

APLICAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO: UMA REVISÃO

Application of sludge from wastewater treatment plants in building materials: a review

Bianca Trindade Oldoni¹, Juliana Steffens¹, Rogério Marcos Dallago¹, Marcelo Luis Mignoni^{1*}

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI Erechim.

* *E-mail*: mignoni@uricer.edu.br

Data do recebimento: 24/06/2024 - Data do aceite: 07/10/2024

RESUMO: O foco da economia circular está na conversão de resíduos em materiais de uso comum, assim agregando valor a estes. O lodo residual gerado nas estações de tratamento de efluentes é um grave problema ambiental, pois sua eliminação requer grandes áreas para disposição em aterros. Em busca de alternativas, a indústria de materiais de construção se destaca, demandando matérias-primas residuais que contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Os principais óxidos presentes neles são essenciais como substitutos na produção de cimento e argilas para materiais cerâmicos. Mediante o exposto, o presente artigo apresenta uma revisão literária sobre o uso de lodos de estações de tratamento de efluentes na fabricação de materiais de construção civil.

Palavras-chave: Resíduos. Efluentes. Efeito estufa. Óxidos. Construção civil.

ABSTRACT: The focus of the circular economy is on converting waste into commonly used materials, thus adding value to them. The residual sludge generated in wastewater treatment plants is a serious environmental problem, as its disposal requires large areas of landfill. In the search for alternatives, the building materials industry stands out, demanding residual raw materials that contribute to reducing greenhouse gas emissions. The main oxides present in them are essential as substitutes in the production of cement and clays for

ceramic materials. This article presents a literature review on the use of sludge from wastewater treatment plants in the manufacture of construction materials.

Keywords: Waste. Effluents. Greenhouse effect. Oxides. Construction.

Introdução

A crescente preocupação das indústrias com a sustentabilidade e a economia circular tem impulsionado a transformação de resíduos em materiais de alto valor agregado (Liu *et al.*, 2011; Basu; Pal; Prakash, 2022).

As estações de tratamento de águas residuais industriais e municipais são geradoras significativas de resíduos sólidos, principalmente na forma de lodos (Abouelela *et al.*, 2022). Nos países menos desenvolvidos, a quantidade de estações de tratamento de água e efluentes é considerada pequena (Świerczek; Cieślík; Konieczka, 2018).

O lodo gerado nas estações de tratamento possui uma composição complexa, com altas concentrações de água e materiais orgânicos, o que o torna uma ameaça ao meio ambiente (Yu *et al.*, 2023).

Além disso, os lodos têm composição heterogênea e contêm muitas substâncias orgânicas e inorgânicas, sendo o tratamento indispensável antes do seu descarte. Dentre os métodos de tratamento utilizados estão os físico-químicos e biológicos, que após realizados, o lodo é comumente disposto em aterros sanitários (Liu *et al.*, 2013).

Dentro da economia circular, rotas inovadoras e ecológicas de fabricação de materiais de construção, ambientalmente amigáveis, vêm recebendo destaque, sendo o lodo considerado um aditivo adequado na produção desses materiais (Gomes *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2023).

A indústria de materiais de construção é responsável por diversos impactos ambien-

tais e desempenha um papel significativo tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento. Há uma crescente demanda por cimento para construção de habitações e urbanização, considerado uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa, o que traz uma necessidade de práticas sustentáveis para sua produção, como o uso de resíduos (Smol *et al.*, 2015; Supino *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2023).

O lodo, principalmente de esgoto, é uma matéria-prima potencial na construção civil, com alto valor agregado (Bagheri *et al.*, 2023). Na construção civil, reduz o consumo de energia e elimina etapas caras de produção (Paris *et al.*, 2016).

O lodo contém várias frações inorgânicas semelhantes aos componentes da argila e cimento, tais como óxidos e coagulantes, que podem ser utilizados como matérias-primas para a preparação de tijolos, cerâmicas, telhas, agregados leves, argamassas, concretos, entre outros (Yang *et al.*, 2021; Gherghel; Teodosiu; Gisi, 2019).

A incineração e a desidratação são métodos capazes de minimizar a massa e o grande volume dos lodos, retirando completamente os microrganismos patogênicos e os vírus, sendo, atualmente, os métodos de eliminação mais eficientes e completos (Yu *et al.*, 2023; Chang *et al.*, 2020).

As cinzas de lodo contêm alto teor de metais pesados, maior presença de óxidos em sua composição, tornando-se semelhantes ao clínquer de cimento. Apresentam pouca atividade pozolânica, sendo recomendadas apenas como complementos aos materiais de construção. (Tantawy *et al.*, 2012).

Em vista disso, a presente revisão tem o objetivo de elucidar sobre a aplicação de lodo

gerado em estações de tratamento de efluentes como matéria-prima para a produção de materiais de construção, utilizando estudos com dados de um período de 21 anos (2003 a 2024), em sua maioria artigos científicos publicados em revistas nacionais e internacionais.

Economia circular e as indústrias de materiais de construção

A urbanização do mundo aumentou exponencialmente coincidindo com o crescimento da população humana; portanto, o uso de mais recursos materiais foi amplificado (Ginga, Ongpeng, Daly, 2020). O setor da construção é o maior consumidor de matérias-primas e recursos, predominando no ambiente urbano, além da geração de resíduos através dos processos de demolição de edifícios e estruturas que encerraram seu ciclo de vida (Purchase *et al.*, 2021; Elliot; Vigier; Levasseur, 2024). Consome 3 mil milhões de toneladas de matérias-primas e cerca de 50% do aço produzido no mundo (World Economic Forum, 2016).

O Relatório de Status Global de 2022 para Edifícios e Construção, do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, mostrou que as emissões de dióxido de carbono (CO₂) pela construção civil chegaram a 10 bilhões de toneladas em 2021 (Comando Notícia, 2024).

Conforme a Organização das Nações Unidas (ONU), a construção civil participa em cerca de 11% das emissões globais de dióxido de carbono por mão-de-obra humana, incluindo a produção de materiais de construção, desenvolvimento de edifícios e demolição (Comando Notícia, 2024).

O termo Economia Circular (EC) vem como uma nova solução para reduzir os efeitos prejudiciais ao meio ambiente e aumentar o crescimento econômico dentro do setor de construção para a prática do desenvolvimento sustentável (Ginga; Ongpeng; Daly, 2020).

Nas últimas décadas, esse setor empenha-se na incorporação de resíduos nos materiais de construção, principalmente aqueles que são descartados em aterros sanitários (Moura, 2021). A indústria de cimento já realiza o maior reúso de produtos gerados, reduzindo as emissões de gás carbônico e o uso de combustível significativamente (Matos; Isewaki, 2017).

Processo de geração de lodo residual e suas características

As quantidades de lodo produzidas no mundo são enormes e crescentes, ultrapassando milhões de toneladas em sua forma seca (Gao *et al.*, 2014). Em 2020, somente no Brasil, conforme o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINIR), foram geradas 81 milhões de toneladas de lodo (Sinir, 2020). A NBR ABNT 10004/2004 considera os lodos de tratamento de efluentes líquidos como resíduos sólidos que necessitam de destinação e tratamento adequados antes de serem descartados no meio ambiente (ABNT, 2004).

O lodo é obtido do processo de tratamento de águas residuais municipais ou industriais, que se inicia pelo tratamento físico-químico, onde se aplica um coagulante químico que desestabiliza o material orgânico, obtendo-se um produto primário. O lodo secundário pode ser obtido através do processo biológico de tratamento, que faz o uso de bactérias (Nguyen *et al.*, 2023; YU *et al.*, 2023; Świerczek; Cieślík; Konieczka, 2018).

Especificamente, o efluente é recebido e armazenado em tanques, sendo conduzido para o processo primário de tratamento com dosagem de coagulantes e floculantes químicos, entre eles o cloreto férrico, sulfato de alumínio e policloreto de alumínio. Nesse processo inicial o efluente fica sob decantação para separação

do líquido tratado e do lodo decantado, este último sendo encaminhado para um tanque específico só para armazenamento. O efluente líquido do primeiro tratamento segue para a segunda fase, o processo biológico, que faz o uso de bactérias anaeróbias ou aeróbias, que geram também outra quantidade de lodo que será separado. Ao final, ele será armazenado e levado a um filtro e prensa, gerando uma torta (Fernandes; Oliveira; Hotza, 2003; Nguyen *et al.*, 2023). A Figura 1 traz um fluxograma do funcionamento de uma estação de tratamento de esgoto e efluentes e o processo de separação do lodo.

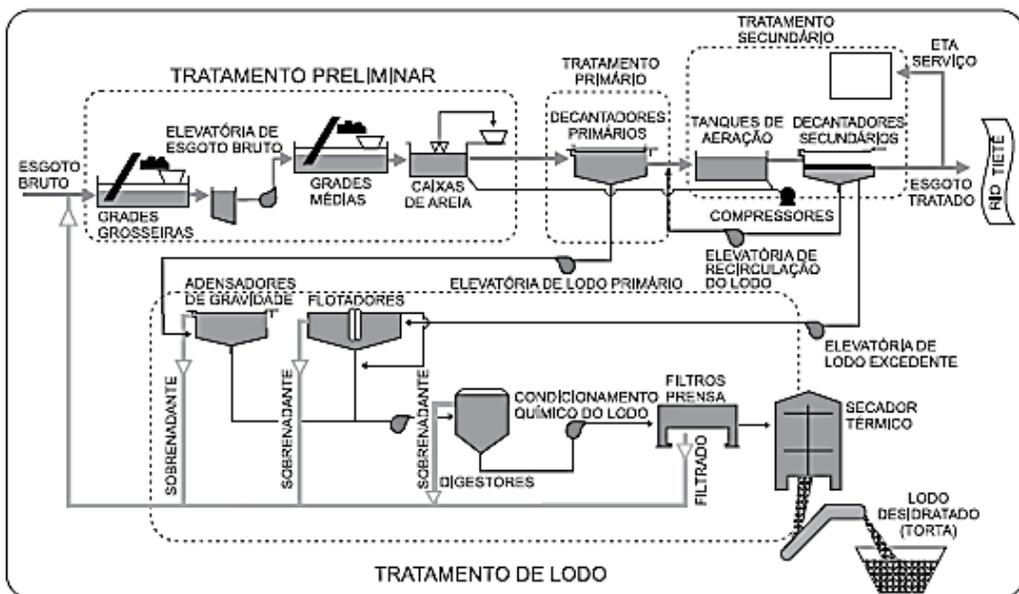
O lodo pode ser caracterizado pela alta umidade (95 a 99%), alto teor de matérias orgânicas (60 a 80% de sólidos secos), matérias inorgânicas e minerais (óxido de cálcio, dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro (III)), nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio), além de diversos metais pesados (Arsênio, Cádmio, Cromo, Cobre, Níquel, Fósforo e Zinco); fertilizantes; produto de

higiene e limpeza; microrganismos patogênicos como *Bacillus anthracis*, *Clostridium perfringens*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Vibrio cholera*; coloides e coagulantes à base de alumínio, ferro e cal (Oliveira *et al.*, 2016; Matos; Isewaki, 2017; YU *et al.*, 2023; Chang *et al.*, 2020; Rorat *et al.*, 2019).

Problemas ambientais relacionados ao descarte de lodo

O descarte mais comum dos lodos ocorre em aterros sanitários, uma prática de alto custo e impacto ambiental, além de também ser realizada em corpos de água e esgotos (Ippolito, Barbarick, Elliott, 2011). Esse resíduo que hoje é descartado em aterros sanitários no Brasil pode gerar cerca de 6 milhões de metros cúbicos de gás poluente por dia, e segundo o IBGE, menos de 5% do lodo sanitário é reaproveitado no país (O Globo, 2023).

Figura 1. Fluxograma de uma estação de tratamento de esgoto e efluentes.



Fonte: Sabesp (2016)

Os lodos são poluentes inevitáveis e abundantes, que geram muitos problemas ambientais de descartados de forma inadequada, como a contaminação dos solos, lençóis freáticos, plantas e animais, poluição dos recursos hídricos e impacto na saúde pública pela presença de patógenos e produtos químicos, devendo ser tratados adequadamente para redução do seu volume e quantidade de água (Moreira *et al.*, 2019; Mathew *et al.*, 2021), além da busca por novas destinações para o reaproveitamento destes resíduos (Alsaedi *et al.*, 2022).

Tecnologias de tratamento de lodo e características das cinzas

Os lodos têm alto potencial de reaproveitamento, desde fertilizantes agrícolas, energia e combustíveis, até na composição de materiais de construção (Bagheri *et al.*, 2023; Diniz; Melo, 2019).

A combustão, incineração ou pirólise do excesso de lodo são métodos muito utilizados para conversão em cinzas, reduzindo o volume em cerca de 70 a 95%, eliminando também os microrganismos patogênicos, os tornando reaproveitáveis. São métodos de produção de gás ou óleo a partir de materiais carbonáceos usando craqueamento térmico de alta temperatura por meio de uma fonte de calor externa sem o fornecimento de ar ou vapor (Jayaraman; Gökalp, 2015; Liang *et al.*, 2021; Świerczek; Cieślik; Konieczka, 2018).

O uso das cinzas destes resíduos na construção civil são uma solução para a estabilização do mesmo, garantindo mais resistência do que ele apenas desidratado ou bruto, além de maior teor dos óxidos presentes e compactação dos metais pesados (Świerczek; Cieślik; Konieczka, 2018).

As cinzas consistem predominantemente em partículas de tamanho de silte e areia fina,

com uma densidade média comparável à da areia leve. O material tem uma microestrutura porosa com altas propriedades de absorção de água e seus principais óxidos presentes são SiO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 , CaO e Fe_2O_3 . Além disso, o mineral mais abundante é o quartzo, incluindo também a presença de pequena parte de calcita e hematita (Lynn; Dhir; Ghataora, 2018).

Aplicação de lodo na indústria de materiais de construção

Para a aplicação de lodo em materiais de construção, a composição mineral e as propriedades geotécnicas são ideais, principalmente a presença de óxidos (cálcio, silício, alumínio e ferro), que são comparáveis aos materiais de construção, principalmente cimentos, argilas para tijolos e telhas e agregados leves (Assaf, 2020; Dhir; Ghataora; Lynn, 2017).

Além de óxidos, os lodos com presença de coagulantes de alumínio e ferro possuem características semelhantes das argilas, e os lodos com presença de coagulantes à base de cal são excelentes substitutos do calcário na produção de cimento (Lee; Kim; Yoo, 2018).

A Tabela I apresenta as resistências à compressão de materiais de construção à base de pequena porcentagem de lodo de alguns estudos da literatura, em comparativo com as resistências dos materiais na sua forma convencional.

Aplicação de lodo em cimento (argamassas e concretos)

O cimento é o material de construção mais utilizado no mundo e seu principal componente é o clínquer, que é uma mistura de óxidos como o óxido de cálcio, dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro (III), que compreendem em 95% de

Tabela I – Tipo de material de construção, quantidades de lodo e aglutinante adicionadas, e resistência à compressão após 28 dias de cura.

Tipo de material de construção	Quantidade em peso de aglutinante (%)	Quantidade em massa de lodo no produto (%)	Resistência à compressão após 28 dias de cura (MPa)	Referência
Argamassa convencional	-	-	2 – 10	Mohamad <i>et al.</i> , 2009
Concreto convencional	-	-	30	Mohamad <i>et al.</i> , 2009
Tijolos cerâmicos	-	-	9,26	Souza, Soriano, Patino, 2018
Concreto	63,5	4,1	39	Roccaro <i>et al.</i> , 2015
	14,3	4,3	15	Rahman <i>et al.</i> , 2017
Argamassa	16	0,32	12 – 14	Hamood, Khatib, Williams, 2017
	25	7,5	~ 25	Rahman <i>et al.</i> , 2017
	2,5	18,75	~ 20	
Tijolos/blocos de concreto	25	10	17,2 – 18,6	Yamuna Rani <i>et al.</i> , 2015
	32,4	6,5	32,1 – 36,9	Yang <i>et al.</i> , 2013
Produtos sinterizados/cerâmicos	95	5	23	Amin <i>et al.</i> , 2017
	95	5	20,5	Zhang <i>et al.</i> , 2016
	75	25	16,2 – 25,9	Ukwatta <i>et al.</i> , 2015
Agregados leves	90	10	4,64	Franus, Barnat-Hunek, Wdowin, 2016
	60	40	8,1	Lau, Teo, Mannan, 2017

Fonte: autores (2024).

sua massa (Świerczek, Cieślik, Konieczka, 2018), além da presença de calcário e argilas. Sua produção exige alto consumo energético e gera alta poluição ambiental (Chang *et al.*, 2020; Xia *et al.*, 2023).

Os cimentos podem conter aditivos que afetam a resistência da argamassa, chamados de aditivos pozolânicos naturais de origem vulcânica ou artificiais de cinzas residuais, considerados ambientalmente econômicos (Świerczek, Cieślik, Konieczka, 2018).

O lodo é considerado um material alternativo para aproveitamento como aditivo. O alto poder calorífico e a presença destes óxidos e do fósforo, no lodo, são favoráveis para o uso no clínquer de cimento, que tem características minerais e químicas semelhantes aos componentes para cimento Portland comum (Chang *et al.*, 2020; Xia *et al.*, 2023).

Durante a produção de cimento, argamassas e concreto são utilizadas quantidades de água, e o uso de lodo bruto como substituto

é uma alternativa, não necessitando passar pelo processo de desidratação. Estes materiais, quando endurecidos e encapsulados, imobilizam as substâncias orgânicas e metais pesados presentes no lodo (Hamood; Khatib; Williams, 2017).

O alto teor de matéria orgânica no lodo pode afetar a propriedade cimentícia, aumentando a porosidade e diminuindo a resistência, sendo necessário o pré-tratamento do lodo bruto antes de ser usado no cimento, argamassa ou concreto. O tratamento térmico e a incineração são alternativas para um uso mais eficaz nestes materiais de construção, onde são obtidas cinzas que aliviam os efeitos adversos na resistência mecânica e imobilizam os metais pesados, contribuindo para a atividade pozolânica (Chang *et al.*, 2020).

Stojmenović *et al.* (2024) investigaram o reaproveitamento de lodos industriais brutos como substitutos parciais do cimento na preparação de concretos e argamassas, apresentando propriedades pozolânicas, sendo possível o uso de até 20% de lodo sem alteração significativa física e mecânica do material. Guo *et al.* (2023) combinaram cinzas de lodo de esgoto municipal com alto teor de alumínio em escória e cinza volante, sendo alcançada a melhor resistência da argamassa quando 10% de cinza de lodo foi combinado com 10% de escória e 10% de cinza volante, aproximando-se da argamassa de cimento comum, ou seja, 30% do cimento foi substituído por resíduos.

Para garantir a resistência e segurança do material, a quantidade de lodo adicionada como matéria-prima, tanto bruto como em cinzas, é recomendada dentro de uma faixa máxima de 15% em peso para manter a composição química e mecânica semelhante e apresentar boa trabalhabilidade e qualidade do produto. Ao adicionar outros minerais pozolânicos, como escória de alto forno, cinzas

volantes e cal, o desempenho do produto é melhorado (SHIH *et al.*, 2005).

Aplicação de lodo em tijolos e telhas (cerâmicas)

A indústria cerâmica é definida por materiais compostos de argilas que apresentam a cor avermelhada após os processos de calcinação, usados na forma de tijolos e telhas (MME, 2019).

A produção de tijolos, cerâmicas e telhas a partir de lodos residuais se baseia no processo de sinterização, que é a queima da argila e pré-compactação, e só é possível por conta da presença de elementos óxidos semelhantes à argila (Świerczek; Cieślík; Konieczka, 2018).

O silício está presente em quantidades acima de 50% nos lodos de estações de tratamento, sendo um dos elementos mais importantes que regem a capacidade de suporte de peso de um produto de tijolo (Trang; Ho; Babel, 2021).

A incineração do lodo é o pré-tratamento mais eficaz para garantir sua incorporação na preparação de tijolos, cerâmicas e telhas (Xia *et al.*, 2023).

Ingunza *et al.* (2015) investigaram a adição de lodo de esgoto na fabricação de telhas, variando as concentrações de lodo de 2 a 10% na argila, onde foi observada a utilização de cerca de 4% de lodo sem afetar as propriedades do produto final. Akash *et al.* (2018) realizaram experimentos para estudar o uso de resíduos industriais como substitutos da argila para tijolos e o lodo foi adicionado nas proporções de 5 a 25%, sendo misturado com sucesso na quantidade de até 15%.

Segundo Chang *et al.* (2020), o aumento da quantidade de cinzas de lama no material diminui a plasticidade e a retração e aumenta a absorção de água, porém a resistência à compressão aumenta se adicionada uma quantidade limitada de cerca de 20% de argila

de cinzas por peso. A resistência e a qualidade dos materiais também são melhoradas quando adicionados aditivos como nanomateriais, cinzas de casca de arroz, cinzas volantes e escória de alto forno.

Aplicação de lodo em agregados leves

Agregados leves são adições de escória de alto forno, argilas e outros materiais porosos, que podem melhorar o desempenho do isolamento térmico de edifícios e diminuir a massa unitária do concreto (Yang *et al.*, 2022; Oliveira; Kikkawa; Santos, 2018).

Os agregados leves, como a areia, podem ser substituídos pelo lodo parcialmente seco. A sinterização ou a pelotização do lodo são abordagens racionais para obter agregados leves, pois o material obtido é inerte e pode ter mais durabilidade que os agregados comerciais (Świerczek; Cieślik; Konieczka, 2018). Além disso, o lodo pode ser misturado à argila e a outros materiais para garantir a qualidade dos agregados leves (Xia *et al.*, 2023).

Suchorab *et al.* (2016) realizaram um estudo de uma mistura de 10% de lodo de esgoto e 90% de argila, que foi sinterizada a 1150°C por 30 min para a produção de agregados leves, que apresentaram maior porosidade, menor densidade e menor resistência à compressão, fazendo necessária a adição de um agente hidrofóbico para a melhor impregnação do produto, trazendo boa adesão à argamassa de cimento. Chiou *et al.* (2006) utilizaram cinzas de lodo e lodo de esgoto desidratado para produzir agregados leves e obtiveram boas partículas esféricas com uma quantidade limitada de 20% de lodo.

O processo de pirólise também é uma alternativa, pois promove a redução da densidade e formação de poros que dão a característica de agregado leve ao lodo. Como ele tem alto poder calorífico, a temperatura

de sinterização é reduzida, economizando energia. Os agregados leves, fabricados com 20% em peso de lodo, apresentam boa forma esférica e propriedade semelhantes aos agregados normais (Chang *et al.*, 2020).

Vantagens, desvantagens e soluções

A principal vantagem de incorporar os lodos de estação de tratamento em materiais de construção é o fato de que os metais pesados tóxicos presentes são imobilizados com segurança, não havendo ameaça ambiental imediata ou risco à saúde humana na produção e edificação destes materiais (Świerczek; Cieślik; Konieczka, 2021).

A durabilidade dos materiais obtidos pela estabilização de lodo de esgoto com aditivos ligantes depende, principalmente, do tipo e quantidade desses aditivos. O uso de cinzas volantes é uma solução benéfica porque o lodo estabilizado é caracterizado por maior resistência do que o lodo apenas desidratado por meio de uma prensa.

Substituir cimento por lodo de esgoto não é uma boa solução, porque sua participação na mistura diminui, o que se traduz diretamente em uma menor resistência dos materiais endurecidos. Uma solução mais vantajosa é o uso de lodo de esgoto como um substituto parcial para agregados finos (por exemplo, areia) (Chang *et al.*, 2020).

O impacto negativo da presença de lodo em misturas de cimento pode ser reduzido pela modificação da proporção de óxidos ativos. A alta participação de óxidos de CaO e pozolânicos (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3) no lodo pode contribuir para a reação pozolânica em uma mistura cimentícia, portanto, a diminuição da resistência à compressão é menor (Świerczek; Cieślik; Konieczka, 2021).

Considerações finais e perspectivas futuras

Os lodos de estações de tratamento de efluentes são resíduos promissores para uso em materiais de construção. Os principais componentes são os óxidos de cálcio, ferro e alumínio, que são componentes essenciais dos cimentos, telhas, tijolos e agregados leves comerciais.

As cinzas de lodo apresentam maior teor destes óxidos devido à perda de volatilidade e decomposição da matéria orgânica patogênica, apresentando alta atividade pozolânica e melhor trabalhabilidade. O processo de sinterização garante a imobilização dos metais pesados, incorporando-os ao material.

A quantidade de lodo adicionada é recomendada em até 15% em peso nos cimentos e 20% em peso nas telhas, tijolos e agregados leves, para não afetar significativamente as propriedades físicas e mecânicas do material de construção.

Além disso, minerais pozolânicos como aditivos aos lodos são essenciais na melhora estrutural dos materiais, dentre eles estão a

escória de alto forno, cinzas volantes e cal.

Pesquisas futuras são necessárias, com foco nos efeitos adversos da aplicação do lodo nos materiais de construção. É interessante explorar um método de pré-tratamento do lodo mais eficaz na remoção da matéria orgânica e melhorias nas propriedades mecânicas, físicas e atividades químicas dos materiais cimentícios, visando a melhorar a quantidade e a qualidade da utilização do lodo. Seu desempenho e durabilidade a longo prazo precisam de mais investigações para determinar o risco de lixiviação de metais pesados, ataque de ácido/sulfato, carbonatação, congelamento-degelo e corrosão.

Deve-se ter em mente que resistência, trabalhabilidade, tempo de pega ou absorção de água não são as únicas características que são afetadas pela presença de lodo na mistura de cimento. Para uma avaliação detalhada, outros aspectos, como segurança ambiental ou outras propriedades mecânicas, também devem ser considerados. Antes de considerar qualquer aplicação em escala tecnológica, o teste em escala de laboratório deve sempre ser apoiado por dados obtidos durante ensaios em escala industrial.

REFERÊNCIAS

- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ABOUELELA A.R.; MUSSA A.A.; TALHAMI M. DAS P.; HAWARI A.H. Industrial sludge valorization and decontamination via lipid extraction and heavy metals removal using low-cost protic ionic liquid. **Science of The Total Environment**, v. 835, p. 155451-155451, 2022.
- ALSAEDI, A.; CCHEM M., T. D. M.; BALAKRISHNAN, V.; SHAAH, M. ; MOHD Z. M. M.; ISMAIL, N.; NAUSHAD, M.; BATHULA, C. Extraction and separation of lipids from municipal sewage sludge for biodiesel production: Kinetics and thermodynamics modeling. **Fuel**, v. 325, p. 124946, 2022.
- AKASH V.A; THANKACHAN, A.; SANKAR, S.; SHIFA, K, PARAPPATTU, N.B. Use of industrial sludge as an ingredient in brick. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 3, p. 3077-3079, 2018.

AMIN, SH.K; ABDEL HAMID, E.M.; EL-SHERBINY, S.A.; SIBAK, H.A.; ABADIR; M.F. The use of sewage sludge in the production of ceramic floor tiles. **HBRC Journal**, v. 14, n. 3, p. 309-315, 2018.

ASSAF, A. **Aproveitamento do lodo de ETE em materiais de construção**. 2020. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/aproveitamento-lodo-ete-materiais-construcao/>. Acesso em: 1 jun. 2024.

BAGHERI, M; BAUER, T.; BURGMAN, L. E.; WETTERLUND, E. Fifty years of sewage sludge management research: mapping researchers' motivations and concerns. **Journal Of Environmental Management**, v. 325, p. 116412, 2023.

BASU, D.; PAL, P.; PRAKASH, A. Utilization of waste sludge in cementitious Matrix: A feasibility study. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1375-1381, 2022.

CHANG, Z.; LONG, G.; ZHOU, J.; CONG, M. Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 154, p. 104606, 2020.

CHIOU I.J.; WANG K.S.; CHEN C.H.; LIN Y.T. Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. **Waste Management**, v. 26, n. 12, p. 1453-1461, 2006.

COMANDO NOTÍCIA. **Brasil chega a 227 quilos de materiais de entulho por habitante**. 2024. Disponível em: <https://comandonoticia.com.br/brasil-chega-a-227-quilos-de-materiais-de-entulho-por-habitante/>. Acesso em: 7 jun. 2024.

DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S.; LYNN, C. J. Sewage Sludge Ash Characteristics. **Sustainable Construction Materials**, p. 69-110, 2017.

DINIZ, M. A. O. M.; MELO, D. C. P. Potencial aproveitamento de lodo de ETE na construção civil em Recife/PE. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 5, p. 187-203, 2019.

ELLIOT, T.; VIGIER, M.; LEVASSEUR, A. Spatio-temporal metabolic rifts in urban construction material circularity. **Resources, conservation and recycling**, v. 205, p. 107567-107567, 2024.

FERNANDES, P. F.; OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. Reciclagem do lodo da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de revestimentos cerâmicos. Parte 1: ensaios laboratoriais. **Cerâmica Industrial**, v.8, n. 2, p. 26-34, 2003.

FRANUS, M.; BARNAT-HUNEK, D.; WDOWN, M. Utilization of sewage sludge in the manufacture of lightweight aggregate. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, n. 1, 2015.

Gao, N.; Li, J.; Qi, B.; Li, A.; Duan, Y.; Wang, Z. Thermal analysis and products distribution of dried sewage sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 105, p. 43-48, 2014.

GHERGHEL, A.; TEODOSIU, C.; GISI, S. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 244-263, 2019.

GINGA, C. P.; ONGPENG, J. M. C.; DALY, MA. K. M. Circular Economy on Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Material Recovery and Production. **Materials**, v. 13, n. 13, p. 2970, 2020.

GOMES, S. C. ZHOU, J. L.. LI, W.; LONG, G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, p. 148-159, 2019.

GUO, S. ; DONG. R.; CHANG, Z.; XIE, Y.; CHEN, G.; LOMG, G. Performance and microstructure of sustainable cementitious materials mixed by municipal sewage sludge ash, slag, and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 130028, 2023.

- HAMOOD, A.; KHATIB, J. M.; WILLIAMS, C. The effectiveness of using Raw Sewage Sludge (RSS) as a water replacement in cement mortar mixes containing Unprocessed Fly Ash (u-FA). **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 27-34, 2017.
- INGUNZA, D.; QUIÑONES, K.M. D. P. LIMA, A. NASCIMENTO, R. Use of Sewage Sludge as Raw Material in the Manufacture of Roofs. **Advances in Engineering Research**, 2015.
- IPPOLITO, J. A.; BARBARICK, K. A.; ELLIOTT, H. A. Drinking Water Treatment Residuals: A Review of Recent Uses. **Journal of Environmental Quality**, v. 40, n. 1, p. 1-12, 2011.
- JAYARAMAN, K.; GÖKALP, I. Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge. **Energy Conversion and Management**, v. 89, p. 83–91, 2015.
- LAU, P. C.; TEO, D. C. L.; MANNAN, M. A. Characteristics of lightweight aggregate produced from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 558–567, 2017.
- LEE, Y. E.; KIM, I. T.; YOO, Y. S. Stabilization of High-Organic-Content Water Treatment Sludge by Pyrolysis. **Energies**, v. 11, n. 12, p. 3292, 2018.
- LIANG, Y. *et al.* Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, p. 126456, 2021.
- LIU, B. *et al.* Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China. **Science of The Total Environment**, v. 447, p. 361-369, 2013.
- LIU, Z. *et al.* Utilization of the sludge derived from dyestuff-making wastewater coagulation for unfired bricks. **Construction & building materials**, v. 25, n. 4, p. 1699-1706, 2011.
- LYNN, C. J.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S. Environmental impacts of sewage sludge ash in construction: Leaching assessment. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 306–314, 2018.
- MATHEW, G. M. *et al.* Recent advances in biodiesel production: Challenges and solutions. **Science of The Total Environment**, v. 794, n. 794, p. 148751, 2021.
- MATOS, A. C. M.; ISEWAKI, N. T. Alternativa de aplicação de lodo de estação de tratamento de esgoto em cobertura de aterros sanitários. *In*: Congresso Mineiro De Engenharias E Arquitetura. **Anais eletrônico [...]**. Belo Horizonte, CEMEA, 2017.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Boletim do Setor Mineral**. 2. ed. Brasília: MME, 2019. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/78404/0/BOLETIM+SETOR+MINERAL.pdf/acb1ca8db2bd-825c-03e8-939e87f94682>. Acesso em: 01 jun. 2024.
- MOHAMAD, G. *et al.* Caracterização mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural - previsão e modo de ruptura. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 14, n. 2, p. 824–844, 2009.
- MOREIRA, S. F. *et al.* ETE sludge as an alternative to soil recovery in degraded areas. **Brazilian Applied Science Review**, v.3, n.3, p.1564-1585, 2019.
- MOURA, L. S. **Utilização de lodo de tratamento têxtil em revestimentos asfálticos: Uma análise mecânica, microscópica e ambiental**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.
- NGUYEN, M. D. *et al.* Investigation on the suitability of aluminium-based water treatment sludge as a sustainable soil replacement for road construction. **Transportation Engineering**, v. 12, p. 100175-100175, 2023.
- O GLOBO. **Dia da Água: Lodo de estações de tratamento vira gás combustível e matéria-prima**. 2023. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/negocios/noticia/2023/03/dia-mundial-da-agua-lodo-de-estacoes-de-tratamento-vira-gas-combustivel-e-materia-prima.ghtml>. Acesso em: 5 jun. 2024.

- OLIVEIRA, D. D. *et al.* Produção de Blocos de Concreto Empregando Efluente Tratado por Lodos Ativados e por Lagoas de Estabilização. **Revista Virtual de Química**, v.8, n. 4, p.1054-1066, 2016.
- OLIVEIRA, G.; KIKKAWA, L. S.; SANTOS, A. M. Reutilização de lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) na região de Suzano, São Paulo, Brasil: alternativas e oportunidades. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, n. 11, p. 999-1007, 2018.
- PARIS, J. M. *et al.* A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1-18, 2016.
- PURCHASE, C. K. *et al.* Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 76, 2021.
- RAHMAN, MD. M. *et al.* Textile Effluent Treatment Plant Sludge: Characterization and Utilization in Building Materials. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 42, n. 4, p. 1435–1442, 2016.
- ROCCARO, P., FRANCO, A., CONTRAFATTO, L., VAGLIASINDI, F.G.A. Use sludge from water and wastewater treatment plants in the production of concrete: an effective end-of-waste alternative. **In: Proceeding of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology**, 2015.
- RORAT, A. *et al.* Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management. **Industrial and Municipal Sludge**, p. 155–180, 2019.
- Sabesp. Disponível em: <<https://www.sabesp.com.br/>>. Acesso em: 23 out. 2024.
- SHIH, P. H. *et al.* Reuse of heavy metal-containing sludges in cement production. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11, p. 2110-2115, 2005.
- SINIR. **Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR)**. 2020. Disponível em: <https://www.sinir.gov.br/informacoes/tipos-deresiduos/residuos-dos-servicos-de-saneamento-basico/>. Acesso em: 01 jun. 2024.
- SMOL, M. *et al.* The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 45-54, 2015.
- SOUZA, M. F. DE; SORIANO, J.; PATINO, M. T. O. Resistência à compressão e viabilidade econômica de blocos de concreto dosado com resíduos de tijolos cerâmicos. **Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.
- STOJMENOVIĆ, M. *et al.* Sustainable Application of Waste Sludges from the Wastewater Treatment Plant Generated during the Production of Heating Devices in the Construction Industry. **Materials**, v. 17, n. 5, p. 1089, 2024.
- SUCHORAB, Z. *et al.* Mechanical and Physical Properties of Hydrophobized Lightweight Aggregate Concrete with Sewage Sludge. **Materials**, v. 9, n. 5, p. 317, 27 abr. 2016.
- SUPINO, S. *et al.* Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 430-442, 2016.
- ŚWIERCZEK, L.; CIEŚLIK, B. M.; KONIECZKA, P. Challenges and opportunities related to the use of sewage sludge ash in cement-based building materials – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125054, 2021.
- ŚWIERCZEK, L.; CIEŚLIK, B. M.; KONIECZKA, P. The potential of raw sewage sludge in construction industry – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 342-356, 2018.
- TANTAWY, M. A. *et al.* Evaluation of the Pozzolanic Activity of Sewage Sludge Ash. **ISRN Chemical Engineering**, v. 2012, p. 1-8, 2012.

TRANG, N. T. M.; HO, N. A. D.; BABEL, S. Reuse of waste sludge from water treatment plants and fly ash for manufacturing of adobe bricks. **Chemosphere**, v. 284, p. 131367, 2021.

UKWATTA, A. *et al.* Possible use of biosolids in fired-clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 86–93, 2015.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Shaping the future of construction: a breakthrough in mindset and technology**. 2016. Disponível em: https://web.archive.org/web/20200720213340/http://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report_.pdf. Acesso em: 01 jun. 2024.

XIA, Y. *et al.* Value-added recycling of sludge and sludge ash into low-carbon construction materials: current status and perspectives. **Low-carbon Materials and Green Construction**, v. 1, n. 1, 2023.

YAMUNA RANI, M. *et al.* Preparation and characterization of green bricks using pharmaceutical industrial wastes. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 10, p. 9323–9333, 2015.

YANG, J. *et al.* Durability of autoclaved construction materials of sewage sludge–cement–fly ash–furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 398–405, 2013.

YANG, F. *et al.* Synergistic effects of amorphous porous materials and anhydrous Na₂CO₃ on the performance of bricks with high municipal sewage sludge content. **Journal of cleaner production**, v. 280, p. 124338-124338, 2021.

YANG, L. *et al.* Use of bauxite tailing for the production of fine lightweight aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 372, p. 133603, 2022.

YU, L. *et al.* Recycling reuse of municipal sewage sludge in sustainable structural materials: Preparation, properties, crystallization and microstructure analyses. **Construction & building materials**, v. 398, p. 132507-132507, 2023.

ZHANG, Y. M. *et al.* Fabrication, microstructure and properties of bricks fired from lake sediment, cinder and sewage sludge. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 154-160, 2016.

