

# VALORIZAÇÃO DE LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMO MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA PARA MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

## 1. INTRODUÇÃO

A gestão de políticas sustentáveis tem como foco aprimorar e tratar de questões relativas à degradação do meio ambiente e à implementação de mecanismos que o resguarde. As nações mundiais vêm demonstrando apreensão com tais questões há algumas décadas, iniciando debates sobre questões ambientais na primeira Conferência das Nações Unidas para o Desenvolvimento Humano, realizada em Estocolmo no ano de 1972, tendo como ápice a Agenda 21 da ECO-92 (Rio-92). Desde então, o assunto tem ganhado cada vez mais importância com o passar dos anos.

Em 2010, foi implementada no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio da Lei Federal número 12.305 de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010) que destaca uma ordem prioritária para a destinação dos resíduos: primeiro deve-se pensar em reutilizar e reciclar o resíduo, para somente então se trabalhar com o seu tratamento e disposição final adequada.

Entre os resíduos de origem conhecida, encontram-se os gerados no tratamento de efluentes domésticos em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Com uma população de aproximadamente 213 milhões de habitantes (IBGE, 2021) e considerando que a média diária de geração de esgoto por pessoa é de 150 L (SAAEARA, 2021) e que 49,1% da população possui rede de coleta de esgoto (SNIS, 2021), o Brasil coleta um volume de esgoto de 15,7 bilhões de litros por dia. Neste ínterim, a gestão dos resíduos provenientes do tratamento de esgoto é fundamental para o combate à degradação do meio ambiente.

O esgoto, quando não contém resíduos industriais, é basicamente composto por 99,87% de água, 0,04% de sólidos sedimentáveis, 0,02% de sólidos não sedimentáveis e 0,07% de substâncias dissolvidas (NUVOLARI *et al.*, 2011). Durante seu tratamento químico e biológico, são geradas grandes quantidades de lodos, que contêm cerca de 30% de matéria mineral e 70% de matéria orgânica, biodegradáveis e inertes, que são separadas ao longo do processo. No decorrer da digestão, o lodo perde cerca de 66% de matéria orgânica, terminado com composição final de 45% de matéria orgânica e 55% de substâncias minerais (MATOS; ISEWAKI, 2017).

A disposição do lodo de ETE (LE) é um problema comum em muitas comunidades no Brasil. As destinações finais para esse resíduo são comumente os aterros sanitários, aplicações na agricultura, incineração e como materiais alternativos. O gerenciamento do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento é uma atividade de grande complexidade e alto custo, que, se for mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados desses sistemas. Tais disposições podem comprometer até 50% do orçamento operacional de um sistema de tratamento, além de apresentarem elevado potencial de carga poluidora, capaz de gerar sérios problemas socioambientais (VISENTIN *et al.*, 2017) e penalizações.

As aplicações agrícolas do LE têm sido foco de estudos e pesquisas científicas. Todavia, estudos apontam que há uma tendência de se buscar alternativas mais eficazes para a disposição do LE. Entre elas, destacam-se aplicações no setor de construção civil, utilizando o lodo como matéria-prima alternativa para produção de materiais diversos, como cerâmicas, tijolos, blocos e a substituição de agregado de baixo peso por material parcialmente composto por LE (CASTRO; SILVA; SCALIZE, 2015). A reciclagem do resíduo apresenta benefícios tanto para o meio ambiente quanto para empresas, que diminuem os custos de produção e fabricam

produto com um preço mais competitivo e com maior apelo ao público e para os consumidores, que utilizam um produto de qualidade e menor custo.

A proposta deste artigo é explorar este nicho de pesquisas pensando em soluções industriais para a reciclagem do LE, com foco em sua aplicação como material de construção, por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura. Espera-se que o presente trabalho forneça subsídios para futuros trabalhos acadêmicos e científicos voltados para este ramo de estudo. É possível que uma pesquisa exploratória em base de dados nacional e internacional possa vir a fornecer tanto oportunidades a serem investigadas quanto uma visão mais sistêmica com lacunas de pesquisa e temas saturados ou pouco originais.

Destaca-se a contribuição deste trabalho para a Agenda 2030 da ONU (2015), no que diz respeito aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), com foco no ODS 6 e suas metas. A ODS 6 – Água e Saneamento – tem como intuito garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento básico para toda a população. Além deste, contribui também para o ODS 9 - indústria, inovação e infraestrutura; ODS 11 - cidade e comunidades sustentáveis e ODS 12 - consumo e produção responsáveis.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão abordados os principais pilares teóricos do trabalho: saneamento básico no Brasil; tratamento de esgoto e aplicações do lodo de tratamento de esgoto.

### 2.1 Saneamento Básico no Brasil

A Constituição Federal do Brasil explica que compete à União instituir diretrizes para o Saneamento Básico (BRASIL, 2020). O tópico de Saneamento Básico é bastante diversificado e contempla os serviços de esgotamento e a produção de água potável via Estação de Tratamento de Água (ETA). O primeiro serviço contempla a coleta, transporte, tratamento e disposição final do esgoto sanitário, ao passo que no segundo, a água é captada de algum corpo hídrico, seja ele rio, lago ou uma represa e é tratada (TRATA BRASIL, 2021a). O novo marco legal do saneamento básico brasileiro (Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020) tem a meta de alcançar a universalização dos serviços de saneamento até 2033, garantindo que 99% da população tenha acesso à água potável e 90% ao tratamento e à coleta de esgoto, reduzindo os despejos in natura em bacias e mares.

A Tabela 1 apresenta as informações relativas à gestão de água no país, que se mostra relativamente heterogênea considerando as cinco regiões.

Tabela 1 – Informações relativas à gestão de água no Brasil

Dados	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	Brasil
<b>População com água tratada (%)</b>	57,5	73,9	89,7	91,1	90,5	83,7
<b>Perdas na distribuição (%)</b>	55,2	45,7	34,4	36,3	37,5	39,2
<b>População com esgoto tratado (%)</b>	12,3	28,5	57,7	79,2	46,3	54,1
<b>Tratamento de esgoto (%)</b>	22,0	33,7	56,8	55,5	47,0	49,1

Fonte: elaborado pelos autores, adaptado de TRATA BRASIL, 2021b e 2021c.

Observa-se pelos dados da tabela, que as Regiões Norte e Nordeste possuem os menores índices de população abastecida com água potável e os maiores índices de perda de água potável

após tratamento (vazamentos, ligações clandestinas etc.). Além disso, essas regiões apresentam os menores índices da população que tem seu esgoto coletado e tratado. No outro extremo, a Região Sudeste apresenta os melhores indicadores no tratamento de água e de coleta e tratamento de esgoto. Estes indicadores acabam se relacionando à qualidade de vida das regiões. Há um padrão, portanto, em relação aos menores índices de saneamento básico e as Regiões nacionais com menores Índices de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), que é similar ao IDH, porém aplicado para municípios, cidades e regiões. Através dos dados mais recentes do Atlas Brasil, de 2010, constata-se que as Regiões Nordeste e Norte são as últimas colocadas com 0,663 e 0,667, acompanhadas pela Região Sul (0,754). Em segundo está a Região Centro-Oeste com 0,757 e a Região Sudeste é a que possui o melhor IDHM no Brasil, com 0,766 (ARCHDAILY, 2021).

O mais recente relatório de Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto, com dados de 2019 e publicado em 2021 pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, revela que 61,9% das áreas urbanas no Brasil são abastecidas por redes de esgoto e 92,9% da população que vive nestas áreas é abastecida por redes de água. Por outro lado, ao se considerar todas as áreas do país (como as rurais também), estes indicadores mudam, conforme mostrado na Tabela 1. Apenas 49,1% do esgoto gerado no país é tratado (SNIS, 2021).

Esta realidade revela o nível de defasagem em relação à Comunidade Europeia e as nações mais desenvolvidas. De acordo com a Agência Ambiental Europeia (EEA), os níveis brasileiros de tratamento se aproximam da Sérvia (48,3%) e ainda estão muito distantes de países como Dinamarca, Finlândia, Alemanha e Grécia. Nestes países, 100% do esgoto gerado é tratado (EEA, 2021).

## **2.2 Tratamento de Esgoto**

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) descreve de maneira sucinta o processo de tratamento de esgoto mais comum na Região Metropolitana de São Paulo (SP), o chamado tratamento por Lodo Ativado. Este método foi desenvolvido na Inglaterra no início do século XX e é um processo biológico. Uma massa biológica (lodo ativado) está constantemente circulando dentro do processo, entrando em contato com a matéria-orgânica na presença de oxigênio. Esta mistura é agitada e aerada de modo que ocorra a deterioração da matéria-orgânica, para que o lodo seja enviado ao decantador secundário e seja feita a separação da parte sólida (que retorna ao tanque de aeração) e da parte líquida (que é devolvida ao meio ambiente) (SABESP, 2021).

Entretanto, o método de lodo ativado é apenas uma das maneiras de se tratar o LE. No método das Lagoas de Estabilização, é escavada uma grande área para que se receba o lodo de esgoto e o tratamento é relativamente mais barato e simplificado (INCT, 2021). A partir do projeto, é definido o tipo da lagoa, como: lagoa facultativa, lagoa aerada e lagoa anaeróbia, lagoa de maturação e lagoa de polimento. Além disso, há a possibilidade de se conjugar mais de um tipo de lagoa para um mesmo sistema.

Além desses sistemas, existem os tratamentos anaeróbios, nos quais microrganismos que não necessitam de oxigênio e estão presentes no esgoto consomem a matéria-orgânica. Para estes processos, são empregados reatores, como o Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) e o Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente (UASB), amplamente empregados no Brasil. A diferença básica dos dois é na capacidade, que é maior no UASB (INCT, 2021). O Quadro 1 apresenta um resumo dos principais métodos de tratamento de efluentes, separados pelas suas categorias: os tratamentos aplicados podem ser físicos, químicos ou biológicos.

Quadro 1 - Os principais tipos e métodos de tratamento de efluentes.

Tratamento Físico	Tratamento Químico	Tratamento Biológico	
		Aeróbio	Anaeróbio
Filtração	Correção de pH	Lodo Ativado	Reatores RAFA
Gradeamento	Precipitação Química	Lagoa Aerada	Reatores UASB
Aeração	Oxirredução	Lagoa de Estabilização	
Flotação	Coagulação	Filtros Biológicos	
Peneiramento	Alcalinização		
Gradeamento			

Fonte: adaptado pelos autores de BRK AMBIENTAL, 2021.

### 2.3 Aplicações do Lodo de Tratamento de Esgoto

Muitos trabalhos e pesquisas relacionadas ao lodo de esgoto estudam a possibilidade do seu emprego como fertilizante agrícola, pela sua riqueza em nutrientes como fósforo, nitrogênio e potássio. Além disso, o LE proporciona melhorias às condições físicas do solo, aumentando a retenção de água em solos arenosos e melhorando a permeabilidade e infiltração nos solos argilosos. Por certo tempo, há estabilidade de agregados na superfície do solo (BETTIOL; CAMARGO, 2006). Todavia, a presença destes macronutrientes no LE pode causar a eutrofização quando o LE é disposto em corpos d'água e mananciais, comprometendo a fauna e a flora do manancial, além de torná-lo impróprio para uso humano (CHAO, 2006).

Uma outra possibilidade é o emprego do LE como combustível, através da pirólise. O LE pode apresentar poder calorífico (16 MJ/kg) muito próximo de biomassas comuns (18 MJ/kg) (LEE, 2011). Dessa forma, torna-se viável utilizar o lodo como combustível de modo a se recuperar parte da energia gasta durante o tratamento de esgoto. Finalmente, o LE pode ser aplicado no setor de construção civil, como agregado leve para pisos e blocos cerâmicos. Além disso, é possível produzir agregados miúdos através das cinzas do lodo para a produção de tijolos (DINIZ; MELO, 2019).

### 3. METODOLOGIA EMPREGADA

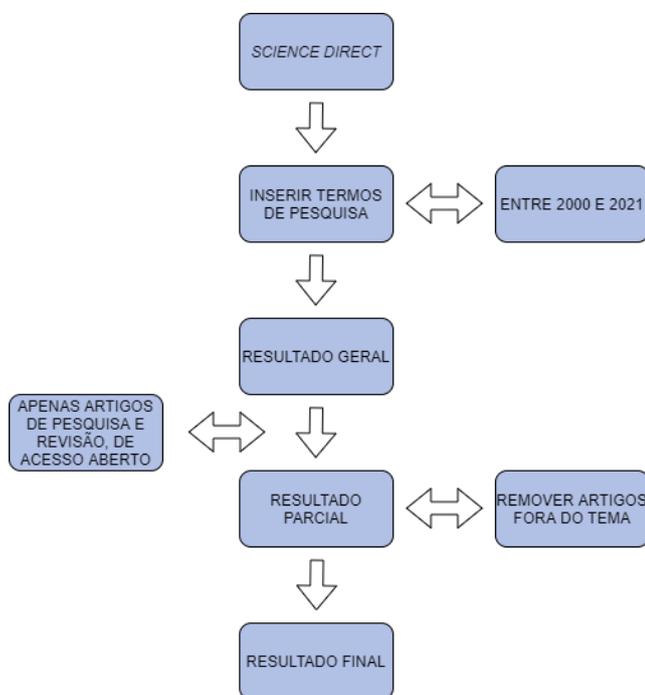
A pesquisa realizada pode ser caracterizada como do tipo exploratória com abordagem qualitativa. A estratégia adotada foi a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) e seguiu a orientação de alguns trabalhos de modo a nortear estudo realizado. Galvão e Pereira (2014) explica que uma RSL se trata de um estudo secundário, que utiliza dados de artigos científicos que relatam resultados em primeira mão. Através de uma RSL é possível se obter amplos resultados e seus resultados acabam sendo uma contribuição original para o tema em questão. Os autores ainda discorrem sobre os passos para a elaboração de uma RSL, nos quais este estudo se baseou: elaboração da pergunta de pesquisa; busca na literatura; seleção dos artigos e extração dos dados; avaliação da qualidade metodológica; síntese dos dados; avaliação da qualidade das evidências e publicação dos resultados.

A primeira etapa da pesquisa foi a seleção das bases de dados utilizadas. Foram selecionados a base de dados *Science Direct* e o portal de Periódicos CAPES. De modo a contemplar a maior gama possível de trabalhos publicados sobre o tema sem deixar de tornar a busca da literatura um trabalho repetitivo, optou-se por realizar três buscas em cada plataforma, com três descritores diferentes, com o intuito de minimizar a possibilidade de não se contemplar alguma publicação. Além disso, o recorte temporal das buscas foi definido como o intervalo

entre os anos 2000 e 2021. Foram utilizados os chamados operadores lógicos nos termos de busca. Basicamente, utilizou-se a palavra *AND* que agrupa termos ou palavras e utilizaram-se aspas para que se retornasse com exatidão o termo pesquisado. Além disso, foram implementados os filtros de resultados da plataforma para otimizar a resposta da pesquisa.

As buscas no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior - CAPES foram realizadas com os termos “lodo de esgoto”, “lodo de esgoto e material de construção” e “lodo de esgoto e construção civil”, com o critério de inclusão “artigos revisados por pares”, com o intuito de aumentar o rigor científico dos resultados. Na base *Science Direct*, buscaram-se os termos correspondentes em inglês, a saber: “*sewage sludge*”, “*sewage sludge and building material*” e “*sewage sludge and construction*”. Adicionalmente, foram escolhidos apenas os artigos de pesquisa e de revisão, como também os trabalhos com acesso aberto. A Figura 1 resume as etapas utilizadas para se realizar a pesquisa nesta plataforma.

Figura 1 - Fluxograma do método de pesquisa realizado na Plataforma *Science Direct*.



Fonte: elaborado pelos autores.

Com os resultados de cada base de dados coletados, foram analisados os títulos e resumos dos artigos encontrados, para realizar um ajuste fino. O propósito deste último ajuste, feito manualmente, foi de manter apenas os trabalhos que realmente apresentavam alguma solução ou aplicação do lodo de esgoto na área da construção civil, sejam estudos qualitativos ou quantitativos.

De posse dos resultados das pesquisas, foram excluídas as duplicidades e chegou-se ao número efetivo de trabalhos que respondiam à pergunta inicial proposta. A partir dos resultados obtidos, as publicações foram analisadas caso a caso, discutindo as pesquisas propostas em cada trabalho, bem como a sua viabilidade ou não de acordo com a visão de seus autores. Tudo isto teve como objetivo caracterizar o campo de estudo sobre o tema e identificar demandas em potencial para pesquisas futuras.

Por último, foram compiladas algumas características dos resultados formados pela pesquisa. Foram verificadas as palavras-chave mais comuns, bem como seu ano de publicação.

Além disso, em qual periódico o estudo foi publicado e a sua respectiva classificação segundo critérios pré-estabelecidos. Para os artigos publicados no Portal de Periódicos da CAPES, foi analisada a Classificações Qualis (Quadriênio 2013-2016), de A1, A2, B1, B2, B3, B4, B5 a C (UFRJ, 2021). Apesar de também poderem ser estudadas pelos parâmetros da Classificação Qualis, as publicações obtidas na base *Science Direct* foram analisadas pelos indicadores SJR (*SCImago Journal Rank*) e SNIP (*Source Normalized Impact per Paper*).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na plataforma Portal de Periódicos CAPES, as buscas com os termos “lodo de esgoto”, “lodo de esgoto e material de construção” e “lodo de esgoto e construção civil” resultaram em 19, 207 e 608 publicações respectivamente. A pesquisa com o termo mais generalista (“lodo de esgoto”) resultou na maior quantidade de publicações científicas, ao passo que o termo mais específico (“lodo de esgoto e construção”) apresentou a menor quantidade de publicações na base de dados. Após a remoção das duplicidades, sobraram apenas 2 artigos que se relacionavam efetivamente ao tema de aplicações do lodo de esgoto no setor de construção.

Já os resultados dos termos de buscas na plataforma *Science Direct* obtiveram comportamento similar: a combinação dos termos mais específicos (“*sewage sludge and construction*”) retornou 6.828 artigos e o termo mais abrangente (“*sewage sludge*”), 32.525. Ao final, com a remoção de duplicatas realizada, foram obtidos 10 artigos.

##### 4.1 Resultados Obtidos no Portal Periódicos CAPES

A Tabela 2 apresenta os artigos resultantes da pesquisa realizada com os termos em português. É interessante notar que apesar do número modesto de publicações obtidas, os periódicos em que estes estudos foram publicados possuem Classificação Qualis B1. Os dois estudos foram publicados em um período bastante próximo, sendo o primeiro de 2015 e o segundo de 2016. Não houve uma palavra-chave que se replicou neles.

Tabela 2 - Artigos resultantes da pesquisa realizada na plataforma Portal de Periódicos CAPES.

Referência	Periódico	Área de Avaliação da CAPES	Classificação Qualis
HIRATA et al., 2015	Revista de Ciências da Administração	Ciências Sociais Aplicadas	B1
FONTES; FILHO; BARBOSA, 2016	Revista IBRACON de Estruturas e Materiais	Engenharias I	B1

Fonte: elaborado pelos autores.

Sobre a primeira publicação, Hirata *et al.* (2015) pesquisaram tecnologias que buscam criar produtos a partir do lodo de esgoto doméstico em base de dados patentária internacional. Após esta busca, os autores levantaram alguns parâmetros, como a tecnologia predominante sobre a reciclagem do LE. Em uma das pesquisas, os autores analisaram as patentes que envolviam a reciclagem do LE com um grupo de patentes que envolve cimento, concreto, pedra artificial, cerâmica e refratários. Neste íterim, a pesquisa dos autores resultou em dois temas que concentraram 20,4% dos artigos cada:

- I. Uso de aglomerados ou materiais de rejeito ou refugo, como enchimento para argamassas, concreto ou pedra artificial; tratamento de aglomerados ou materiais de rejeito ou refugo, especialmente adaptados para melhorar suas propriedades de enchimento em argamassa, concreto ou pedra artificial;
- II. Composições de argamassas, concreto, pedra artificial ou similares, contendo ligantes inorgânicos ou produtos de reação de um ligante inorgânico e um ligante orgânico.

Já na segunda publicação, os autores fizeram uso do LE após o processo de calcinação, transformando o efluente em cinzas. Depois disso, concretos de alto desempenho foram produzidos substituindo 5% e 10% em massa do cimento Portland por cinzas. Após avaliações físicas e mecânicas dos corpos de prova produzidos, foi concluído que as cinzas afetaram mais a microestrutura do concreto do que as propriedades mecânicas. A mistura com 5% apresentou melhores resultados e as cinzas atuaram como agregado fino e não aglomerante, além de dificultar a percolação de agentes externos, melhorando a durabilidade do material. Já a resistência à compressão, apesar de próxima de referência, foi inferior (FONTES; FILHO; BARBOSA, 2016).

#### 4.2 Resultados Obtidos no Portal *Science Direct*

A Tabela 3 apresenta os artigos resultantes da pesquisa realizada com os termos em inglês no portal *Science Direct*, organizados pelo ano de publicação. Além disso, mostra os indicadores SJR e SNIP, além do nome dos periódicos dos artigos. É interessante notar que todos os artigos foram publicados dentro do intervalo dos últimos 10 anos, com destaque para os anos de 2012, 2013 e 2016 com 2 publicações cada, o que demonstra um interesse recente do tema.

Tabela 3 - Artigos resultantes da pesquisa realizada na plataforma *Science Direct*.

Referência	Periódico Publicado	SJR 2019	SNIP 2019
LUO <i>et al.</i> , 2012	<i>International Journal of Transportation Science and Technology</i>	1,928	1,240
LI <i>et al.</i> , 2012	<i>Procedia Environmental Sciences</i>	0,216	-
XU; LIU; LI, 2013	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	2,010	2,159
ZHANG <i>et al.</i> , 2013	<i>Procedia Environmental Sciences</i>	0,216	-
LI <i>et al.</i> , 2016	<i>Procedia Environmental Sciences</i>	0,216	-
PIASTA; LUKAWSKA, 2016	<i>Procedia Engineering</i>	0,316	1,333
KASINA; KOWALSKI; MICHALIK, 2017	<i>Energy Procedia</i>	0,545	0,782
AMIN <i>et al.</i> , 2018	<i>HBRC Journal</i>	-	-
RABIE; EL-HALIM; ROZAIK, 2019	<i>Ain Shams Engineering Journal</i>	0,402	1,212
LIMAMI <i>et al.</i> , 2021	<i>Cleaner Engineering and Technology</i>	1,886	2,394

Fonte: elaborado pelos autores.

O periódico do qual foram obtidos mais resultados foi o *Procedia Environmental Sciences*, com as publicações de Zhang *et al.* (2013), Li *et al.* (2012) e Li *et al.* (2016). O periódico com o melhor índice nos indicadores apontados é o *Journal of Hazardous Materials*, com SJR de 2,010 e SNIP 2,159, com o estudo de Xu, Liu e Li (2013). Ainda, é importante

citar que *Energy Procedia* e *Procedia Engineering*, responsáveis pelos artigos de Kasina, Kowalski e Michalik (2017) e Piasta e Lukawska (2016) respectivamente, também foram descontinuados. Já o *HBRC Journal* foi transferido de editora e não foi possível obter seus indicadores. O *Cleaner Engineering and Technology* é uma publicação conjunta com o *Journal of Cleaner Production*, do qual foram extraídos os dados.

As palavras-chave mais comuns nos artigos foram *sewage sludge* e *compressive strength*, com 5 e 3 aparições respectivamente, indicando que além do LE, a maior parte dos trabalhos tratou também da resistência à compressão dos materiais estudados. Vale ressaltar que na referência de Luo *et al.* (2012) não constava palavras-chave.

As principais conclusões dos autores foram discutidas de acordo com a ordem de publicação dos artigos científicos. Deste modo, Luo *et al.* (2012) estudaram a aplicação de uma mistura contendo cinzas de LE incinerado e cimento como estabilizador de solos coesivos. Também foram adicionadas porcentagens de  $Al_2O_3$  como um aditivo em quatro diferentes volumes: sem adição e com 1%, 2% e 3% de adição. Os autores concluíram que a mistura de cinzas e cimento pode diminuir a plasticidade e a permeabilidade do solo ao passo que a resistência à compressão do solo pode ser melhorada. Eles sugerem que a substituição de 15% de solo pela mistura cinzas-cimento tem potencial para melhorar a estabilidade de solos coesivos. Além disso, indicam que a utilização de 1% de alumina é um valor considerado ótimo para melhorar as propriedades mecânicas do solo.

Li *et al.* (2012) comentaram sobre o coprocessamento do LE em fornos de cimento. Europa, Japão e Estados Unidos consideram que este processo é um método sustentável de lidar com o resíduo e adotam a prática. Como exemplo, os autores comentam que a empresa japonesa Huaxin iniciou este procedimento em 2008 e até 2012 já havia disposto 65.000 toneladas de LE. Eles concluíram que a aplicação do LE desta maneira é ideal para cidades de pequeno e médio porte ao se levar em consideração os custos com transporte e investimentos que precisam ser feitos.

Para grandes centros urbanos, os autores sugerem que seja instalada uma unidade primária próxima à ETE para desidratar o lodo até valores próximos a 50%, o que reduz custos com transporte e deixa a queima facilitada, sem necessidade de combustível adicional. Comentam também que as estações que possuem uma unidade secundária podem utilizar o calor/energia gerado pela estação primária e desidratar o lodo até 30%, valor que, segundo os autores, proporciona uma reciclagem sem danos.

Xu, Liu e Li (2013) investigaram a estabilização de metais pesados em agregado de baixo peso formado por LE e sedimentos de rio, obtidos na cidade de Harbin, China. Eles comentam que a concentração destes elementos no LE limita sua utilização. Os autores definiram uma mistura contendo a relação mássica de 1:1:0,1 de LE, sedimentos fluviais e uma mistura de silicato de sódio ( $Na_2SiO_3$ ), utilizado como aglomerante. Além disso, foi adicionada uma solução contendo chumbo (Pb), cádmio (Cd), crômio (Cr) e cobre (Cu) para que fosse possível efetivamente se analisar o que ocorre com os metais pesados.

Os autores entenderam que ao se realizar a sinterização da mistura em temperaturas superiores à 1100 °C os metais efetivamente se ligam ao agregado. Segundo eles, isto ocorre, porque as estruturas metálicas ligam-se vigorosamente ao aluminossilicato, formando uma rede metalorgânica estável. Além disso, o agregado foi submetido a condições de lixiviação e os metais pesados se mantiveram no sólido, mesmo após o rompimento da estrutura. Finalmente, eles concluem que o agregado de baixo peso com LE e sedimentos pluviais podem ser utilizados para aplicações em construção e engenharia civil como um material ambientalmente seguro.

Zhang *et al.* (2013) comentam que a incineração do LE tem se tornado um problema pois as cinzas remanescentes contêm certa concentração de metais pesados. Pensando em uma aplicação para este material, os autores produziram uma vitrocerâmica com as cinzas do LE. Os autores concluíram que o tempo de cristalização não modificou a fase cristalina principal da

estrutura, apenas alterou a quantidade e a microestrutura dos cristais formados. Eles entenderam que o tratamento térmico ideal para a confecção deste artefato foi o aquecimento durante 1 h a 837 °C seguido por uma cristalização por 2 h a 977 °C. Os autores concluíram que a estrutura cristalina formada é benéfica para as propriedades físicas e mecânicas do material. Além disso, discorrem que é viável a produção da vitrocerâmica como um produto decorativo de valor agregado e ecologicamente correto.

Li *et al.* (2016) analisaram as tendências e a performance das publicações envolvendo LE durante os anos de 1991 a 2012 utilizando o indicador *SCI-Expanded*. Adicionalmente, os autores utilizaram o termo *biosolid* (biossólido) além de “*sewage sludge*” visto que o objetivo era analisar todas as publicações. Neste recorte temporal e dentro dos seus parâmetros de pesquisa, os autores verificaram 13156 publicações e concluíram que os Estados Unidos foram a nação mais produtiva tanto em termos de artigos publicados quanto autores dos trabalhos.

Através de análise das palavras-chave utilizadas, os autores concluíram que compostagem, digestão anaeróbia e desidratação foram os métodos mais populares de disposição e tratamento do LE. De modo complementar, metais pesados, como zinco e níquel, além do cádmio, chumbo e cobre foram sublinhados como os contaminantes mais preocupantes presentes no LE. Além disso, o termo “*soil*” (solo) foi o que apresentou maior relação com o LE devido ao fato de sua frequente aparição em títulos e resumos de trabalhos como uma importante forma de disposição do lodo de esgoto.

Piasta e Lukawska (2016) analisaram o efeito do uso das cinzas do LE nas propriedades de compostos cimentícios. Foram produzidas argamassas com substituição de 10% e 20% de cimento pelas cinzas, em uma proporção mássica de 1:3:0,6 de cimento, areia e água. Os autores concluíram que o tempo de pega das argamassas contendo as cinzas de LE foram estendidos quando comparados à argamassa padrão e levantaram a hipótese de que isto se dá pela presença de fósforo nas cinzas.

Além disso, o ganho de resistência das argamassas contendo as cinzas foi mais lento, apesar de que a longo prazo o aumento da resistência à compressão foi maior que uma argamassa padrão. Finalmente, os autores explicam que a substituição de 10% de cimento pelas cinzas de LE pode ser utilizada como uma adição segura a compostos cimentícios e que a concentração de metais pesados é inferior a 0,1% e não é motivo de preocupação.

Kasina, Kowalski e Michalik (2017) verificaram a influência de mudanças sazonais na composição química e mineralógica de resíduos da incineração do LE e seu potencial para se recuperar elementos metálicos e compostos de alto valor agregado. Os autores utilizaram amostras de cinzas volantes da incineração do LE que variam do inverno de 2015 ao outono de 2016. Foi observado um leve aumento na concentração de silício durante o verão, ao mesmo tempo em que houve uma redução de alumínio, ferro e fósforo. Não obstante, foi comentado que estas variações são mínimas e as concentrações metálicas efetivamente são reduzidas, apesar de presentes.

Os autores comentam que os metais não formam seus próprios minerais, mas na verdade estão dispersos entre formas amorfas e cristalinas, e consideram que o LE não é uma fonte valiosa destes materiais, pelo menos não sem a elaboração de uma técnica de extração efetiva e barata. Por outro lado, o fósforo apresentou 7% em peso nas cinzas volantes, o que as torna uma fonte em potencial deste elemento devido à sua elevada concentração.

Amin *et al.* (2018) verificaram o uso do LE para a produção de azulejos cerâmicos para piso. Os autores adicionaram LE seco em porcentagens que variaram de 5% a 35% a uma mistura cerâmica padrão. Também se basearam no padrão da norma ISO 13006 (ABNT, 2012), para a aceitação dos materiais produzidos, a qual indica um valor máximo de absorção de água de 10%. Foi possível produzir azulejos com uma concentração máxima de 7% de LE quando este foi aquecido a 1150 °C. Já quando o azulejo foi aquecido a 1150 °C e 1100 °C as concentrações máximas foram 10% e 5% de LE respectivamente.

O estudo de Rabie, El-Halim e Rozaik (2019) tratou de analisar a influência de se utilizar LE úmido e seco em misturas com concreto nas suas propriedades físicas e mecânicas. Os autores entenderam que misturas com 5% em peso de LE úmido e seco como substituintes de cimento podem ser consideradas como uma maneira de disposição final do lodo ambientalmente adequada. O principal uso neste caso de acordo com a resistência à compressão do material seria utilizar o material para pavimentação.

Os autores também observaram que com até 15% de substituição do cimento, o LE pode ser utilizado como uma adição ao concreto sem afetar sua resistência à compressão. Eles inferem que o material pode ser utilizado como *filler*, proporcionando melhoras nas propriedades mecânicas e na absorção de água da mistura. Contudo, é feita uma observação de que o uso de LE seco é melhor, pois causa uma redução de 1,3% na resistência à compressão após 28 dias, ao passo que o LE úmido diminui a mesma em 5,7%, devido à presença de matéria-orgânica.

Por último, Limami *et al.* (2021) verificaram a possibilidade de se utilizar LE como uma adição na produção de tijolos de terra de baixo peso, ecologicamente amigáveis. Foram investigadas várias adições de LE, indo desde 0% (amostra padrão) até 1%, 3%, 7%, 15% e 20%. Foi concluído que quanto maior a concentração de LE, maior a porosidade (máximo de 17%) e capilaridade dos tijolos, e maior é a redução na resistência à compressão (chegando no mínimo de 3,95 MPa, 35% inferior à resistência de 6,17 MPa da amostra sem LE). Além disso, os tijolos contendo LE apresentaram menor pH e maior condutividade térmica. Enfim, os autores concluem que os tijolos, de acordo com os padrões do seu país de origem, Marrocos, podem ser utilizados como estruturas que não suportarão carregamentos e como estruturas de preenchimento interno de paredes.

O Quadro 2 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos nos artigos selecionados na revisão sistemática da literatura.

Quadro 2 - Principais resultados dos artigos selecionados na revisão sistemática da literatura.

Referência	Resultados
HIRATA <i>et al.</i> , 2015	<p>As patentes do EPO envolvendo o emprego tecnológico do LE se concentram em 2 temas:</p> <p>I. Uso de aglomerados ou materiais de rejeito ou refugo como enchimento para argamassas, concreto ou pedra artificial; tratamento de aglomerados ou materiais de rejeito ou refugo, especialmente adaptados para melhorar suas propriedades de enchimento em argamassa, concreto ou pedra artificial;</p> <p>II. Composições de argamassas, concreto, pedra artificial ou similares, contendo ligantes inorgânicos ou produtos de reação de um ligante inorgânico e um ligante orgânico.</p>
FONTES; FILHO; BARBOSA, 2016	Ao substituir 5% de cimento por LE calcinado em concretos de alto desempenho,

	as cinzas atuam como agregado fino. Além disso, melhoram a durabilidade do material.
LUO <i>et al.</i> , 2012	Substituir 15% de solo por LE auxilia na estabilidade dos solos coesivos.
LI <i>et al.</i> , 2012	Coprocessar o LE em fornos de cimento é viável para pequenas e médias cidades. Em grandes centros urbanos, deve-se ter estações que seque o lodo até 30% para viabilizar seu uso.
XU; LIU; LI, 2013	Agregado de baixo peso formado por LE e sedimentos de rios sinterizado a 1100 °C é considerado ambientalmente seguro.
ZHANG <i>et al.</i> , 2013	Vitrocerâmica formada pelas cinzas do LE é um produto com alto valor agregado, boas propriedades físicas e mecânicas e ambientalmente amigável.
LI <i>et al.</i> , 2016	A RSL entre 1991-2012 mostrou que a digestão anaeróbia e a desidratação eram os métodos mais populares de tratamento de esgoto. O uso em solo também foi um resultado popular dentro dos artigos pesquisados.
PIASTA; LUKAWSKA, 2016	Substituir até 10% de cimento por cinzas de LE é seguro para compostos cimentícios e benéfica para o meio ambiente.
KASINA; KOWALSKI; MICHALIK, 2017	Apesar de possuir elementos metálicos, o LE não pode ser considerado uma fonte de coleta de metais pois apresentam baixa concentração que não varia sazonalmente.
AMIN <i>et al.</i> , 2018	É possível produzir azulejos cerâmicos dentro da norma ISO 13006 (ABNT, 2012), utilizando-se de 5% a 10% de LE como material alternativo.
RABIE; EL-HALIM; ROZAIK, 2019	Misturas com 5% em peso de LE seco ou úmido não afetam as propriedades do concreto. Utilizando-se mais, até 15%, o material adquire função de <i>filler</i> . O LE seco é melhor, pois há menor redução de resistência a compressão do concreto.
LIMAMI <i>et al.</i> , 2021	É possível produzir tijolos de terra com adição de LE, porém não devem ser usados em estruturas que suportarão cargas, mas sim como enchimento de paredes.

Fonte: elaborado pelos autores.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da RSL foi possível explorar as aplicações do LE na obtenção de materiais construtivos e analisar as publicações relativas a este tema. A RSL, realizada no recorte

temporal de 2000 a 2021, permitiu verificar que ainda são poucos os estudos publicados sobre esse campo. Entre os mais de 600 artigos obtidos nas buscas no Periódicos CAPES, somente 2 foram considerados aderentes ao propósito específico da pesquisa. Já na plataforma *Science Direct*, de mais de 68900 publicações resultantes das buscas, apenas 10 se enquadravam no tema em estudo. Notou-se que os artigos resultantes da RSL foram publicados recentemente, durante os últimos 10 anos (a partir de 2011), significando que é um nicho de estudo relativamente novo. As palavras-chave mais manifestadas nos estudos foram “*sewage sludge*” (lodo de esgoto) e “*compressive strength*” (resistência à compressão).

O mapeamento destas publicações permitiu observar algumas tendências, como a preocupação dos autores com a concentração de metais pesados no LE e a frequência com que se analisou a resistência à compressão dos materiais elaborados. Os autores demonstraram preferência por utilizar as cinzas do lodo de esgoto, oriundas da sua incineração, em função da quantidade de matéria orgânica no lodo in natura. Vale ressaltar que o uso do LE na forma de cinzas não apresentou quantidade significativa de metais pesados. O emprego do LE seco ou úmido também mostrou que os metais contidos nos materiais elaborados não sofrem lixiviação. Finalmente, as concentrações ideais para o uso de LE como substituinte em materiais construtivos, definidas pelos autores, estão em um intervalo de 5% a 15%. É entendido por eles que tais quantidades não afetam de modo significativo as propriedades físicas e mecânicas dos materiais desenvolvidos.

Como limitação da pesquisa, ressalta-se que a metodologia de uma RSL, por mais completa que seja, não consegue englobar absolutamente todos os trabalhos publicados sobre um determinado tema. Existem inúmeros fatores que contribuem para isso, como a utilização de sinônimos dos termos pesquisados, o recorte temporal definido, o tipo de trabalho pesquisado etc. Até mesmo o próprio mecanismo de busca da base de dados pode causar divergências nos resultados obtidos ou ocasionar alguma imprecisão na quantidade de artigos retornados.

Finalmente, o uso de LE de forma alternativa ao empregado na agricultura constitui uma importante estratégia nas políticas de saneamento e gestão dos recursos hídricos. Recomenda-se ampliar as discussões e o desenvolvimento de pesquisas aplicadas neste tema para promover o desenvolvimento sustentável no Brasil e atingir as metas da Agenda 2030.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIN, S. K., *et al.* The use of sewage sludge in the production of ceramic floor tiles. **HBRC Journal**, v. 14, n. 3, p. 309-315, dez. 2018.

ARCHDAILY. **Diferença de IDHM entre regiões brasileiras diminuiu nas últimas décadas**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/784994/diferenca-de-idhm-entre-regioes-brasileiras-diminuiu-nas-ultimas-decadas>>. Acesso em: 04 jun. 2021.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei n.9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providencias. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília DF.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, [2016]. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm)>. Acesso em: 04 jun. 2021.

BRK AMBIENTAL. **Conheça as etapas do processo de tratamento de esgoto**. Disponível em: <<https://blog.brkambiental.com.br/etapas-tratamento-de-esgoto/>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

- CASTRO, A. L. F. G.; SILVA, O. R.; SCALIZE, P. S. Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. **Multi-Science Journal**, p. 66-73, 2015.
- CHAO, I.R.S. **Remoção de fósforo de efluentes de estações de tratamento biológico de esgotos utilizando lodo de estação de tratamento de água**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- 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.
- EUROPEAN ECONOMIC AREA - EEA. **Urban wastewater treatment in Europe**. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/urban-waste-water-treatment/urban-waste-water-treatment-assessment-5>>. Acesso em: 04 jun. 2021.
- FONTES, C. M.; FILHO, R. D. T.; BARBOSA, M. C. Cinza de lodo de esgoto (CLE) em concretos de alto desempenho: caracterização e aplicação. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 6, p. 989-1006, 2016.
- GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiol. Serv. Saúde**, Brasília, v. 23, n. 1, p. 183-184, 2014.
- HIRATA, D., *et al.* O uso de informações patentárias para a valorização de resíduos industriais: o caso do lodo de tratamento de esgoto doméstico. **Revista de Ciências da Administração**, v. 1, n. 1, p. 55-71, 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **População do Brasil**. Disponível em: <[https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/box\\_popclock.php](https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/box_popclock.php)>. Acesso em: 04 jun. 2021.
- INSTITUTOS NACIONAIS DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - INCT. **Principais métodos de tratamento de esgoto**. Disponível em: <<https://etes-sustentaveis.org/metodos-tratamento-de-esgoto/>>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- KASINA, M.; KOWALSKI, P. R.; MICHALIK, M. Seasonal changes in chemical and mineralogical composition of sewage sludge incineration residues and their potential for metallic elements and valuable components recovery. **Energy Procedia**, v. 125, p. 34-40, set. 2017.
- LI, Y., *et al.* The Industrial Practice of Co-Processing Sewage Sludge in Cement Kiln. **Procedia Environmental Sciences**, v. 16, p. 628-632, 2012.
- LI, Y., *et al.* Global Trends and Performances of Publication on Sewage Sludge from 1991 to 2012. **Procedia Environmental Sciences**, v. 31, p. 65-74, 2016.
- LIMAMI, H., *et al.* Recycled wastewater treatment plant sludge as a construction material additive to ecological lightweight earth bricks. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 2, p. 327-345, jun. 2021.
- LUO, H. L., *et al.* Cohesive Soil Stabilized Using Sewage Sludge Ash/Cement and Nano Aluminum Oxide. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 1, n. 1, p. 83-99, mar. 2012.
- MATOS, A. C. M.; ISEWAKI, N. T. Alternativa de aplicação de lodo de estação de tratamento de esgoto em cobertura de aterros sanitários. **Congresso Mineiro de Engenharias e Arquitetura**. Belo Horizonte, CEMEA, 2017.
- NUVOLARI, A., *et al.* **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. 2ª ed. São Paulo: Blucher, p. 565, 2011.
- PIASTA, W.; LUKAWSKA, M. The Effect of Sewage Sludge Ash on Properties of Cement Composites. **Procedia Engineering**, v. 161, p. 1018-1024, 2016.

RABIE, G. M.; EL-HALIM, H. A.; ROZAIK, E. H. Influence of using dry and wet wastewater sludge in concrete mix on its physical and mechanical properties. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 10, n. 4, p. 705-712, dez. 2019.

SAAEARA. **Esgoto – Curiosidades.** Disponível em: <<https://www.saaeara.com.br/informacao/esgoto---curiosidades/>>. Acesso em: 04 jun. 2021.

SABESP. **Tratamento de esgoto.** Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=49>>. Acesso em: 01 jun. 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto.** Disponível em: <[http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2019/Diagn%C3%B3stico\\_SNIS\\_AE\\_2019\\_Republicacao\\_31032021.pdf](http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2019/Diagn%C3%B3stico_SNIS_AE_2019_Republicacao_31032021.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2021.

TRATA BRASIL. **Manual do Saneamento Básico.** Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/uploads/estudos/pesquisa16/manual-imprensa.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2021a.

TRATA BRASIL. **Água.** Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/agua>>. Acesso em: 04 jun. 2021b.

TRATA BRASIL. **Esgoto.** Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/esgoto>>. Acesso em: 04 jun. 2021c.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO- UFRJ. **Novo Qualis.** Disponível em: <[http://www.pep.ufrj.br/images/documentos/manuais/Manual\\_PEP\\_-\\_Como\\_consultar\\_o\\_Novo\\_Qualis.pdf](http://www.pep.ufrj.br/images/documentos/manuais/Manual_PEP_-_Como_consultar_o_Novo_Qualis.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2021.

VISENTIN, R., *et al.* Compostagem de lodo de esgoto em Botucatu: avaliação preliminar de custos. **Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**. Porto Alegre, 2017.

XU, G.; LIU, M.; LI, G. Stabilization of heavy metals in lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 260, p. 74-81, set. 2013.

ZHANG, Z., *et al.* Effect of Crystallization Time on Behaviors of Glass-ceramic Produced from Sludge Incineration Ash. **Procedia Environmental Sciences**, [S.L.], v. 18, p. 788-793, 2013.