

PRODUÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS A PARTIR DA REUTILIZAÇÃO DE CINZAS DE LODO DE EFLUENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

¹PATRICIA BARROS VIANA, GLÓRIA MARIA MARINHO SILVA, JUCELINE BATISTA DOS SANTOS BASTOS,
²ESEQUIEL FERNANDES TEIXEIRA MESQUITA

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE),

²Universidade Federal do Ceará (UFC)

<patybarrosviana@gmail.com>, <gloriamarinho@ifce.edu.br>, <juceline.santos@ifce.edu.br>, <emesquita@ufc.br>

DOI: 10.21439/conexoes.v18i0.3152

Resumo. Os lodos de efluentes, resíduos sólidos provenientes do tratamento de água residuais, demandam um gerenciamento efetivo, dada a considerável quantidade gerada nos centros urbanos e as condições exigidas necessárias para sua disposição final. A produção de materiais sustentáveis, que incorporem a reutilização de tais resíduos, contribui para a redução de emissões de CO₂. O objetivo deste trabalho consistiu em avaliar a produção de materiais sustentáveis utilizando as cinzas derivadas desses lodos. A metodologia sistemática de literatura tipo *Methodi Ordinatio* foi aplicada para classificar artigos com base no fator de impacto da revista, ano de publicação e número de citações. A análise dos artigos publicados nos últimos cinco anos (2018 a 2022) revelou duas tendências principais: a aplicação da tecnologia de solidificação/estabilização (S/E) para materiais perigosos à base de cimento e a fabricação de materiais como blocos de concreto, tijolos e compósitos cimentícios ecológicos. A reutilização de lodos, principalmente na forma de cinzas, apresenta potencial para a produção de materiais sustentáveis na construção civil e na infraestrutura, contribuindo assim para a gestão ambiental.

Palavras-chaves: Lodo de esgoto. Materiais sustentáveis. Reutilização. Construção civil.

PRODUCTION OF SUSTAINABLE MATERIALS FROM THE REUSE OF EFFLUENT SLUDGE ASH: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Abstract. Effluent sludge, solid waste from wastewater treatment, demand effective management due to the considerable quality generated in urban centers and the necessary conditions for their final disposal. The production of sustainable materials incorporation the reuse of theses residues contributes to the reduction of CO₂ emissions. The objective of this work was to assess the production of sustainable materials using the ashes derived from these sludge. The systematic literature review methodology, *Methodi Ordinatio*, was applied to classified papers based on journal impact factor, publication year, and citation count. The analysis of articles published in the last five years (2018 to 2022) revealed two main trends: the application of solidification/stabilization (S/E) technology for hazardous cement-based materials and the manufacturing of materials such as concrete blocks, bricks, and ecological cementitious composites. The reuse of residues, primarily in the form of ashes, holds potential for the production of sustainable materials in civil construction and infrastructure, thus contributing to environmental management.

Keywords: Effluent sludge. Sustainable materials. Reuse. Civil construction.

1 INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto pode ser definido como um resíduo resultante do tratamento de efluentes oriundo de várias fontes, entre elas, residências, indústrias, hospitais, escoamento de ruas e comércios (Zuloaga et al., 2012). Esse subproduto consequente das águas residuais, apesar de ter potencial poluidor e necessitar de tratamento, pode-se tornar uma matéria-prima com valor agregado em diversas áreas, como na construção civil. O lodo de esgoto é também uma fonte potencial de nutrientes agrícolas e energia através da digestão anaeróbica e da combustão (Bagheri et al., 2023).

Em 2017, foram produzidos aproximadamente 45 milhões de toneladas de lodo seco de esgoto em escala global (Gao et al., 2020). Com o aumento populacional da Europa e as modificações de legislações sobre disposição de resíduos, estima-se que a União Europeia tenha produzido em 2020, 13 milhões de toneladas de lodo seco Garrido-Baserba et al. (2015), já a China com uma participação de 40 milhões de toneladas em 2020 (Lishan et al., 2018). No caso do Brasil, segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Sinir (2020), a geração anual desse tipo de resíduo fica em torno de 81 milhões de toneladas.

Tendo em vista os volumes apreciáveis produzidos nos centros urbanos e as condições exigidas pela legislação para a sua disposição final, uma concreta gestão se faz necessária em relação aos lodos de efluentes (Fontes; Filho; Barbosa, 2016). A norma brasileira NBR 10004/2004 ABNT (2004) classifica os lodos de tratamento de efluentes líquidos como resíduos sólidos, passíveis de destinação e tratamento adequado conforme os órgãos regulamentadores. No país, foram criadas regras para o uso do lodo na agricultura, através das Instruções Normativas números 23, 27 e 35 e as Resoluções nº 375/2006 e 380/2006, e para procedimentos de aplicação e produção de biossólidos no solo, com a Resolução nº 498/ 2020 e Instruções Normativas 25 e 23 (Lima et al., 2022).

Em relação aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) dispostos pelas Nações Unidas, o gerenciamento dos lodos de esgotos de forma a promover uma sociedade sustentável é um objetivo difícil e desafiador (Mason-Renton et al., 2019). O lodo, resíduo de um tratamento que visa diminuir os riscos à saúde da população e ao meio ambiente, ao mesmo tempo pode ser uma fonte potencial para fertilizantes agrícolas e de energia (Bagheri et al., 2023). Os ODS envolvidos no gerenciamento desse tipo de material e que precisam ser mais compreendidos diante desse tema, são: (ODS 6) água potável e saneamento, (ODS 3) saúde e bem-estar, (ODS 7) energia limpa e acessível, (ODS 2) fome zero

e agricultura sustentável, (ODS 12) consumo e produção sustentáveis, (ODS 14) vida na água e (ODS 15) vida terrestre. Observa-se que ao serem identificados e considerados simultaneamente, acabam sendo considerados controversos e de alguma forma incompatíveis (Bagheri et al., 2023).

Reaproveitar recursos valiosos enquanto protege o meio ambiente é um centro de gestão sustentável de lodo de esgoto. Para cumprir isso, não só viabilidade técnica e maturidade são importantes, mas a legislação, aceitação e custo também desempenham papéis importantes (Shaddel et al., 2019). Diante disso, o objetivo deste trabalho é discutir sobre as potencialidades de reuso do lodo de esgoto voltadas para a produção de materiais sustentáveis a partir de uma revisão de literatura.

2 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, que aborda a produção de materiais sustentáveis através de resíduos, foi realizada a busca de artigos científicos no portal periódico CAPES, através da base de dados *Science Direct* com a utilização das palavras-chaves “sewage sludge”; “construction material”; “reuse”; “sustainable”, estando as palavras compostas entre aspas e interligadas pelo conectivo AND. O período de busca compreendeu a escala temporal dos últimos cinco anos (2018 a 2022), possibilitando a avaliação dos estudos mais recentes publicados no portal.

Após a pesquisa, para a revisão sistemática de literatura aplicou-se o Methodi Ordinatio, descrito por Pagani, Kovaleski e Resende (2015). Trata-se de uma metodologia para levantamento de trabalhos, utilizando três critérios de análise para uma publicação ser utilizada: o número de citações, o fator de impacto e o ano de publicação (Pagani; Kovaleski; Resende, 2017), conforme a Equação 1:

$$InOrdination = \left(\frac{F_i}{1000} \right) + (10 \times (10 - (A' - A''))) + C_i \quad (1)$$

Sendo:

F_i: Fator de impacto;

A': Ano da pesquisa;

A'': Ano da publicação;

C_i: Número de citações.

Através dessa metodologia é possibilitado, com a aplicação da equação citada anteriormente, a classificação dos artigos científicos em relação a sua relevância significativa, devido à consideração dos três fatores

mais importantes em um artigo científico (Pagani; Kovalski; Resende, 2017).

Desta forma, a escolha dos materiais a serem lidos e analisados foi realizada através de três etapas: primeiramente considerando os artigos que se adequavam ao objetivo proposto, no segundo momento selecionando os que estivessem no formato de artigos científicos e que não estivessem repetidos, e por fim através da definição do espaço-temporal, leitura dos títulos, e *abstract*, restando os artigos científicos selecionados para serem lidos por completo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a realização da busca de artigos científicos no periódico em questão, foram encontrados 142 resultados. Após a escolha do intervalo temporal, leitura dos títulos e *abstract*, foram totalizados 15 trabalhos a serem analisados e integrarem esta revisão, como demonstrado na Tabela 1.

A partir da aplicação da equação (1), considerando o fator de impacto referente ao ano de 2022, o número de citações e o ano de publicação, foi calculado a classificação dos trabalhos a serem analisados, resultando nos seguintes artigos científicos apresentados na Tabela 2.

Após a análise das experiências, os trabalhos relacionados a materiais sustentáveis estavam voltados para a utilização de lodos de esgotos na produção de diferentes materiais, sendo distribuídos em: 35,7% para o tratamento de estabilização/solidificação, 21,4% para materiais cimentícios suplementares, 14,3% para os materiais de baixa resistência controlada e produção de tijolos, e aproximadamente 7% para blocos de concreto e compósitos cimentícios ecológicos, conforme 1.

Além disso, levando em consideração a distribuição geográfica dos artigos científicos com base nas filiações dos autores, foram obtidos trabalhos com autorias provenientes de treze (13) diferentes países. Conforme demonstrado na Figura 2, o maior destaque de publicações foi observado no país da China, liderando com nove (09) publicações sobre o assunto, seguido de Hong Kong com seis (06) publicações e Coreia do Sul juntamente do Reino Unido com duas (02) publicações, estando o restante dos países participantes com uma (01) publicação.

O tratamento a partir da técnica de solidificação/estabilização para materiais perigosos, foi um dos temas mais abordados pelos autores considerados na pesquisa. Wang et al. (2019) analisaram a influência de minerais ricos em silício com diferentes características (cinzas volantes, cinzas de lodo de esgoto incinerado e pó de vidro) na formação de gel de silicato de magné-

sio hidratado (M-S-H) em cimento à base de óxido de magnésio (MgO) reativo para aplicação da técnica de S/E em sedimentos contaminados. Os autores observaram que os minerais ricos em silício (Si) influenciaram significativamente a formação e polimerização do gel M-S-H. As cinzas volantes pulverizadas mostraram ser um mineral rico em Si, promissor para gerar o gel polimérico M-S-H, diferentemente das amostras de cinzas de lodo de esgoto incinerado, com um baixo grau de polimerização e o uso de amostras de pó de vidro, com baixo rendimento de M-S-H.

Já Hossain et al. (2020) avaliaram a sustentabilidade ambiental das tecnologias (S/E) para gerenciar sedimentos marinhos contaminados e cinzas volantes de incineração de resíduos sólidos urbanos através da avaliação do ciclo de vida (ACV). Dos cenários avaliados, o Cenário 1, que considera a mistura de sedimentos com uma pequena porcentagem de Cimento Portland e cinzas de lodo de esgoto incinerado (1,7% cimento Portland e 3,3% de cinza de lodos de esgoto) juntamente da Estratégia 1 (uso como materiais de preenchimento) tornou-se a opção preferida, reduzindo cerca de 54% e 70% do potencial de aquecimento global em relação aos Cenários 2 (1% Cimento Portland, 4% de escória granulada de alto forno) e Cenário 3 (5% Cimento Portland, 4% de cinzas de lodo de esgoto), respectivamente.

Wang et al. (2022) estudaram a remediação de sedimentos marinhos contaminados e reciclados através da técnica S/E à base de cimento incorporando compósitos de ferro-biocarbão derivados de cinzas de lodo de esgoto incinerado e casca de amendoim. A incorporação de 20% de compósitos de ferro-biocarbão aumentou a imobilização de cromo (Cr) em 52,8% para 92,1–99,7% e eficiências de imobilização de Arsênio (Ar) com 70% e cobre (Cu) com 95%, semelhantes em comparação com o grupo controle (GC), preparado com cimento simples como aglutinante. Os produtos S/E tiveram resistência mecânica de 5,0 MPa, significativamente maior que suas contrapartes derivadas de óxido de ferro puro ou biochar puro (< 4,5 MPa).

Zhou et al. (2022) investigaram o potencial de uso das cinzas de lodo de esgoto incinerado (CLEI) junto com aglutinantes tradicionais para também solidificar/estabilizar sedimentos marinhos. Os sedimentos tratados com 10% de cimento e 20% de CLEI atingiram a maior resistência, já os sedimentos tratados com S/E por 10% de cal e 20% de CLEI resultaram em menores concentrações de lixiviado no cenário de reutilização no local ou sob condições simuladas de chuva ácida. Zhou et al. (2021) também relataram a avaliação dos efeitos da água do mar no desempenho mecânico e nas propriedades microestruturais do ligante de cinzas

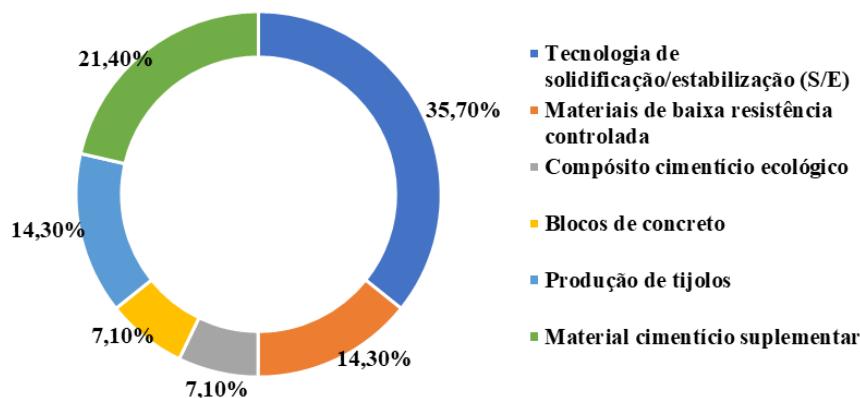
PRODUÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS A PARTIR DA REUTILIZAÇÃO DE CINZAS DE LODO DE EFLUENTES: UMA
REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Quadro 1: Resultados da busca sistemática realizada na base de dados.

Palavras-chave e combinações	Base de dados Science Direct				Total
	Resultados	Intervalo (2018-2022)	Títulos	Abstract	
“sewage sludge” AND “construction material” AND reuse AND sustainable	142	55	33	7	15

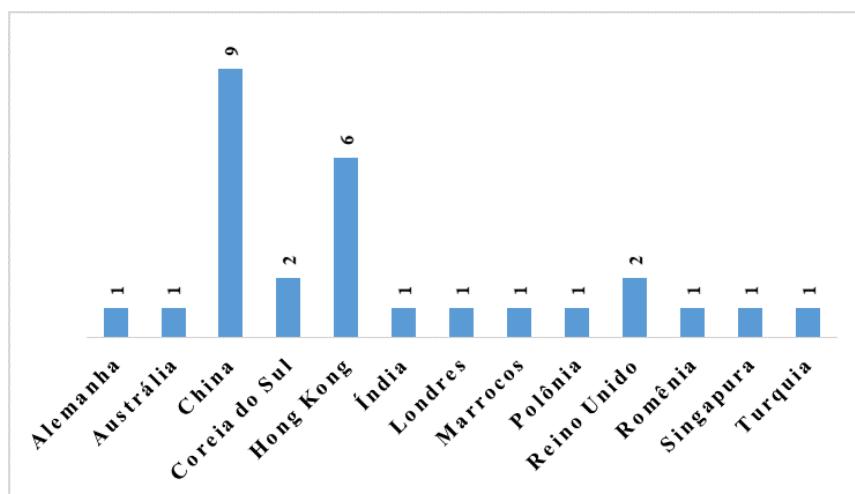
Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Figura 1: Porcentagem dos tipos de materiais encontrados.



Fonte: Fonte: Autores (2023).

Figura 2: Lista de países participantes no desenvolvimento dos artigos selecionados.



Fonte: Fonte: Autores (2023).

de lodo de esgoto de incineração junto com cal anidra e cal hidratada (S/E) feito para ambiente marinho. Os

autores concluíram que o uso de cal anidra pode mitigar a redução de resistência causada pelos sais de Friedel,

PRODUÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS A PARTIR DA REUTILIZAÇÃO DE CINZAS DE LODO DE EFLUENTES: UMA
REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Quadro 2: Classificação dos artigos científicos selecionados pelo methodi ordinatio.

Nº	Autores	Artigos	Fi	Ci	Ano	InOrdination
1	Lei Wang, Liang Chen, Dong-Wan Cho, Daniel C.W. Tsang, Jian Yangb, Deyi Hou, Kitae Baek, Harn Wei Kuae, Chi-Sun Poon	Novel synergy of Si-rich minerals and reactive MgO for stabilisation/solidification of contaminated sediment.	14,224	126	2019	196,014
2	Zhen Chen, Jiang Shan Li, Chi Sun Poon	Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks.	11,072	102	2017	152,011
3	Yifan Zhou, Jianxin Lu, Jiangshan Li, Chris Cheeseman, Chi Sun Poon	Recycling incinerated sewage sludge ash (ISSA) as a cementitious binder by lime activation.	11,072	57	2020	127,011
4	Lei Wang, Fuliao Zou, Xiaoliang Fang, Daniel C.W. Tsang, Chi Sun Poon, Zhen Leng, Kitae Baek	A novel type of controlled low strength material derived from alum sludge and green materials.	7,693	56	2018	116,008
5	Ertugrul Erdogmus, Maria Harja, Osman Gencel, Mucahit Sutcu, Ali Yaras	New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes.	7,144	21	2021	111,007
6	Yifan Zhou, Guanghua Cai, Chris Cheeseman, Jiangshan Li, Chi Sun Poon	Sewage sludge ash-incorporated stabilisation/solidification for recycling and remediation of marine sediments.	8,91	8	2021	108,009
7	Houssame Limami, Imad Manssouri, Khalid Cherkaooui, Asmae Khaldoun	Recycled wastewater treatment plant sludge as a construction material additive to ecological lightweight earth bricks.	0,9	15	2021	105,001
8	Md. Uzzal Hossain, Lei Wang, Liang Chen, Daniel C.W. Tsang, S. Thomas Ng, Chi Sun Poon, Viktor Mechtcherine	Evaluating the environmental impacts of stabilization and solidification technologies for managing hazardous wastes through life cycle assessment: A case study of Hong Kong.	13,352	23	2020	103,013
9	Piotr Gorak, Przemysław Postawa, Lidia Natalia Trusilewicz, Aleksandra Kalwik	Cementitious eco-composites and their physicochemical/mechanical properties in Portland cement-based mortars with a lightweight aggregate manufactured by upcycling waste by-products.	11,072	13	2021	103,011

PRODUÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS A PARTIR DA REUTILIZAÇÃO DE CINZAS DE LODO DE EFLUENTES: UMA
REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

10	Zhiyang Chang, Guangcheng Long, Youjun Xie, John L. Zhou	Chemical effect of sewage sludge ash on early-age hydration of cement used as supplementary cementitious material.	7,693	3	2022	103,008
11	Zhiyang Chang, Guangcheng Long, Youjun Xie, John L. Zhou	Recycling sewage sludge ash and limestone for sustainable cementitious material production.	7,144	3	2022	103,007
12	Qiming Wang, Jiangshan, Qiang Xue, Chi Sun Poon	Immobilization and recycling of contaminated marine sediments in cement-based materials incorporating iron-biochar composites.	14,224	1	2022	101,014
13	Debolina Basu, Priyaranjan Pal, Ankit Prakash	Utilization of waste sludge in cementitious Matrix: A feasibility study.	2,3	0	2022	100,002
14	Yifan Zhou, Jianxin Lu, Jiangshan Li, Chris Cheeseman, Chi Sun Poon	Influence of seawater on the mechanical and microstructural properties of lime-incineration sewage sludge ash pastes.	7,693	5	2021	95,0077
15	Jiang-Shan Li, Yifan Zhou, Xin Chen, Qiming Wang, Qi-ang Xue, Daniel C.W. Tsang, Chi Sun Poon	Engineering and microstructure properties of contaminated marine sediments solidified by high content of incinerated sewage sludge ash.	5,915	11	2020	91,0059

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

encontrado nas amostras, nas idades posteriores.

Por fim, Li et al. (2021) estudaram a utilização de alto teor de CLEI (20% de sedimento em massa) juntamente de cimento/cal para tratamento de sedimentos marinhos contaminados dragados (SMDs) por S/E. A porosidade das cinzas absorveu uma grande quantidade de água, tornando o processo de solidificação do sedimento marinho mais eficiente. Apesar da técnica S/E ter reduzido a trabalhabilidade, especialmente para as amostras tratadas com cal, as propriedades de engenharia do sedimento melhoraram. As amostras de sedimento endurecido preparadas com 10% de cal e 20% de CLEI puderam atingir uma resistência de 1,6 MPa após 28 dias de cura e os testes de lixiviação confirmaram que não havia risco ambiental induzido pelos materiais, demonstrando o potencial da cal ser usada para substituir o cimento Portland comum na imobilização de metais pesados e redução de emissão de carbono.

As propriedades de blocos de concretos produzidos a partir de cinzas de lodo de esgoto (CLE) foram in-

vestigadas por Chen, Li e Poon (2018). As cinzas foram adicionadas a agregados reciclados de construção e demolição ou caco de vidro (CV) substituindo parcialmente os agregados naturais, pelo método de compressão de mistura seca (*slump zero*). Observou-se que a CLE possui atividade pozolânica moderada e aumento da resistência à compressão a longo prazo, sendo de 20% o teor ideal de CLE para produzir blocos de concreto com resistência satisfatória e baixo risco de reação álcali-sílica. A retração por secagem foi reduzida significativamente e os testes de lixiviação mostraram conformidade com os limites regulamentares. Os autores indicam a possibilidade de se produzir blocos de concreto para pavimentação com propriedades mecânicas, durabilidade e de lixiviação satisfatórias, além de auxiliar na reciclagem de dois tipos de resíduos sólidos.

Zhou et al. (2020) desenvolveram um ligante cimentício ecologicamente correto com a adição de 10, 20 e 30% em peso de cal em cinzas de lodo de esgoto incinerado para obter diferentes relações cal/cinzas, rea-

PRODUÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS A PARTIR DA REUTILIZAÇÃO DE CINZAS DE LODO DE EFLUENTES: UMA
REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

lizando também o teste comparativo com cimento Portland comum. O sistema alcançou propriedades mecânicas ótimas com a mistura de 30% de cal, onde os valores de resistência mostraram notável melhora de 28 para 90 dias de cura. As pastas contendo cal apresentaram maiores quantidades de calor e maior reatividade do que as pastas contendo cimento. As fases cristalinas responsáveis pelo desenvolvimento da resistência foram principalmente a brushita e os hidratos de fosfato de cálcio, demonstrando o potencial do ligante a base de cal para serem utilizados no desenvolvimento de novos materiais de baixa resistência controlados.

Wang et al. (2018) também estudaram sobre o desenvolvimento de materiais de baixa resistência controlada, desta vez, através de um método inovador utilizando lodo de alumínio, gerado em estações de tratamento de água. O lodo foi adicionado como substituto parcial do agregado miúdo reciclado para a produção de material de baixa resistência controlada (MBRC). A adição da lama de alumínio resultou em longo tempo de endurecimento final e baixa resistência à compressão. Com isso, a cinza volante pulverizada (CVP) foi considerada o SCM mais eficaz e os aceleradores à base de cálcio ou trietanolamina foram incorporados para produzir CLSM com alta fluidez (>200 mm), tempo de endurecimento relativamente curto (<24 h) e resistência à compressão moderada (0,3–1 MPa), o que facilitou que as amostras cumprissem todos os requisitos do CLSM.

Erdogmus et al. (2021) estudaram as proporções de 25, 40, 55, 70, 85 e 100% de dosagem do peso total da mistura de lodo de tratamento de água (LTA) com resíduos de tijolos de argila queimados para a produção de novos tijolos. Cada série envolveu a queima da argila a 1000 °C por cerca de duas horas. Os resíduos de ETA apresentaram uma resistência à compressão superior duas vezes ao limite mínimo e a eflorescência de todos os tijolos ficaram em nível leve. Os testes mostraram que os tijolos com 70–85% de LTA possuem características adequadas e podem ser efetivamente usados como materiais de construção civil.

Já Limami et al. (2021) analisaram as propriedades mecânicas, físico-químicas e térmicas de tijolos de terra do tipo não queimado com as porcentagens de aditivo de lodo (0%, 1%, 3%, 7%, 15% e 20%) por peso de material. Os aumentos do teor de lodo na matriz das amostras produziram corpos de prova até 17% mais porosos em relação às amostras de controle, com 1,04% de porosidade. O coeficiente de absorção capilar de água igual a 47,15 g/(cm².min0,5) e a resistência à compressão de 3,95 MPa foram menores em comparação aos valores de referência, 25,10 g/(cm².min0,5) e 6,17 MPa, respectivamente. Por fim, houve melhorias no desem-

penho térmico, com ganhos de 43%, e na condutividade térmica e capacidade de calor específico, com 30

Gorak et al. (2021) apresentaram resultados de testes sobre compósitos cimentícios ecológicos com agregados leves compostos (ALCs) substituindo parcialmente os agregados naturais. As argamassas de cimento modificado: flocos de polímeros termoplásticos (PET) e fluxos de cinzas volantes de lodo de esgoto ou cinzas volantes siliciosas, fabricadas em condições de laboratório usando 100% de subprodutos residuais foram testadas em várias séries de CLAs aplicando substituições de volume de 10% e 25% em relação ao agregado padrão (EN 196-1). A utilização do ALC como substituto do agregado padrão permitiu reduzir o teor de água na mistura, mantendo uma boa trabalhabilidade e aumentando as resistências à compressão e à flexão em até 25% da argamassa de referência.

Chang et al. (2022a) investigaram o efeito químico da adição de cinzas do lodo de esgoto calcinados a 600 °C (S600) e 800 °C (S800) na hidratação precoce do cimento como um material cimentício suplementar. A adição de cinzas S600 promoveu um alto calor inicial de hidratação e a inibição significativa da dissolução de C3S. Já a cinza S800 teve um leve efeito na hidratação inicial do cimento e em comparação com a referência, o calor cumulativo de hidratação da pasta misturada com 30% de cinza S800 em 7 dias foi aumentado em 18,72%, indicando a ocorrência de reação entre as cinzas do lodo e o cimento, o que contribuiu para mais calor de hidratação e produtos de hidratação.

Em outro estudo, Chang et al. (2022b) investigaram o efeito sinérgico da substituição parcial do cimento por cinzas de lodo de esgoto e calcário também para a produção sustentável de material cimentício suplementar. Os testes de microestrutura mostraram que a adição de calcário potencializou a formação de hidratos de carbonato-aluminato. Os produtos de hidratação adicionais preencheram grandes poros de pasta, resultando em uma microestrutura mais refinada da mistura ternária. O índice de atividade de resistência em 90 dias da argamassa, com 15% de cinzas de lodo e 7,5% de calcário, foi de 100,6% em relação à referência. Apesar do efeito adverso do calcário na resistência à compressão, reduziu-se o consumo de cimento Portland em 23,13% e a intensidade de emissão de dióxido de carbono (CO₂-eq) em 13,52%.

Por fim, Basu, Pal e Prakash (2022) utilizaram o lodo de policloreto de alumínio (PLA) de estações de tratamento como substituto parcial do cimento no concreto. Os resultados experimentais mostraram variação de resistência em diferentes níveis de substituição, que podem ser atribuídas à matéria orgânica presente no

lodo. No entanto, o concreto constituído com 10% de lodo de esgoto mostrou-se aceitável para fins de construção. Já o concreto constituído de 5% de lodo de PLA foi aceitável para construção secundária, ou seja, parede divisória. Por fim, a análise de difração de raios-X do lodo residual do PLA confirmou a presença de alumina no lodo.

4 CONCLUSÕES

A partir da revisão de literatura realizada pelo *Methodi Ordinatio*, utilizando palavras-chaves em bases de dados específicas e ordenando os trabalhos mais significativos, foi possível a condução eficaz da pesquisa, obtendo documentos atuais e relevantes para o tema.

Os temas desenvolvidos e estudados nos últimos cinco anos, relacionados à produção de materiais sustentáveis para aplicação na construção civil e na infraestrutura utilizando cinzas de lodo de efluentes, incluem o avanço da tecnologia de solidificação/estabilização (S/E) para o tratamento de sedimentos contaminados e a fabricação de materiais, como blocos de concreto para pavimentação, materiais de baixa resistência controlada, tijolos, compósito cimentício ecológico, e materiais cimentícios suplementares.

Portanto, este estudo destaca lacunas potenciais, com ênfase na combinação da técnica de solidificação/estabilização para materiais perigosos e ligantes cimentícios com diferentes propriedades. Essas descobertas contribuem para a reutilização de resíduos gerados em grande quantidade, abordando problemas ambientais e reduzindo as emissões de dióxido de carbono, um fator crucial para combater o aquecimento global.

REFERÊNCIAS

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

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**, Elsevier BV, v. 325, p. 116412, 2023.

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

CHANG, Z.; LONG, G.; XIE, Y.; ZHOU, J. L. Chemical effect of sewage sludge ash on early-age hydration of cement used as supplementary

cementitious material. **Construction And Building Materials**, Elsevier BV, v. 322, p. 126116, mar 2022.

CHANG, Z.; LONG, G.; XIE, Y.; ZHOU, J. L. Recycling sewage sludge ash and limestone for sustainable cementitious material production. **Journal Of Building Engineering**, Elsevier BV, v. 49, p. 104035, may 2022.

CHEN, Z.; LI, J. S.; POON, C. S. Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. **Journal Of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 171, p. 1447–1459, jan 2018.

COORDENACAO DE APERFEICOAMENTO DE PESSOAL DE NIVEL SUPERIOR (CAPES). **Relatório CAPES 2018-2022**. 2022. Brasília, DF.

ERDOGMUS, E.; HARJA, M.; GENCCEL, O.; SUTCU, M.; YARAS, A. New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes. **Journal Of Building Engineering**, Elsevier BV, v. 42, p. 102471, oct 2021.

FONTES, C. M. A.; FILHO, R. D. T.; BARBOSA, M. C. Sewage sludge ash (ssa) in high performance concrete: characterization and application. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, FapUNIFESP (SciELO), v. 9, n. 6, p. 989–1006, dec 2016.

GAO, N.; KAMRAN, K.; QUAN, C.; WILLIAMS, P. T. Thermochemical conversion of sewage sludge: a critical review. **Progress In Energy And Combustion Science**, Elsevier BV, v. 79, p. 100843, jul 2020.

GARRIDO-BASERBA, M.; MOLINOS-SENANTE, M.; ABELLEIRA-PEREIRA, J.; FDEZ-GÜELFO, L.; POCH, M.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F. Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems. **Journal Of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 107, p. 410–419, nov 2015.

GORAK, P.; POSTAWA, P.; TRUSILEWICZ, L. N.; KALWIK, A. Cementitious eco-composites and their physicochemical/mechanical properties in portland cement-based mortars with a lightweight aggregate manufactured by upcycling waste by-products. **Journal Of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 289, p. 125156, mar 2021.

HOSSAIN, M. U.; WANG, L.; CHEN, L.; TSANG, D. C.; NG, S. T.; POON, C. S.; MECHTCHERINE, V. Evaluating the environmental impacts of stabilization

PRODUÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS A PARTIR DA REUTILIZAÇÃO DE CINZAS DE LODO DE EFLUENTES: UMA
REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

- and solidification technologies for managing hazardous wastes through life cycle assessment: a case study of hong kong. **Environment International**, Elsevier BV, v. 145, p. 106139, dec 2020.
- LI, J.-S.; ZHOU, Y.; CHEN, X.; WANG, Q.; XUE, Q.; TSANG, D. C.; POON, C. S. Engineering and microstructure properties of contaminated marine sediments solidified by high content of incinerated sewage sludge ash. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, Elsevier BV, v. 13, p. 643, jun 2021.
- LIMA, M. d. F. d.; COSTA, A. d. F. S. d.; MATTOS, C. N. d.; COSTA, A. N. d. **Aspectos legais de utilização do lodo na agricultura**. 2022. <https://x.gd/1rENO>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- LIMAMI, H.; MANSSOURI, I.; CHERKAO, K.; KHALDOUN, A. Recycled wastewater treatment plant sludge as a construction material additive to ecological lightweight earth bricks. **Cleaner Engineering And Technology**, Elsevier BV, v. 2, p. 100050, jun 2021.
- LISHAN et al. **Comparative life cycle assessment of sludge management: A case study of Xiamen, China**. 2018. China.
- MASON-RENTON, S.; VAZQUEZ, M.; ROBINSON, C.; OBERG, G. Science for policy: a case study of scientific polarization, values, and the framing of risk and uncertainty. **Risk Analysis**, Wiley, v. 39, p. 1229–1242, jun 2019.
- PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, Springer Science and Business Media LLC, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, sep 2015.
- PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. M. d. Avanços na composição da methodi ordinatio para revisão sistemática de literatura. **Ciência da Informação**, v. 46, n. 2, p. 161–187, may 2017.
- SHADDEL, S.; BAKHTIARY-DAVIJANY, H.; KABBE, C.; DADGAR, F.; ØSTERHUS, S. Sustainable sewage sludge management: from current practices to emerging nutrient recovery technologies. **Sustainability**, MDPI AG, v. 11, n. 12, p. 3435, jun 2019.
- <https://www.sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-dos-servicos-de-saneamento-basico/>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- WANG, L.; CHEN, L.; CHO, D.-W.; TSANG, D. C.; YANG, J.; HOU, D.; BAEK, K.; KUA, H. W.; POON, C.-S. Novel synergy of si-rich minerals and reactive mgo for stabilisation/solidification of contaminated sediment. **Journal Of Hazardous Materials**, Elsevier BV, v. 365, p. 695–706, mar 2019.
- WANG, L.; ZOU, F.; FANG, X.; TSANG, D. C.; POON, C. S.; LENG, Z.; BAEK, K. A novel type of controlled low strength material derived from alum sludge and green materials. **Construction And Building Materials**, Elsevier BV, v. 165, p. 792–800, mar 2018.
- WANG, Q.; LI, J.-S.; XUE, Q.; POON, C. S. Immobilization and recycling of contaminated marine sediments in cement-based materials incorporating iron-biochar composites. **Journal Of Hazardous Materials**, Elsevier BV, v. 435, p. 128971, aug 2022.
- ZHOU, Y.; CAI, G.; CHEESEMAN, C.; LI, J.; POON, C. S. Sewage sludge ash-incorporated stabilisation/solidification for recycling and remediation of marine sediments. **Journal Of Environmental Management**, Elsevier BV, v. 301, p. 113877, jan 2022.
- ZHOU, Y.; LI, J.-S.; LU, J.-X.; CHEESEMAN, C.; POON, C. S. Recycling incinerated sewage sludge ash (issa) as a cementitious binder by lime activation. **Journal Of Cleaner Production**, Elsevier BV, v. 244, p. 118856, jan 2020.
- ZHOU, Y.; LU, J.; LI, J.; CHEESEMAN, C.; POON, C. S. Influence of seawater on the mechanical and microstructural properties of lime-incineration sewage sludge ash pastes. **Construction And Building Materials**, Elsevier BV, v. 278, p. 122364, apr 2021.
- ZULOAGA, O.; NAVARRO, P.; BIZKARGUENAGA, E.; IPARRAQUIRE, A.; VALLEJO, A.; OLIVARES, M.; PRIETO, A. Overview of extraction, clean-up and detection techniques for the determination of organic pollutants in sewage sludge: a review. **Analytica Chimica Acta**, Elsevier BV, v. 736, p. 7–29, jul 2012.

Sinir. Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR+). 2020.