

# ESTUDO DO APROVEITAMENTO DO LODO ORIUNDO DAS ETES NA CONSTRUÇÃO CIVIL: DE REJEITO A RECURSO AMBIENTAL

## STUDY OF THE UTILIZATION OF SLUDGE FROM ETES IN CIVIL CONSTRUCTION: FROM WASTE TO ENVIRONMENTAL RESOURCE

Tatiana Pereira da Silva Souza<sup>1</sup>  
Robson José Silva<sup>2</sup>

### RESUMO

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) refere-se a uma estrutura de propriedade pública ou privada utilizada para o tratamento de esgoto sanitário. O lodo de esgoto gerado no processo de tratamento apresenta um alto potencial de risco à saúde pública e ao meio ambiente. Sua destinação final também denota preocupação, visto a grande quantidade gerada. Além disso, quando não manejado adequadamente, pode provocar graves problemas socioambientais. Neste sentido, é eminente a busca por soluções e alternativas que possam sanar ou reduzir os problemas ambientais enfrentados. Dessa forma, o objetivo proposto teve por finalidade estudar por meio de revisão bibliográfica criteriosa a origem e caracterização do lodo de ETES e seu potencial na construção civil, a partir de sua aplicação como material suplementar à argamassa, ao concreto e à pavimentação. O trabalho se deu por meio de pesquisa nas principais bases: Periódicos CAPES, Google Acadêmico, Scielo e Scopus; com trabalhos publicados nos últimos 30 anos. Como resultado, na avaliação da argamassa, os teores de incorporação de lodo mais indicados foram de 10% e 20%. Para o concreto, a substituição do agregado miúdo ou adição ao cimento por lodo apresentaram os teores de 5% e 10% como os de maior relevância. Por fim, na pavimentação, a utilização de lodo em misturas da base, sub-base e subleito tiveram os melhores valores de dosagem na ordem de 5% a 7%. Em termos gerais, o lodo de ETE apresentou viabilidade quanto ao aproveitamento na construção civil, demonstrando seu potencial uso como recurso ambiental.

**Palavras-chave:** aproveitamento de lodo; substituição; incorporação; resíduo; recurso.

### ABSTRACT

A Sewage Treatment Station (ETE) refers to a publicly or privately owned structure used for the treatment of sanitary sewage. The sewage sludge generated in the treatment process presents a high potential risk to public health and the environment. Its final destination also denotes concern, given the large quantity generated. Furthermore, when not managed properly, it can cause serious socio-environmental problems. In this sense, the search for solutions and alternatives that can solve or reduce the environmental problems faced is eminent. Thus, the proposed objective was to study, through a careful literature review, the origin and characterization of STP sludge and its potential in civil construction, based on its application as a supplementary material to mortar, concrete and paving. The work was carried out through research in the main databases: CAPES Periodicals, Google Scholar, Scielo and Scopus; with works published in the last 30 years. As a result, when evaluating the mortar, the most recommended sludge incorporation levels were 10% and 20%. For concrete, replacing

---

<sup>1</sup> Bacharelada em Engenharia Civil pela Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2024.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Civil Universidade Federal de Pernambuco, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2017.

fine aggregate or adding cement to sludge presented the levels of 5% and 10% as the most had the best dosage values in the order of 5% to 7%. In general terms, ETE sludge was viable for use in civil construction, demonstrating its potential use as an environmental resource.

**Keywords:** sludge utilization; replacement; incorporation; residue; resource.

## INTRODUÇÃO

A elevada concentração urbana tem acarretado diversos problemas ambientais globais. Uma das problemáticas estudadas mais relevantes relaciona-se ao destino adequado dos milhões de toneladas de lodos gerados diariamente (Yada et al., 2020). Neste contexto, o esgoto doméstico representa uma alta demanda, acarretando no aumento da necessidade de unidades de estações de tratamento de esgotos (ETEs) e consequentemente na produção mais elevada de lodo resultante do processo (Prates, 2022). Este material é definido na Resolução nº 375, como resíduo gerado nos processos de tratamento de esgoto sanitário, formado por uma fonte de matéria orgânica, nutrientes e patógenos com potencial de risco à saúde pública, ao ambiente e à proliferação de vetores de moléstias e organismos nocivos (Brasil, 2006).

Segundo Klein e Oliveira (2019), a geração anual do lodo proveniente de tratamento de esgoto sanitário no Brasil alcança cerca de 150 mil a 220 mil toneladas por ano. Assim, a Lei nº 14.026 indica que disposição final do lodo, vem se caracterizando como um desafio para os governantes e profissionais do setor no cenário nacional (Brasil, 2020).

Desde de 1992 conforme o Salão Verde a destinação de resíduos vem sendo discutida (Ecos [...], 1992). Com isso, a Agenda da Conferência Mundial de Meio Ambiente reconhece a importância da destinação adequada dos resíduos gerados nos grandes centros urbanos ao pontuar no capítulo 21 o tema “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com o esgoto”. O tema citado definiu quatro

programas prioritários: a redução da produção de resíduos, o aumento ao máximo de reutilização e reciclagem, a promoção de depósitos e tratamento ambientalmente saudável e a ampliação do alcance dos serviços que se ocupam com os resíduos (Maciel; Melhorim, 2019).

Uma das alternativas viáveis de reaproveitamento do lodo é a utilização do mesmo como adubo orgânico, visto o elevado teor de nitrogênio em sua composição. Portanto, o adubo pode ser aproveitado pelas plantas como um nutriente essencial e de considerável valor econômico (Bindá, 2022). Além do nitrogênio, o lodo também pode fornecer altos teores de fósforo e potássio. Dentre todos os benefícios, ainda é possível destacar o aumento do teor de micronutrientes essenciais (Zn, Cu, Mn e Mo), o aumento da capacidade de retenção de água e uma melhor estruturação do solo pela presença de matéria orgânica (Garcia et al., 2009).

Com base nos riscos ambientais e no cuidado com a saúde da população é de extrema importância o acompanhamento das exigências legais sobre as técnicas de manejo e gestão do lodo (Soares; Madureira, 2018). Neste aspecto, é possível analisar a Resolução CONAMA nº 305 que tem como intuito adequar os princípios de coleta, armazenamento e destinação final dos resíduos (Brasil, 2002).

Malliou et al. (2007) reforçam que para o êxito de um plano de resíduos, o processo de eliminação de materiais perigosos é fundamental. Por meio da estabilização dos patógenos advindos do lodo há uma maior aceitabilidade ambiental quanto ao seu reaproveitamento.

Isto posto, pode-se acrescentar como medida mitigadora a reutilização do

lodo como insumo da construção civil. Dentre as vantagens deste tipo de reúso é possível citar a redução do volume de material a ser lançado como expurgo e em aterros, além da redução da exploração de jazidas de agregados e aglomerantes (Júnior, 2019). Vale salientar que a indústria cerâmica possui um leque de possibilidades para aceitação de novos materiais como componentes na matéria prima, sendo uma oportunidade vantajosa a inserção do lodo dentro desta perspectiva (Medeiros, 2018).

Diante do exposto, este documento tem como propósito avaliar o potencial aproveitamento do lodo oriundo das ETEs na construção civil por meio de investigações relacionadas a sua aplicação em argamassa, concreto e pavimentação.

## METODOLOGIA

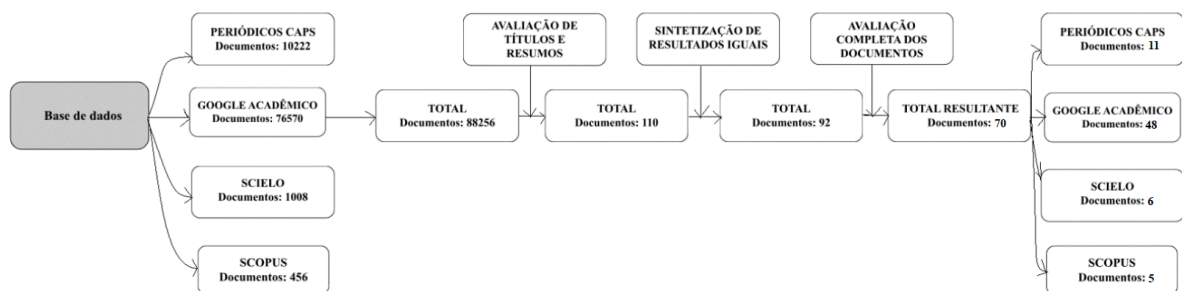
O presente artigo tem como base a pesquisa qualitativa, de caráter descritivo-exploratório, tendo como foco de investigação estudos da origem e caracterização do lodo advindo das ETEs, bem como a possível inserção deste material na construção civil. Os meios de busca utilizados para embasar a pesquisa

se concentraram nas principais bases de dados: Periódicos CAPES, Google Acadêmico, SCIELO e SCOPUS; onde foram investigados trabalhos publicados nos últimos 30 anos, em virtude das pesquisas de caracterização e conceitos iniciais tratados fortemente nessas décadas.

Tendo por finalidade a análise crítica de conteúdos, as informações foram filtradas por meio das seguintes palavras chaves: lodo de ETE, lodo de ETE na construção civil, lodo de ETE em argamassa, lodo de ETE em concreto e lodo de ETE em pavimentação. Dentro deste contexto foram avaliados artigos; monografias, dissertações, teses, NBRs e resoluções. Dentre as principais NBRs, se destacam: NBR 13281, NBR 5752. No caso das resoluções, se evidenciam: as do Brasil (2006) associada à Resolução nº 375 do CONAMA e Brasil (2006) associada ao Manual de Pavimentação do DNIT.

Na Figura 1 observa-se o diagrama de fluxo de pesquisa, onde é possível acompanhar o processo de investigação e escolha dos artigos utilizados neste estudo. Ao final do processo foram selecionados um total de 70 trabalhos baseados nos seguintes critérios de sumarização: avaliação de títulos e resumos, sintetização de resultados iguais e avaliação completa dos documentos.

Figura 1 - Diagrama de fluxo de pesquisas



Fonte: A autora (2024).

A partir da escolha dos trabalhos, foi analisada a inserção sustentável do lodo na construção civil ( argamassa, concreto e pavimentação) sob diferentes percentuais e

tratamentos de utilização, como material suplementar.

## REFERENCIAL TEÓRICO

### Origem do lodo

As Estações de Tratamento de Esgoto são definidas como um conjunto de técnicas associadas a unidades de tratamento; equipamentos; órgãos auxiliares como canais, vertedores e tubulações; e também sistemas de utilidades para água potável, combate a incêndio, distribuição de energia e drenagem pluvial. Também pode-se inferir que a ETE tem por finalidade, diminuir cargas poluidoras do esgoto sanitário e condicionamento da matéria residual que provém do tratamento NBR 12.209 (2011).

Munhoz (2020) explica que o processo de tratamento de esgotos compreende etapas bem definidas entre operações e processos unitários, dividido em tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e terciário.

O tratamento preliminar objetiva a remoção de areia e sólidos grosseiros de maiores dimensões em suspensão, através de mecanismos de remoção como peneiramento e sedimentação. O tratamento primário é caracterizado pela remoção de sólidos em suspensão sedimentares e sólidos flutuantes. Já o tratamento secundário tem como objetivo a remoção da matéria orgânica dissolvida (DBO solúvel) e matéria orgânica em suspensão (DBO particulada). Por fim, o processo de tratamento terciário objetiva a redução das concentrações de nitrogênio e fósforo, fundamentada comumente em fases biológicas realizadas nas etapas de nitrificação e a desnitrificação (Munhoz, 2020).

Batista (2015) infere que as fases de tratamento são definidas consoante a entrada de esgoto e passagem do lodo gerado para etapas posteriores. Estações que recebem o esgoto bruto, passam-no para decantadores primários, que geram o lodo primário composto por sólidos sedimentáveis. Estes ao serem passados para a etapa biológica formam o lodo

secundário e ou biológico. Areias (2015) indica que as unidades para o tratamento preliminar costumam ser incluídas no tratamento secundário, entretanto as unidades de tratamento primário podem ou não ser introduzidas neste processo.

Os métodos de tratamento a nível secundário mais utilizados são as lagoas de estabilização e variantes; lodos ativados e variantes; filtro biológico e variantes; tratamento anaeróbio e disposição sobre o solo (visto como tratamento e disposição final). Na Figura 2 é possível observar a Estação de Tratamento ETE Mangueira, cujo tratamento é formado por reator UASB seguido de lagoa de polimento, configurando um sistema de tratamento a nível secundário.

Figura 2 - ETE Mangueira



Fonte:  
<https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/about/>.

Conforme Betemps (2018), os lodos de estação de tratamento de esgoto são gerados a partir da biomassa microbiana que decanta durante o processo de tratamento do esgoto bruto, no qual os microrganismos decompositores e a própria matéria orgânica digerida do esgoto se acumulam no fundo dos tanques das ETEs. Em complemento a isto, o lodo de esgoto é definido como um subproduto que se apresenta em forma de resíduo sólido e pastoso, e de natureza predominantemente orgânica, rico em nutrientes, com grande potencial poluidor (Pedroza; Lôbo; Vieira; Sousa; Silva, 2019). Neste sentido os lodos podem ser formados desde o tratamento primário, com maior incidência no tratamento secundário, podendo seguir para o tratamento terciário.

Conforme Batista (2015), os diferentes tipos de lodo advêm dos processos de tratamento a que estes resíduos são submetidos, sejam por meio

das tecnologias empregadas, intermediações das etapas, alternativa de estabilização e condicionamento do lodo, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação de lodos de ETEs

Tipo de lodo	Origem	Características
Lodo bruto	Por sedimentação.	Coloração acinzentada, é pegajoso, de odor desagradável e pode decompor-se facilmente.
Lodo digerido	Processos de estabilização de lodos.	Redução de SSV superior a 40%, dependendo do processo empregado. Quando bem digerido não possui odor ofensivo.
Lodo aeróbio não estabilizado	Sistemas de lodos ativados e em reatores aeróbios com biofilmes – alta carga.	Biomassa de microrganismos aeróbios, gerada nos processos metabólicos de degradação da matéria orgânica, descartada do sistema. Necessita de processo de digestão complementar.
Lodo aeróbio estabilizado	Lodos ativados com aeração prolongada e reatores aeróbios com biofilmes – baixa carga.	Lodo excedente, resultante de respiração endógena prevacente, com um menor teor de matéria orgânica e maior quantidade de sólidos inorgânicos, não havendo necessidade de uma etapa posterior de digestão.
Lodo anaeróbio estabilizado	Processos de degradação da matéria orgânica, em condições anaeróbias.	Ocorrência em reatores anaeróbios e no fundo de lagoas de estabilização. Menor teor de matéria orgânica, quanto melhor a digestão, menor o potencial de geração de odor.
Lodo misto	Tratamento conjunto de lodos excedentes, de origem em tratamentos primário e secundário.	Composição do lodo que lhe deu origem.

Fonte: Adaptado de Batista, 2015.

### Caracterização do lodo de ETEs

Segundo Castro (2019) a característica do lodo de ETE é resultante da natureza do esgoto, o tipo de

tratamento empregado na estação e o tratamento a que o lodo é submetido, conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Caracterização de lodos gerados em ETEs

Lodo resultantes	Caracterização
Tratamento primário	Sólidos totais secos: 2 a 8%, com 60-80% correspondendo à fração volátil e pH de 5 a 8.
	Varição de umidade: geralmente é elevada de 95,0 - 97,5%, 94-96% e 95%.
	Concentração de nitrogênio total é de aproximadamente 4500 mg/L.
Lodo ativado (tratamento secundário)	Sólidos totais baixos (0,83 a 1,16%), com a fração volátil variando entre 59 e 88% e faixa de variação de pH de 6,5 a 8,0.
	Varição de umidade: de 98,0 a 99,5%.
	Concentração de nitrogênio total é de aproximadamente 6.200 mg/L.
Lodo secundário de filtração biológica	Varição de umidade: de 92% a 97% e frações voláteis de 45 a 70%.
Lodo digerido da estabilização aeróbia ou anaeróbia do lodo cru	Varição de umidade: de 87% a 94% nos lodos primários bem digeridos.
	Sólidos totais secos de 6 a 12% e os sólidos voláteis representam 30 a 60% dessa matéria sólida. O pH no lodo digerido varia de 6,5 a 7,5.
	Concentração de nitrogênio: de 2.200 mg/L e 25 a 50% digerido correspondente à fração amoniacal resultante do processo de decomposição da matéria orgânica presente no lodo cru.

Fonte: Adaptado de Suassuna, 1995.

Conforme Limongi (2019), as bactérias vivas constituem boa parte do lodo, entretanto variam de acordo com o seu tipo. Aisse et al. (1999) detalha que a fração de massa bacteriana do lodo aeróbio pode chegar entre 50% e 90%, em contrapartida o lodo anaeróbio atinge valores no segmento de 2% a 20% de biomassa.

Ferreira et al. (1999) em suas análises apresentam a composição química e propriedades típicas do lodo consoante estudos antes e após o processo de digestão (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição química e propriedades típicas do lodo bruto e digerido

Características	Lodo primário cru		Lodo digerido	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média
Sólidos totais (%)	2,0 - 8,0	5,0	6,0 - 12,0	10,0
Sólidos voláteis (%)	60 - 80	65	30 - 60	40
Proteínas (%)	20 - 30	25	15 - 20	18
Nitrogênio (%)	1,5 - 60	4,0	1,6 - 6,0	4,0
Fósforo (%)	0,8 - 3,0	2,0	1,5 - 4,0	2,5
Potássio (%)	0,0 - 1,0	0,4	0,0 - 3,0	1,0
pH	5,0 - 8,0	6,0	6,5 - 7,5	7,0
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	500 - 1500	600	2500 - 3500	3000
Ácidos orgânicos (mg/L)	200 - 2000	500	100 - 600	200

Fonte: Adaptado de Ferreira et al., 1999.

Visentin et al. (2017) pontuam que a destinação final do resíduo denota uma preocupação, visto que existe uma grande quantidade gerada, chegando a prejudicar cerca de 50% do orçamento operacional do sistema de tratamento quando manejado inadequadamente.

Moreira et al. (2019) indicam que tratar este subproduto diante de qualquer origem ou finalidade, torna-se

fundamental para a redução de seu volume na água e promoção da estabilidade da matéria orgânica, devido a problemas recorrentes de disposição final inadequada no meio ambiente. Dessa forma, existem diferentes métodos de reaproveitamento do lodo, diferenciando-se conforme características inerentes a cada aplicação (Silva, 2018).

### Construção Civil

Segundo a Resolução nº 375, salienta a importância do manejo e gerenciamento dos resíduos, ao descrever a disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2006). Neste contexto, Pereira (2012) evidencia que no Brasil, aproximadamente 80% do lodo de ETE é descartado em aterros sanitários e apenas uma parcela de 5% é usada na agricultura. Contudo, apesar de uma realidade ainda preocupante, o autor apresenta perspectivas de mudanças neste cenário ao longo do tempo, visto que, este resíduo pode ser reciclado e incorporado a outros materiais da construção civil.

Dentre os materiais em análise é possível destacar que a inserção do lodo em diferentes níveis de tratamento (*in natura*, calcinado, incinerado, seco em estufa, dentre outros) com e sem a formação da cinza, pode ser utilizada para reduzir custos e sanar alguns problemas ambientais característicos, como a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Uso de lodo na argamassa

De acordo com a NBR 13281 (2023), a argamassa é definida como uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, incluindo ou não aditivos ou adições minerais, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou de forma industrializada. Este composto, ainda de acordo com a NBR 13281 (2023), é classificado conforme sua aplicação como: argamassa para

assentamento; argamassa para revestimento de paredes e tetos; argamassa de uso geral; argamassa de reboco; argamassa decorativa em camada fina e argamassa decorativa em monocamada.

Basto (2018) verificou que a incorporação do lodo calcinado ao cimento Portland é uma ótima alternativa devido às suas características químicas, físicas e biológicas. Segundo Moura et al. (2020), o processo de incineração do lodo ocorre sob temperaturas de 550°C a 950°C, usualmente 800°C, promovendo a eliminação de organismos patogênicos e a redução de volume. É possível destacar que este resíduo pode adquirir propriedades pozolânicas por apresentar em sua composição o óxido de silício ( $SiO_2$ ) e o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ).

Dados do SNIC (2020) indicam que o cimento Portland além de ser um dos materiais mais utilizados no mundo, alcançou uma produção de 61.156.683 toneladas no Brasil em 2020. Quanto ao processo de produção, Lima (2019) introduz que o cimento Portland é originado da queima de matérias primas contendo cálcio, sílica e ferro-aluminatos em um tratamento térmico de temperaturas elevadas, podendo atingir 1450 °C para chegar ao ponto de calcinação.

Ainda segundo Lima (2019), o resultado da queima destes materiais gera o clínquer. Kirchheim (2013) estima que após a produção de 1000 kg de clínquer são gerados em torno de 815 kg de  $CO_2$ . Por razões ambientais, a redução da produção de  $CO_2$  seria uma meta importante. Neste contexto, a substituição parcial do cimento pelo lodo calcinado na argamassa reduz a quantidade de cimento portland e conseqüentemente contribui para a diminuição da concentração de  $CO_2$  gerado no processo produtivo desse aglomerante.

O Quadro 3 apresenta resultados de estudos de viabilidade da utilização do lodo em argamassas, levando-se em

consideração a influência dos processos de tratamento do lodo por meio de incineração, queima, secagem em estufa e calcinação, além dos percentuais de adição (incorporação) e substituição parcial da mistura da argamassa.

Quadro 3 - Detalhamento de adições de lodo de ETE em argamassa

Pesquisador	Tratamento do lodo	Porcentagens de lodo	Conclusões
Pan et al. (2003)	Incineração	Adição de 20%	As argamassas produzidas com aplicação da cinza do lodo com finura ajustada de forma mecânica apresentaram melhoras nas propriedades da argamassa.
Costa (2014)	Queima	Adição de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%	O teor de 20% representou o mais indicado por apresentar melhores desempenhos nos ensaios.
Chagas (2019)	Calcinação	Incorporação de 10%, 20% e 30%	As proporções 1:3 e 1:4,5 com 10% e 20% de lodo incorporado a 800 °C apresentaram melhores resultados para argamassas de revestimento classe D6 (densidade de massa no estado fresco maior que 2000 Kg/m <sup>3</sup> ).
Silveira (2020)	Seco em estufa e temperatura ambiente -	Substituição de 1%, 1,5% e 2%	A substituição parcial do agregado miúdo por lodo no uso em argamassa de assentamento é efetiva para argamassas de classe P4 (resistência a compressão 4,0 a 6,5 MPa) e P5 (resistência à compressão 5,5 a 9,0 MPa).
Souza et al. (2021)	Calcinação	Substituição de 10%, 20% e 30%	Os teores que apresentam melhores resultados para argamassas de assentamento estão presentes em 10% e 20% a 600 °C e 10% a 800 °C.

Fonte: A autora, 2024; NBR 13281, 2023; NBR 13278, 2005.

Todas as conclusões do Quadro 3 apresentaram percentuais passíveis de utilização do lodo em argamassa, evidenciando o potencial suplementar deste material. Pan et al. (2003), Costa (2014), Chagas (2019) e Souza et al. (2021) indicaram os maiores percentuais de inserção deste resíduo chegando até 20% sob tratamento em temperaturas de 800 °C. Já Silveira (2020), apesar de estudos com proporções menores (teores de substituição de até 2%) alcançou resultados positivos com relação à substituição parcial no agregado miúdo quando utilizados em argamassas de classificação P4 e P5.

Chagas (2019) e Souza et al. (2021) apresentaram estudos mais recentes e semelhantes de incorporação e substituição parcial do cimento Portland por lodo em argamassa. Neste contexto, os resultados percentuais de 10% e 20% assumiram proporções viáveis de utilização em argamassas de revestimento e assentamento sob calcinação em temperaturas de 600 °C e 800 °C.

No processo de análise de Chagas (2019) e Souza et al. (2021), torna-se

importante frisar que os fatores de influência para variação de desempenho e durabilidade para argamassas de assentamento, se dão conforme alguns fundamentos. Para Chagas (2019), o traço foi organizado conforme o índice de atividade pozolânica, seguindo padrões estabelecidos pela NBR 5752 (2014). No caso de Souza et al. (2021), as proporções variaram à medida que o lodo era adicionado em substituição parcial ao cimento. Ambos assumiram como parâmetro que os índices de perda de massa deveriam apresentar valores semelhantes aos demais materiais de composição da argamassa, conforme o processo de calcinação sob elevadas temperaturas, consoante a decomposição da matéria orgânica presente no resíduo.

#### **Incorporação do cimento Portland**

A pesquisa analisada por Chagas (2019), utilizou-se do lodo de tratamento secundário captado pela ETE Centro de Petrolina-PE (PT). A avaliação do resíduo ocorreu por meio de experimentos relacionados ao desempenho e à durabilidade de argamassas, através da



incorporação de proporções variáveis do lodo de esgoto calcinado ao cimento Portland de 0% (REF), 10%, 20% e 30%, sob temperaturas de 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900°C. Em continuidade, foram desenvolvidos traços de cimento:areia nas proporções de 1,0:3,0 (a/c de 0,6), 1:4,5 (a/c de 0,8) e 1:6,0 (a/c de 1,0).

As respostas obtidas para o estado da massa no estado fresco relacionaram-se ao teor de ar incorporado ( $A_i$ ), índice de consistência (IC), densidade de massa

( $\rho_{mas,f}$ ) e retenção de água ( $R_{et}$ ). Além disso, no estado endurecido, foram analisados os resultados dos ensaios de densidade da massa ( $\rho_{mas,e}$ ), resistência à compressão axial ( $R_{comp,a}$ ) em 28 dias e resistência à tração na flexão ( $R_{tra,flex}$ ). Ainda foram desenvolvidos ensaios de durabilidade da massa por absorção de água por capilaridade ( $Abs_{a,cap}$ ) em períodos de medição de 10min e 90min. A Tabela 2 apresenta os resultados mais relevantes das análises do lodo no estado fresco e endurecido.

Tabela 2 - Resultados mais relevantes das análises no estado fresco e endurecido

LOCAL (°C)-(%)/Traço	Estado Fresco				Estado Endurecido			
	$A_i$ (%)	IC (mm)	$\rho_{mas,f}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$R_{et}$ (%)	$\rho_{mas,e}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$R_{comp,a}$ (MPa)	$R_{tra,flex}$ (MPa)	$Abs_{a,cap}$ (g/cm <sup>3</sup> )
REF-0/1:3	22	263,2	2036	84	1962	27,03	5,31	0,22
REF-0/1:4,5	21	261,5	2044	84	1970	27,03	4,41	0,23
PT800-10/1:3	21	261,5	2049	85	1977	29,6	6,55	0,20
PT800-10/1:4,5	20	260,6	2057	85	1977	29,6	4,09	0,22
PT800-20/1:3	20	256,3	2072	87	2002	27,93	5,9	0,20
PT800-20/1:4,5	19	255,7	2065	87	2005	27,93	4,18	0,21

Fonte: Adaptado de Chagas, 2019.

Todos os resultados apresentaram melhores traços a 800 °C. Considerando os  $A_i$  percebeu-se que os melhores resultados ocorreram nas substituições de PT800-10/1:4,5, PT800-20/1:3 e PT800-20/1:4,5, alcançando 20% para o primeiro e segundo teor e 19% para o terceiro. Martins et al. (2018) explicam que quando o teor de ar incorporado aumenta, gera problema para as argamassas indicando aumento de porosidade. Cabe salientar, que os valores de  $A_i$  diminuíram, ficando abaixo do valor de referência.

Com relação ao IC, todos os resultados apresentaram índices de desempenho em conformidade com a NBR 13276 (2005). Da mesma forma, todos os teores de  $\rho_{mas,f}$  alcançaram valores de acordo com a classificação da NBR 13278 (2005).

Outrossim, para o caso da  $R_{et}$ , os melhores índices aumentaram com relação à referência para valor de 85% (PT800-10/1:3,0 e PT800-10/1:4,5). Com isso, os resultados da retenção de água explicam os valores de IC um pouco maiores, já que a incorporação de lodo provocou aumento de retenção de água nas argamassas.

No caso das informações adquiridas acerca da  $\rho_{mas,e}$  ocorreu aumento em todos os parâmetros quando associados aos valores de referência, passíveis de classificação para a NBR 13280 (2005).

Em continuidade, para a  $R_{comp,a}$ , todos os resultados atingiram valores maiores que os de referência, destacando-se o melhor desempenho com o valor de 29,6 MPa (PT800-10/1:3,0 e PT800-10/1:4,5). Para a  $R_{tra,flex}$  o melhor desempenho com 6,55 MPa

(PT800-10/1:3,0), mas todos os teores atingiram valores de classificação normalizados pela NBR 13279 (2005).

Por fim, todos os valores de  $A_{bsa, cap}$  resultaram em valores inferiores ao de referência, que segundo Chagas (2019) indica um baixo valor de permeabilidade e contribui para o aumento da impermeabilidade e da durabilidade das argamassas em estudo.

De forma geral, os teores de 10% e 20% com proporções de 1:3 e 1:4,5 apresentaram maior viabilidade. Assim, Chagas (2019) os define como mais significativos para argamassas de revestimento.

### Substituição do Cimento Portland

Souza et al. (2021) verificaram o comportamento das argamassas mediante a incorporação do lodo. O resíduo utilizado foi obtido pelas ETEs do Parque Novo Mundo (P) e em Barueri (B) no Estado de São Paulo. Por meio desses resíduos, após ensaios de laboratório em argamassas no

estado fresco e endurecido, conseguiram avaliar o potencial uso do lodo proveniente de ETEs, com substituição parcial de 0%, 10% e 20% do cimento Portland sob temperaturas de 600 °C e 800 °C. Em seguida, foram desenvolvidos traços de cimento:areia nas proporções de 1,0:3,0 (a/c de 0,48); 0,9:3,0 (a/c de 0,53); 0,8:3,0 (a/c de 0,60).

As respostas mais relevantes obtidas para o estado da massa no estado fresco relacionaram-se ao teor de ar incorporado ( $A_i$ ), índice de consistência (IC), densidade de massa ( $\rho_{mas, f}$ ) e retenção de água ( $R_{et}$ ). Além disso, no estado endurecido obteve-se os ensaios de densidade da massa ( $\rho_{mas, e}$ ), resistência à compressão axial ( $R_{comp}$ ) em 28 dias, e resistência à tração por compressão diametral ( $R_{tra, dia}$ ). Ainda foram desenvolvidos ensaios de durabilidade da massa por absorção de água por imersão ( $Abs_{a, ime}$ ). Com isso, os resultados em associação à argamassa de referência foram apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados mais relevantes das análises no estado fresco e endurecido

LOCAL (° C)-(%)/Traço	Estado Fresco				Estado Endurecido			
	$A_i$ (%)	IC (mm)	$\rho_{mas, f}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$R_{et}$ (%)	$\rho_{mas, e}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$R_{comp}$ (MPa)	$R_{tra, dia}$ (MPa)	$Abs_{a, ime}$ (%)
REF-0/1,0:3,0	11,37	150,0	2020	92,92	2060	27,3	4,12	5,53
B600-10/0,9:3,0	18,61	130,0	1840	97,55	2180	28,45	3,32	3,59
B600-20/0,8:3,0	22,4	133,0	1750	97,41	2220	34,46	3,59	4,02
P800-10/0,9:3,0	15,08	125,0	1920	100,0	2220	31,37	4,26	3,33

Fonte: Adaptado de Souza et al., 2021.

Considerando os  $A_i$  percebe-se que o valor mais próximo de referência ocorre na substituição com teor de 15,08% (P800-10/0,9:3,0). Neste parâmetro, Souza et al. aponta que a diferença entre os valores apresentados pode ter sido ocasionada devido a calcinação total do material sob a temperatura de 600 °C.

Com relação ao IC os resultados obtiveram índices menores que a amostra de referência. Para a  $\rho_{mas, f}$  os valores mais semelhantes ao de referência foram de 1840 kg/m<sup>3</sup> (B600-10/0,9:3,0) e 1920

kg/m<sup>3</sup> (P800-10/0,9:3,0), em conforme NBR 13278 (2005).

Outrossim, para o caso da  $R_{et}$  todos os valores tiveram resultados de classificação conforme NBR 13281 (2005). No caso das informações adquiridas acerca da  $\rho_{mas, e}$ , ocorreu um aumento considerável em todas as amostras, sendo o resultado de 2180 kg/m<sup>3</sup> (B600-10/0,9:3,0) com maior similaridade com o valor de referência 2060 kg/m<sup>3</sup> (REF-0/1,0:3,0), mas todos em conformidade com a NBR 13280 (2005).

Com relação a  $R_{comp}$ , todos os resultados atingiram valores maiores que os de referência (REF-0/1,0:3,0), destacando-se a substituição em de melhor desempenho com 34,46 MPa (B600-20/0,8:3,0). Para a  $R_{tra,dia}$ , o melhor desempenho ocorre com 4,26 MPa (P800-10/0,9:3,0), de acordo com a NBR 13279 (2005). Além disso, todos as  $Abs_{a,ime}$  resultaram em valores muito próximos à amostra de referência, representando de forma positiva a compatibilidade entre os materiais.

Dessa forma, as conclusões de Souza et al. (2021) apontam o uso do lodo em substituição ao cimento Portland na ordem de 10% e 20% sob temperatura de 600 °C e 10% a 800 °C, definindo sua viabilidade de utilização em argamassas para assentamento de paredes e tetos. Além disso, os resultados apresentados indicam que as propriedades pozolânicas do lodo permitem a viabilidade de sua inserção na execução de argamassas. É importante ressaltar que este fato permite a redução da proporção de cimento e contribui para a minimização dos riscos de impacto ambiental proveniente da produção de  $CO_2$ .

Em termos gerais, a incorporação e substituição do lodo em argamassas com percentuais de 10% e 20% são viáveis para a utilização deste material no âmbito da construção civil.

### **Uso do lodo no concreto**

De acordo com a NBR 12655 (2022) o concreto de cimento Portland é definido como o material formado pela mistura homogênea de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários como aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolânicos. Estes componentes desenvolvem suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento resultante da composição de cimento e água.

Segundo Real (2018), os benefícios do uso de adições minerais no cimento ou em concreto podem ser divididos em três categorias: benefícios de engenharia, benefícios econômicos e benefícios ecológicos. No que diz respeito aos benefícios da engenharia é possível citar: melhoria da trabalhabilidade, aumento da consistência, incremento à resistência, redução da permeabilidade, aumento da durabilidade ao ataque químico e redução nas fissuras térmicas devido o menor calor de hidratação do concreto.

Em termos econômicos pode-se pontuar a redução da utilização do cimento Portland que representa o mais caro dos materiais utilizados no concreto. Tal aspecto, por consequência, também ocasiona a redução da concentração de  $CO_2$  na atmosfera, proporcionando benefícios ecológicos (Chagas, 2019).

Assim como no caso da argamassa, é possível utilizar o lodo em substituição parcial do cimento Portland como alternativa ambientalmente favorável dentro do concreto, visto que este resíduo pode adquirir propriedades pozolânicas.

Com o intuito de definir onde melhor se adequa o lodo, torna-se necessário dividir o concreto com base em sua finalidade: estrutural e não estrutural.

Conforme informações da Engemix o concreto estrutural apresenta características fundamentais de resistência à compressão, durabilidade e rigidez, com o intuito de suportar cargas e forças atuantes sobre a estrutura. Já na a NBR 8953 (2015) o concreto não estrutural, normalmente é destinado aos elementos de função não estrutural formados por composições menos resistentes.

O Quadro 4 apresenta resultados de estudos de viabilidade da utilização do lodo em concreto, levando-se em consideração a influência dos processos de tratamento do lodo por meio de incineração e secagem ao sol, além dos percentuais de substituição da mistura do concreto.

Quadro 4 - Detalhamento da utilização do lodo em concreto

Pesquisador	Tratamento do lodo	Porcentagens de substituição	Conclusões
Khanbilvardi et al. (1995)	Incineração	Até 30%	Os resultados indicam que poderia ser possível substituir o agregado fino por cinzas de lodo na mistura do concreto.
Pérez-Carrión et al. (2014)	Incineração	10% e 20%	A fabricação de blocos de concreto com substituição de até 20% do cimento pelo lodo é uma solução viável.
Lynn, C. J. et al. (2015)	Incineração	Até 5%	O lodo tem potencial para o uso como matéria-prima na produção de clínquer de cimento e agregados leves, agregado fino, agregado de enchimento e na forma moída como componente de cimento.
Marangoni, Vanzetto e Zaleski (2018)	Secagem ao sol	5%, 10% e 15%	A substituição parcial de 5% e 10% do agregado miúdo por lodo é possível desde que seja utilizado em concretos com funções não estruturais.
Veronese et al. (2022)	Incineração	5%, 7,5% e 10%	A substituição de cimento Portland por cinza de lodo que apresentaram melhores resultados assumiram proporções de 5% e 10%.

Fonte: A autora (2024)

Todas as conclusões expostas no Quadro 4 apresentaram percentuais de no mínimo 5% de substituição do lodo no concreto. Khanbilvardi et al. (1995) e Pérez-Carrión et al. (2014) indicaram maiores percentuais de substituição, respectivamente, 30% de agregado miúdo e 20% do aglomerante no traço do concreto. Já Lynn et al. (2015), mesmo com percentual até 5%, trouxeram considerações mais diversificadas, tendo em vista que foi avaliada a substituição de agregados leves, agregado fino, agregado de enchimento, na forma moída como componente de cimento e na produção do clínquer para o cimento.

Marangoni, Vanzetto e Zaleski (2018) e Veronese et al. (2022) apresentaram estudos mais recentes e semelhantes de substituição parcial do agregado miúdo e do cimento Portland assumindo como resultados os percentuais de 5% e 10% como proporções viáveis para utilização em concreto.

De forma mais aprofundada, Marangoni, Vanzetto e Zaleski (2018) avaliaram a incorporação do lodo de ETE

como substituição ao agregado miúdo (areia) na matriz do concreto. Já Veronese et al. (2022) analisaram o potencial uso de cinza deste resíduo em substituição ao aglomerante (cimento) no concreto convencional.

#### Substituição do agregado miúdo

A pesquisa analisada por Marangoni, Vanzetto e Zaleski (2018), utilizou-se do lodo de tratamento secundário captado de uma indústria de Erechim, RS. As proporções de resíduo utilizadas foram com teores de 0% (concreto de referência), 5%, 10% e 15% de substituição por lodo seco triturado com o intuito de minimizar os efeitos da disposição final inadequada deste resíduo. A partir da substituição parcial da areia por lodo, foi realizada a caracterização do resíduo e a determinação das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.

Além disso, no concreto em análise ainda foram realizados os seguintes ensaios: composição granulométrica seguindo a NBR NM 248 (2003) para o agregado miúdo; massa específica do lodo

de acordo com a NBR 16697 (2018), a aplicação do método de análise de variância simples (*one way ANOVA*) e o Teste Tukey para interpretação dos resultados.

As respostas obtidas para as propriedades dos ensaios granulométricos relacionaram-se à dimensão máxima característica (DMC), massa específica ( $\mu$ ), massa unitária ( $\delta$ ), absorção de água ( $Abs_a$ ) e módulo de finura (MF). Além disso, após 91 dias foram analisados 28 corpos de prova para coleta de resultados de resistência à compressão uniaxial ( $R_{com, uni}$ ), resistência à tração por compressão diametral ( $R_{tra, com, dia}$ ) e absorção de água por capilaridade ( $Abs_{a,c}$ ) como observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados obtidos em substituição à areia

Material	DMC (mm)	$\mu$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	$Abs_a$ (%)	MF
Areia	1,18	2,62	1,59	0,8	1,9
Lodo seco triturado	1,18	1,63	0,7	53,8	2,01

Teor de lodo (%)	$R_{com, uni}$ (MPa)	$R_{tra, com, dia}$ (MPa)	$Abs_{a,c}$ (g/cm <sup>3</sup> )
0	35,30	2,64	1,26
5	39,16	2,73	0,78
10	40,45	2,48	0,64
15	29,68	2,19	0,85

Fonte: Adaptado de Marangoni, Vanzetto e Zaleski, 2018.

Considerando os resultados para  $R_{com, uni}$ , observa-se o melhor desempenho para as substituições de 5% e 10%, alcançando respectivamente as resistências de 39,16 MPa e 40,45 MPa. Da mesma forma, as substituições citadas alcançaram os melhores resultados para  $R_{tra, com, dia}$ , 2,73 MPa e 2,48 MPa, respectivamente.

Marangoni, Vanzetto e Zaleski (2018), ainda observaram que os percentuais de 5% e 10% apresentaram teores expressivamente semelhantes de forma a não perder as características do material de referência. Além disso, o resultado da substituição de 10%

apresentou melhores propriedades mecânicas e de durabilidade. No geral, ambos indicaram viabilidade para concreto de função não estrutural, como blocos de concreto não estrutural, placas de vedação, peças decorativas, contrapisos e pisos internos, conforme a NBR 6118 (2023).

### Substituição do aglomerante

Veronese et al. (2022) coletaram o lodo úmido advindo da ETE-Prata, TO; que possui o tratamento terciário como processo final (Alves, 2016). Neste estudo, os traços aplicados para a substituição parcial do cimento foram de 0% (concreto convencional), 5%, 7,5% e 10% por cinzas de lodo. Suas análises foram baseados na caracterização física da cinza do lodo e nos ensaios mecânicos relacionados ao concreto. Assim, foram realizados os seguintes ensaios para concreto convencional: caracterização das cinzas de lodo por meio da NBR NM 23 (2017) e NBR 11579 (2003), abatimento pelo tronco de cone (Slump test) e resistência à compressão.

As respostas obtidas para a caracterização física do cimento e da cinza de lodo de esgoto relacionaram-se à massa específica ( $\mu$ ) e ao módulo de finura (MF). Além disso, foi realizado o abatimento pelo tronco de cone ( $Ab$ ) conforme a porcentagem de substituição do cimento. Para a obtenção dos resultados da resistência média à compressão ( $R_{med, comp}$ ) foram analisados 5 corpos de prova nos períodos de 7, 28 e 63 dias, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados obtidos em substituição ao cimento

Material	$\mu$ (g/cm <sup>3</sup> )	MF (%)
Cimento	3,18	11,2
Cinza de Lodo	2,76	11,5

Teor de lodo (%)	Ab (cm)	R <sub>med, comp</sub> (MPa)		
		7 dias	28 dias	63 dias
0	9,5	19,3	31,9	32,2
5	6,0	25,1	35,0	33,6
7,5	3,5	25,3	25,7	26,9
10	0	22,6	25,0	32,9

Fonte: Adaptado de Veronese et al., 2022.

Considerando os resultados de  $\mu$  e MF percebe-se a semelhança entre os materiais de estudo, onde a cinza do lodo apresenta valores de 2,76 g/cm<sup>3</sup> e 11,5 % respectivamente. Estes resultados acabam demonstrando a capacidade do lodo como material pozolânico, suficiente para a parcial substituição do cimento.

No caso das informações adquiridas acerca do A<sub>b</sub>, os valores para 5%, 7,5% e 10% indicaram redução de trabalhabilidade, respectivamente, 6,0 cm, 3,5 cm e 0, necessitando de uma maior demanda de água. Neste caso, Veronese et al. (2022) ressaltam ainda que a trabalhabilidade pode ser aperfeiçoada com a presença de aditivos plastificantes.

Com relação aos resultados de R<sub>med, comp</sub>, observa-se que os valores para 5%, 7,5% e 10% aumentaram ao longo dos 7 dias, 28 dias e 63 dias. No entanto, as melhores resistências foram encontradas aos 63 dias para os percentuais de 5% e 10%, os quais alcançaram a marca de 33,6 MPa e 32,9 MPa, valores maiores que o de referência (32,2 MPa). Vale ressaltar, que o percentual de 7,5% apresentou uma resistência inicial superior, porém se manteve com valores próximos aos 28 e 63 dias.

Dessa forma, visando a redução dos impactos ambientais gerados na produção do concreto e melhoria da resistência à compressão deste material, os

teores de 5% e 10% apresentaram maior viabilidade.

Em termos gerais, avaliando a substituição do lodo para agregado miúdo e aglomerante, os estudos apontam esses percentuais como mais significativos para a reutilização na construção civil.

### Uso do lodo em pavimentação

Pavimentos são definidos segundo o Manual de Pavimentação, como uma superestrutura constituída pela combinação de camadas finitas, assentes sobre um terreno ou fundação denominado como subleito. Ainda conforme o manual torna-se possível classificar os pavimentos em: flexível, cuja carga diminui à medida que aumenta a profundidade; semi-rígido, com base composta por aglutinante de propriedades cimentícias; e rígido, detentor de elevada rigidez, capaz de suportar integralmente as tensões atuantes em seu revestimento (Brasil, 2006).

Segundo Bernucci et al. (2010), os pavimentos são compostos por camadas de base e sub-base assentadas sobre uma fundação, conhecida como subleito, cujo comportamento estrutural está relacionado à espessura e rigidez de cada um destes elementos, além das interações entre as diferentes camadas do pavimento.

Segundo Araújo (2021), a possibilidade de adição do lodo ao solo para uso na pavimentação, resultaria na destinação segura e eficiente dos contaminantes aprisionados em uma matriz sólida e na economia do volume de solo utilizado.

O Quadro 5 apresenta resultados de estudos de viabilidade da utilização do lodo em pavimentação, levando-se em consideração a influência dos processos de tratamento do lodo por meio da secagem ao ar, *in natura*, seco em estufa e calcinação, além dos percentuais de utilização em base, sub-base e subleito.

Quadro 5 - Detalhamento da mistura do lodo de ETE em pavimentação

Pesquisador	Tratamento do lodo	Percentagens de mistura	Conclusões
Lucena et al. (2012)	Seco ao ar	5, 10, 15 e 20% lodo + solo fino siltoso.	Existe viabilidade técnica do uso de lodo em uma porcentagem de 10% em base e sub-base.
Pereira (2012)	Calcinado	5, 10, 20, 30% lodo + 95, 90, 80, 70% solo siltoso + (0, 3, 6, 9% cimento).	As análises apresentaram viabilidade técnica do uso de lodo em uma porcentagem de 20% em base, sub-base e subleito a 550° C de calcinação.
Kelm (2014)	<i>In natura</i> , seco em estufa e Calcinado	5%, 10% e 15%	Os resultados indicam possibilidade de utilização do lodo <i>in natura</i> de 5% na base e sub-base.
Lucena et al. (2014)	Seco ao ar	10% lodo + 90% solo fino siltoso + (2, 4, 6 ou % de cimento, cal ou emulsão asfáltica)	Existe viabilidade técnica do uso de lodo em uma porcentagem de 10% em base e sub-base e com aditivos estabilizantes a base de betume.
Güllü e Fedakar (2016)	Calcinado	0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60% lodo + solo argiloso	As análises apresentaram viabilidade técnica do uso de lodo em uma porcentagem de 50% em sub-base.
Pizoni (2019)	Calcinado	5% e 7%	O lodo tem potencial para o uso como mistura em 5% e 7% no subleito calcinado a 800 °C.

Fonte: A autora (2024).

As conclusões do Quadro 5 apresentaram percentuais passíveis de utilização do lodo em camadas e subleito, demonstrando a viabilidade deste material em pavimentos. Güllü e Fedakar (2016) indicaram maiores percentuais de uso do lodo com 50% de uso em sub-base. Em seguida, Pereira (2016), Lucena et al. (2012) e Lucena et al. (2014), quando relacionados a base e sub-base, identificaram viabilidades respectivas de 20%, 10% e 10%.

Kelm (2014) e Pizoni (2019) apresentaram estudos mais recentes e de percentuais semelhantes da utilização do lodo para base, sub-base e subleito, assumindo como resultados os percentuais de 5% (base, sub-base e subleito) e 7% (subleito) como proporções viáveis para pavimentos.

De forma mais aprofundada, Kelm (2014) utilizou fatores de influência em base e sub-base num programa

experimental que consistiu na caracterização física, química e mecânica dos materiais, além de experimento piloto e experimento com estabilizante. Já Pizoni (2019) fundamentou suas análises seguindo o programa experimental de ensaios para granulometria, Índices de consistência, índice de suporte califórnia, expansão e resistência à compressão simples para a busca de resultados positivos na utilização do lodo calcinado para o subleito.

#### Mistura da base e sub-base

O solo coletado por Kelm (2014) adveio do Rio de Janeiro, sendo denominado como um solo saprolítico (proveniente da decomposição da rocha matriz) areno argiloso típico da região e o lodo, advindo da Estação de Tratamento de Esgoto Alegria, na cidade do Rio de Janeiro - RJ. Com o propósito de avaliar o comportamento mecânico e prosseguir

com os experimentos, desenvolveram-se estudos exploratórios de manipulação de materiais (experimento piloto) com teores *in natura*, de secagem de lodo a 60 °C e de produção de cinza a 550 °C nas proporções de 5%, 10% e 15%.

A análise desenvolvida atingiu aproximadamente 15 misturas, com o intuito de determinar a possibilidade da utilização de lodo nas camadas de base ou sub-base de pavimentos. Os teores verificados se dividiram em misturas de experimento piloto (solo-resíduo e pó de pedra-resíduo) e experimento com estabilizantes (cal e cimento). Em termos ambientais o lodo *in natura* e a cinza de lodo do solo holocênico são definidos como de Classe II A – Não inerte, ou seja, resíduos não inflamáveis, corrosivos,

tóxicos, patogênicos, e sem tendência a sofrer reação química.

Quanto à caracterização física do material, Kelm (2014) avaliou os seguintes parâmetros: densidade relativa dos grãos (Gs), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP); ensaios de compactação relacionados a umidade ótima ( $\omega_{ótima}$ ) e a massa específica aparente seca máxima (MEAS<sub>máx.</sub>); além do ensaio de expansão (Exp) realizado segundo a Norma DNER-ME 049/94. Com isso a identificação de cada material se baseia em: Sa (solo areno argiloso), L (lodo seco), Ln (Lodo *in natura*), Lc (cinza de lodo) P (pó de pedra), Ca (Cal), Ci (cimento), e os números conforme as porcentagens de material, na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de caracterização física, compactação e de expansão das misturas

Materiais/ Misturas	Caracterizações Físicas				Ensaio de compactação		Exp (%)
	Gs (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\omega_{ótima}$ (%)	MEAS <sub>máx.</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	
Solo	2,65	46	21,7	24,3	-	-	2,54
Pó de Pedra	2,54	-	-	-	-	-	-
Lodo <i>in natura</i>	-	483	112	371	-	-	-
Lodo seco a 60°	1,66	Não plástico			-	-	-
Cinza de Lodo	2,74	Não plástico			-	-	-
REF - P95C95	-	-	-	-	18	1,67	0,42
Sa90L5Ca5	-	-	-	-	19,3	1,6	0,97
P91L5Ci4	-	-	-	-	7,5	1,92	0,39
P91Ln5Ci4	-	-	-	-	7,5	2,01	0,17
Sa80Lc15Ca5	-	-	-	-	24	1,54	0,93

Fonte: Adaptado de Kelm, 2014.

Considerando os resultados de  $\omega_{ótima}$ , os valores de maior semelhança ao de referência foram sob porcentagens de 19,3% e 24% (Sa90L5Ca5 e Sa80Lc15Ca5). De mesmo modo as misturas apresentadas alcançaram resultados parecidos para a MEAS<sub>máx.</sub>, no valor de 1,6 g/cm<sup>3</sup> e 1,54 g/cm<sup>3</sup>, mantendo-se a ordem de dados.

No caso das informações adquiridas acerca da Exp, as misturas com P91L5Ci4 e P91Ln5Ci4 apresentaram valores inferiores a 0,5%, atingindo o valor

necessário para camadas de base e sub-base de pavimentos. Além disso, as misturas com solo obtiveram valores de expansão próximos a 1% , compatível com camada de sub-base.

Kelm (2014) concluiu que dentro dos estudos de caracterização física dos materiais, o solo foi classificado quanto a curva granulométrica e também dos limites de Atterberg como um solo SC, ou seja, uma areia argilosa. Já o lodo *in natura* apresentou alta plasticidade, mas seco a 60 °C, destorroado e com a cinza de



lodo, se classificou como não plástico. Além disso, o resíduo não apresentou riscos de utilização acima do limite estabelecido pela NBR 10.004 (2004) para o meio ambiente e saúde pública quando utilizado sob 5% de dosagem.

### Mistura de subleito

As verificações de Pizoni (2019) se desenvolveram no solo colúvio aluvionar, classificado como solo argiloso holocênico do ponto de coleta localizado na zona rural de Rio do Salto - SC e no lodo coletado da ETE da cidade de Criciúma - SC.

O programa experimental contemplado por este estudo se baseou em misturas com a utilização do cimento e dosagens de lodo no material de 5% e 7%, com o processo de transformação da cinza

do lodo dividida a princípio com a secagem a 130 °C e calcinação a 800 °C.

Os estudos verificados, relacionaram-se à caracterização física dos materiais, mais detalhadamente, porcentagem dos grãos passantes na peneira nº 200 (% Passante nº 200), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP); análise da compactação, relacionada a umidade ótima ( $\omega_{ótima}$ ) e o peso específico seco máximo ( $\gamma_{d,max}$ ); *California Bearing Ratio* (CBR) e resistência à compressão simples (Rcs), ambos após 14 dias de cura; e expansão (Exp) das misturas conforme o Brasil (2006). Com isso, a identificação de cada material se baseou em: Sh (solo argiloso holocênico), Lc (Cinza de lodo), Ci (cimento) e os números conforme as porcentagens de material; na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados de caracterização física, compactação, CBR e de expansão das misturas

Materiais/ Misturas	Caracterizações Físicas				Ensaio de compactação		CBR (%)	Exp (%)	Rcs (MPa)
	% Passante nº 200	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\omega_{ótima}$ (%)	$\gamma_{d,max}$ (g/cm <sup>3</sup> )			
REF - Sh100	99,9	46	41	5	20	1,56	-	3,05	0,48
Sh90Ci5Lc5	96,94	45	37	8	22,80	1,55	30,70	1,85	0,69
Sh88Ci5Lc7	96,09	47	38	9	25,89	1,50	27,60	1,75	0,59
Sh87Ci8Lc5	97,64	Não plástico			20,50	1,52	41,20	3,90	1,3
Sh85Ci8Lc7	95,53	Não plástico			22,01	1,49	37,50	4,17	1,13

Fonte: Adaptado de Pizoni, 2019.

Considerando os resultados de  $\omega_{ótima}$ , os valores de maior semelhança ao de referência foram com a utilização de Sh87Ci8Lc5 e Sh85Ci8Lc7 sob porcentagens de 20,50% e 22,01% respectivamente. Ainda nos ensaios de compactação para  $\gamma_{d,max}$  os valores mais aproximados da referência foram de 1,55 g/cm<sup>3</sup> (Sh90Ci5Lc5) e 1,52 g/cm<sup>3</sup> (Sh85Ci8Lc7).

No caso das informações adquiridas acerca do CBR, todas as misturas atingiram valores adequados visto que, segundo o Brasil (2006) os materiais

para subleito devem apresentar CBR maior ou igual a 2%.

Em continuidade, para a Exp, apenas Sh90Ci5Lc5 e Sh88Ci5Lc7 atingiram os valores adequados com 1,85% e 1,75% respectivamente, conforme especificações do Brasil (2006), ou seja valores menores ou iguais a 2%.

Com relação aos resultados de Rcs, os melhores valores foram de 1,3 MPa (Sh87Ci8Lc5) e 1,13 MPa (Sh85Ci8Lc7), resultados acima do valor de referência, 0,43 MPa (REF - Sh100).

Pizoni (2019) definiu que a caracterização física dos materiais adquiriu redução dos finos, melhorando as propriedades do solo. Portanto, com base nas análises das condições de incorporação do lodo no solo associadas ao cimento, evidenciou-se a potencial aplicabilidade das misturas compostas por 5% e 7% de lodo e 5% de cimento no subleito.

Em termos gerais, avaliando a utilização do lodo em base, sub-base e subleito os estudos convergem para os percentuais de 5% e 7%.

## CONCLUSÕES

A disposição final do lodo de ETE na construção civil representa uma solução ambientalmente adequada, visto que o resíduo passa de rejeito para recurso, a partir de sua aplicação efetiva em argamassa, concreto e pavimentação.

Os estudos demonstraram que a utilização do lodo em argamassa alcançou os melhores desempenhos nos teores de 10% e 20%. Da mesma forma, quando relacionado à substituição do lodo no concreto, os teores de maior relevância se estabelecem entre 5% e 10%. Por fim, para a utilização em misturas da base, sub-base e subleito foram identificados valores de dosagens que podem variar de 5% a 7%.

Dentro deste contexto o aproveitamento do lodo na construção civil denota caráter promissor, promovendo a minimização de impactos ambientais com a redução de  $CO_2$  e destinação adequada deste resíduo. Nesta perspectiva, sugere-se a realização e aprofundamento de mais estudos aplicados, para que por meio da confiabilidade o reúso de lodo na construção civil se torne cada vez mais consistente.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Thalles. **Análise de desempenho de estações de tratamento de esgoto visando condições de outorga e**

**enquadramento de corpos hídricos: o caso das ETEs Aurenny e Prata, Palmas – TO.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/272/1/Thalles%20Delano%20Cordeiro%20Vilarins%20Alves%20-%20Disserta%20c3%a7%20c3%a3o.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2024.

ARAÚJO, Mayara Silveira de. **Estudo da utilização da mistura solo e lodo das estações de tratamento de água e esgoto para aplicação em base e sub-base na pavimentação.** 2021. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2021.

AREIAS, Isabela Oliveira Rangel. **Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) do município de Campos dos Goytacazes - RJ em cerâmica vermelha.** 2015. Dissertação (Mestrado Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Disserta%20C3%A7%20C3%A3o-ISA-mod.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579:** Determinação da liquidação por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200). Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de Cimento Portland - Preparo, Controle, Recebimento e Aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos e métodos de ensaios Parte 1: argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland-Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com Cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BATISTA, Lucilene Ferreira. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal**: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/>

18139/1/2015\_LucileneFerreiraBatista.pdf.  
Acesso em: 31 jan. 2023.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. ;  
CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.  
**Pavimentação Asfáltica:** Formação  
Básica para Engenheiros. 1. ed. Rio de  
Janeiro: Petrobras e ABEDA, 2008. 509 p.

BETEMPS, Cristiane. Lodo de esgoto é  
ótimo componente de substratos para  
plantas. **Embrapa Clima Temperado**,  
Brasília, 13 mar. 2018. Disponível em:  
[https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/32485890/lodo-de-esgoto-e-otimo-componente-de-substratos-para-plantas#:~:text=antes%20do%20uso-,Os%20lodos%20de%20esta%C3%A7%C3%A3o%20de%20tratamento%20de%20esgoto%20\(Letes\)%20s%C3%A3o,Esta%C3%A7%C3%B5es%20de%20Tratamento%20de%20Esgoto%20.](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/32485890/lodo-de-esgoto-e-otimo-componente-de-substratos-para-plantas#:~:text=antes%20do%20uso-,Os%20lodos%20de%20esta%C3%A7%C3%A3o%20de%20tratamento%20de%20esgoto%20(Letes)%20s%C3%A3o,Esta%C3%A7%C3%B5es%20de%20Tratamento%20de%20Esgoto%20.) Acesso em: 24 jan. 2024.

BINDÁ, Sigrid Machado. **Caracterização do lodo bruto da ETE-Maratoan de Crateús-CE e tratamento a partir da compostagem para fertilização de solos.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal do Ceará Disponível, Crateús, 2022. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/68875/3/2022\\_tcc\\_smbinda.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/68875/3/2022_tcc_smbinda.pdf). Acesso em: 17 fev. 2024.

BRASIL. Diário Oficial da União. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 305, de 5 de julho de 2002.** Brasília: Diário Oficial da União, 12 jun. 2002. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=273>. Acesso em: 23 dez. 2022.

BRASIL. Diário Oficial da União. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 375 , de 29 de agosto de 2006.** Brasília: Diário Oficial da União, 29 ago. 2006. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5956#:~:text=RESOLU%C3%87%C3%83O%20No%20375%20%2C%20DE%2029%20DE%20AGOSTO%20DE%202006&text=Define%20crit%C3%A9rios%20e%20procedimentos%2C%20para,derivados%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAs>. Acesso em: 23 dez. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020.** Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000 [...]. Brasília: Presidência da República, 2020. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm). Acesso em: 16 fev. 2024.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação.** Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 28 mar. 2006. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr\\_719\\_manual\\_de\\_pavimentacao\\_versao\\_corrigda\\_errata\\_1.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf). Acesso em: 17 jan. 2023.

CASTRO, Marcelo Castilho de. **Utilização do lodo gerado em estação de tratamento como fertilizante.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso ( Engenharia Industrial Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível

em:

<https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2019/MEQ19001.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2024.

CHAGAS, Leila. **Estudo da incorporação de lodo de esgoto calcinado em argamassas como substituto parcial do cimento portland**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. p. 168. DO CIMENTO PORTLAND. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/36164/1/TESE%20Leila%20Soares%20Viegas%20Barreto%20Chagas.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2023.

CONCRETO: O que é? Qual sua relação com o cimento e os principais tipos de concreto. **Engemix**, São Paulo, 08 mar. 2023. Disponível em: <https://www.engemix.com.br/concreto-o-que-e-qual-sua-relacao-com-o-cimento-e-os-principais-tipos-de-concreto/>. Acesso em: 2 fev. 2024.

COSTA, Felipe Murilo Silva da. **Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/14853/1/FelipeMSC\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/14853/1/FelipeMSC_DISSERT.pdf). Acesso em: 16 fev. 2024.

ECOS da Rio-92. **Salão Verde**, Brasília, 06 jun. 2022. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/radio/programas/881951-ecos-da-rio-92/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. JÜRGENSEN, D. Produção e Características dos biossólidos. 17-25 p. *In*: ANDREOLI, C. V.; LARA A. I.(org.) **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999. 97 p.

GARCIA, G. O. et al. Características químicas de um solo degradado após aplicação de lodo de esgoto doméstico. **Revista Verde**, Mossoró, v. 4, n. 2, p. 01-12, abr./ jun. 2009. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7466607.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2023.

GÜLLÜ, HAMZA; FEDAKAR, HALIL İBRAHİM. Use of factorial experimental approach and effect size on the CBR testing results for the usable dosages of wastewater sludge ash with coarse-grained material. **European Journal Of Environmental And Civil Engineering**, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 42-63, 3 maio 2016. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19648189.2016.1179678?needAccess=true>. Acesso em: 23 dez. 2022.

KELM, Tamile Antunes. **Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 230p, 2014.

KHANBILVARDI, R., AFSHARI, S., Sludge ash as fine aggregate for concrete Mix. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 121, n. 9, p. 633-638, set. 1995. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28AS>

CE%290733-9372%281995%29121%3A9%28633%29. Acesso em: 15 fev. 2023.

KIRCHHEIM, E. B. da C. T. R. S. N. A. Q. G. M. M. A. P. Portland cement clinker with reduced environmental impact. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 75–86, abr./jun. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/RQWhYNnvCNYDZs7sgvZvydB/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 fev. 2023.

KLEIN, Diego; OLIVEIRA, Daiane Martins de. Resíduos de estação de tratamento de água e esgoto: um estudo de viabilidade para uso na pavimentação no município de Vila Velha/ES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, Rio Grande do Norte. **Anais [...]**. Natal: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019. Tema: Saneamento ambiental: como tratar igual os desiguais, p. 1-7. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Diego-Klein/publication/358242768\\_Residuos\\_de\\_Estacao\\_de\\_Tratamento\\_de\\_Agua\\_e\\_Esgoto\\_um\\_estudo\\_de\\_viabilidade\\_para\\_uso\\_na\\_pavimentacao\\_no\\_municipio\\_de\\_Vila\\_VelhaES/links/61f7f9ed1e98d168d7e12adf/Residuos-de-Estacao-de-Tratamento-de-Agua-e-Esgoto-um-estudo-de-viabilidade-para-uso-na-pavimentacao-no-municipio-d-e-Vila-Velha-ES.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Diego-Klein/publication/358242768_Residuos_de_Estacao_de_Tratamento_de_Agua_e_Esgoto_um_estudo_de_viabilidade_para_uso_na_pavimentacao_no_municipio_de_Vila_VelhaES/links/61f7f9ed1e98d168d7e12adf/Residuos-de-Estacao-de-Tratamento-de-Agua-e-Esgoto-um-estudo-de-viabilidade-para-uso-na-pavimentacao-no-municipio-d-e-Vila-Velha-ES.pdf). Acesso em: 9 fev. 2024.

LIMA, M. T. de. **Influência da adição de gesso e fosfogesso no tempo de pega do cimento Portland**, 2019. Trabalho de conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

Disponível em: [https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2080/3/MONOGRAFIA\\_Influ%C3%A0nciaAdi%C3%A7%C3%A3oGesso.pdf](https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2080/3/MONOGRAFIA_Influ%C3%A0nciaAdi%C3%A7%C3%A3oGesso.pdf). Acesso em: 23 dez. 2022.

LIMONGI, Maycon. **Tratamento de Efluentes e Recursos Hídricos**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão e Educação Ambiental) – Faculdades IDAAM, Manaus, 2019. Disponível em: <https://dspace.sws.net.br/jspui/bitstream/prefix/87/1/TRATAMENTO%20DE%20EFLUENTES%20E%20RECURSOS%20H%C3%8dDRICOS.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.

LUCENA, L. C. de F. L.; JUCA, J. F. T.; SOARES, J. B.; FILHO, M.; TAVARES, P. G. Use of wastewater sludge for base and subbase of road pavements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 33, p. 210-219, Dez. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920914000728>. Acesso em: 23 dez. 2023.

LUCENA, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes. **Estudo de aplicação de misturas solo lodo em base e subbase de pavimentos**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

LYNN, C. J.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S.; WEST, R. P. Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 98, p. 767-779, Nov. 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.122>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/arti>

cle/abs/pii/S0950061815303408?via%3Dihub. Acesso em: 23 dez. 2022.

MACIEL, I. C.; MELHORIM, P. C. **Gerenciamento de resíduos sólidos aplicada a empresas têxteis de pequeno e médio porte no Brasil**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Faculdade Vale do Cricaré, São Mateus, 2019. Disponível em:

<https://repositorio.ivc.br/bitstream/handle/123456789/343/TCC%20-%20IARA%20E%20PAMELA%20-%20ENG%20PRODU%20U%20%87%20%83O.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 fev. 2024.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Londres: CRC Press, 2014. DOI <https://doi.org/10.1201/9781482296761>. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482296761/pozzolanic-cementitious-materials-malhotra-mehta>. Acesso em: 15 dez. 2022.

MALLIOU, O.; KATSIOTI, M.; GEORGIADIS, A.; KATSIRI, A. Properties Of Stabilized/Solidified Admixtures Of Cement And Sewage Sludge. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 29, ed. 1, p. 55-61, Jan. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946506001624>. Acesso em: 5 jun. 2023.

MARTINS, R. O. G.; ALVARENGA, R. C. S. S.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, A.F.; MEDEIROS, Akim Alexandre Cardoso. **Viabilidade de utilização do lodo de estação de tratamento de efluentes industriais em materiais**

**cerâmicos**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios) – Universidade Aberta do Brasil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Blumenau, 2018. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/22468/2/utiliza%20a%20olodomat%20ceramicos.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2024.

MENDES, B. C.; AZEVEDO, A. R. G. Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 159, p. 261–262, Jan. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817321608>. Acesso em: 5 jun. 2023.

MOREIRA, S. F.; SANTOS, S. D. O.; SARDINHA, A. S.; PEREIRA JÚNIOR, A. ETE sludge as an alternative to soil recovery in degraded areas. **Brazilian Applied Science Review**, v.3, n.3, p. 1564-1585, mai./jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.34115/basrv3n3-006>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/2045/2049>. Acesso em: 5 jun. 2023.

MORO, Daniel Campos. **Avaliação de cenários para disposição final do lodo oriundo da estação de tratamento de esgotos São João/Navegantes do município de Porto Alegre**: um estudo de caso. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2024. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/1018>

3/272677/001197044.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 10 fev. 2024.

MUNHOZ, Lígia Rodrigues Jordão. **Avaliação e dimensionamento da estação de tratamento de esgoto de Rio Paranaíba** - MG. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30929/3/Avalia%0c3%a7%0c3%a3oDimensionamentoEsta%0c3%a7%0c3%a3o.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2024.

PAN, S.C.; TSENG, D.C.; LEE, C.C.; LEE, C. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 33, p. 1749–1754, Nov. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603001650>. Acesso em: 5 jun. 2023.

PEDROZA, M. M.; LÔBO, R. N.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F. de; SILVA, F. M. Lodo de esgoto doméstico: Características Físicas, Químicas e Biológicas. **Revista Multidebates**, Palmas, v. 3 n. 2, p. 206-218, 2018. Disponível em: <https://revista.faculdadeitop.edu.br/index.php/revista/article/view/173/164>. Acesso em: 3 fev. 2024.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. Dissertação (mestrado em Engenharia civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Disponível em:

[https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/15673/2/Ana\\_Karla\\_Pereira\\_Prates.pdf](https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/15673/2/Ana_Karla_Pereira_Prates.pdf). Acesso em: 19 fev. 2024.

PÉREZ-CARRIÓN, M.; BAEZA-BROTONS, F.; PAYÁ, J.; SAVAL, J.M.; ZORNOZA, E.; BORRACHERO, M.V.; GARCÉS, P. Potential use of sewage sludge ash (SSA) as a cement replacement in precast concrete blocks. **Matéria. Construir**. 64 [313], DOI <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.06312>. Disponível em: <https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1460/1591>. Acesso em: 1 fev. 2024.

PIZONI, Bianca Bussolo. **Estabilização de um solo colúvio aluvionar com cimento e lodo de esgoto calcinado para aplicação em camadas de pavimento**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesc.net/bitstream/1/7499/1/BiancaBussoloPizzoni.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2023.

PRATES, Ana Karla Pereira. **Avaliação do potencial de aproveitamento energético do biogás para secagem de lodo em 6 estações de tratamento de esgoto do estado de Sergipe que possuem reatores anaeróbios**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2021. Disponível em: [https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/15673/2/Ana\\_Karla\\_Pereira\\_Prates.pdf](https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/15673/2/Ana_Karla_Pereira_Prates.pdf). Acesso em: 19 fev. 2024.



PRODUÇÃO nacional de cimento por regiões e estados. [S. l.; s. n.], 2020. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1627312640.pdf>. Acesso em: 4 jan. 2023.

REAL, Ricardo Perim. **Avaliação da utilização da cinza da casca de arroz como adição mineral em concreto de alto desempenho**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: [https://sig-arquivos.cefetmg.br/arquivos/201812610287f62039205c8971b183d48/Dissertao\\_Ricardo\\_Perim\\_-\\_Verso\\_final\\_com\\_ficha.pdf](https://sig-arquivos.cefetmg.br/arquivos/201812610287f62039205c8971b183d48/Dissertao_Ricardo_Perim_-_Verso_final_com_ficha.pdf). Acesso em: 5 fev. 2024.

SILVA, C. R. L.; CHINELATTO, A. L.; CHINELATTO, A. S. A. **Viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Uvaranas, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/swg5X6pzD39c94m6TBCw6nD/?lang=pt#>. Acesso em: 21 dez. 2022.

SILVEIRA, E. C. A. **Avaliação da resistência mecânica de argamassa de assentamento com substituição de agregado miúdo por lodo têxtil**. 2020. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico de Joinville, Joinville, 2020. Disponível em: [https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/218246/TCC\\_EDNA\\_ENG\\_CI](https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/218246/TCC_EDNA_ENG_CI)

VIL\_INFRAESTRUTURA\_UFSC.pdf?sequence=1. Acesso em: 4 jan. 2024.

SILVA, Michele G. F. da. **Cenário brasileiro acerca do aproveitamento do lodo do tratamento de esgoto sanitário (2006 – 2018)**. 2019. Dissertação (Pós-Graduação em Soluções e Tecnologias ambientais) – Centro Universitário SENAI CIMATEC, Bahia, 2019. Disponível em: [http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/bitstream/fieb/1527/1/ARTIGO\\_MICHELE%20GUIMAR%20FALC%20O%20DA%20SILVA.pdf](http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/bitstream/fieb/1527/1/ARTIGO_MICHELE%20GUIMAR%20FALC%20O%20DA%20SILVA.pdf). Acesso em: 12 fev. 2024.

SIQUEIRA, A. M. de O.; LEITE, I. C.; MARTINS, M. C.; CASTRO, F. D.; SILVA, J. L. Reaproveitamento energético do lodo de estação de tratamento de esgoto – uma revisão. **Journal of Engineering and Exact Sciences**, n. 5, 2020. 6 v. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jceec/article/view/11734/6402>. Acesso em: 13 jul. 2023.

SOARES, L. S. V.; MADUREIRA, A. S. Cenários que desafiam a implementação emergencial da política nacional de resíduos sólidos: uma questão ambiental e de saúde. **Revista de Direito e Sustentabilidade**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 74–89, jul./dez. ISSN 2525-9687 versão *online*. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/210565589.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2024.

SOUZA, Bruna; FROTA, Diogenes; DORATIOTTO, Isabella; OLIVEIRA, Larissa; GUIMARÃES, Nathalia. **Argamassas preparadas com lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em substituição ao cimento Portland**.

2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/18247/1/ARGAMASSAS%20PREPARADAS%20COM%20LODO%20DE%20ESTA%20C%87%20C%83O%20DE%20TRATAMENTO%20DE%20ESGOTO%20%5bETE%5d%20EM%20SUBSTITUI%20C%87%20C%83O%20AO%20CIMENTO%20PORTLAND..pdf>. Acesso em: 21 dez. 2022.

SUARTE JÚNIOR, Fernando Moreno. **Aproveitamento e caracterização do lodo de ete para fins energéticos e como adição pozolânica para o concreto.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019. Disponível em: <http://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/1452/1/Fernando%20Moreno%20Suarte%20Junior%20-%20Disserta%20a7%20c3%20a3o.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2022.

SUASSUNA, Rita de Cassia Avelino. **Caracterização dos lodos produzidos na ETE Cabanga - Recife – Pernambuco.** 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/2959/3/RITA%20DE%20CASSIA%20AVELINO%20SUASSUNA%20-%20DISSERTA%20C%87%20C%83O%20PPGECA%201995.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2022.

VERONESE, R. B.; MOREIRA, Karla C. B.; SIDEL, S. M.; D'OLIVEIRA, M. C. de P. E. Avaliação do uso de cinza do lodo de esgoto como substituição parcial ao uso do

cimento em misturas de concreto. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 13, n. 2, p. 274-281, jun. 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/18041>. Acesso em: 6 jan. 2024.

VISENTIN, R.; MATEUS, C. M. D. A.; ESPERANCINI, M. S. T.; BOAS, R. L. V.; CRUZ, C. V. Compostagem de lodo de esgoto em Botucatu: avaliação preliminar de custos. *In*: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Anais** [...]. Porto Alegre: UTFPR, 2017. Disponível em: <https://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/243/171>. Acesso em: 6 jan. 2024.

YADA, M. M.; MELO, W. J. de.; MELO, V. P. de. Elementos – traço no solo, na planta e no grão de plantas de milho cultivadas com lodo de esgoto por 16 anos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro - RJ, v. 25, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522020150124>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/PvfCPkVWPXvcYL4xcNF9f6h/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 6 jan. 2023.

ZALESKI, A.; MARANGONI, B.; VANZETTO, S. C. Comportamento mecânico e de durabilidade de concretos produzidos com efluente industrial tratado e bruto. **Revista de Engenharia Civil**, Braga, n. 61, p. 44-54, 2022. Disponível em: <https://revistas.uminho.pt/index.php/ecum/article/view/4153/4374>. Acesso em: 6 jan. 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me fortalecer em cada momento. À minha mãe Rita Pereira da Silva Souza por me ajudar e ser minha maior inspiração de vida. Aos meus amigos e familiares que sempre me apoiaram e incentivaram em minhas decisões. Ao meu orientador pela colaboração profissional no desenvolvimento do meu projeto. À UFRPE-UACSA, professores e colaboradores do departamento de Engenharia Civil, Biblioteca e Coordenação Geral dos cursos.