

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CARLA TAUANA FRANCISCA ALVES DE OLIVEIRA

**LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMO RESÍDUO
AGREGADO EM INSUMOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ALTERNATIVA
PARA REDUÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL**

CAMPO MOURÃO

2022

CARLA TAUANA FRANCISCA ALVES DE OLIVEIRA

**LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMO RESÍDUO
AGREGADO EM INSUMOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ALTERNATIVA
PARA A REDUÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL**

**Sludge from sewage treatment station as aggregate waste in civil construction
inputs: an alternative for reducing environmental impact**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em inovações
tecnológicas da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dra. Ana Paula Peron

CAMPO MOURÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Campo Mourão



CARLA TAUANA FRANCISCA ALVES DE OLIVEIRA

**LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMO RESÍDUO AGREGADO EM INSUMOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ALTERNATIVA PARA A REDUÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Inovações Tecnológicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Inovações Tecnológicas.

Data de aprovação: 26 de Abril de 2022

Dra. Ana Paula Peron, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Debora Cristina De Souza, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Flavia Vieira Da Silva Medeiros, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Marcia Maria Mendes Marques, Doutorado - Universidade Federal do Piauí (Ufpi)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 26/04/2022.

Dedico este trabalho a todos que me ajudaram, especialmente para a minha família, que sempre me apoiou e incentivou mesmo mediante as dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Certamente não conseguirei agradecer a todos que já me ajudaram em determinado momento da vida, ações pelas quais, unidas, me fizeram chegar até aqui. Desde já agradeço a todos que de alguma forma me incentivaram, proferiram palavras de ajuda e incentivo, ou até mesmo de forma indireta, me auxiliaram. Obrigada.

Agradeço primeiramente a Deus pelo que me deste, pelo que dás, pela vida, pelo amor e coragem para lutar pelos meus sonhos. Palavras não são o suficiente para expressar minha gratidão pela oportunidade.

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe, irmão, tios e avós, que sempre me apoiaram e incentivaram, não medindo esforços para que eu conquistasse meu caminho.

Agradeço aos meus amigos, que me incentivaram e apoiaram mediante tantas dificuldades.

À minha orientadora Prof.^a Dra. Ana Paula Peron, obrigada por me orientar e indicar o melhor caminho.

À UTFPR que disponibilizou o espaço e ambientes para estudo e trabalho.

Agradeço a todos que me ajudaram em determinado momento, afinal sozinha nunca chegaria até este momento.

A conscientização ambiental resultante da percepção de que somos parte de um todo e não meros entes supostamente superiores, alheios e exploradores, modificará nossa relação com a natureza, nosso "próximo" não semelhante.
(SILVA, 2020).

RESUMO

O excesso de lodo de esgoto produzido em estações de tratamento de esgoto municipais ou industriais tornou-se um obstáculo devido a sua crescente produção. O crescimento na produção desse resíduo foi ocasionado pelo aprimoramento das tecnologias de tratamento, expansão do sistema de esgoto municipais e industriais e, por fim, pelo crescimento populacional. A gestão do excesso de lodo de esgoto conduziu para a implementação e desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas ao seu uso, como forma de destinação correta para o substrato. A indústria da construção tem se mostrado promissora para a utilização desse resíduo. A utilização em materiais da construção elimina a etapa de destinação para aterros e solo, os quais podem gerar danos a diferentes espécies. O uso do lodo de esgoto em insumos da construção civil elimina alguns estágios do descarte do resíduo, esses com custos elevados e utilização extensiva de energia, e o produto final obtido por meio da incorporação é estável e seguro para o setor da construção e para o meio ambiente. É possível confirmar essa estabilidade e segurança por meio de pesquisas a respeito das propriedades de força, resistência à água e lixiviação de materiais, especialmente quando a quantidade de lodo de esgoto aplicada nas amostras é menor que 15%. O principal objetivo da dissertação é a apresentação de métodos de incorporação de lodo de esgoto em materiais de construção. O uso de lodo de esgoto como aditivo melhora a qualidade da matéria prima final. E em aglomerantes, apresenta uma redução na resistência quando não retirada a matéria orgânica presente no lodo de esgoto e quando não incorporado com granulometria similar ao do cimento. A utilização de lodo de esgoto em materiais cerâmicos, a exemplos de telhas, pisos e tijolos, requer uma quantidade significativa de energia para atingir a temperatura de sinterização adequada para incorporação e sua utilização não interfere, de maneira significativa, na qualidade dos produtos derivados da cerâmica vermelha. A lixiviação dos materiais demonstrou-se de grande importância, sendo necessário avaliar a capacidade de deslocamento das partículas tóxicas incorporadas. Todavia, os produtos obtidos são estáveis e, embora em determinadas quantidades, reduza a resistência, em pequena quantidade ainda qualifica para aplicação na construção. Devido as propriedades físico-químicas se distinguem pelos métodos de gestão abordados em cada estação de tratamento de águas residuais, sua incorporação e identificação deve ser abordada de maneira individual. Sendo assim, é difícil relacionar um método de aplicação geral e sólido para a incorporação de lodo de esgoto em materiais da construção civil, mas com base nos estudos, o método de gestão com a utilização como aditivo para concreto e agregados se mostra promissor.

Palavras-chave: lodo de esgoto; materiais da construção; impacto ambiental; concreto.

ABSTRACT

Excess sewage sludge produced in municipal or industrial sewage treatment plants has become an obstacle due to its increasing production. The growth in the production of this waste was caused by the improvement of treatment technologies, expansion of the municipal and industrial sewage system and, finally, by population growth. The management of excess sewage sludge led to the implementation and development of new technologies related to its use, as a correct destination for the substrate. The construction industry has shown promise for the use of this waste. The use in construction materials eliminates the destination stage for landfills and soil, which can cause damage to different species. The use of sewage sludge in civil construction inputs eliminates some stages of waste disposal, these with high costs and extensive use of energy, and the final product obtained through incorporation is often stable and safe for the construction sector and for the environment. This stability and safety can be confirmed through research into the strength, water resistance and leaching properties of materials, especially when the amount of sewage sludge applied to the samples less than 15%. The main objective of the dissertation is the presentation of methods of incorporation of sewage sludge in construction materials. The use of sewage sludge as a possible additive improves the quality of the final raw material. The use of this sludge in concrete or binders presents a reduction in strength when the organic matter present in the sewage sludge is not removed and when it is not incorporated with a granulometry similar to that of cement. The use of sewage sludge in ceramic materials, such as tiles, floors and bricks, requires a significant amount of energy to reach the sintering temperature suitable for incorporation and its use does not significantly interfere with the quality of the products derived from red pottery. The leaching of the materials proved to be of great importance, being necessary to evaluate the capacity of displacement of the incorporated toxic particles. However, the products obtained are stable and, although in certain quantities, it reduces strength, in small quantities it still qualifies for application in construction. Because the physical-chemical properties are distinguished by the management methods addressed in each wastewater treatment plant, their incorporation and identification must be addressed individually. Therefore, it is difficult to relate a general and solid method for the incorporation of sewage sludge in construction materials, but based on the studies, the management method with the use as an additive for concrete and aggregates shows promise.

Keywords: biosolid; building materials; environmental impact; concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Requisitos de qualidade da água em função das classes de enquadramento e usos da água.....	17
Figura 2 – Processo de tratamento típico aplicado em estações de tratamento de esgoto de cidades no mundo.....	19
Figura 3 – Representação esquemática reatores UASB.....	22
Figura 4 - Sistema de tratamento de águas residuais por meio de lagoas de estabilização anaeróbia, facultativa e de maturação	24
Figura 5 – Sistema de lodo ativado	25
Figura 6 – Fases de tratamento do lodo proveniente do esgoto	26
Figura 7 - Propriedades do concreto endurecido com adição de cinza de lodo.....	39
Figura 8 - Massa específica de agregados e resistência à compressão simples de argamassas	40
Figura 9 – Propriedades dos tijolos executados com cinza de lodo	41
Gráfico 1- Produção de resíduos sólidos no Brasil	27
Gráfico 2 - Produção de resíduos em países da Europa ao longo dos anos 2010, 2015 e 2018	28
Gráfico 3 – Relação dos trabalhos utilizados nessa pesquisa e o ano de sua publicação.....	31
Quadro 1 – Tipo de poluente e seu respectivo tratamento.....	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características químicas do lodo de esgoto de indústrias e cidades, no formato desidratado e compostado	16
---	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Meio Ambiente
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEE	Comunidade Económica Europeia
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda biológica de oxigênio
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DQO	Demanda química de oxigênio
ETE	Estação de tratamento de esgoto
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
PIB	Produto interno bruto
SST	Sólidos suspensos totais
UASB	Upflow anaerobic sludge blanket digestion

LISTA DE SÍMBOLOS

μm	Micrômetro
a.C.	Antes de Cristo
a/c	Água/cimento
Al_2O_3	Óxido de alumínio
C_2S	Silicato de dicálcio
C_3A	Aluminato tricálcico
C_3S	Silicato de tricálcio
C_4AF	Cálcio Alumino-Ferrita
CaO	Óxido de cálcio
C-A-S-H	Aluminosulfato de hidróxido de cálcio hidratado
C-H	Hidróxido de cálcio
CO_2	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DM	De média
Fe_2O_3	Óxido de ferro(III)
h	Hora
H_2	Hidrogênio
K_2O	Óxido de potássio
Km	Quilômetro
mg	Miligramas
MgO	Óxido de magnésio
mm	Milímetro
Mt	Mil toneladas
Na_2O	Óxido de sódio
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
OD	Oxigênio dissolvido
pH	Potencial hidrogeniônico
SiO_2	Dióxido de silício
t	Toneladas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	Definição e características do lodo de esgoto.....	15
2.2	Analisando parâmetros físico, químicos e biológicos no tratamento de esgoto16	
2.3	Etapas do tratamento de esgoto	19
2.4	Tratamento do Lodo Proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE).....	26
2.5	Lodo de esgoto e poluição ambiental	27
3	METODOLOGIA	30
4	RESULTADOS.....	31
4.1	Cimento, Materiais Suplementares, Cerâmica Vermelha e Pavimentação Asfáltica para uso em Construção Civil e o Impacto Ambiental Causado para a Extração de Recursos Naturais para Produção.....	31
4.2	Utilização de Lodo de Esgoto em Clínquer	35
4.3	Incorporação de Lodo de Esgoto em Insumos da Construção.....	35
4.3.1	Incorporação de lodo de esgoto em cimento.....	35
4.3.2	Incorporação de lodo de esgoto em agregados para cimento.....	39
4.3.3	Incorporação de lodo de esgoto em cerâmica vermelha	40
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos é tão antiga quanto a presença do homem na Terra. Desde as gerações nômades gera-se resíduos por meio das atividades humanas. Mediante a homeostase, fenômeno da natureza que busca o equilíbrio, os resíduos eram absorvidos e regulados por mecanismos de controle e autorregulação dos ecossistemas, ou seja, a capacidade dos ecossistemas em gerenciar resíduos era maior que a sua produção (COSTA, 2014). Por consequência do aumento populacional, desenvolvimento econômico e industrialização houve um crescente acúmulo desses resíduos, ocasionando uma demanda para minimizar os impactos ambientais associados à sua produção e destinação.

A gestão do excesso de lodo produzido em estações de tratamentos de águas residuais de cidades (ETE) ou indústrias geram obstáculos à sociedade devido à crescente produção do lodo de esgoto e os impactos negativos gerados no meio ambiente. Esse resíduo é um grande provedor de microrganismos e de substâncias orgânicas e inorgânicas prejudiciais ao meio ambiente, saúde humana e animal (ŚWIERCZEK; CIEŚLIK; KONIECZKA, 2018). Anualmente, cerca de 11,5 milhões de toneladas de lodo de esgoto seco são produzidos em países da União Europeia. A China, com a segunda maior população mundial, teve uma produção de 63 milhões de toneladas de lodo em 2019. No Brasil a estimativa de produção em 2021 de lodo bruto é de 10 a 15,5 mil toneladas por dia (CHANG et al., 2020; GONÇALVES, DAYANE; MOL, 2021; HE et al., 2021; ŚWIERCZEK; CIEŚLIK; KONIECZKA, 2018).

O lodo proveniente de ETE deve se adequar às normativas impostas em cada país para seu gerenciamento. A destinação final desse resíduo torna-se uma atividade de grande importância e complexidade, podendo ser destinada para aterros sanitários, despejo em oceanos, aplicação na agricultura e até mesmo, quando não fiscalizados, em lixões. No entanto, a destinação desse lodo de forma irregular pode acarretar na lixiviação do lodo de esgoto, liberação de metais pesados e, por consequência, contaminação do solo, águas superficiais e águas subterrâneas (YAKAMERCAN; ARI; AYGÜN, 2021).

No Brasil, a resolução CONAMA nº 498 considera o lodo de esgoto como alternativa para a destinação em solos, desde que apresente uma redução significativa de contaminantes e microrganismos. Para que seja viável a destinação em solos é necessária a redução desses contaminantes, ações pelas quais geram

custos altos e necessitam de tecnologia avançada para sua retirada, impedindo a locação do lodo na agricultura (CONAMA, 2020).

A indústria da construção civil tem sido considerada o setor mais promissor para o reaproveitamento do lodo de esgoto. Incentivada por práticas de economia circular, sustentáveis e uma demanda alta por concreto, esse tipo de indústria se tornou indicada para a reutilização desse lodo de esgoto. No entanto, é necessário avaliar as consequências dessa incorporação no produto final e avaliar o deslocamento dos metais e poluentes presentes, para que não prejudique a saúde da população exposta (ŚWIERCZEK; CIEŚLIK; KONIECZKA, 2018).

Dessa forma, o presente estudo teve por objetivo principal realizar uma revisão bibliográfica sistemática, como base em artigos científicos publicados, sobre as possibilidades e impactos gerados da incorporação do lodo de esgoto em materiais da construção civil, bem como as limitações em termos de custo-benefício dessa atividade, e suas implicações ambientais quando considerado a lixiviação dos insumos da construção civil com lodo agregado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Parte Neste tópico pretendeu-se informar a respeito do lodo oriundo de ETE, como base em sua definição, nos principais parâmetros físicos e químicos, assim como sobre os tratamentos convencionais, considerados na obtenção desse lodo de esgoto, e sobre a problemática desse resíduo como um poluente ambiental.

Enfatiza-se que o conhecimento acerca do processo produtivo de lodo se torna necessário para nortear ao leitor a respeito de qual resíduo se considerou para a incorporação em produtos da construção civil em tópicos posteriores.

2.1 Definição e características do lodo de esgoto

O lodo é resultado do processamento de águas residuais provenientes de indústrias ou residências, gerado a partir do processo mecânico e biológico que ocorre em ETEs. As características do lodo e sua composição química estão relacionadas com sua origem, época do ano em que foi processado, condições socioeconômicas da população e tecnologia utilizada para o tratamento do esgoto (MOURA et al., 2020).

Os esgotos domésticos são constituídos de 0,1-2% por contaminantes orgânicos e inorgânicos, dissolvidos ou particulados, enquanto os outros 98-99,9% é composto por água. Dentre os principais poluentes do lodo de esgoto, estão microrganismos patogênicos, como protozoários, bactérias e vírus, poluentes orgânicos (como os pesticidas) e inorgânicos (metais) (GONÇALVES; MOL, 2021).

A NBR 9648 (ABNT, 1986 p.1) define as parcelas do esgoto sanitário como:

Esgoto doméstico: despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas.

Esgoto industrial: despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitado os padrões de lançamento estabelecidos.

O lodo proveniente da indústria apresenta uma ampla variabilidade em sua constituição, causado pelas peculiaridades de cada setor, como método de tratamento, disposição do lodo e área disponível. As indústrias de grande porte normalmente detêm sua própria estação de tratamento, seja por motivo de diminuição de gastos, fiscalização por órgãos reguladores e especificidade do seu resíduo. Deste modo, as indústrias que possuem tratamento para o próprio efluente garantem a qualidade das águas tratadas, evitam multas provenientes das ETE's de cidades e evitam a sobrecarga nas ETE's destinadas a esgoto doméstico (GALDINO, 2021; OWUSU-TWUM; SHARARA, 2020).

As características do lodo provenientes de ETE's de cidades variam de acordo com o tipo de tratamento, fluxo e tecnologia aplicada, porém, geralmente encontra-se em sua constituição dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (FeO), óxido de magnésio (MgO) e pentóxido de fósforo (P_4O_{10}), compostos químicos utilizados como coagulantes durante a limpeza da água (SOUZA et al., 2020a)

As principais características do lodo seco são demonstradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características químicas do lodo de esgoto de indústrias e cidades, no formato desidratado e compostado

ESTUDO	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	FeO (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)
(MUN et. al., 2007)	52,00	20,94	8,98	4,06	2,21	1,30	3,11
(WANG et al., 2009)	24,37	7,95	6,08	10,69	10,68	0,34	5,33
(TUAN et al., 2013)	36,20	14,40	9,20	6,60	2,90	0,00	2,50
(TSAI; WANG; CHIOU, 2006)	44,89	11,62	6,81	6,49	0,10	0,04	2,93
(LIU et al., 2017)	9,97	10,67	4,05	2,55	0,90	0,30	1,45
(HUANG et al., 2017)	29,10	15,20	16,40	11,50	3,60	2,30	1,80
(CHIOU et al., 2006)	63,31	15,38	6,81	1,80	1,03	0,70	1,52
(LAU; TEO; MANNAN, 2017)	6,08	2,40	1,27	41,53	1,83	0,08	0,11
(GONZÁLEZ-CORROCHANO et al., 2016)	6,41	9,85	0,63	2,25	0,61	0,15	0,37
(GONZÁLEZ-CORROCHANO et al., 2009)	14,40	38,52	1,54	3,57	0,93	0,58	0,64
(HE, 2017)	39,10	11,20	9,23	3,68	2,20	0,75	1,70
(LAU; TEO; MANNAN, 2017)	6,08	2,40	1,27	41,53	1,83	0,08	0,11
(FONTES; TOLEDO FILHO; BARBOSA, 2016)	39,02	19,09	12,48	10,12	1,89	1,26	1,76
(LIMA, 2013)	33,15	25,44	5,11	5,44	3,78	-	0,71
(CYR; COUTAND; CLASTRES, 2007)	34,2	12,6	4,7	20,6	1,9	1,0	1,7
(BAEZA et al., 2014)	17,27	9,64	8,52	30,24	3,22	0,34	1,28

Fonte: Adaptado (SOUZA et al., 2020a)

Analisando a Tabela 1 é possível notar a diversidade da composição química apresentada em cada pesquisa, sendo necessário ressaltar que as pesquisas foram realizadas em condições de tratamento de esgoto diferentes, épocas e locais distintos.

2.2 Analisando parâmetros físico, químicos e biológicos no tratamento de esgoto

A composição do lodo de esgoto é variável, portanto, parâmetros físicos, químicos e biológicos auxiliam para verificar as falhas e tornar o resíduo de saída com características similares a outras ETE's, assimilando características de subprodutos.

Essa uniformidade viabiliza a incorporação do lodo de esgoto em grande escala, melhor aplicação e assimilação das características com os produtos (SOUZA et al., 2020).

Os parâmetros físicos e químicos são de grande importância para o tratamento do esgoto, com a obtenção dessas características, pode se conhecer o tipo de tratamento a ser abordado. Os parâmetros físicos do efluente podem ser analisados de acordo com a cor, turbidez, sabor e odor, temperatura, série de sólidos e condutividade. Já os químicos podem ser divididos em potencial hidrogeniônico (pH), alcalinidade, acidez, dureza, presença de metais, cloretos, nitrogênio, fósforo, e concentração de oxigênio dissolvido (OD), matéria orgânica (DBO e DQO), e micropoluentes orgânicos ou poluentes emergentes (MARQUES; NUNES-GUTJAHR; BRAGA, 2020).

Para que o esgoto tratado retorne ao corpo hídrico são aplicados parâmetros de qualidade com base em leis estabelecidas. Na Resolução CONAMA nº 357, o artigo 18 define parâmetros de lançamento de efluentes como, advindos de qualquer fonte poluidora, direta ou indiretamente. Além de obedecer aos limites impostos no artigo, os efluentes não poderão conferir ao corpo receptor características em desacordo com o enquadramento do corpo hídrico, ou seja, a água que retornar ao corpo hídrico deve conter as características da classe à qual o corpo hídrico está enquadrado (CONAMA, 2005)

Pode-se observar na Figura 1 o enquadramento dos corpos hídricos e suas características (ANA, 2020).

Figura 1 – Requisitos de qualidade da água em função das classes de enquadramento e usos da água



Fonte: (ANA, 2020)

De acordo com NBR 12614 (ABNT, 1992), a Demanda Química de Oxigênio (DQO) é quantidade de oxigênio necessária para a oxidação biológica e química das substâncias de fácil degradação. Moraes e dos Santos (2019) menciona que os parâmetros aplicados para a DQO na legislação federal do Brasil não apresentam um valor teto a ser cumprido, existindo entre as normativas estaduais uma discrepância quando comparados, variando de 60 a 600 mg O₂ /L.

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) pode ser definida como a quantidade de oxigênio requerida pelas bactérias para estabilizar a matéria orgânica degradável em condições aeróbicas após um tempo determinado e a uma temperatura padrão. Os parâmetros de lançamento do lodo de esgoto são estipulados no máximo em 120 mg O₂ /L para 5 dias e a 20°C, sendo que, esse limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO e para substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas) até 100 mg/L (CONAMA, 2011; SILVA et al., 2020).

O pH é um importante parâmetro químico para avaliar o equilíbrio dos compostos presentes no efluente, sendo que, pH muito ácidos ou básicos podem afetar a sobrevivência de peixes e de microrganismos decompositores nos recursos hídricos. O pH deve variar entre 6,5 e 7,5 para que não afete os corpos hídricos interferindo nas reações químicas que ocorrem no corpo d'água (PASSOS et al., 2021).

Os parâmetros biológicos envolvem os microrganismos vivos, ou seja, compete a esse fator avaliar os coliformes, sejam eles totais ou termotolerantes. O grupo dos coliformes totais logo descarta a água do ponto de vista de potabilidade, dispensando análises de outras bactérias. Os termotolerantes são utilizados frequentemente para avaliar a qualidade da água e indicar a contaminação por esgoto (COSTA et al., 2021).

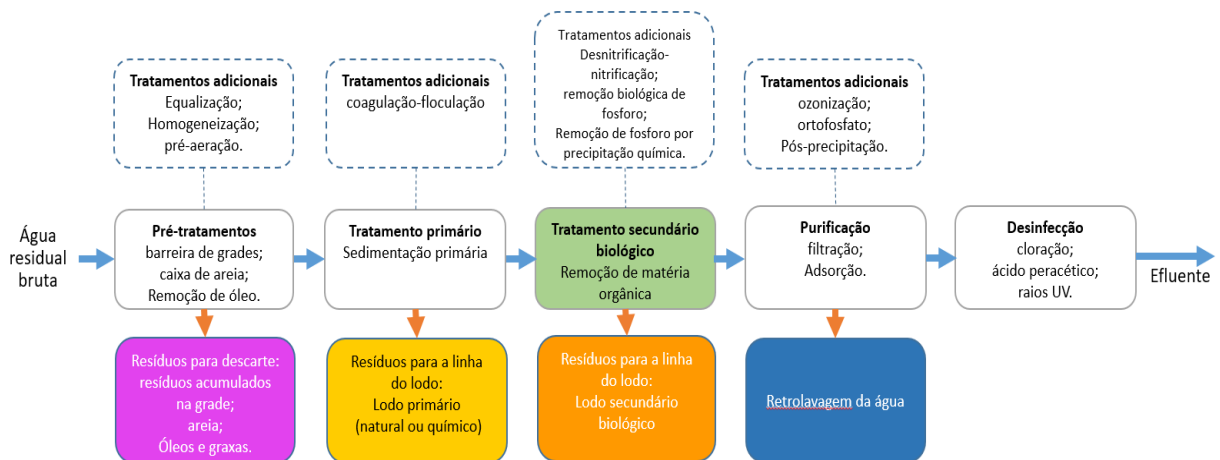
Portanto, o pH alto pode afetar o metabolismo microbiano e a produção de depósitos minerais; na verdade, a temperatura, o pH e a concentração de H⁺ dissolvido podem influenciar o desempenho de bactérias desnitrificantes autotróficas. Dependendo do potencial redox do sistema, diferentes microrganismos podem usar H₂ como doador de elétrons (MA et al., 2020).

2.3 Etapas do tratamento de esgoto

O tratamento de esgoto consiste em diversas ações unitárias empregadas para correção de características do resíduo. Dentre as características do resíduo está a grande quantidade de matéria orgânica, baixa qualidade higiênica (grande variedade de vírus, bactérias e protozoários) e grande volume de lodo (baixa concentração de sólidos e alto volume de água, sendo necessária a redução do teor de água), as quais podem variar de acordo com a água residual tratada e o nível de eficácia solicitado (PEDROZA, LÔBO, VIEIRA, 2019; SILVA et al., 2020).

De maneira geral, o tratamento de esgoto consiste na separação dos materiais sólidos e redução da carga de matéria orgânica presente, por meio de processos físicos, químicos e biológicos. O tratamento aplicado em ETE consiste nos seguintes níveis: preliminar; primário; secundário ou terciário (MARQUES; AMÉRICO-PINHEIRO, 2018).

Figura 2 – Processo de tratamento típico aplicado em estações de tratamento de esgoto de cidades no mundo



Fonte: Adaptado Gherghel; Teodosiu; de Gisi (2019)

O tratamento preliminar ou pré-tratamento consiste na retirada dos sólidos grosseiros provenientes das águas residuais, normalmente composto por grades, barras ou peneiras, podendo ou não incluir controle de vazão. Entre as matérias retiradas encontram-se elementos fibrosos e volumosos, sólidos pesados como areia, limo, cinzas, cascas, materiais rochosos e partículas de plástico. A dimensão das grades ou barreiras varia de acordo com os objetivos impostos pelo processo. As

barreiras podem ser higienizadas de forma mecânica ou manual (PATRÍCIO; VILAS BOAS; GALDINO, 2021).

O tratamento destina-se a remoção de sólidos sedimentáveis e sólidos flutuantes, onde o efluente se encontra menos grosseiro, mas ainda nitidamente poluído, a exemplo de graxas, óleos e sólidos suspensos, em sua maioria produtos orgânicos. São aplicados tratamentos por meio de sedimentação, flotação ou filtração, onde é originado o lodo primário. Normalmente, são aplicados sistemas físicos de filtração e sistemas físico-químicos de precipitação e coagulação primários, onde são removidos os sólidos grosseiros (MOURA et al., 2020).

Para o processo de sedimentação são utilizados tanques de decantação ou decantadores, em que durante a passagem vagarosa do resíduo ou estadia na unidade, ocorre a decantação de materiais particulados com densidade maior que o líquido, para uma otimização do processo de decantação e maior sedimentação de fundo em menor tempo, são acrescentados agentes químicos, denominados agentes coagulantes, para a formação de um aglomerado maior de matéria orgânica, por consequência aumentando sua densidade e facilitando a separação e remoção (NOTARI et al., 2020).

O processo de flotação consiste na separação sólido-líquido em que um fluxo ascendente de bolhas de ar permeia a fase líquida com o objetivo de aderir as partículas em suspensão, para a formação de um aglomerado “partícula-bolha”, com uma densidade menor que o líquido presente, sendo conduzidas até a superfície onde são removidas por meio de raspadores ou similar. Para auxiliar na suspensão das partículas são empregados coagulantes inorgânicos, como: sulfato de alumínio; cloreto férrico e o sulfato férrico (LOPES et al., 2020).

O tratamento secundário é correspondente aos mecanismos biológicos, tem como principal objetivo a degradação de matéria orgânica solúvel, biodegradáveis (DBO solúvel ou filtrada) e a matéria orgânica em suspensão não retirada no tratamento primário. A matéria orgânica dissolvida não pode ser retirada por meio de tratamentos físicos, e sim por processos bioquímicos, esses realizados por microrganismos (DJANDJA et al., 2021).

A concepção do tratamento secundário é baseada em reproduzir mecanismos de degradação que ocorrem naturalmente em corpos hídricos, nos quais a biomassa digere a matéria orgânica presente. A matéria orgânica dissolvida se torna alimento para esses microrganismos, e por consequência, fonte de energia para o crescimento

da população microbiana. Nesse sentido, são inseridos ao efluente: bactérias; protozoários e fungos, esses sendo alguns dos muitos exemplos de microrganismos capazes de realizar esse tipo de processo (DJANDJA et al., 2021; MASSI, 2020)

Para que se possa obter uma eficiência, diversos métodos podem ser aplicados para o tratamento secundário, a exemplo de lagoas de estabilização, reatores anaeróbios, lodos ativados e reatores aeróbios. Em nível de tratamento secundário, os principais tipos de tratamento são: sistemas de lagoas de estabilização; lagoa facultativa; lagoa anaeróbia; lagoa aerada-facultativa; lagoa aerada de mistura completa; lagoa de decantação; sistemas de filtros biológicos; sistema de lodo ativado e lagoas de maturação (AMÉRICO-PINHEIRO et al.; CHAGAS, 2012; 2019).

Os tratamentos podem ser mesclados para obtenção de melhores parâmetros de qualidade no tratamento, no entanto alguns tratamentos podem ser indicados previamente conforme o tipo de poluente a ser tratado, no Quadro 1 podemos visualizar a relação entre o poluente e a operação, processo ou o sistema de tratamento.

Quadro 1 – Tipo de poluente e seu respectivo tratamento

Poluente	Operação, processo ou sistema de tratamento
Sólidos em suspensão	Gradeamento Remoção de areia Sedimentação Disposição no solo
Matéria orgânica biodegradável	Lagoas de estabilização e variações Lodos ativados e variações Reatores aeróbios com biofilmes Tratamento anaeróbio Disposição no solo
Nitrogênio	Nitrificação e desnitrificação biológica Lagoas de maturação e de alta taxa Disposição no solo Processos físico-químicos
Fósforo	Remoção biológica Lagoas de maturação e de alta taxa Processos físico-químicos
Patógenos	Sedimentação Filtração Carvão ativado

Fonte: ; Arruda; Soares (2020); Américo-pinheiro et al. (2019)

Existem diversos tratamentos, dado que, os tratamentos podem ser mesclados e personalizados de acordo com o tipo de resíduos e características, exigindo projetos de engenharia ambiental. No entanto, dentre os tratamentos aplicados são utilizados dois tipos de tratamentos biológicos, os realizados na ausência de oxigênio, chamados de tratamento anaeróbios, e aqueles com a presença de oxigênio, chamados tratamentos aeróbios (OLIVEIRA et al., 2019)

As lagoas anaeróbias consistem na transformação de matéria orgânica em biogás, esse sendo constituído de metano e dióxido de carbono. A principal vantagem da digestão anaeróbia é a capacidade de reutilização dos gases para energia renovável, além de uma menor produção de lodo e dispensabilidade de aeração. No entanto adotando-o para o tratamento pode gerar desafios técnicos, como: acúmulo de ácidos graxos; instabilidade no processo; alta formação de espuma e desafios com custo de transporte e operação. Em geral, são voltadas para tratamento de esgotos provenientes de matadouros ou frigoríficos (CHUKA-OGWUDE; OGBONNA; MOHEIMANI, 2020).

O processo anaeróbio pode ocorrer por meio de lagoas de estabilização, tanques de digestão e reatores, um exemplo é o reator anaeróbio de fluxo ascendente, o UASB (upflow anaerobic sludge blanket). Neste equipamento o efluente fica depositado na parte inferior onde ocorre uma coluna de escoamento ascendente, e a matéria orgânica é digerida ao misturar o lodo em fluxo ascendente a digestão e estabilização de matéria (LOPP; MENDES, 2020).

Na figura 3 é possível demonstrar a representação esquemática de reatores UASB, onde na parte 01 a matéria orgânica é misturada com o lodo e logo após é digerida, formando o biogás, na parte 02 é possível observar a sedimentação das partículas e por fim é realizada a separação de fases e a coleta dos gases.



Fonte: Lopp (2020)

Na digestão aeróbia ocorre na presença de oxigênio com a ajuda de cultura mista de microrganismos heterotróficos e autotróficos. O sistema é eficiente na eliminação de patógenos e odores, no entanto esse tipo de tratamento demanda uma grande quantidade de oxigênio, excessiva produção de biomassa e manutenção diária. O tratamento pode ser aprimorado utilizando técnicas de aeração ou tanque de decantação (AZZI, 2020).

Nos reatores aeróbios com biofilmes, a DBO é estabilizada por bactérias que estão inseridas ao meio (rochas ou materiais plásticos), onde o esgoto é aplicado na parte superior do tanque por meio de distribuidores rotativos. O líquido percola pelo tanque, saindo pelo fundo à medida que a matéria orgânica fica retida, onde posteriormente é estabilizada pela ação de bactérias. Os espaços livres ficam vazios e possibilitam a circulação de ar (AMÉRICO-PINHEIRO et al., 2012).

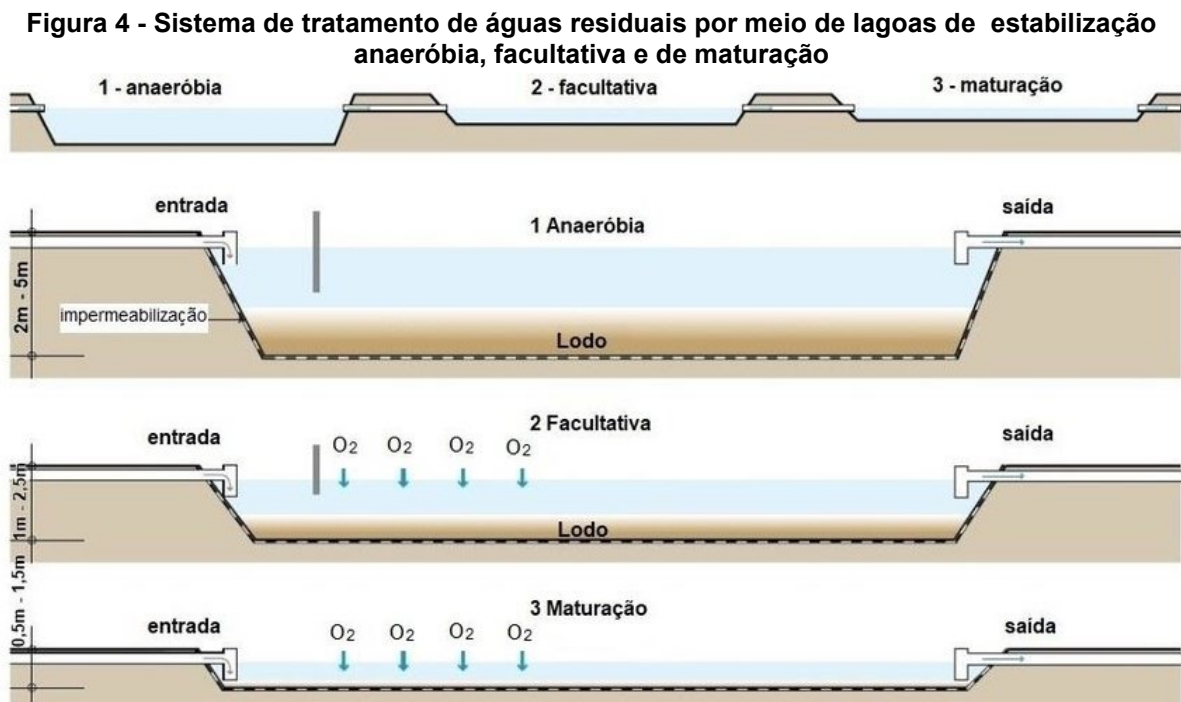
As lagoas de estabilização são áreas alagadas com um corpo de água lântico e com baixa movimentação, elas utilizam processos físicos e biológicos, a exemplo de microbiológico natural (bactérias aeróbias e anaeróbias) e algas fotossintetizantes para reduzir a matéria orgânica. No geral apresentam baixo custo de execução, no entanto exigem grandes áreas para sua implantação (GRUCHLIK; LINGE; JOLL, 2018).

A principal função das lagoas de tratamento é o armazenamento e o tratamento de resíduos orgânicos. Para que seja possível a retirada desses resíduos o tratamento é realizado por meio de autodepuração ou estabilização, o qual ocorre de forma parcialmente controlada. Nesse processo os microrganismos transformam a matéria orgânica em compostos de minérios orgânicos e gás carbônico. As lagoas podem ser classificadas de acordo com o tipo de atividade biológica. Os tipos mais comuns existentes, são anaeróbias, aeróbias e facultativas (LI et al., 2018).

As lagoas facultativas se sucedem pela ação de algas e bactérias que recebem a influência da luz solar, sendo nela uma parte convertida em matéria mais estável em forma de células de alga e outra parte em produtos inorgânicos que saem no efluente. A lagoa realiza a fotossíntese na superfície e anaerobiose no fundo, em consequência, obtém uma profundidade de 1,5 metros. Nelas as matérias orgânicas têm um tempo de retenção estimado de 4 a 6 dias. Seu principal papel é a remoção da DBO, obtendo um nível de eficiência na DBO, em torno de 50 a 70% (AMÉRICO-PINHEIRO et al.; GOMIDES; DOURADO, 2012; 2020).

Em contrapartida, as lagoas de maturação têm como função principal diminuir a quantidade de coliformes fecais, devido a isso apresentam uma baixa profundidade, algo entre 1 a 2 metros e apresentam um tempo de retenção alto, de 12 a 18 dias, possibilitando a desinfecção. É comumente utilizada após o tratamento, com uma taxa de 99,99% de retirada de coliformes fecais (AMÉRICO-PINHEIRO et al., 2019)

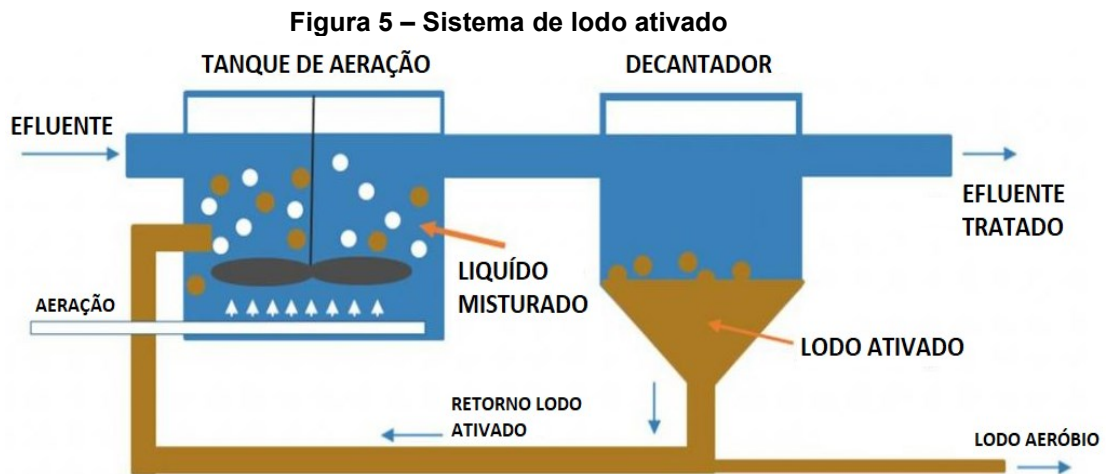
A figura 4 exemplifica de maneira ilustrativa um sistema de tratamento por meio de lagoas de estabilização anaeróbia, facultativa e de maturação.



Fonte: Américo-pinheiro et al. (2012)

No sistema de lodo ativado há duas unidades de tratamento que compreendem a etapa biológica: o reator biológico, ou tanque de aeração, e o decantador secundário. O lodo de esgoto é gerado no reator biológico ou tanque de aeração por meio da oxidação da matéria orgânica por meio de bactérias aeróbias, transformando em biomassa microbiana por meio da oxidação da matéria carbonácea e nitrogenada e da remoção de fosfatos, na sequência o licor misto produzido é direcionado ao tanque de decantação, onde parte do lodo sedimentado retorna ao tanque de aeração para servir de reativação da população microbiana e aumentar a eficiência no processo (OLIVEIRA et al., 2019)

Na figura 5 é possível observar de maneira ilustrativa o fluxo no sistema de lodo ativado, onde é composto por tanque de aeração e decantador, verificando a recirculação do lodo ativado para reativação da população microbiana.



Fonte: Adaptado Covre (2020)

O sistema de nitrificação-desnitrificação biológica pode ser mencionado como processo biológico no qual a desnitrificação das bactérias reduz o nitrogênio em nitrato, por meio de uma série de intermediários, sendo eles as bactérias de organismos heterotróficos e autotróficos, seres que ingerem de matéria orgânica existente. A desnitrificação é amplamente utilizada para o tratamento de poluição por nitrato (MA et al., 2020).

O carvão ativado é um dos adsorventes mais versáteis para utilização em filtros, apresenta grande área superficial, estrutura porosa (especialmente microporosa), alta capacidade de adsorção e composição química da superfície variável. Por conta das suas propriedades é amplamente utilizado para retirada de gosto e odor da água residual (SANTOS et al., 2020).

O tratamento secundário complementar tem como objetivo a retirada de poluentes específicos ou a retirada de materiais resultantes de etapas anteriores, é comumente implementada como um tratamento extra ou ainda como polimento final. São retirados, em geral, nutrientes como fosforo, nitrogênio e sódio, organismos patogênicos, compostos não biodegradáveis, metais pesados, sólidos dissolvidos e possíveis sólidos em suspensão (TEIXEIRA et al., 2021).

As etapas e tratamentos mencionados geram uma carga de lodo de esgoto correspondente ao tipo de tratamento e carga de microrganismos aplicados, os quais

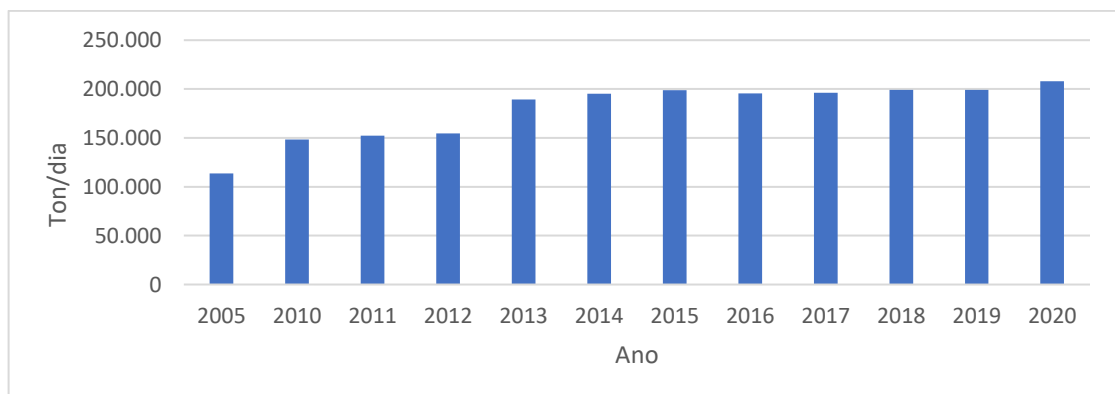
2.5 Lodo de esgoto e poluição ambiental

Com a ampliação das tecnologias disponíveis para o tratamento de esgoto e leis cada vez mais rígidas para a manutenção dos corpos hídricos receptores dos efluentes tratados, aliado a uma conscientização ambiental e crescimento populacional, sucedeu, ao longo dos anos, em uma grande produção de lodo de esgoto. No Brasil a Lei nº. 11.445, estabelece a Política de Saneamento Básico no Brasil, em seu artigo 48 determina a necessidade de desenvolvimento sustentável, eficiência e eficácia no tratamento, evitando riscos sanitários e epidemiológicos (BRASIL, 2007).

Entre os períodos de 1992 a 2005, cidades da Europa como, Reino Unido e Alemanha introduziram medidas para aprimorar o tratamento de esgoto para ETE, essa medida ocasionou em um aumento da produção de lodo em 50%, enquanto em outros países ocorreu um aumento de 20% na produção de lodo, totalizando 10 milhões de toneladas produzidas ao ano. Em contraste, outros países como Estônia, Malta, Romênia, Lituânia e Eslovênia, aumentaram sua produção em 100% (2,5 milhões de toneladas/ano) (ŚWIERCZEK; CIEŚLIK; KONIECZKA, 2018).

No Brasil, o aumento na produção do resíduo gerou uma busca pelo seu gerenciamento, bem como sua disposição de forma correta. Os dados do total de resíduos sólidos coletados sofreram um aumento de 54% comparando 2020 com 2005. Na figura 7 é demonstrado o crescimento de resíduos coletados no Brasil, sendo que, da quantidade demonstrada, o maior produtor desses resíduos é a região sudeste. (OLIVEIRA et al., 2019; ŚWIERCZEK; CIEŚLIK; KONIECZKA, 2018)

Gráfico 1- Produção de resíduos sólidos no Brasil

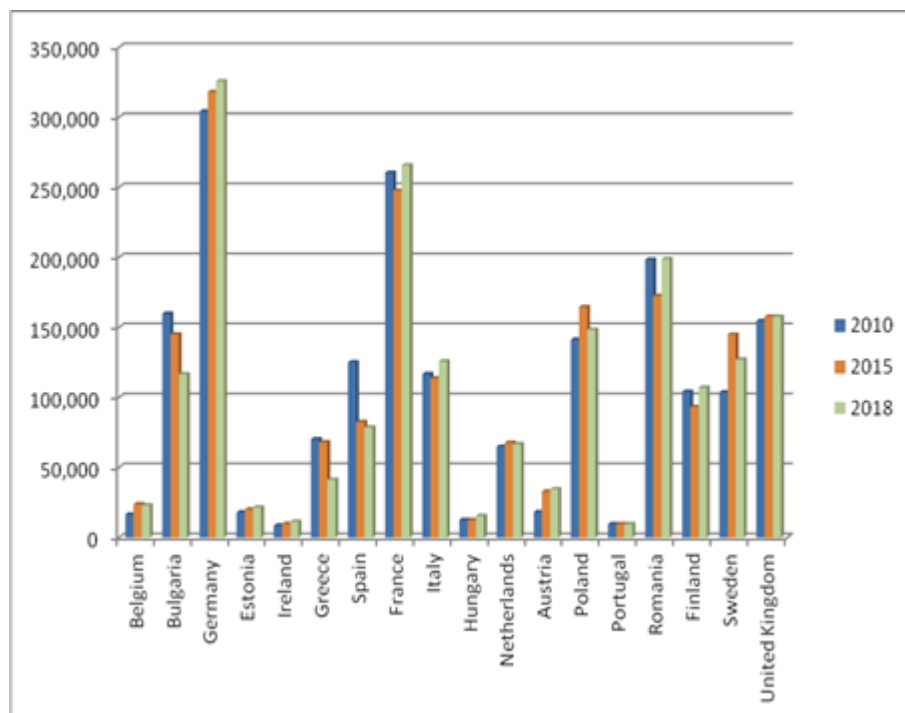


Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE, 2005, 2010, 2020, 2021, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2018, 2019)

O lodo se tornou um problema também na Ásia, Europa e Ocidente. A exemplo do Japão que observou um aumento de 170% na produção do lodo, entre os anos de 1994 a 2004, aproximadamente 2,2 milhões de toneladas. Na Figura 08 é possível notar o crescimento na produção de lodo, em um comparativo entre os anos de 2010, 2015 e 2018, entre países integrantes da União Europeia. Dos 27 países da união europeia, 18 foram abordados no gráfico. Dos 18 países mostrados ocorreu uma redução na quantidade de lodo produzido em apenas 3 países (Bulgária, Grécia e Espanha) (EUROSTAT, 2021).

A figura 8 mostra a quantidade de lodo produzido, com a Alemanha sendo a maior produtora, aproximadamente 325 mil toneladas no ano de 2018. Seguida por França, com aproximadamente 375 mil toneladas no ano de 2018 e Romênia com aproximadamente 190 mil toneladas. Conforme a figura demonstra a maioria dos países equipararam suas taxas de produção ou aumentaram, causando preocupação com relação às áreas de disposição.

Gráfico 2 - Produção de resíduos em países da Europa ao longo dos anos 2010, 2015 e 2018



Fonte: Eurostat (2021)

Devido a quantidade produzida, ocorreu a necessidade do gerenciamento e reutilização do resíduo, o meio encontrado foi a disposição na agricultura. A ação que

obrigou os países membros da Europa a implementar a Diretiva nº 278, faz referência à proteção do meio ambiente e, em particular, do solo, quando o lodo de esgoto é utilizado na agricultura. Entretanto, alguns países impõem requisitos adicionais e mais rígidos para a qualidade do lodo de esgoto, portanto, sua gestão expõe mais problemas para os proprietários e operadores das ETE's (ŚWIERCZEK; CIEŚLIK E KONIECZKA, 2018; CEC, 1986).

Os resíduos gerados, sejam eles industriais ou sanitários, geram uma carga de agentes bacterianos, que auxiliada pelos vetores, pode contribuir para a disseminação de agentes virais, como, vírus hepatite, rotavírus, enterovírus e reovírus. O lodo quando depositado de forma irregular também pode apresentar danos ao meio ambiente, em decorrência dos materiais em sua composição, como cobre e zinco (OLIVEIRA et al, 2019).

A partir da dificuldade na disposição do lodo, principalmente em países desenvolvidos, iniciou-se o estudo para a produção em insumos da construção. O setor da construção é o maior consumidor de recursos naturais não renováveis, diante da necessidade de dispor de técnicas que não só absorvam os resíduos, mas busquem a preservação das matérias primas. Ainda, o lodo pode apresentar características pozolanicas, as quais contribuiriam para o desempenho de artigos relacionados ao cimento (GONÇALVES et al., 2021).

3 METODOLOGIA

O estudo concentra-se na descrição das metodologias abordadas para gerenciamento de lodo de esgoto, na incorporação em insumos da construção civil. São abordadas as vantagens e desvantagens da incorporação de lodo de esgoto seco e bruto em concreto, cimento, materiais cerâmicos e asfalto. Foi analisado a capacidade de deslocamento do lodo quando incorporado, averiguando danos a saúde da população. O tema está se desenvolvendo em alguns países, os quais acrescentam mais inovações, devido a isso foram utilizadas literaturas de todo o mundo. A revisão é baseada na literatura científica, revistas técnicas, capítulos de livros, normativas e trabalhos de repositórios.

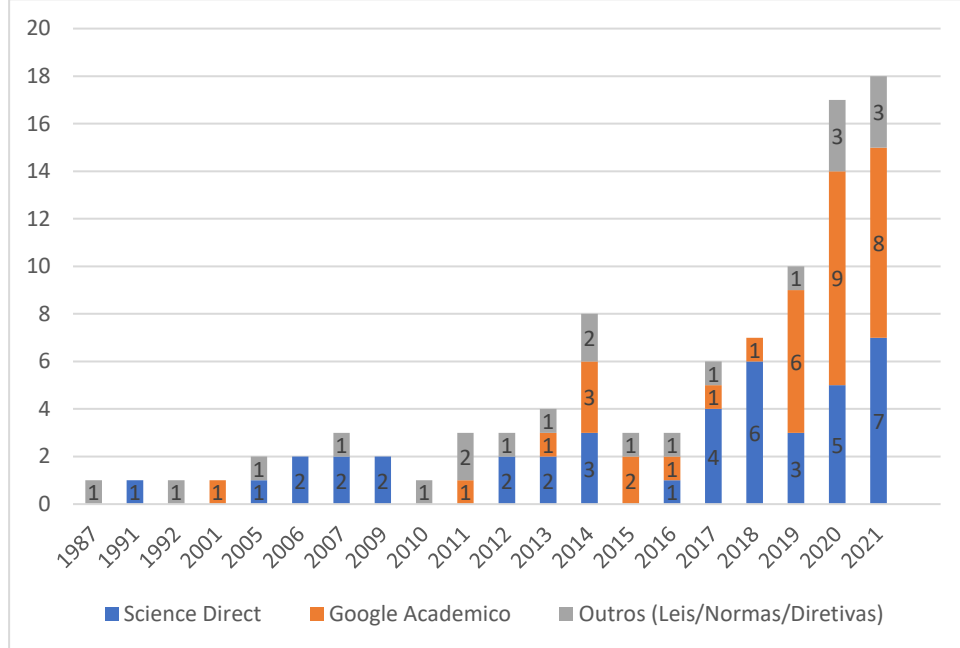
Considerando a relevância da informação nessa área de pesquisa, o estudo em questão optou por duas bases de dados eletrônicas para pesquisa ScienceDirect e Google Acadêmico. Para a obtenção dos trabalhos sobre a utilização de lodo de esgoto na construção civil, utilizou-se os seguintes termos, em português: lodo de esgoto, construção civil, meio ambiente, concreto, lixiviação. Em inglês: Biosolid, Building materials, Environmental impact, Concrete, Leaching.

A revisão narrativa crítica em foco selecionou apenas estudos em inglês e português. Também foram definidos 03 critérios de exclusão: (1) A pesquisa não apresenta contribuições na área da engenharia; (2) A publicação apresenta o uso de lodo de esgoto para outras finalidades; (3) O trabalho não apresenta de forma clara a metodologia utilizada. Em seguida, foram eliminadas as duplicidades nas pesquisas, resultando em 100 trabalhos. Considerou-se o período das publicações de 1986 a 2021, sendo que das publicações abordadas.

4 RESULTADOS

Com relação aos estudos obtidos, 76,00% foram a partir de 2014, para obtenção de fontes de destinação atuais na disposição do resíduo. Na figura 9 foi demonstrado a distribuição de trabalhos, conforme os anos e base de dados.

Gráfico 3 – Relação dos trabalhos utilizados nessa pesquisa e o ano de sua publicação.



Fonte: Autor (2021)

Na sequência foram abordados a composição dos insumos da construção civil, sendo possível observar a composição de cada elemento, facilitando a incorporação do resíduo nas fases corretas para obtenção do melhor resultado. Foi demonstrado os recursos naturais utilizados para a fabricação dos insumos e escassez na natureza.

4.1 Cimento, Materiais Suplementares, Cerâmica Vermelha e Pavimentação Asfáltica para uso em Construção Civil e o Impacto Ambiental Causado para a Extração de Recursos Naturais para Produção.

O cimento tem grande importância para a sociedade. Sua utilização vem sendo implementada desde as épocas mais antigas, com um aumento previsto na produção de 12–23% até 2050. No entanto, a fabricação de cimento tem um impacto negativo nos ecossistemas. São utilizados uma grande quantidade de recursos naturais, a exemplo de calcita (CaCO_3), sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), obtidos por

meio da extração de rochas. Além disso, o setor é o terceiro maior consumidor de energia no mundo, sendo responsável por 7% de toda a energia industrial (JUAREZ;FINNEGAN, 2021).

A indústria da construção é responsável pela extração de 50% de todos os recursos naturais extraídos. Essas riquezas naturais são limitadas, fato que torna essencial a compreensão, quantificação e sua racionalização. A extração, processamento, transporte, manutenção e descarte desses agregados requer enormes quantidades de recursos, energia e espaço. Além disso, a extração desses agregados, por meio de perfuração de poços, mineração e pedreiras geram grandes danos para o meio ambiente, como a perda recursos geológicos (RUBAN et al., 2018; JUAREZ;FINNEGAN, 2021)

Diretamente ligado com a produção do cimento está o efeito estufa, processo natural causado pela retenção de calor proveniente do sol para as camadas inferiores da atmosfera. O aumento da emissão de determinados tipos de gases chama atenção para os fatores que mais influenciam no efeito estufa, A produção de 1 tonelada (t) de cimento libera uma estimativa de 0,73–0,99 t CO₂/t cimento, dependendo da relação clínquer-cimento e das porcentagens de materiais aplicados (HASANBEIGI; PRICE; LIN, 2012)

Com a necessidade de reduções no uso de energia e nas emissões de CO₂ são exigidos mais inovação nesta indústria. As inovações provavelmente incluirão o desenvolvimento de diferentes processos e materiais para produção de cimento ou tecnologias que podem capturar e armazenar economicamente as emissões de CO₂ da indústria. O desenvolvimento dessas tecnologias emergentes e sua implementação no mercado apresentará uma mudança na perspectiva de sustentabilidade na indústria do cimento, incluindo estratégias de mitigação das mudanças climáticas de médio e longo prazo, visando a redução da poluição no âmbito da produção do cimento (HASANBEIGI; PRICE; LIN, 2012)..

É possível analisar que, o clínquer é o que mais acarreta a poluição, por consequência, a redução na produção acarretaria as emissões de gases. A sugestão base para redução da produção de clínquer seria sua substituição, mesmo que de forma parcial, por materiais cimentícios suplementares, a exemplo de escória de alto forno, cinzas volantes e resíduos industriais (HASANBEIGI; PRICE; LIN, 2012).

Dentre as diversas possibilidades de aplicação do lodo de esgoto, apresentam-se incorporação em materiais suplementares para cimento (aditivos);

aplicação em cerâmica vermelha (tijolos, telhas e azulejos); aplicação em pavimentação asfáltica e aplicação no concreto. A aplicação como material suplementar é observada quando ocorre a substituição do cimento por lodo de esgoto ou cinza de lodo de esgoto. A aplicação na cerâmica vermelha ocorre na substituição ou incorporação do resíduo na argila utilizada na produção de artefatos como tijolos, telhas e azulejos. Na pavimentação asfáltica pode ser utilizado como agregados nas misturas ou empregada como fíler (material com granulometria fina para preenchimento de vazios). No concreto pode ser adicionado como um agregado (LIMA, 2013; ŚWIERCZEK; CIEŚLIK; KONIECZKA, 2018)

O lodo de esgoto apresenta propriedades pozolônicas, no entanto não pode ser enquadrado como materiais suplementares, conforme a NBR 12653 (ABNT, 2015). As propriedades do lodo não atendem aos requisitos químicos necessários, embora a presença dessa característica auxilia para os resultados apresentados nas pesquisas, o aumento na resistência de concretos produzidos com lodo.

Os materiais suplementares são utilizados em misturas de concreto como uma substituição parcial do clínquer ou no cimento. Geralmente, a função dos materiais suplementares é alcançada por duas abordagens: autocimentantes (materiais que sofrem endurecimento em contato com a água) e reação pozolânica (reação entre a adição mineral e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Esses dois efeitos podem ser observados quando o lodo de esgoto ou cinza de lodo de esgoto é utilizado como substituição para materiais cimentícios aplicados no concreto (CHANG et al., 2020).

A cerâmica vermelha, ou cerâmica estrutural é um subgrupo cerâmico caracterizado pela coloração avermelhada de seus produtos, sendo utilizada em sua totalidade em produtos da construção civil, sendo eles; blocos; telhas; tijolos; elementos vazados; laje; tubos cerâmicos e argilas expandidas. A produção desses produtos é realizada próximo a jazidas compostas de depósitos de argila e a centros urbanos, visando sua distribuição. A principal matéria prima da produção de cerâmica vermelha é a argila, que tem alto teor de impurezas e compostos característicos pelo seu baixo ponto de fusão e alto teor de ferro, que é responsável pela coloração avermelhada dos produtos (BABISK et al., 2020).

A indústria da cerâmica vermelha é diretamente ligada ao setor da construção civil, o qual também apresentou um ritmo de crescimento acelerado ao longo dos anos, sendo responsável por grande parcela do PIB (Produto Interno Bruto). No entanto, aliado com o crescimento do setor da construção civil, os efeitos impactos

negativos sobre o meio ambiente são crescentes, principalmente pela extração de argila e madeira. As extrações geram danos ao meio ambiente, como a erosão do solo e modificação da paisagem. Outros impactos registrados são a destruição da fauna e flora, assoreamento de rios e reservatórios, perda física e química dos solos, geração de resíduos sólidos e emissões gasosas. A retirada da argila pode deixar o lençol freático mais exposto, acarretando em contaminações das águas subterrâneas (LIMA; GUTJAHR; PONTES, 2019; ALMEIDA; ARRUDA; SOARES, 2020).

A incorporação de resíduos na produção de cerâmica apresenta-se como uma forma de reduzir o impacto ambiental causado pela indústria, além de agregar melhores parâmetros de qualidade aos corpos cerâmicos. As indústrias cerâmicas apresenta-se como uma opção para a inserção dos resíduos na matéria prima, sendo incorporado à massa cerâmica, de forma que não afete as propriedades iniciais da cerâmica (MACIEL et al., 2020).

Na pavimentação asfáltica o lodo de esgoto pode ser utilizado como enchimento mineral para misturas de concreto asfáltico ou como fíler. A utilização do resíduo como fíler em ambientes quentes se mostrou satisfatória, pois o resíduo amplia a temperatura de derretimento do pavimento para 70 a 80°C, ou seja, o asfalto derrete apenas quando exposta a altas temperaturas. As incorporações também demonstraram que as misturas atendem ao comportamento mecânico solicitado pelas normativas do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) (LIMA, 2013).

Os agregados utilizados na produção da pavimentação asfáltica são recursos naturais limitados e as extrações geram custos altos para o meio ambiente. A utilização descomedida dos recursos naturais pode apresentar como consequência as alterações climáticas, erosão do solo, modificação da topografia, aceleração dos processos erosivos, modificações dos cursos d'água, interceptação de lençol freático, aumento dos gases e partículas em suspensão (LEITE; NETO, 2014)

Com a problemática da escassez de recursos naturais e falta de investimento é preciso buscar alternativas para redução no custo de implementação da malha viária. Entre os procedimentos aplicados está a utilização de lodo em forma de cinzas incorporado ao cimento asfáltico de petróleo. O uso do lodo de esgoto é uma proposta para resolver o problema ambiental e de saúde pública. A utilização do lodo de esgoto no ligante asfáltico também possibilitou uma melhora na consistência à medida que se eleva a temperatura de calcinação (MOURA et al., 2021).

4.2 Utilização de Lodo de Esgoto em Clínquer

Atualmente, ocorre uma extensiva busca por produtos mais ecológicos, os quais tem o intuito de reduzir a poluição no meio ambiente, produtos como o lodo produzido em ETE's de cidades (SILVA et al., 2020). Em 1990, introduziu-se o uso de resíduos renováveis, no coprocessamento de cimento em fornos de clínquer, devido à necessidade crescente de destinação social e ambiental dos resíduos provenientes de processos industriais. A concepção da queima de lodo de esgoto é baseada na queima em forno rotativo de clínquer em condições especiais (ROCHA et al., 2011).

A utilização desses combustíveis alternativos no processo de produção de clínquer possui limitações, como as relacionadas ao volume de combustível secundário que alimenta o forno, e limitações ligadas à segurança ambiental (ROCHA et al., 2011). A utilização desse tipo de resíduo em forno no processo de fabricação do clínquer demonstra grande evolução na reutilização de resíduos, pois esse tipo de ação já está regulamentado. Tal pratica é monitorada com relação as emissões de gases e auxilia na redução de grande parte do volume gerado.

Chang (2020) comenta que para que o clínquer de ecocimento apresentem composição química semelhante ao do cimento portland, apresentando boa trabalhabilidade e propriedades mecânicas semelhantes a porcentagem de adição não pode ultrapassar 15%. No entanto, estudos não abrangem a adição secundária, ou seja, caso lodo seja utilizado em larga escala em cimentos, a reação a incorporação durante outro estágio manteria as características necessária para atender os critérios da construção civil. As pesquisas abordadas nesse trabalho a incorporação do lodo de esgoto em apenas uma etapa do processo, sendo necessário avaliar a exposição dos materiais a possível incorporação secundária.

4.3 Incorporação de Lodo de Esgoto em Insumos da Construção

4.3.1 Incorporação de lodo de esgoto em cimento

Inúmeros produtos foram incorporados ao concreto ao longo da história, inicialmente com a intenção de atender os parâmetros exigidos pelos clientes. Nos dias atuais a demanda por produtos ecologicamente corretos, aliados com a necessidade de disposição adequada, falta de espaço para aterros sanitários e disseminação de doenças despertou uma busca por uma gestão integrada e

sustentável dos resíduos, recorrendo a incorporação, bem como a geração de produtos que auxiliam o meio ambiente.

Tay e Show (1987) investigaram o potencial de utilização de lodo desidratado em cimento, aliado, principalmente a lodo seco com calcário. Os resultados da mistura mostraram alta taxa de absorção de água e um rápido tempo de pega para o cimento, quando comparado com a amostra sem porcentagem de incorporação. Os resultados mostraram também a possibilidade, por meio da avaliação da argamassa, da realização de pasta de cimento (cimento e água) para realização de argamassa, sendo que essa atenderia as exigências dos padrões ASTM (American Society for Testing and Materials), avançando em estudos com relação as propriedades dessa mistura a longo prazo.

Costa (2014) avaliou a utilização de lodo de esgoto em argamassa de cimento Portland. Foram estudadas adições desta cinza nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em relação à massa de cimento. O lodo foi seco por 40 dias com exposição ao sol e logo depois foi queimado a uma temperatura de 850°C, considerando que a eliminação de matéria orgânica ocorreria entre 550 a 950°C. Foi utilizada cinza de lodo com uma granulometria de 0,075mm. Os resultados indicaram a perda de consistência da argamassa em todas as porcentagens adicionadas. Houve uma retenção de água em todas as porcentagens de incorporações, no entanto, em todas os corpos de prova ocorrem aumento da resistência à compressão.

Oliveira et al. (2019) avaliaram a incorporação de lodo de esgoto em cimento. O lodo foi queimado em uma temperatura de 105°C durante um período de 12 horas. Foram incorporadas ao cimento porcentagens de lodo 3, 5 e 7% do peso do cimento. O lodo foi reduzido para uma granulometria de 150 µm. Os resultados mostraram que a trabalhabilidade foi melhorada no concreto em todas as porcentagens de incorporação. Os resultados mostraram que a resistência aos 28 dias se mostrou maior ou similar ao corpo de prova de referência.

Fontes et al. (2016) avaliaram o desempenho de lodo de esgoto calcinado como adição mineral ao concreto de alta resistência. Foram produzidos concretos com teores de substituição de 5% e 10%, em massa de cimento Portland por cinza de lodo de esgoto. Para a mistura com 5% de CLE, o grau de hidratação ficou bem próximo à referência para todas as idades. Pode-se dizer, portanto, que a substituição de cimento Portland por 5% e 10% de CLE não interferiu nas reações de hidratação do cimento. Para a resistência à compressão com a mistura de 5% os resultados obtidos

foram inferiores a referência, variando 4% à 7%, nas idades de 1, 28, 91 e 365 dias. Já para a mistura de 10%, as reduções foram expressivas em todas as idades, variando 10% para 365 dias.

Yang et al. (2013) realizaram uma abordagem demonstrada, ou seja, utilizou lodo de esgoto como um aditivo em uma mistura de cimento, cinzas e escória. Uma inovação na abordagem dos autores é o uso do processo de autoclavagem que melhora a resistência a longo prazo dos materiais obtidos.

Felipe (2015) utilizou nanotubos de carbono e nano-SiO₂ em argamassas produzidas com cinzas de lodo de esgoto em substituição parcial do cimento Portland. A cinza de lodo de esgoto foi calcinada a uma temperatura de 774°C. Foram realizadas adições de cinza de lodo de esgoto em porcentagens de 5%, 10% e 15%. Com relação ao índice de consistência da amostra foi possível observar uma redução na consistência da amostra com adição de lodo de esgoto, uma redução variando entre 4,2% a 10,7%, sendo observada a menor redução na consistência por meio da adição de 5%.

Lin e Lin (2005) usaram diferentes tipos de cinza de lodo residual, incluindo cinza de lodo de esgoto, cinza de lodo de tratamento de água e escória de aço e calcário, como componentes brutos para a produção de clínquer de cimento ecológico queimando a 1400 ° C por 6 h. Os principais componentes do cimento Portland comum, foram todos encontrados em novos clínquer. Os resultados indicaram que era viável usar cinzas de lodo de esgoto para substituir até 20% dos componentes minerais brutos.

Fontes et al. (2016) realizaram estudos a respeito da resistência à compressão, o resultado foi um aumento na resistência à compressão, nas porcentagens de 5% e 10% quando comparado ao corpo de prova padrão, sendo mantido o ganho de resistência em amostras rompidas ao longo de 1, 3, 7 e 28 dias. Com a adição de nanomateriais houve um ganho de resistência maior que o padrão, e os corpos de prova com adição de cinza de lodo, na ordem de 30% a 35%, sendo o maior ganho na idade de 90 dias.

Cappellesso et al. (2020) analisaram o potencial de uso de um resíduo de lodo de efluentes de indústrias de papel como aditivo em matrizes cimentícias. Foram incorporadas as porcentagens de 5% e 10%, em relação à massa do cimento. O resíduo foi seco a uma temperatura de 100°C. O resíduo provocou um aumento no fluxo de calor para os teores empregados, sendo o maior fluxo observado para o teor

de 10% nas primeiras horas. Quanto a resistência à compressão, o teor de 10% de adição do resíduo se mostrou mais eficiente, aumentando a resistência em todas as relações a/c estudadas.

Silva (2015) avaliou o potencial de incorporação de lodo de duas indústrias de produtos de limpeza como adição mineral em concretos de cimento Portland, produzindo artigos de concreto pré-moldado. Foram realizadas adições em porcentagens de 5, 10, 15 e 20% em um traço comum de (1:2:3). O resíduo passou por um processo de secagem em estufa a 110°C, por um período de 24 horas seguido por destorroamento do lodo. Com relação a resistência à compressão do concreto aos 28 dias, foi possível observar uma redução na resistência quando comparado com a referência, no entanto essa redução se mostra dentro dos limites de variação permitidos.

Lima (2013) avaliou as implicações técnicas e micro estruturais da incorporação da utilização de cinzas de lodo séptico em teores de 10% e 20% como adição mineral em concretos de cimento Portland, em temperatura de queima de 850°C durante um período de três horas. Foi observado um decréscimo de trabalhabilidade nas argamassas com incorporação de cinza de lodo de esgoto, tendenciado em abatimentos muito baixos para teores de adição superiores a 20%. Foi constatado que a adição de cinza de lodo de esgoto atuou de forma benéfica no aumento da resistência, em todas as adições realizadas.

Geyer (2001), conforme a figura 10 correlacionou alguns fatores importantes para o concreto, como resistência a compressão, massa específica e absorção. Demonstrando as incorporações em baixas proporções (5%) até altas proporções (20%), onde é possível confirmar as pesquisas anteriores, as quais em proporções menores que 15% o lodo se tornou mais viável com relação à incorporação.

Figura 7 - Propriedades do concreto endurecido com adição de cinza de lodo

ADIÇÃO DE CINZA (%)	Resistência à Compressão 3 dias (MPa)	Resistência à Compressão 7 dias (MPa)	Resistência à Compressão 14 dias (MPa)	Resistência à Compressão 28 dias (MPa)	Massa específica (tf/m³)	Absorção (%)
0	24,1	27,5	31,2	34,9	2,39	6,09
5	21,6	25,9	29,7	33,0	2,35	6,16
10	21,8	25,2	28,1	31,0	2,35	6,03
15	17,0	21,5	24,4	27,1	2,36	6,03
20	14,9	16,8	20,0	23,7	2,39	5,59

Fonte: Geyer (2001)

4.3.2 Incorporação de lodo de esgoto em agregados para cimento

Souza et al. (2020b) realizaram a substituição parcial do agregado miúdo do concreto com resíduo proveniente de estação de tratamento de esgoto de indústria frigorífica. Foram realizadas adições parciais de 2,5 e 8%. A secagem do lodo foi realizada de maneira natural, por meio da luz solar. A granulometria do agregado foi reduzida para inferior a 2 mm por meio da utilização de espátula e peneira. A pesquisa mostrou ser promissora, na aplicação de lodo como agregado para concreto com aditivo de lodo de esgoto em porcentagens de 2 e 5%. Contudo, quando aplicada em 8%, ocorreu um declínio da resistência a compressão.

Chagas (2019) substituiu parcialmente a areia pela cinza de lodo na produção de argamassa. Foram produzidas argamassas com substituição de 5% e 10% em volume da areia natural pela cinza do lodo. O traço em volume correspondente utilizado foi 1:1,63 (cimento:areia). O lodo foi seco de forma natural, ao sol, por 10 dias, e logo após foi incinerado em uma temperatura de 600°C. Foi possível observar um aumento na resistência à compressão aos 28 dias, quando comparados ao traço de referência.

Pedroza et al. (2019) aplicaram o lodo em duas situações; concreto produzido com a mistura areia/lodo e concreto produzido com a substituição da areia pelo lodo, ambas, com finalidade de aplicação em concreto de baixa resistência. O lodo para ambas as pesquisas foi seco em estufa. A resistência à compressão do concreto produzido com a mistura de areia/lodo demonstrou um aumento de 8% na resistência. Para o concreto produzido com substituição da areia pelo lodo, no teste de resistência à compressão ocorreu um decréscimo na resistência com relação ao traço de referência.

Blanc et al. (2014) realizaram a substituição de 20% da areia, por 10% de lodo incinerado de ETE e 10% de pó de pedra na produção de concreto. O lodo foi incinerado. A resistência a compressão do concreto modificado obteve uma redução de 23,5% em relação ao concreto-referência aos 14 dias de cura.

Geyer (2001) na figura 11 relacionou a massa específica e resistência à compressão de agregados miúdos com a incorporação de lodo, demonstrando uma redução na massa específica e na resistência à compressão inicial. No entanto, quando comparada à resistência de 28 dias (Utilizada nas obras) à resistência se torna próxima ao modelo sem incorporação.

Figura 8 - Massa específica de agregados e resistência à compressão simples de argamassas

Tipo de Agregado miúdo	Massa específica (kg/dm³)	Res. à compressão aos 7 dias (MPa)	Res. à compressão aos 28 dias (MPa)
Agregado miúdo leve de Cinza de Lodo	1,33	23,9	41,0
Agregado miúdo artificial	1,63	27,7	44,8
Areia	2,61	30,1	46,9

Fonte: Geyer (2001)

4.3.3 Incorporação de lodo de esgoto em cerâmica vermelha

Areias et al. (2017) incorporaram resíduo de lodo de esgoto de ETE em cerâmica vermelha, foram realizadas amostras com incorporação de 0%, 2,5%, 10% e 15% em massa de resíduo, o material foi calcinado a uma temperatura de 950°C. Foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas, como retração linear, absorção de água e resistência à compressão.

Com relação à retração linear, uma retração maior na porcentagem de 10%, sendo a causa provável o menor empacotamento dos corpos de prova durante a fase de conformação. Para as porcentagens de 10 e 15% foi analisado que a absorção de água ultrapassou os limites permitidos por norma para blocos de vedação, atingindo 22%, sendo permitido por norma 20%. A resistência mecânica se manteve em porcentagens de incorporação de 2,5%, enquanto para as demais incorporações

ocorreu uma redução na resistência, sendo uma redução média de 64,5% (AREIAS et al., 2017)

Pessanha (2019) incorporou lodo primário de estação de tratamento de efluentes de papel em cerâmica vermelha. Foram realizadas incorporações com porcentagens de 5,10 e 15% com relação ao peso do resíduo.

Similar à aplicação de lodo de esgoto em concreto, o alto teor de matéria orgânica não é favorável à resistência de materiais cerâmicos. Para a incorporação de lodo de esgoto em cerâmica vermelha se mostrou viável para produtos de baixa resistência ou em proporções de incorporação menores. Em porcentagens maiores apresentou retração e redução da resistência da cerâmica. Grandes porcentagens podem gerar acúmulo de metais e materiais presentes no lodo, aumentando a porcentagem lixiviada para além do limite permitido. Estudos com a incorporação de 45% de lodo de esgoto em cerâmica vermelha se apresentaram dentro dos limites exigidos, devendo ser incorporado porcentagem iguais ou menos que 45% quando relacionado a segurança da lixiviação (LYNN, DHIR e GHATAORA, 2018)

Geyer (2001) na figura 12 relacionou incorporações de tijolos com lodo de esgoto de 0 a 50%, demonstrando sua massa específica, resistência à compressão, absorção de água e fissuras por secagem na queima. O lodo quando incorporado ao tijolo reduziu a fissuração na secagem em incorporações de até 40%.

Figura 9 – Propriedades dos tijolos executados com cinza de lodo

Tijolo com cinza de Lodo (% de cinza)	Massa específico (t/m³)	Resistência a compressão (MPa)	Absorção de água (%)	Fissuras por secagem na queima dos tijolos (%)
0	2,38	8,72	0,03	9,91
10	2,42	8,57	0,07	9,55
20	2,46	8,00	0,11	9,10
30	2,50	7,07	1,39	9,36
40	2,55	7,05	1,52	9,79
50	2,58	6,69	1,70	10,51

Fonte: Geyer (2001)

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, K. S. de, SOARES, R. A. L. e MATOS, J. M. E. Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 1-19, 2020.

AMÉRICO-PINHEIRO, J.; et al. Presença de fármacos em estações de tratamento de esgoto, persistência em efluentes e técnicas de remoção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v.17, n. 3, p. 61-67, Jul/Set 2012.

ANA. Agência Nacional De Águas E Saneamento Básico. **Enquadramento dos corpos d'água em classes**. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/contenidos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/encarte_enquadramento_conjuntura2019.pdf. Acesso em: 01 jan. 2020.

ANACLETO, T. F. **Avaliação exergética e otimização de uma unidade industrial utilizada para a produção de clínquer [recurso eletrônico]**. 2021. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2021.

AREIAS, I. O. R.; et al. Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, n. 367, p. 343–349, jul. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama 2010 dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, p. 1–199, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama 2017**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama 2021**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2011**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, p. 186, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2012**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, p. 114, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS.

ABRELPE - Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020.** São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama dos RSU no Brasil 2015.** São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE - Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019.** São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2018/2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:2004:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12614:1992:** Águas - Determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) – Método de incubação (20°C, cinco dias). Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:2014:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648:1986:** Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648:1986:** Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

AZZI, S. S. **Influência da pozolanicidade e do efeito fíler na resistividade elétrica volumétrica e superficial do concreto.** 2020. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2020.

BABISK, M. P.; et al. Evaluation and application of sintered red mud and its incorporated clay ceramics as materials for building construction. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 2, p. 2186–2195, mar/abr. 2020.

BAEZA, F.; et al. Blending of industrial waste from different sources as partial

substitution of Portland cement in pastes and mortars. **Construction & Building materials**, v. 66, p. 645–653, set. 2014.

BLANC, L. R. Propriedades mecânicas do concreto substituindo 20% da areia por 10% de lodo incinerado e 10% de pó de pedra. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 58., 2014, Bento Gonçalves. **Anais[...]** São Paulo : UFVJM, 2014. p. 2062-2070.

BRASIL. **Lei n. 11.455, de 5 de janeiro de 2007**. Diretrizes nacionais para o saneamento. Brasília: Casa Civil, 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 01 jan. 2022.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 18 - Segurança e saúde no trabalho na indústria da construção**. [Brasília]: [Min. do Trabalho e Emprego], 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-18-atualizada-2020-1.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2021.

BRASIL. **Resolução 357/2005**. Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Brasília: Casa Civil, 2011. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>. Acesso em: 01 jan. 2022.

BRASIL. **Resolução 498/2000**. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, 2020. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=797. Acesso em: 01 jan. 2022.

CAPPELLESSO, V. G.; et al. Use potential of a paper sludge waste from tissue paper industries in cementitious materials. **Revista Materia**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, 2020.

CHAGAS, L. S. V. B.. **Estudo da incorporação de lodo de esgoto calcinado em argamassas como substituto parcial do cimento portland**. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2019.

CHANG, Z.; et al. Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials : A review. **Resources, Conservation & Recycling**, Holanda, v. 154, n. Jun 2019, p. 104606, 2020.

CHIOU, I.; et al. Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. **Waste Management**, v. 26, p. 1453–1461, 2006.

CHUKA-OGWUDE, D.; OGBONNA, J.; MOHEIMANI, N. A review on microalgal culture to treat anaerobic digestate food waste effluent. **Algal Research**, v. 47, n. Ago. 2019, p. 101841, mai. 2020.

COVRE, N. S. **Avaliação da sedimentabilidade do lodo biológico de um processo de lodos ativados**. 2020. Monografia (graduação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2020.

CUSIDÓ, J. A.; CREMADES, L. V. Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies. **Waste Management**, v. 32, n. 6, p. 1202–1208, jun. 2012.

CYR, M.; COUTAND, M.; CLASTRES, P. Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1278–1289, Ago. 2007.

COSTA, F. M. S. **Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento portland**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio Grande do Norte, 2014.

SOUZA, M. M. et al. Uso do lodo de esgoto na produção de agregados leves: uma revisão sistemática de literatura. **Revista Materia**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, 2020a.

LIMA, J. F. **Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concretos de cimento Portland**. 2013. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Rio Grande do Norte, 2013.

LIMA, W. F.; GUTJAHR, A. L. N.; PONTES, A. N. Impactos ambientais provenientes das atividades de olarias nas regiões brasileiras. **Environmental Scientiae**, v. 3, n. 2, p. 13–17, Jul. 2019.

OLIVEIRA, C. T. F. A.; et al. Incorporação de cinza de lodo de estação de tratamento de esgoto de abatedouro de aves em cimento. **Revista Valore**, Rio de Janeiro, v. 4, p. 210-226, 2019.

DJANDJA, O. S. et al. From wastewater treatment to resources recovery through hydrothermal treatments of municipal sewage sludge: A critical review. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 151, p. 101–127, jul. 2021.

EUROSTAT (European Union Statistics Office). **EU direct investment income, by country and economic activity**. União Europeia: EUROSTAT, 2021.

FELIPE, A. dos S.. **Utilização de nanotubos de carbono e nano-sio2 em argamassas produzidas com cinzas do lodo de esgoto em substituição parcial do cimento portland**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) Programa de Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.

FONTES, C. M. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; BARBOSA, M. C. Cinza de lodo de esgoto (CLE) em concretos de alto desempenho: caracterização e aplicação. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 9, n. 6, p. 989–1006, nov. 2016.

GALDINO, L. A. Mecânica dos fluidos aplicada ao projeto de estações de tratamento de água, esgoto e efluentes industriais. **Revista científica da UMC**, Mogi das Cruzes, v. 6, n.1, p. 1-11, Jun. 2021.

GEYER, A. L. B. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto**. 2001. Tese de doutorado em Engenharia Civil - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

GHERGHEL, A.; TEODOSIU, C.; de 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, Ago. 2019.

GOMIDES, A. V.; DOURADO, G. **Processos de tratamentos de efluentes**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) Centro Universitário de Goiás, Goiânia, 2020.

GONÇALVES, D.; MOL, M. P. G.. Destinação final de lodo de esgoto: proposição para auxílio em tomadas de decisão a partir de uma revisão de literatura. **REVISTA AIDIS**, Cidade do México, v. 14, n. 1, p. 90–106, Abr. 2021.

GONZÁLEZ-CORROCHANO, B. et al. Valorization of washing aggregate sludge and sewage sludge for lightweight aggregates production. **Construction and Building Materials journal**, Reino Unido, v. 116, p. 252–262, Jul.2016.

GONZÁLEZ-CORROCHANO, B.; Alonso-Azcárate, J.; Rodas, M. Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes. **Journal of Environmental Management**, v. 90, p. 2801–2812, Jun. 2009.

GRUHLIK, Y.; LINGE, K.; JOLL, Cynthia. Removal of organic micropollutants in waste stabilisation ponds : A review. **Journal of Environmental Management**, v. 206, p. 202–214, Jan. 2018.

HASANBEIGI, A.; PRICE, L.; LIN, E. Emerging energy-efficiency and CO 2 emission-reduction technologies for cement and concrete production : A technical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 6220–6238, Out. 2012.

HE, B. Lightweight Ceramsite based on sewage sludge made by Muffle furnace. *In*: CONFERENCE ON ENERGY MATERIALS AND ENVIRONMENT ENGINEERING. 3., 2017. Bangkok. **Anais [...]** Shapingba District: Chongqing City Management College, 2017, p.1-6.

HE, J.; et al. Utilization of soda residue and ground granulated blast furnace slag to stabilize/ solidify sewage sludge in leachate soaking environment. **Water Science and Engineering**, v.14, n. 4, p.304-313, Dez. 2021.

HUANG, Z.; et al. Investigation on gasification performance of sewage sludge using chemical looping gasification with iron ore oxygen carrier. **International Journal of Hydrogen Energy**, Miami, v. 42, n. 40, p. 25474–25491, Out. 2017.

HUSEIEN, G. F. et al. Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, n. May, p. 54–74, Dez. 2017.

JUAREZ, R. I. C.; FINNEGAN, S. The environmental impact of cement production in Europe: A holistic review of existing EPDs. **Cleaner Environmental Systems**, Reino Unido, v. 3, n. August, p. 100053, Dez. 2021.

KULAKOWSKI, M. P.; et al. Contribuição à avaliação ambiental de materiais e componentes construtivos: proposta de método para obtenção de extrato lixiviado. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 69-81, Dez. 2014.

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**, Belo Horizonte, v. 152, p. 558–567, Out. 2017.

LEITE, J. C. P. S.; NETO, M. T. R. Meio Ambiente e os Embates da Construção Civil. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 6, n. 2, Jul./Dez. 2014.

LI, M et al. On the hydrodynamics and treatment efficiency of waste stabilisation ponds: From a literature review to a strategic evaluation framework. **Journal of Cleaner Production**, v.183, p.495-514, Mai. 2018.

LIN, K. L.; LIN, C. Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material. **Cement and Concrete Research**, Suíça, v. 35, n. 10, p. 1999–2007, Out. 2005.

LIU, M.; et al. Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment. **Ceramics International**, Italy, v.4, n.4, p. 4313-4319, Mar. 2018.

LOPES, V. dos S.; et al. Estudo da coagulação/floculação de água com turbidez moderada na sedimentação e flotação por ar dissolvido. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. 567–572, Jul./Ago. 2020.

LOPP, P. L.; MENDES, A. T. Análise de sistemas de tratamento de efluentes de abatedouros bovinos por lagoas de estabilização e por reator uasb seguido de lagoa de polimento. **Revista aidis**, Cidade do México, v. 13, n. 2, p. 640–654, Ago. 2020.

LYNN, C. J.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S. Environmental impacts of sewage sludge ash in construction: Leaching assessment. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 136, n. February, p. 306–314, Set. 2018.

MA, Y.; et al. Autotrophic denitrification in constructed wetlands: Achievements and challenges. **Bioresource Technology**, v.318, p. 123778, Dez. 2020.

MACIEL, L.; et al. Incorporação de resíduo ponta de cigarro em cerâmica argilosa para telha. *In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE*. 3., 2020, Gramado. **Anais [...]** Rio de Janeiro: UENF-RJ, 2020. p. 1–9.

MAKNI, H.; et al. Leaching test for assessing compliance with environmental requirements of fired clay bricks incorporated by deinking paper sludge. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123155, Jun. 2021.

MARQUES, J. R. A.; NUNES-GUTJAHR, A. L.; BRAGA, C. E. de S. Situação sanitária e o uso da água do Igarapé Santa Cruz, município de Breves, Arquipélago de Marajó, Pará, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. 597–606, Jul./Ago. 2020.

MARQUES, M. B. L.; AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P. Wetlands: uma alternativa ecológica para o tratamento de efluentes. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, São Paulo, v. 6, n. 41, p. 21–33, Dez. 2018.

MASSI, V. M. **Desenvolvimento de um modelo de estação de tratamento de efluentes (ETE) didático de bancada**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

MORAIS, N. W. S.; dos SANTOS, A. B. Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reúso de águas residuárias de diversos estados do Brasil. **Revista DAE**, São Paulo, v. 67, n. 215, p. 40–55, Jan./Mar. 2019.

MOURA, A. F. F.; et al. Reaproveitamento energético do lodo de estação de tratamento de esgoto – uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Minas Gerais, v. 6, n. 5, p. 740–747, Dez. 2020.

MOURA, L. S.; et al. Avaliação da adesividade do ligante asfáltico modificado com lodo têxtil por meio do processamento digital de imagens. **Research, Society and Development**, São Paulo, v.10, n.4, 2021.

MUN, K. J. Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete. **Construction and Building Materials**, Belo Horizonte, v. 21, p. 1583–1588, Jul. 2007.

NOTARI, C. A.; et al. Tratamento de efluentes em um polo agroindustrial do Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, Paraíba, v. 7, n. 16, p. 937–951, Ago. 2020.

OLIVEIRA, D. C. da S.; AZEVEDO, P. A.; CAVALCANTI, L. Processos biológicos para o tratamento efluentes : uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, Paraíba, v. 8, p. 397–415, Abr. 2021.

OWUSU-TWUM, M. Y.; SHARARA, M. A. Sludge management in anaerobic swine lagoons: A review. **Revista de Gestão Ambiental**, v.271, p. 110949, Out. 2020.

PASSOS, E. S.; et al. Tratamento de águas cinzas por meio de filtro com leite associado de resíduos da construção civil, esponjas utilizadas e antracito. **Revista Tecnologia e Ambiente**, Santa Catarina, v. 27, 2021.

PATRÍCIO, A. R.; VILAS BOAS, R. M. R. P.; GALDINO, M. T. Gerenciamento e tratamento de efluentes líquidos da produção de produtos de laticínios de qualidade superior com dimensionamento de uma estação de tratamento de efluentes a ser implantada em uma indústria localizada em Uberaba-MG . **Brazilian Journal of Development**, Minas Gerais, v.7, n.4, p. 37278-37292, Abr. 2021.

PEDROZA, L.; et al. Lodo de esgoto doméstico: características físicas, químicas e biológicas. **Revista Multidebates**, Tocantins, v.3, n.2, p. 206–218, 2019.

PESSANHA, L. S. P. **Incorporação do lodo primário da estação de tratamento de efluente de papel em cerâmica vermelha**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2019.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. F.; do ESPÍRITO SANTO, B. C. Aspects of waste co-processing in clinker kilns. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 1–10, Mar. 2011.

RUBAN, D. A.; et al. Combined mineral and geoheritage resources related to kaolin, phosphate, and cement production in Egypt: Conceptualization, assessment, and policy implications. **Sustainable Environment Research**, Taiwan, v. 28, n. 6, p. 454–461, Nov. 2018.

SANTOS, C. P. D.; et al. Carvão ativado como estratégia para remoção de interferentes interferentes endócrinos. CONGRESSO BRASILEIRO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Anais online [...]**. Belo Horizonte: UniBH, 2020.

SILVA, G.; et al. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, Minas Gerais, v.6, n.7, p. 46883–46896, 2020.

SILVA, J. D. J. **Avaliação da potencialidade de incorporação de lodo de uma indústria de produtos de limpeza como adição mineral em concretos de cimento portland**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

SOUZA, M. M.; et al. Developing and classifying lightweight aggregates from sewage sludge and rice husk ash. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, Jun. 2020b.

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, Nov. 2018.

TAY, J.-H; SHOW, K.-Y. Bricks manufactured from sludge. **J. Environ.** Reston, v. 117, n. 2, p. 236–246, 1987.

TEIXEIRA, L. P.; et al. Wetland construído como alternativa para o Tratamento terciário em municípios sem sistema de coleta de esgoto: uma revisão bibliográfica. **Revista extra**, Rio de Janeiro, v.4, n.21, p. 1–23, 2021.

TSAI, C.; WANG, K.; CHIOU, I. Effect of $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ – flux ratio change on the bloating characteristics of lightweight aggregate material produced from recycled sewage sludge. **Journal of Hazardous Materials**, v. 134, p. 87–93, Jun. 2006.

Tuan, B.; et al. Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 334–339, Out. 2013.

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 86/278/EEC de 12 Junho 1986**. Proteção do ambiente, e em particular do solo, na utilização de lamas de depuração na agricultura. União Europeia, 2022. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1986/278/2022-01-01>. Acesso em: 01 jan. 2022.

WANG, T.; et al. Hydration kinetics, freeze-thaw resistance, leaching behavior of blended cement containing co-combustion ash of sewage sludge and rice husk. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 361–370, Jan. 2017.

WANG, X.; et al. Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash. **Waste Management**, v. 29, n. 4, p. 1330–1335, Abr. 2009.

YAKAMERCAN, E.; ARI, A.; AYGÜN, A. Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, p. 128568, Out. 2021.

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, Nov. 2013.

ZHOU, G.; et al. Selecting sustainable technologies for disposal of municipal sewage sludge using a multi-criterion decision-making method: A case study from China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161 p. 104881, Out. 2020.