado. As análises de caracterização físico-química dos corpos de prova incluem testes de absorção de água e porosidade aparente, conforme a norma ASTM C373-88, e testes de resistência à flexão em uma máquina de ensaio universal (ASTM, 1988). Todo o processo, desde a preparação das misturas até a realização dos testes de caracterização, é meticulosamente documentado com fotografias, garantindo um registro visual que complementa os dados experimentais. Este procedimento meticuloso visa avaliar a viabilidade técnica e ambiental da utilização de lodo de ETA na produção de cerâmicas, contribuindo para práticas sustentáveis na indústria cerâmica. O cronograma a seguir descreve as etapas do projeto (MENDES *et al.*, 2020).

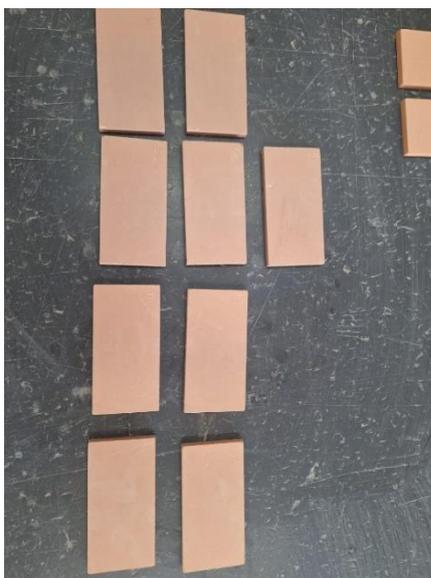
Tabela 1 Sequência de atividade desenvolvida na empresa Industria Cerâmica Fagnani Ltda.

Atividades	Março		Maio				Junho
	3	5	15	16	17	29	7
Coleta de lodo de ETA							
Secagem e moagem do lodo							
Coleta e preparação da argila							
Preparação das misturas							
Conformação dos corpos de prova							
Secagem dos corpos de prova							
Queima dos corpos de prova							
Testes de absorção de água e porosidade							
Testes de resistência à flexão							

Atividades	Março		Maio				Junho
Compilação de dados e documentação							
Preparação do relatório final							
Apresentação dos resultados							

O projeto começa com a coleta do lodo de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) e da argila, incluindo o transporte desses materiais para as instalações de pesquisa. Segue-se a secagem e moagem do lodo, além da preparação da argila, que são processos essenciais para a adequação desses materiais antes de sua mistura. Uma vez preparados, o lodo e a argila são homogeneizados nas proporções estabelecidas para formar as misturas desejadas. A figura a seguir apresenta os corpos de prova após o processo de prensagem.

Figura 3 Corpos de prova após prensagem



Fonte: Os autores, 2024.

Os corpos de prova são então moldados usando uma prensa para atingir as dimensões padrão necessárias para os testes subsequentes. Estes corpos passam por processos térmicos de secagem e queima para finalizar sua forma física e propriedades estruturais. Após essas etapas, os corpos de prova são submetidos a testes para avaliar sua absorção de água, porosidade e resistência à flexão, que são cruciais para determinar as propriedades físicas do material final. A figura a seguir apresenta a prensa utilizada.

Figura 4 Prensa utilizada

Fonte: Os autores, 2024.

São realizadas análises que examinam a integração do lodo na matriz cerâmica e a formação de novas fases após a queima. Os dados coletados de todas essas etapas são meticulosamente compilados e documentados, incluindo a preparação de gráficos e tabelas para a redação do relatório final. Finalmente, os resultados são apresentados, envolvendo a preparação e realização de uma apresentação para stakeholders ou em uma conferência científica, destacando os achados significativos e as implicações do uso de lodo de ETA na produção de cerâmicas, visando promover práticas sustentáveis na indústria cerâmica. A argila prensada tinha a gramatura de 72,00g, conforme evidenciado na figura a seguir.

Figura 5 Argila utilizada

Fonte: Os autores, 2024.

Para a obtenção dos corpos de prova na pesquisa que envolve a adição de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) na confecção de revestimentos cerâmicos, o processo é meticulosamente planejado e executado em várias etapas chave. Aqui está uma explicação detalhada dessas etapas:

O lodo é inicialmente coletado de uma Estação de Tratamento de Água. Após a coleta, o lodo é transportado para as instalações de pesquisa onde é submetido a um processo de secagem para reduzir a umidade. A secagem é geralmente realizada em estufas a temperaturas controladas até que o lodo atinja uma umidade constante. Após secar, o lodo é moído até obter uma granulometria fina e uniforme, o que facilita a sua mistura homogênea com a argila.

Simultaneamente, a argila utilizada é selecionada e preparada. Esta preparação envolve peneiramento para remover impurezas e garantir uniformidade no tamanho das partículas. A qualidade da argila é importante, pois ela forma a base da matriz cerâmica. Uma vez que o lodo e a argila estão prontos, eles são misturados em proporções precisamente definidas. Essas proporções são determinadas com base em estudos preliminares que indicam a melhor composição para alcançar as propriedades desejadas nos corpos de prova. As misturas são geralmente realizadas

em um misturador mecânico, garantindo que o lodo seja distribuído uniformemente dentro da massa de argila.

Após a mistura, a massa resultante é então moldada para formar os corpos de prova. Esta etapa é realizada usando uma prensa hidráulica que compacta a mistura em moldes específicos. A figura a seguir apresenta os resultados pós queima.

Figura 6 Resultados pós-queima



Fonte: Os autores, 2024.

A pressão e o tempo de prensagem são controlados para assegurar que os corpos de prova sejam compactos e livres de defeitos, com as dimensões e a forma adequadas para os testes subsequentes. A tabela a seguir apresenta os resultados dos ensaios da amostra 1.

Tabela 2 Resultados dos Ensaio - Amostra 1 (0% Lodo)

Parâmetro	Valor
Retração (R)	5.1
Perda ao Fogo (PF)	4.1
Absorção de Água (Abs)	7.4
Calciometria (CA)	2.45

Fonte: Os autores, 2024.

Retração (R): Indica a mudança dimensional das amostras após a queima.

Perda ao Fogo (PF): Quantidade de material volátil eliminado durante a queima.

Absorção de Água (Abs): Mede a porosidade das amostras.

Calciometria (CA): Quantifica o conteúdo de carbonatos presentes.

Os resultados dos ensaios realizados nas amostras cerâmicas fornecem informações detalhadas sobre suas propriedades físicas e químicas. A retração (R) é de 5.1, indicando a mudança dimensional das amostras após a queima. Esse valor reflete a redução nas dimensões das cerâmicas devido à eliminação de água e outros componentes durante o aquecimento, resultando em um material mais compacto. A perda ao fogo (PF) é de 4.1, representando a quantidade de material volátil eliminado durante a queima. Esse parâmetro mede a massa perdida devido à decomposição de materiais orgânicos e outros voláteis presentes na amostra.

A absorção de água (Abs) é de 7.4, que mede a porosidade das amostras. Valores mais altos de absorção indicam uma maior porosidade, o que pode influenciar a resistência mecânica e a durabilidade das cerâmicas. Finalmente, a calciometria (CA) tem um valor de 2.45, quantificando o conteúdo de carbonatos presentes na amostra. A presença de carbonatos pode afetar a reatividade e a estabilidade do material durante e após a queima. Esses resultados são cruciais para entender como a adição de lodo afeta as propriedades das cerâmicas e para otimizar as formulações para aplicações específicas. A tabela a seguir apresenta os resultados da amostra 2 (5% de lodo).

Tabela 3 Resultados dos Ensaio - Amostra 2 (5% Lodo)

Parâmetro	Valor
Retração (R)	4.9
Perda ao Fogo (PF)	4.1
Absorção de Água (Abs)	8.7
Calciometria (CA)	2.45

Fonte: Os autores, 2024.

Retração (R): Um pouco menor que na amostra 1, indicando ligeira redução na mudança dimensional.

Perda ao Fogo (PF): Mantém-se constante, indicando pouca variação na quantidade de material volátil eliminado.

Absorção de Água (Abs): Aumenta, sugerindo maior porosidade.

Calciometria (CA): Mantém-se constante, indicando estabilidade nos carbonatos.

A retração indica a mudança dimensional das amostras após a queima. Um valor de 4.9 sugere que a amostra com 5% de lodo experimentou uma ligeira redução nas dimensões durante o processo de queima. Ela é um indicativo de como a estrutura interna do material cerâmico se ajusta e compacta sob altas temperaturas. Valores menores em comparação com amostras sem lodo podem sugerir uma menor densificação ou uma estrutura interna diferente devido à adição de lodo.

A perda ao fogo representa a quantidade de material volátil eliminado durante a queima. Com um valor de 4.1, este parâmetro mostra que a adição de 5% de lodo não alterou significativamente a quantidade de voláteis eliminados em comparação com a amostra sem lodo. Isso indica que o conteúdo orgânico e outros componentes voláteis no lodo adicionado é comparável ao da argila pura.

A absorção de água mede a porosidade das amostras. O valor de 8.7 indica que a porosidade aumentou com a adição de 5% de lodo, sugerindo que a estrutura do material cerâmico se tornou mais permeável. Maior absorção de água pode influenciar negativamente a resistência mecânica e durabilidade das cerâmicas, mas pode ser benéfica para aplicações que requerem maior permeabilidade.

A calciometria quantifica o conteúdo de carbonatos presentes na amostra. Um valor de 2.45, constante em várias amostras, sugere que a adição de lodo não afetou significativamente o conteúdo de carbonatos no material. A presença de carbonatos pode afetar a reatividade e estabilidade do material durante e após a queima, mas neste caso, parece que o lodo e a argila têm conteúdo de carbonato semelhantes. A tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios da amostra 3 (10% lodo).

Tabela 4 Resultados dos Ensaios - Amostra 3 (10% Lodo)

Parâmetro	Valor
Retração (R)	3.9
Perda ao Fogo (PF)	6.7
Absorção de Água (Abs)	8.0
Calciometria (CA)	2.45

Fonte: Os autores, 2024.

Retração (R): Reduz-se ainda mais, indicando menor mudança dimensional.

Perda ao Fogo (PF): Aumenta significativamente, indicando maior eliminação de materiais voláteis.

Absorção de Água (Abs): Mantém-se alta, indicando alta porosidade.

Calciometria (CA): Mantém-se constante, sugerindo estabilidade nos carbonatos.

A retração de 3.9 indica uma redução nas mudanças dimensionais das amostras após a queima. Um valor mais baixo de retração em comparação com outras amostras sugere que a adição de 10% de lodo resulta em uma menor compactação da estrutura cerâmica durante o aquecimento. Isso pode refletir uma menor densificação ou diferentes características da microestrutura devido à presença de lodo.

A perda ao fogo de 6.7 mostra um aumento significativo na quantidade de material volátil eliminado durante a queima. Este valor mais alto indica que a amostra com 10% de lodo possui mais componentes orgânicos ou voláteis que se decompõem e evaporam quando aquecidos, em comparação com amostras com menor teor de lodo ou sem lodo. Este aumento pode afetar a integridade e a estabilidade do material final.

A absorção de água de 8.0 revela que a porosidade da amostra se mantém alta. Valores elevados de absorção de água sugerem que a cerâmica continua a ter uma estrutura porosa, o que pode ser benéfico para certas aplicações, mas também pode comprometer a resistência mecânica e a durabilidade do material. A porosidade elevada está associada à presença de lodo, que cria mais espaços vazios dentro da estrutura cerâmica.

A calciometria de 2.45 permanece constante, indicando que o conteúdo de carbonatos na amostra não foi significativamente alterado pela adição de lodo. Isso sugere uma estabilidade na composição química em termos de carbonatos, independentemente da quantidade de lodo adicionada. Os carbonatos são importantes para a reatividade e a estabilidade do material durante a queima.

Para a amostra com 10% de lodo, observa-se uma retração reduzida, indicando menor compactação durante a queima, enquanto a perda ao fogo aumenta significativamente devido à maior quantidade de materiais voláteis. A absorção de água continua alta, confirmando a porosidade elevada, o que pode influenciar negativamente a resistência e a durabilidade da cerâmica. A calciometria constante sugere que o conteúdo de carbonatos não é afetado pela adição de lodo, mantendo a estabilidade química do material. Esses resultados ajudam a entender os efeitos de adições mais altas de lodo nas propriedades cerâmicas, destacando a necessidade

de otimização para equilibrar porosidade e resistência mecânica. A tabela a seguir apresenta os resultados da amostra 4 (15%).

Tabela 5 Resultados dos Ensaios - Amostra 4 (15% Lodo)

Parâmetro	Valor
Retração (R)	8.3
Perda ao Fogo (PF)	5.5
Absorção de Água (Abs)	8.2
Calciometria (CA)	2.45

Fonte: Os autores, 2024.

- **Retração (R):** Aumenta significativamente, sugerindo maior alteração dimensional.
- **Perda ao Fogo (PF):** Relativamente alta, indicando eliminação considerável de materiais voláteis.
- **Absorção de Água (Abs):** Mantém-se elevada, indicando alta porosidade.
- **Calciometria (CA):** Permanece constante, indicando estabilidade nos carbonatos.

A análise dos resultados dos ensaios realizados nas amostras cerâmicas revela tendências distintas nas propriedades físicas e químicas em função da adição de diferentes percentuais de lodo. A retração das amostras inicialmente diminui com a adição de lodo até 10%, sugerindo uma menor compactação das cerâmicas durante a queima devido à presença de lodo. No entanto, ao atingir 15% de lodo, a retração aumenta significativamente, indicando uma mudança dimensional maior. Isso pode ser resultado da estrutura interna das cerâmicas sendo menos capaz de acomodar a quantidade crescente de lodo, levando a maiores ajustes e compactações durante o processo térmico.

A perda ao fogo aumenta consistentemente com o aumento da adição de lodo. Esse incremento é especialmente notável nas amostras contendo 10% e 15% de lodo. O aumento na perda ao fogo indica que há uma quantidade maior de materiais voláteis e orgânicos sendo eliminados durante a queima, o que pode comprometer a integridade do material final. A presença de lodo adiciona compostos que se decompõem e evaporam em altas temperaturas, elevando o valor de perda ao fogo.

A absorção de água nas amostras também aumenta com a adição de lodo, indicando uma maior porosidade das cerâmicas. A maior porosidade sugere que a estrutura do material se torna mais permeável, o que pode impactar negativamente sua resistência mecânica e durabilidade. Contudo, essa característica pode ser

benéfica para aplicações específicas que demandem materiais mais leves ou com melhores propriedades de isolamento acústico e térmico.

A calciometria permanece constante em todas as amostras, independentemente da adição de lodo. Isso sugere que o conteúdo de carbonatos no material não é significativamente afetado pela presença de lodo. A estabilidade nos valores de calciometria indica que a reatividade e a estabilidade química das cerâmicas são mantidas, o que é fundamental para garantir a qualidade e a consistência do produto.

Assim, a adição de lodo afeta significativamente as propriedades das cerâmicas. Pequenas adições (até 5%) tendem a manter as propriedades mecânicas e físicas em níveis aceitáveis, enquanto maiores adições (10% e 15%) aumentam a perda ao fogo e a porosidade, e alteram a retração de forma significativa. A constância na calciometria sugere que o conteúdo de carbonatos não é alterado pela adição de lodo, mantendo a estabilidade química das cerâmicas. Esses dados são essenciais para otimizar a utilização de lodo em formulações cerâmicas, equilibrando os benefícios ambientais com as exigências de desempenho do material.

Os corpos de prova moldados são então secos novamente para eliminar qualquer umidade residual que possa afetar a qualidade final do material. Esta secagem é feita gradualmente em temperatura ambiente ou em estufas, dependendo das especificações do projeto. Finalmente, os corpos de prova secos são queimados em um forno de alta temperatura. O processo de queima é importante, pois as altas temperaturas provocam reações químicas e físicas que solidificam a estrutura do material, melhorando sua resistência e outras propriedades mecânicas. Os parâmetros de queima, como temperatura, rampa de aquecimento e tempo de permanência no pico de temperatura, são cuidadosamente controlados para otimizar as características do material cerâmico. Cada uma dessas etapas é crítica para garantir a integridade e a qualidade dos corpos de prova cerâmicos, permitindo que as propriedades finais dos materiais sejam avaliadas com precisão em fases subsequentes de testes e análises.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo revelam o impacto significativo da adição de lodo de ETA nas propriedades dos corpos de prova cerâmicos. As análises foram realizadas focando-se em diversas características chave, como a absorção de água, resistência mecânica à flexão, porosidade, os corpos de prova mostraram diferentes níveis de absorção de água, dependendo da porcentagem de lodo adicionado à argila.

A Tabela 6 representa a distribuição percentual das partículas de argila de acordo com o tamanho do peneiro, o que é essencial para entender as propriedades físicas do material, como porosidade e densidade, influenciando diretamente no processo de fabricação e na qualidade final dos produtos cerâmicos.

Tabela 6 distribuição percentual das partículas de argila de acordo com o tamanho do peneiro.

DESCRIÇÃO ABNT	DIÂMETRO MALHAS, ABERTURA EM MM	VALOR (%)
UI	UI	10.2
#30	0,60 mm	35.0
#60	0,250 mm	27.3
#120	0,125 mm	28.4
#230	0,063 mm	25.2
Fundo	Fundo	44.4

Fonte: Dados primários, 2024.

Figura 5 peneiras granulométrica

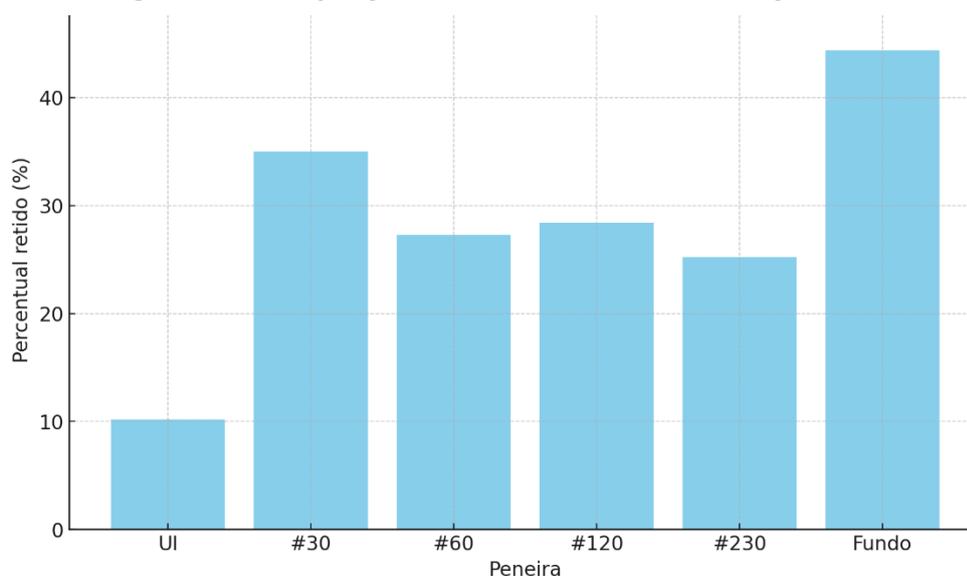
Fonte: Os autores, 2024.

O UI significa "Indeterminado" ou "Inicial" e refere-se a partículas que não foram categorizadas ou medidas antes dos peneiramentos detalhados que seguiram. É a porcentagem inicial de partículas antes de serem divididas pelas peneiras.

60mm, 0,250mm, 0,125mm, 0,063mm representam os diferentes tamanhos das malhas dos peneiros utilizados para a separação das partículas de argila. Cada número corresponde a uma especificação de malha onde uma certa porcentagem de partículas foi retida. Por exemplo, 35,0% das partículas foram retidas na peneira número 30, 27,3% na peneira número 60, e assim por diante.

Fundo indica a porcentagem de partículas que passaram por todas as peneiras e foram coletadas no fundo. Isto sugere que 44,4% das partículas são menores do que o menor tamanho de malha usado (0,063mm).

Os resultados indicam que com o aumento da adição de lodo, a absorção de água tendeu a aumentar, sugerindo uma porosidade maior nos materiais. O gráfico a seguir ilustra a distribuição granulométrica do lodo seco de argila.

Figura 6 Distribuição granulométrica do lodo seco de argila

Fonte: Os autores, 2024.

O gráfico apresenta a distribuição granulométrica do lote seco de argila, mostrando o percentual de partículas retidas em diferentes tamanhos de peneiras. A seguir estão as descrições dos dados exibidos no gráfico:

- **UI (10.2%):** Representa uma medida inicial ou categorias de partículas não especificadas antes das classificações mais detalhadas.
- **0,60mm (35.0%):** Indica que 35,0% das partículas foram retidas na peneira com abertura 0,60mm.
- **0,250mm (27.3%):** Mostra que 27,3% das partículas foram retidas na peneira com abertura de 0,250mm.
- **0,125mm (28.4%):** 28,4% das partículas permaneceram na peneira com abertura de 0,125mm.
- **0,063mm (25.2%):** Reflete que 25,2% das partículas ficaram retidas na peneira com abertura de 0,063mm.
- **Fundo (44.4%):** Este valor mais alto sugere que 44,4% das partículas passaram por todas as peneiras anteriores e foram coletadas no recipiente de fundo.

A distribuição ilustrada no gráfico é importante para entender as características físicas da argila, que podem influenciar o comportamento da mesma durante o

processo de moldagem e queima em aplicações cerâmicas. Por exemplo, uma maior quantidade de partículas finas (como indicado pela alta porcentagem no fundo) pode levar a uma maior plasticidade e menor porosidade após a queima, enquanto uma distribuição mais uniforme de tamanhos de grãos, como observado nas peneiras 0,60mm, 0,250mm e 0,063mm, pode contribuir para uma compactação mais eficiente e propriedades mecânicas equilibradas no produto final. A Tabela a seguir apresenta os dados de plasticidade.

Tabela 7 Plasticidade

Percentual de Lodo (%)	Plasticidade (kgf/cm²)
0	55
2	53
5	44
10	31
15	29

Fonte: Os autores, 2024.

Os dados da tabela mostram a plasticidade das formulações cerâmicas com diferentes percentuais de lodo adicionado. A plasticidade é uma medida da capacidade do material de ser deformado sem fraturar, e é expressa em kgf/cm².

Com uma plasticidade de 53 kgf/cm², a formulação de 2% de lodo apresenta a maior capacidade de deformação, indicando que a adição mínima de lodo não compromete significativamente a integridade estrutural do material. Este valor próximo da plasticidade da argila pura sugere que 2% de lodo é uma adição eficiente que mantém boas propriedades mecânicas.

A 5% de Lodo a plasticidade reduz para 44 kgf/cm². Embora menor que a formulação com 2% de lodo, ainda apresenta uma boa capacidade de deformação. Este valor indica que a adição de lodo em 5% é aceitável para muitas aplicações cerâmicas, com uma leve redução na plasticidade.

A 10% a plasticidade cai para 31 kgf/cm², mostrando uma redução significativa na capacidade de deformação. Este valor indica que o aumento do lodo para 10% começa a comprometer a integridade estrutural do material, tornando-o menos capaz de resistir à deformação.

A 15%, a plasticidade é de 29 kgf/cm², o menor valor entre as formulações testadas. Isso sugere que uma adição de lodo de 15% reduz substancialmente a capacidade do material de ser deformado sem fraturar, indicando uma perda significativa das propriedades plásticas.

A resistência à flexão foi afetada pela adição de lodo. Enquanto as amostras com menores adições de lodo mantiveram uma resistência comparável à argila pura, quantidades maiores de lodo resultaram em uma diminuição da resistência mecânica após processo de secagem dos corpos de prova.

A porosidade dos materiais cerâmicos também foi influenciada pela adição de lodo. Aumentos na porosidade foram observados à medida que a proporção de lodo aumentava, o que está correlacionado com a maior absorção de água e a redução na

Ao final, a umidade do Lodo após secagem em estufa a 250 graus foi de 1,5% conforme indicado na figura a seguir.

Figura 7 Umidade do lodo após a secagem.



Fonte: Os autores, 2024.

Os resultados demonstram que a adição de lodo de ETA influencia diretamente as propriedades físicas e mecânicas dos materiais cerâmicos. Embora aumentos na porosidade e na absorção de água possam ser desvantajosos para certas aplicações estruturais, tais características podem ser benéficas para aplicações que requerem materiais mais leves ou com isolamento acústico e térmico. O melhor resultado obtido foi com a adição de 2% de lodo na argila, apresentando propriedades que mais se

aproximam da argila pura, destacando-se como uma formulação potencialmente viável para a produção de revestimentos cerâmicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo proporcionou uma análise abrangente sobre a viabilidade de incorporar lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) na produção de cerâmicas, especificamente no desenvolvimento de corpos de prova para aplicações potenciais na indústria cerâmica. A integração de materiais sustentáveis, como o lodo de ETA, não só ajuda a reduzir o impacto ambiental associado ao descarte deste subproduto, mas também abre caminho para inovações em materiais de construção que podem ser mais ecoeficientes.

Os resultados deste estudo indicam que a adição de lodo ao processo cerâmico afeta significativamente as propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova. Observou-se que aumentos na porcentagem de lodo resultaram em um aumento na porosidade e na absorção de água dos materiais cerâmicos. Embora tais características possam ser consideradas desvantagens em termos de resistência mecânica, elas podem ser vantajosas para outras aplicações que exigem materiais com isolamento acústico ou térmico.

Os testes realizados indicam que a adição de 2% de lodo na argila é a mais promissora, oferecendo propriedades que se aproximam da argila pura. A composição química da argila, incluindo a presença de sílica, alumina, e óxidos de ferro e alcalinos, desempenha um papel fundamental na determinação das propriedades finais das cerâmicas.

A pesquisa revelou que pequenas adições de lodo (até 10%) mantêm propriedades comparáveis à argila pura em termos de resistência à flexão. No entanto, quantidades maiores de lodo levam a uma redução nesta resistência, o que pode limitar o uso de tais misturas em aplicações estruturais sem um tratamento ou formulação adicional. Adicionalmente, as análises realizadas foram fundamentais para entender como o lodo interage com a matriz cerâmica e como novas fases são formadas durante o processo de queima. Essas informações são cruciais para otimizar misturas e condições de processamento em futuras pesquisas.

O estudo foi meticulosamente documentado, com registros fotográficos que não apenas garantem uma compreensão visual dos processos e resultados, mas também fornecem um meio de verificação e replicação dos experimentos. Isso é essencial para

a validade e continuidade da pesquisa em aplicações sustentáveis de resíduos industriais.

Por fim, as implicações deste estudo são significativas, não apenas do ponto de vista técnico, mas também em termos de impacto ambiental e econômico. A pesquisa abre novas perspectivas para a indústria cerâmica, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis que podem ser amplamente beneficiadas pela inovação e responsabilidade ambiental. A apresentação dos resultados em conferências científicas contribuirá para a disseminação dessas descobertas, promovendo a conscientização e potencial adoção de tecnologias de reciclagem de resíduos em processos produtivos industriais.

O uso do lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA) na produção de revestimentos cerâmicos representa uma abordagem inovadora com potencial significativo para beneficiar tanto o meio ambiente quanto a indústria cerâmica. Esta prática não apenas promove a reciclagem de um subproduto frequentemente tratado como resíduo, mas também ajuda a reduzir a demanda por matérias-primas virgens e a gestão de resíduos em aterros.

Tecnicamente, a inclusão de lodo nas cerâmicas pode melhorar as propriedades de isolamento térmico e acústico devido ao aumento da porosidade nos materiais, embora isso possa comprometer a resistência mecânica. Dependendo da formulação e do tratamento do lodo, é possível ajustar as propriedades das cerâmicas para atender a diferentes especificações e aplicações, variando de revestimentos básicos a elementos decorativos. Contudo, a variabilidade na composição do lodo pode desafiar o controle de qualidade e a consistência dos produtos e ajustes podem ser necessários nos processos de queima tradicionais para garantir a qualidade e integridade dos produtos cerâmicos.

Do ponto de vista econômico, embora a utilização do lodo possa reduzir os custos com matérias-primas, pode requerer investimentos em pesquisa e desenvolvimento e adaptações nos processos de produção. Produtos cerâmicos que incorporam materiais reciclados podem atrair um segmento de mercado consciente, alinhando-se com políticas de sustentabilidade e agregando valor ao produto.

Para maximizar o potencial desta iniciativa, são necessários estudos adicionais para otimizar a composição, as técnicas de processamento e melhorar a qualidade

dos produtos. Uma análise de ciclo de vida completa também é recomendada para avaliar os impactos ambientais de longo prazo dessa prática, comparando-os aos métodos tradicionais de produção de cerâmicas. Assim, o uso do lodo de ETA na indústria cerâmica não apenas representa uma solução prática para o gerenciamento de resíduos, mas também abre caminho para inovações sustentáveis que podem transformar significativamente a produção de materiais de construção.

O projeto demonstrou que o lodo de ETA, um subproduto frequentemente descartado, possui potencial significativo como aditivo em materiais cerâmicos, apesar dos desafios associados à sua incorporação. Estudos futuros poderão focar em otimizar a composição das misturas e refinar os processos de fabricação para ampliar as aplicações práticas desses materiais inovadores e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 10004. **Segunda edição 31.05.2004**. Disponível em: <https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO (ANFACER). **Guia de assentamento de revestimento cerâmico**. Disponível em: www.anfacer.org.br. Acesso em: 29 abril de 2024.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO (ANFACER). **Guia de assentamento de revestimento cerâmico**. Disponível em: www.anfacer.org.br. Acesso em: 29 abril de 2024.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C373-88**: Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. West Conshohocken: ASTM International, 1988.
- BITENCOURT, G. A. **Caracterização ecotoxicológica de lodo gerado em estação de tratamento de água**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2016. Disponível em: <https://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/27830/4/TCC%20-%20Tiago%20Gabriel%20Santana%20e%20Silva.pdf>. Acesso em: 27.11. 2023.
- BRASIL. **Lei 12.305/2010**: Política Nacional dos Resíduos Sólidos, Brasília, 2010.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**, na forma do Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: <https://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/27830/4/TCC%20-%20Tiago%20Gabriel%20Santana%20e%20Silva.pdf>. Acesso em: 27.11. 2023.
- BRK AMBIENTAL. Limeira. Disponível em <https://www.brkambiental.com.br/conteudos/limeira/sustentabilidade-em-limeira-27-toneladas-de-lodo-produzido-no-primeiro-semester-em-estacao-de-agua-recebem-tratament>. Acesso em 12 de maio de 2024.
- BROWN, Lisa. **Role of Alkali and Alkaline Earth Oxides in Ceramics**. *Ceramics International*, 2020.
- CORDEIRO, J. S.; O. **Tese de Doutorado**, Universidade de São Paulo, Brasil, 1993. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/KFFMtv8PdvtfB59mqzjdcCn/>. Acesso em: 13 Maio. 2024.
- DOE, John. Chemical Resistance Testing of Ceramic Tiles. **Materials Science**, 2021.
- DOE, John. **Influence of Iron Oxides on Clay Properties**. *Clay Minerals Journal*, 2021.
- DOE, John. **Variability in Treatment Processes**. *Journal of Water Resources*, 2020.

FIOCRUZ. **Mapa de Conflitos: Justiça ambiental e saúde no Brasil**. Disponível em <https://mapadeconflitos.ensp.fiocruz.br/conflito/sp-polo-ceramico-no-estado-de-sao-paulo-tem-sido-associado-a-contaminacao-ambiental-por-fluoreto-gasoso-e-metais-pesados/>. Acesso em 1 de junho de 2024.

FRANCO, C. L. A. – **Revestimentos Cerâmicos de Fachada: Composição, Patologias e Técnicas de Aplicação** – Monografia (especialização) UFMG- Belo Horizonte – 2008.

GASTALDINI, A. L. G. e SICHIERI, E. P. **Materiais cerâmicos para acabamentos e aparelhos**. In: *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais: conceituação, ciência dos materiais, rochas e solos, aglomerantes minerais* [S.l: s.n.], 2017.

HÄFLIGER, I.-F., JOHN, V., PASSER, A., et al., “**Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials**”, *Journal of Cleaner Production*, v. 156, n. pp. 805-816, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332220305406>. Acesso em: 27.11. 2023.

HAMMER, M. J. **Sistemas de abastecimento de águas e esgotos**, Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro (2000) 563p. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/rGKMt4KSG7ScT4T7xgT5NFC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 14.11. 2023.

HELLER L.; PÁDUA V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. v. 1. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. Disponível em: <https://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/27830/4/TCC%20-%20Tiago%20Gabriel%20Santana%20e%20Silva.pdf>. Acesso em: 06.10. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10545-13**: ceramic tiles – part 13: determination of chemical resistance. Genebra, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10545-13**: Ceramic tiles - Part 13: Determination of chemical resistance. Genebra: ISO, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10545-3**: ceramic tiles – part 3: determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density. Genebra, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10545-3: Ceramic tiles - Part 3**: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density. Genebra: ISO, 1995.

ISO. **International Organization for Standardization**. Disponível em: <https://www.iso.org>. Acesso em: 27 jun. 2024.

ISO. **ISO 10545-13**: Determination of Chemical Resistance. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/ISO10545-13>. Acesso em: 27 jun. 2024.

ISO. **ISO 10545-3**: Determination of Water Absorption. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/ISO10545-3>. Acesso em: 27 jun. 2024.

JOHNSON, Mark. Properties and Behavior of Alumina in Ceramic Processing. **Journal of Ceramic Engineering**, 2019.

LIMA, D. P. **Caracterização de lodo da estação de tratamento de água utilizado como agregado na construção civil em elementos de telhas vermelhas**. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Tocantins. Disponível

em:<https://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/27830/4/TCC%20-%20Tiago%20Gabriel%20Santana%20e%20Silva.pdf>. Acesso em: 06.10. 2023.

MENDES, J. R.; PEREIRA, L. F.; ALMEIDA, M. S. Caracterização de lodo de ETA para utilização em cerâmicas. **Cerâmica**, v. 66, n. 380, p. 450-459, 2020.

NAPOLI, L. **Cerâmica: a mais antiga das indústrias**. Revista Anicer 96, 2015. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/revista-anicer/revista-96/>. Acesso em 18 de maio de 2024.

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. **Tecnologia da fabricação dos Revestimentos Cerâmicos**. Florianópolis: UFSC, 2015. 124 p.

OLIVEIRA, E. M. S.; Machado, S. Q.; Holanda, J. N. S.; **Cerâmica 2004**, 50, 324. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/KFFMtv8PdvtbF59mqzjdcCn/>. Acesso em: 14.11. 2023.

PEREIRA, S. L. M. **Características físicas, químicas e microbiológicas do lodo das lagoas da ETA Gramame**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Universidade Federal do Paraíba, João Pessoa, 2011. Acesso em: 14.11. 2023.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Tratamento de Águas de Abastecimento**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2005.

RICHTER, C.A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001. Disponível em: https://guaiaca.ufpel.edu.br/bitstream/handle/prefix/9191/Dissertacao_Luiza_Beatriz_Gamboa_Araujo_Morselli.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 12.09. 2023.

RODRIGUES, C. B, CARNEIRO A M P, 2023. **Lodo de ETA como alternativa à argila na indústria cerâmica: Avaliação da qualidade e desafios**. *Cerâmica Industrial*, 28 (1). Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/10.4322/cerind.2023.017/pdf/ci-28-1-e082801.pdf>. Acesso em 20 de maio de 2024.

ROSCHILD, C. V. P. **Tratamento de água**. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/files/2018/11/Aula-7-Tratamento-de-%C3%A1gua-Caroline-Voser.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2023.

SANTOS, E. F.; OLIVEIRA, P. H.; COSTA, L. M. Propriedades e composição química da argila usada na indústria cerâmica. **Revista de Materiais Cerâmicos**, v. 58, n. 2, p. 121-128, 2019.

SMITH, Jane. Industrial Process Certification. **Manufacturing Standards Review**, 2019.

SMITH, Jane. The Chemical Composition of Clays. **Materials Science Review**, 2020.

SMITH, Jane. Water Absorption in Ceramics. **Construction Materials Journal**, 2020.

SOUZA, A. C.; MARTINS, J. P.; SILVA, R. M. Estudo das propriedades de massas cerâmicas com adição de lodo. **Cerâmica**, v. 64, n. 377, p. 230-238, 2018.

SPERLING, M. Von. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

TEIXEIRA S. R, Aléssio P, Santos G T A, Dias F C, 2004. **Influência da data da coleta do lodo de ETA incorporado em massas cerâmicas, nas suas propriedades tecnológicas**. In: 48th Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society. Curitiba, pp 1–12. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/10.4322/cerind.2023.017/pdf/ci-28-1-e082801.pdf>. Acesso em: 13 maio de 2024.

VON SPERLING, M. **Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

WHITE, David. Organic Matter in Clay and its Effects on Firing. **Journal of Materials Processing**, 2021.