MEIOS SUSTENTÁVEIS DE PRODUÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS NO BRASIL: O USO DE LODO DE ETE

Joel Santana Barros de Lima Cipriano
Estudante do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro
Nilton Carlos do Nascimento
Estudante do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro
Caio José Alves
Estudante do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro
Thamirys de Souza Zillig
Estudante do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro
Nilson Disposto Souza
Estudante do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro

Marcus Vinicius dos Reis Venditti
Professor do curso Tecnólogo em Mecânica de Precisão - Centro Universitário Senai – Campi Suíço Brasileiro. Estudante de Pós Graduação do curso de Ciência de Dados e Inteligência Artificial

Endereço: Rua Santo André, 379 Apto 21C – Boa Vista – São Caetano do Sul - SP - CEP: 09572-000 - Brasil - Tel: +55 (11) 98962-2491 – e-mail: marcusvdrvenditti@gmail.com.

RESUMO

A geração crescente de lodo em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) representa um desafio ambiental significativo no Brasil. Simultaneamente, a indústria cerâmica busca alternativas mais sustentáveis para suas matérias-primas. Este trabalho avalia, por meio de revisão bibliográfica, a viabilidade técnica e os desafios da incorporação de lodo de ETE na produção de materiais cerâmicos (tijolos, blocos, revestimentos) no contexto brasileiro. A análise aborda a caracterização do lodo, os processos de incorporação, os efeitos nas propriedades físico-mecânicas dos produtos cerâmicos (absorção de água, resistência mecânica, retração), a influência da temperatura de queima e os aspectos ambientais, como a potencial lixiviação de metais. Os resultados compilados indicam que a adição controlada de lodo de ETE (geralmente entre 5% e 20%) pode ser tecnicamente viável para produzir materiais que atendam a normas específicas, representando uma alternativa promissora para a gestão de resíduos e para a redução do consumo de argila virgem. Contudo, desafios como a variabilidade do lodo, a necessidade de controle rigoroso do processo e a avaliação ambiental detalhada são cruciais para a implementação industrial segura e eficaz.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais Cerâmicos; Sustentabilidade; Lodo de ETE;

1. Introdução

A cerâmica acompanha a humanidade desde seus primórdios, evoluindo de artefatos rudimentares a componentes essenciais na construção civil e em tecnologias avançadas (MONTES et al., 2018). O uso do barro, moldado e queimado, permitiu criar utensílios, abrigos e expressar a arte. Com o passar do tempo, novas técnicas e a busca por materiais mais duradouros e sustentáveis impulsionaram a evolução do setor. No Brasil, a indústria de cerâmica vermelha (tijolos, blocos, telhas) possui grande relevância econômica e social, sendo intensiva no uso de recursos naturais, principalmente argilas.

Paralelamente ao desenvolvimento industrial, o aumento populacional e o consumo intensificaram a geração de resíduos, tornando a gestão ambiental uma prioridade (SEABRA et al., 2019). A conscientização sobre os limites dos recursos naturais e os impactos da poluição levou indústrias a buscarem processos mais limpos e eficientes, focando no aproveitamento integral da matéria-prima e na minimização de rejeitos. Nesse contexto, a sustentabilidade tornou-se um fator estratégico, e os produtos cerâmicos são frequentemente considerados vantajosos em termos de ciclo de vida quando comparados a alternativas como o concreto, devido à sua durabilidade e potencial de redução de impacto ambiental (ACERTAR, [s.d.]).

Um dos grandes desafios do saneamento ambiental no Brasil é a gestão do lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). O lodo é um subproduto inevitável do processo de depuração da água residuária, concentrando poluentes orgânicos, inorgânicos, nutrientes e microrganismos removidos do esgoto (SPERLING, 2014; RICHTER, 2001). Sua disposição final inadequada em rios ou aterros sem tratamento representa um risco ambiental e de saúde pública. A busca por alternativas seguras e sustentáveis para o lodo de ETE é, portanto, fundamental.

Diante desse cenário, surge a proposta de utilizar o lodo de ETE como matéria-prima secundária na indústria cerâmica. Esta abordagem se alinha aos princípios da economia circular, transformando um resíduo problemático do setor de saneamento em um insumo para outro setor industrial. A incorporação do lodo em massas cerâmicas pode, potencialmente, reduzir a quantidade de argila extraída de jazidas, diminuir o volume de resíduos destinados a aterros e agregar valor a um subproduto do tratamento de esgoto (SILVA et al., 2021). Pesquisas anteriores já exploraram o uso de outros resíduos, como casca de arroz (SOBROSA, 2014) ou escória de aciaria, na produção cerâmica, indicando a receptividade do setor a matérias-primas alternativas.

Contudo, a viabilidade dessa prática depende de uma análise criteriosa. O lodo de ETE apresenta composição variável (HOLANDA et al., 2009) e pode conter substâncias potencialmente tóxicas. Sua incorporação pode alterar as propriedades da massa cerâmica e do produto final, exigindo ajustes no processo produtivo e avaliação rigorosa da qualidade e segurança ambiental das peças produzidas (ABNT, 2004). Assim, a questão central que norteia este trabalho é: Existem formas tecnicamente viáveis e ambientalmente seguras de utilizar o lodo de ETE gerado no Brasil para a fabricação de materiais cerâmicos, considerando as normas técnicas (por exemplo, ABNT, 2017) e os desafios inerentes a esse resíduo?

O objetivo deste artigo é, portanto, realizar uma revisão da literatura científica para identificar e analisar estudos sobre a incorporação de lodo de ETE em materiais cerâmicos no Brasil, avaliando os principais resultados, desafios, potencialidades e a conformidade dos produtos com as normas pertinentes. Busca-se, com isso, fornecer um panorama sobre o estado da arte desta tecnologia sustentável e subsidiar futuras pesquisas e potenciais aplicações industriais.

2. Referencial Teórico

2.1 Materiais Cerâmicos: Definição, Produção e Propriedades Materiais cerâmicos são, em geral, sólidos inorgânicos não metálicos, frequentemente formados por elementos metálicos e não metálicos unidos por ligações iônicas e/ou covalentes (CALLISTER, 2002). O termo deriva do grego "keramikos" (matéria-prima queimada), indicando que suas propriedades finais são usualmente obtidas através de tratamento térmico a altas temperaturas (sinterização) (JUSTINIANO et al., 2020). A Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM) classifica os materiais cerâmicos em diversos grupos, incluindo a cerâmica vermelha, largamente empregada na construção civil (tijolos, blocos, telhas), caracterizada pela presença de argila rica em óxido de ferro em sua composição, que lhe confere a coloração avermelhada após a queima.

O processo produtivo da cerâmica vermelha envolve tipicamente as etapas de extração da argila, preparação da massa (moagem, mistura, umidificação), conformação (extrusão, prensagem), secagem (remoção da água livre) e queima (sinterização em temperaturas que podem variar de 800°C a mais de 1000°C), onde ocorrem transformações físico-químicas que conferem as propriedades finais ao produto (CALLISTER, 2002). As propriedades tecnológicas mais relevantes para a avaliação da qualidade desses materiais incluem: resistência à compressão, absorção de água, retração linear de secagem e queima, massa específica aparente e durabilidade. Estas propriedades são regulamentadas por normas técnicas brasileiras, como a NBR 15270 (ABNT, 2017) e a NBR 13818 (ABNT, 1997), que estabelecem limites e métodos de ensaio.

2.2 Saneamento Básico e a Questão do Lodo de ETE no Brasil O saneamento básico é um direito fundamental e um pilar para a saúde pública e a preservação ambiental. No Brasil, apesar dos avanços, ainda existem déficits significativos na coleta e, principalmente, no tratamento de esgoto. As Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) são essenciais para remover os poluentes da água antes de seu retorno ao meio ambiente. No entanto, o processo de tratamento gera um subproduto volumoso e complexo: o lodo de ETE (SPERLING, 2014).

O lodo é uma mistura de sólidos suspensos removidos do esgoto e biomassa microbiana gerada no tratamento biológico. Sua composição varia amplamente dependendo das características do esgoto (doméstico, industrial),

do tipo de tratamento empregado (lodos primários, secundários, digeridos) e de fatores locais (HOLANDA et al., 2009; SILVA et al., 2021). Tipicamente, contém alta umidade, matéria orgânica, nutrientes (nitrogênio e fósforo), microrganismos (incluindo patógenos) e constituintes inorgânicos como sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), além de poder conter metais pesados (zinco, cobre, cromo, chumbo, etc.) provenientes de descartes industriais ou domésticos (RICHTER, 2001; SPERLING, 2014).

A gestão do lodo de ETE é um dos maiores desafios operacionais e econômicos do setor de saneamento (SPERLING, 2014). As opções tradicionais de disposição incluem aterros sanitários (que demandam espaço e podem gerar passivos ambientais), incineração (custosa e com emissões atmosféricas) e aplicação agrícola (regulamentada pela CONAMA, 2006), com restrições devido a patógenos e metais pesados (BETTIOL; CAMARGO, 2006). A busca por alternativas mais sustentáveis e economicamente viáveis é constante, e a incorporação em materiais de construção surge como uma opção promissora (SILVA et al., 2021; DUARTE et al., 2011).

2.3 Sustentabilidade e o Uso de Resíduos na Indústria Cerâmica A crescente pressão por práticas ambientalmente responsáveis tem impulsionado a indústria cerâmica a buscar maior sustentabilidade em seus processos (SEABRA et al., 2019). Isso envolve otimizar o consumo de energia, reduzir emissões, gerenciar o uso da água e, crucialmente, encontrar alternativas para as matérias-primas virgens, como a argila. A incorporação de resíduos industriais e agroindustriais nas massas cerâmicas é uma estratégia alinhada à economia circular, que visa transformar passivos ambientais em ativos econômicos.

Diversos estudos têm explorado o potencial de diferentes resíduos como substitutos parciais ou aditivos em massas cerâmicas. Cinzas volantes de termelétricas, escórias de alto-forno e aciaria, resíduos de rochas ornamentais, lodo de estações de tratamento de água (ETA) (RODRIGUES et al., 2023; JUSTINIANO et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2005) e resíduos agrícolas como a casca de arroz (SOBROSA, 2014) são exemplos de materiais que já demonstraram potencial para serem incorporados, muitas vezes melhorando certas propriedades ou reduzindo a temperatura de queima necessária. A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem sido utilizada para comparar o impacto ambiental de produtos cerâmicos tradicionais e aqueles que incorporam resíduos, frequentemente indicando vantagens para as opções mais sustentáveis (ACERTAR, [s.d.]).

2.4 Incorporação de Lodo de ETE em Cerâmica: Revisão da Literatura A utilização de lodo de ETE na fabricação de cerâmica vermelha (tijolos, blocos) e outros produtos cerâmicos tem sido objeto de pesquisa no Brasil e no mundo nas últimas décadas (SILVA et al., 2021). A motivação principal é oferecer uma rota de disposição final segura e útil para o lodo, ao mesmo tempo em que se reduz o consumo de argila.

Estudos de viabilidade técnica investigaram a incorporação de lodo em diferentes proporções, geralmente variando de 2% a 20% em peso seco (DUARTE et al., 2011; HOLANDA et al., 2009; RODRIGUES et al., 2023 - *Nota: este último é sobre ETA, mas a faixa percentual é similar em estudos de ETE*), embora alguns estudos testem teores mais elevados. A caracterização química do lodo é um passo inicial fundamental, geralmente realizada por fluorescência de raios-X (FRX), identificando SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3 como componentes majoritários (HOLANDA et al., 2009), similarmente às argilas, mas também revelando a presença de CaO, P_2O_5 e matéria orgânica em teores variáveis (SILVA et al., 2021).

Os efeitos da adição de lodo nas propriedades das peças cerâmicas são diversos:

- **Plasticidade e Processamento:** O lodo, geralmente menos plástico que a argila, pode afetar a trabalhabilidade da massa, exigindo ajustes na umidade de conformação.

- **Secagem e Queima:** A presença de matéria orgânica no lodo pode gerar porosidade adicional durante a queima, influenciando a retração, a massa específica e a absorção de água (HOLANDA et al., 2009). A retração linear total (secagem + queima) precisa ser controlada para evitar defeitos como trincas e empenamentos.

- **Absorção de Água (AA):** Muitos estudos reportam um aumento da AA com a adição de lodo, devido à maior porosidade (SILVA et al., 2021; HOLANDA et al., 2009). No entanto, para teores controlados (ex: até 10-15%) e temperaturas de queima adequadas (acima de 950-1000°C), é possível manter a AA dentro dos limites especificados por normas como a NBR 15270 (ABNT, 2017).

- **Resistência Mecânica (Compressão/Flexão):** Frequentemente, observa-se uma redução na resistência mecânica com o aumento do teor de lodo (HOLANDA et al., 2009; TEIXEIRA et al., 2005). Isso pode ser atribuído à menor densidade, maior porosidade ou à formação de microtrincas na interface lodo-matriz argilosa. Contudo, alguns estudos mostram que, para baixos teores de adição e otimização da temperatura de queima, a resistência pode se manter em níveis aceitáveis para

alvenaria de vedação ou mesmo estrutural (DUARTE et al., 2011), dependendo da norma (ABNT, 2017). A calcinação prévia ou moagem do lodo podem mitigar parcialmente esses efeitos deletérios.

- **Aspectos Ambientais:** A imobilização de metais pesados presentes no lodo na matriz vítrea formada durante a sinterização é um ponto crucial (HOLANDA et al., 2009). Testes de lixiviação e solubilização (conforme NBR 10004 e normas relacionadas, ABNT, 2004) são essenciais para classificar o produto final quanto à periculosidade e garantir que não haverá contaminação ambiental durante o uso ou descarte das peças cerâmicas. Estudos indicam que a sinterização em altas temperaturas é eficaz na imobilização da maioria dos metais (DUARTE et al., 2011), mas a avaliação caso a caso é indispensável. A queima da matéria orgânica também gera emissões gasosas que precisam ser controladas.

Pesquisas relevantes foram conduzidas em diversas instituições brasileiras (IFRN, UEPB, UENF, Embrapa, universidades federais e estaduais), com estudos de caso utilizando lodos de ETEs de cidades como Jaguariúna-SP (DUARTE et al., 2011), Patos-PB (JUSTINIANO et al., 2020 - *Nota: estudo com lodo de ETA, mas metodologia aplicável*), Açu-RN, Campos dos Goytacazes-RJ (HOLANDA et al., 2009), entre outras. Autores como Holanda, J.N.F. (HOLANDA et al., 2009), Teixeira, S.R. (TEIXEIRA et al., 2005), Morita, D.M., Richter, C.A. (RICHTER, 2001), Bettiol, W. (BETTIOL; CAMARGO, 2006), Camargo, O.A. (BETTIOL; CAMARGO, 2006), entre outros, contribuíram significativamente para o conhecimento na área de aproveitamento de lodos em materiais de construção.

3. Metodologia

Este trabalho baseou-se em uma pesquisa descritiva, utilizando como método a revisão bibliográfica e análise documental. O ponto de partida foi o projeto de pesquisa "Meios sustentáveis de produção de Materiais Cerâmicos no Brasil" (CIPRIANO et al., 2023 - *Referência hipotética ao documento base*), que forneceu um contexto inicial e algumas referências (CALLISTER, 2002; SOBROSA, 2014; GUEDES, 2014; MONTES et al., 2018; SEABRA et al., 2019; JUSTINIANO et al., 2020).

Para aprofundar o tema específico do uso de lodo de ETE, realizou-se uma busca sistemática em bases de dados científicas, incluindo Google Acadêmico, Scielo (Scientific Electronic Library Online), Portal de Periódicos da CAPES e repositórios institucionais de universidades brasileiras. As palavras-chave utilizadas na busca, em português e inglês, foram: "lodo de esgoto", "lodo de ETE", "sewage sludge", "materiais cerâmicos", "ceramic materials", "tijolos", "bricks", "construção civil", "building materials", "sustentabilidade", "sustainability", "reciclagem", "recycling", "Brasil", "Brazil".

Os critérios para seleção dos artigos incluíram: relevância para o tema (foco na incorporação de lodo de ETE em matrizes cerâmicas), preferência por estudos realizados no Brasil ou com aplicabilidade ao contexto nacional, publicações em periódicos revisados por pares (ex: SILVA et al., 2021; HOLANDA et al., 2009; RODRIGUES et al., 2023), anais de congressos relevantes (ex: DUARTE et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2005), teses e dissertações. Foram considerados principalmente trabalhos publicados nos últimos 20 anos para refletir o estado da arte mais recente.

A análise dos documentos selecionados envolveu a extração e síntese das seguintes informações: caracterização do lodo de ETE utilizado, metodologia de preparação das amostras cerâmicas (percentuais de lodo, tipo de argila, processo de conformação, temperaturas de secagem e queima), ensaios realizados (propriedades físico-mecânicas, análises químicas e microestruturais, testes ambientais) e principais resultados e conclusões dos autores. Os resultados reportados foram comparados qualitativamente com os requisitos estabelecidos por normas ABNT pertinentes, como a NBR 15270 (ABNT, 2017) e a NBR 13818 (ABNT, 1997). O levantamento bibliográfico inicial do projeto foi expandido com as novas fontes encontradas. A abordagem metodológica incluiu também a consulta a normas ABNT sobre citações (NBR 10520; ABNT, 2002) e referências (NBR 6023; ABNT, 2018) para a formatação deste artigo.

4. Resultados e Discussão

A análise da literatura revelou um consenso sobre o potencial técnico da utilização de lodo de ETE como matéria-prima alternativa na indústria cerâmica, embora associado a desafios que necessitam de gerenciamento cuidadoso.

Caracterização e Variabilidade do Lodo: A composição físico-química do lodo de ETE é altamente variável, dependendo da origem do esgoto e do processo de tratamento (SPERLING, 2014). Estudos brasileiros confirmam a predominância de SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3, componentes também majoritários nas argilas, o que favorece a compatibilidade química (HOLANDA et al., 2009). No entanto, teores significativos de matéria orgânica (que influencia a porosidade e as emissões na queima), CaO, P_2O_5 e a presença de metais

pesados são características distintivas que demandam atenção (RICHTER, 2001; SILVA et al., 2021). Essa variabilidade exige um controle de qualidade rigoroso do lodo que chega à cerâmica, possivelmente misturando lotes ou ajustando formulações para garantir a homogeneidade do produto final.

Efeitos nas Propriedades Cerâmicas:

- **Absorção de Água (AA):** A incorporação de lodo tende a aumentar a AA devido à volatilização da matéria orgânica e à menor densificação durante a queima (HOLANDA et al., 2009; SILVA et al., 2021). Diversos estudos mostraram que, para teores de até 10-15% de lodo e temperaturas de queima entre 950°C e 1100°C, é possível produzir blocos cerâmicos que atendem aos limites da NBR 15270 para alvenaria de vedação (AA ≤ 22%) (ABNT, 2017). Para revestimentos (NBR 13818; ABNT, 1997), os requisitos de AA são mais rigorosos, limitando potencialmente os percentuais de adição de lodo.

- **Resistência Mecânica:** A resistência à compressão e à flexão geralmente diminui com o aumento do teor de lodo (HOLANDA et al., 2009; TEIXEIRA et al., 2005). A magnitude dessa redução varia, mas teores acima de 15-20% frequentemente comprometem o atendimento às normas para blocos estruturais. Para blocos de vedação (ABNT, 2017), os requisitos são menos exigentes, permitindo maiores teores de lodo (DUARTE et al., 2011). Fatores como a granulometria do lodo e a temperatura de queima (temperaturas mais altas favorecem a sinterização e a resistência, mas até certo limite) são cruciais (RODRIGUES et al., 2023).

- **Retração Linear:** A retração durante a secagem e a queima é afetada pela composição da mistura (HOLANDA et al., 2009). O controle dimensional é essencial na produção cerâmica, e a adição de lodo exige ajustes no ciclo de secagem e queima para evitar defeitos.

- **Temperatura de Queima:** A matéria orgânica do lodo pode atuar como combustível interno, potencialmente reduzindo a necessidade de energia externa para a queima. No entanto, temperaturas suficientemente altas (geralmente > 1000°C) são necessárias para garantir a sinterização adequada, a estabilização de fases cristalinas e a imobilização de metais pesados (HOLANDA et al., 2009; RODRIGUES et al., 2023).

Avaliação Ambiental: Este é um dos aspectos mais críticos. A queima em altas temperaturas é geralmente eficaz na destruição de patógenos e na imobilização de metais pesados na matriz cerâmica vítrea ou cristalina (HOLANDA et al., 2009). Contudo, testes de lixiviação e solubilização (conforme NBR 10004 e normas relacionadas; ABNT, 2004) são mandatórios para garantir que o produto final seja classificado como não perigoso (Classe II A - Não Inerte, no mínimo) e não represente risco de contaminação ao longo de sua vida útil ou no descarte. A maioria dos estudos indica que, para teores usuais de incorporação, os limites normativos para lixiviação são atendidos (DUARTE et al., 2011), mas a avaliação deve ser feita para cada combinação específica de lodo e argila. As emissões gasosas durante a queima, especialmente de compostos orgânicos e enxofre, também precisam ser monitoradas e controladas.

Desafios para Implementação: Além das questões técnicas e ambientais, a implementação industrial enfrenta desafios logísticos (transporte e armazenamento do lodo), econômicos (custos de pré-tratamento do lodo vs. economia de argila), regulatórios (necessidade de licenciamento ambiental específico) e de aceitação pelo mercado da construção civil. A falta de padronização do lodo entre diferentes ETEs ou mesmo ao longo do tempo na mesma ETE é um obstáculo significativo para a produção em larga escala (SILVA et al., 2021).

Comparativo: Comparado ao lodo de ETA (RICHTER, 2001; RODRIGUES et al., 2023), o lodo de ETE tende a ter maior teor de matéria orgânica e maior variabilidade, incluindo a potencial presença de patógenos e metais em concentrações mais elevadas (SPERLING, 2014), tornando seu controle e processamento mais complexos.

5. Considerações Finais

A análise da literatura científica demonstra que a incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) na produção de materiais cerâmicos no Brasil é uma alternativa tecnicamente promissora e com significativos apelos ambientais (SILVA et al., 2021). A capacidade de transformar um resíduo de difícil gestão do setor de saneamento (SPERLING, 2014) em matéria-prima para a indústria da construção civil representa um avanço notável em direção à economia circular e à sustentabilidade.

Os estudos revisados indicam que é possível adicionar lodo de ETE em percentuais variáveis (comumente até 10-20%) em massas cerâmicas para produzir tijolos e blocos que atendam às especificações de normas

técnicas brasileiras (ABNT, 2017; DUARTE et al., 2011; HOLANDA et al., 2009), especialmente para alvenaria de vedação. Isso contribui diretamente para a redução do volume de lodo destinado a aterros sanitários – um dos maiores gargalos do saneamento no país – e para a diminuição da extração de argilas virgens, preservando recursos naturais.

No entanto, a implementação bem-sucedida desta tecnologia não é isenta de desafios. A heterogeneidade inerente ao lodo de ETE exige um controle de qualidade rigoroso e contínuo, tanto do resíduo quanto do produto final (HOLANDA et al., 2009). Ajustes nos parâmetros de processamento cerâmico, como umidade de conformação e ciclos de secagem e queima, são necessários para garantir a qualidade e integridade das peças. A avaliação ambiental criteriosa, sobretudo quanto à imobilização de metais pesados (ABNT, 2004) e ao controle de emissões gasosas, é fundamental para assegurar que a solução não transfira o problema ambiental de um meio para outro.

Para que o uso de lodo de ETE em cerâmica avance da escala laboratorial para a industrial no Brasil, são necessários esforços conjuntos. Pesquisas futuras devem focar na otimização de pré-tratamentos do lodo (secagem, moagem, calcinação parcial), no desenvolvimento de formulações mais robustas à variabilidade do lodo, na avaliação econômica detalhada considerando logística e custos de processo, e em estudos de longa duração sobre a durabilidade e o comportamento ambiental dos produtos. A criação de normas técnicas específicas e políticas públicas de incentivo também seria um fator impulsionador.

Conclui-se, portanto, que o Brasil possui condições favoráveis – grande geração de lodo (SPERLING, 2014) e uma indústria cerâmica estabelecida – para explorar esta via sustentável. Embora os desafios técnicos e de gestão não devam ser subestimados, o potencial para solucionar simultaneamente problemas ambientais do saneamento e da construção civil justifica o investimento contínuo em pesquisa, desenvolvimento e implementação desta tecnologia (SILVA et al., 2021). A hipótese de que existem meios sustentáveis viáveis para a produção de cerâmica no Brasil é confirmada, sendo o aproveitamento do lodo de ETE um exemplo relevante, embora complexo, dessa possibilidade.

6. Referências

(Lista revisada e com a adição da referência 21)

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2018.

6. BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto**: impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

7. CALLISTER, W.D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

8. Cerâmica Sustentável por Natureza - ACERTAR. Disponível em: acertar.org.br. Acesso em: 03 maio 2025. *(Nota: Data de acesso fictícia, usar data real)*.

9. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.

10. DUARTE, A. C. L. et al. Adição de lodo de esgoto da E.T.E. do município de Jaguariúna em tijolos cerâmicos: estudo de viabilidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: SBCS, 2011.

11. GUEDES, F. H. **Reaproveitamento de resíduo de casca de ovo e chamote na produção de material cerâmico para isolação térmica**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

12. HOLANDA, J. N. F.; TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, A. E. Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 333, p. 69-74, jan./mar. 2009. DOI: 10.1590/S0366-69132009000100010.

13. JUSTINIANO, D. Q. et al. **Utilização de lodo de ETA na fabricação de materiais cerâmicos para revestimento aplicados na construção civil**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2020.

14. MONTES, N. A. et al. Sustentabilidade ambiental e estética funcional das cerâmicas de Brennand. **Mix Sustentável**, v. 4, n. 3, p. 91-98, 2018.

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

16. RODRIGUES, C. B. et al. Lodo de ETA como alternativa à argila na indústria cerâmica: Avaliação da qualidade e desafios. **Cerâmica Industrial**, v. 28, n. 1, e082801, 2023. DOI: 10.4322/cerind.2023.017.

17. SEABRA, D. C. M. et al. Educação e gestão ambiental no desenvolvimento sustentável na mineração de ferro: aproveitamento de rejeitos para obtenção de materiais cerâmicos. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 11, p. 26323-26331, 2019.

18. SILVA, J. D. S. S.; DANTAS, R. T. N.; FARIAS NETO, S. R. Uso do lodo de ETE na produção de tijolos cerâmicos: Uma revisão sistemática de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, e22010817200, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i8.17200.

19. SOBROSA, F. Z. **Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários com adição da sílica residual proveniente da queima da casca de arroz**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

20. SPERLING, M. von. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: Lodos ativados. v. 4. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2014.

21. TEIXEIRA, S. R. et al. Análise da utilização de lodo de estação de tratamento de água (ETA) e de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49., 2005, São Pedro. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2005.