

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FERNANDO ROCHA RIGOLIN

**Estudo de viabilidade técnica para incorporação de resíduos de lodo de
estação de tratamento de esgoto em peças de concreto para
pavimentação**

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS

2022

FERNANDO ROCHA RIGOLIN

**Estudo de viabilidade técnica para incorporação de resíduos de lodo de
estação de tratamento de esgoto em peças de concreto para
pavimentação**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Sênior Valdir Schalch

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R565 RIGOLIN, Fernando Rocha
Estudo de viabilidade técnica para incorporação de resíduos de lodo de estação de tratamento de esgoto em peças de concreto para pavimentação / Fernando Rocha RIGOLIN; orientador Valdir Schalch. São Carlos, 2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Lodo de esgoto. 2. Incorporação. 3. Destinação final. 4. Peças de concreto para pavimentação. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FERNANDO ROCHA RIGOLIN**.

Título da dissertação: "Estudo da viabilidade técnica para incorporação de resíduos de lodo de estação de tratamento de esgoto em peças de concreto para pavimentação".

Data da defesa: 06/05/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado **Valdir Schalch**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADO

Prof. Dr. **José da Costa Marques Neto**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Prof. Dr. **Javier Mazariegos Pablos**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos/IAU-USP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por todas as oportunidades que me concedeu até hoje e principalmente por todo seu amor e graça para comigo.

À minha esposa Gabriela, que sempre me incentivou e me deu forças para prosseguir mesmo nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Fernanda e Osvaldenir (in memoria), que me proporcionaram toda a educação e estrutura para chegar até aqui. Tenho muito amor por vocês.

Aos meus familiares que tanto se orgulham dessa conquista e que sempre me apoiaram.

Ao Prof. Valdir, por quem tenho grande consideração. Agradeço pela confiança, por ter me concedido essa oportunidade e por ter me aberto a porta para a realização do mestrado. Agradeço também pela humildade e bom humor de sempre.

Aos colegas do NEPER, pelas conversas que muito contribuíram e por todo o apoio.

Aos meus amigos, que me ouviram e aconselharam em momentos de apreensão. Não posso deixar de agradecê-los, também, pelos momentos de alegria e descontração.

Aos funcionários e professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento, pela disponibilidade, atenção e auxílio.

À querida USP, instituição que me proporcionou oportunidades valiosas de crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

RIGOLIN, F.R. **Estudo de viabilidade técnica para incorporação de resíduos de lodo de estação de tratamento de esgoto em peças de concreto para pavimentação.** 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

Os lodos de estações de tratamento de esgoto (LETES) são frequentemente dispostos de maneira inadequada, e no futuro a sua disposição ambientalmente adequada será cada vez mais complicada, devido à falta de disponibilidade de área para o seu recebimento e a grande geração deste resíduo, cerca de 1,5 milhões de toneladas por ano no Brasil, ocasionando danos socioambientais. Desta maneira o presente trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade técnica da incorporação do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto Vila Pureza localizada na cidade de São Carlos, em peças de concreto para pavimentação. Na primeira etapa do experimento o lodo foi classificado como Classe II A (não perigoso, não inerte) segundo os ensaios de lixiviação e solubilização, logo em seguida recebeu beneficiamento para ser incorporado em matriz cimentícia substituindo-o pela areia, em concentrações de 3, 6 e 12% em massa; após a realização das matrizes foi fabricado corpos de prova com as referidas concentrações, onde foram realizados testes mecânicos e optou-se pela substituição de 6% de lodo pela areia na fabricação das peças de concreto, devido aos testes obterem um resultado médio de 34,8 MPa, ficando apenas 0,2 MPa abaixo da norma ABNT NBR 9781:2013. Após a fabricação das peças de concreto para pavimentação foram realizados ensaios mecânicos, dimensionais, ambientais e de absorção a água; os ensaios de absorção a água e dimensionais obtiveram resultados aceitáveis para a fabricação e utilização das peças, segundo a norma ABNT NBR 9781:2013. Os ensaios mecânicos obtiveram resultados abaixo da referida norma, impossibilitando a fabricação e utilização das peças de concreto para pavimentação. Os ensaios ambientais demonstraram uma boa eficiência no encapsulamento dos elementos químicos nocivos, apenas os elementos alumínio, cobre, fluoretos, sódio e surfactantes não foram encapsulados; os elementos, cobre e fluoretos ficaram abaixo do limite exigido no ensaio de solubilidade mesmo não sendo encapsulados, já alguns elementos que foram encapsulados (cádmio e fenóis) ainda assim ficaram acima dos limites de solubilização. Dessa forma conclui-se que os blocos não podem ser utilizados em pavimentos para o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, devido ao seu desempenho mecânico insatisfatório, sugere-se então algumas melhorias como: o aumento da altura da peça,

diminuição do percentual de lodo incorporado, e uso de cimento resistente a sulfato, para que o requisito mecânico seja sanado, já que as outras variáveis se mostraram adequadas para a utilização da peça.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Incorporação. Destinação final. Peças de concreto para pavimentação.

ABSTRACT

RIGOLIN, F. R. **Technical feasibility study for the incorporation of sewage sludge residues in concrete paving pieces.** 2022. Dissertation (Master in Science) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

Sludge from sewage treatment plants (LETES) is often disposed in an incorrect manner and its environmentally adequate disposal in the future will be increasingly complicated due to the lack of availability of area for its reception, causing environmental damage to society as a whole. In this way, the present work aimed to analyze the technical feasibility of incorporating the sludge from the Vila Pureza Sewage Treatment Station located in the city of São Carlos, in concrete paving pieces (PAVER). In the first stage of the experiment, the sludge was classified as Class II A (non-hazardous, non-inert) following the leaching and solubilization tests. Then, it received processing to be incorporated into a cement matrix, replacing the sand, in concentrations of 3, 6 and 12% by mass. After making the matrices, proof bodies were manufactured with the aforementioned concentrations, in which mechanical tests were carried out and it was decided to replace 6% of sludge with sand in the construction of the PAVERs as this test obtained an average result of 34.8 MPa, just 0.2 MPa below the ABNT NBR 9781:2013 standard. After the manufacture of the PAVERs, mechanical, dimensional, environmental and humidity tests were carried out on the pieces; the humidity and dimensional tests obtained acceptable results for their manufacture and utilization according to the ABNT NBR 9781:2013 standard. However, the mechanical tests obtained results below the referred standard, making it impossible to manufacture and utilize the PAVERs. On the other hand, environmental tests showed good efficiency in encapsulating harmful chemical elements, except for aluminum, copper, fluorides, sodium and surfactants. The copper and fluoride elements were below the required limit in the solubility test even though they were not encapsulated while some elements that were encapsulated (cadmium and phenols) were still above the solubilization limits. In this way, it is concluded that the blocks cannot be utilized in pavements for pedestrian traffic, light vehicles and commercial vehicles due to their unsatisfactory mechanical performance, it is then suggested some improvements for this requirement to be remedied, since the other variables proved to be adequate for utilization.

Keywords: Sewage sludge. Incorporation. Final destination. Concrete pieces for paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem	24
Figura 2 – Técnica de desidratação por leito de secagem coberto em ETE	34
Figura 3 – Modelo de centrífuga de desidratação de lodo	35
Figura 4 – Filtro prensa de desidratação de lodo	35
Figura 5 – Peça de concreto para pavimentação tipo 1	38
Figura 6 – Peça de concreto para pavimentação tipo 2	39
Figura 7 – Peça de concreto para pavimentação tipo 3	39
Figura 8 – Peça de concreto para pavimentação tipo 4	39
Figura 9 – Estrutura Metodológica do projeto	45
Figura 10 – Coleta do lodo da ETE logo após centrifugação	47
Figura 11– Vibro Prensa no momento da moldagem das peças	54
Figura 12 – Fluxograma da ETE Monjolinho São Carlos-SP em 2021	57
Figura 13 – 1º dia de secagem	59
Figura 14 – 3º dia de secagem	59
Figura 15 – 6º dia de secagem	59
Figura 16 – 9º dia de secagem	59
Figura 17 – 13º dia de secagem	60
Figura 18 - 15º dia de secagem	60
Figura 19 – Lodo triturado ao 15º dia de secagem	60
Figura 20 – Liquidificador industrial utilizado no processo de trituração	61
Figura 21 – Corpos de provas cilíndricos, logo após a retificação	69
Figura 22 – Corpo de prova no momento do ensaio de compressão	69
Figura 23 – Correia transportadora	71
Figura 24 – Tanque de mistura	71
Figura 25 – Pátio coberto onde os pavers são armazenados para cura inicial	71
Figura 26 – Peças de concreto com 6% de teor de substituição após confecção ...	73
Figura 27 – Ensaio de resistência a compressão na peça de concreto	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos lodos gerados em diferentes sistemas de tratamento de esgoto	29
Tabela 2 - Relação SV/ST, teor de sólidos, peso específico e densidade de tipos de lodo.....	31
Tabela 3 - Composição do cimento CP V – ARI	42
Tabela 4 - Granulometria da areia comum média	43
Tabela 5 - Granulometria do pedrisco	44
Tabela 6 - Fator X (água/cimento) em função da resistência	51
Tabela 7 - Relação Y para concreto, em função do diâmetro dos agregados	52
Tabela 8 - Teor de Substituição e quantidade de materiais para confecção dos corpos de prova	53
Tabela 9 - Ensaio de lixiviação do resíduo de LETE	62
Tabela 10 - Ensaio de solubilização do resíduo de LETE	62
Tabela 11 - Composição química do LETE pelo método EDXRF.....	63
Tabela 12 - Massa Unitária do resíduo de LETE	64
Tabela 13 - Massa específica do resíduo de LETE	64
Tabela 14 - Composição granulométrica do LETE beneficiado como agregado	65
Tabela 15 - Requisitos físicos que atestam a pozolanicidade do material	66
Tabela 16 - Resistência a compressão dos 2 tipos de CPs	67
Tabela 17 - Resistência a compressão – traço de referência	68
Tabela 18 - Resultados – resistência a compressão aos 28 dias dos corpos de prova com teores de substituição	70
Tabela 19 - Traço de referência utilizado na confecção dos pavers	72
Tabela 20 - Resultado de resistência a compressão aos 23 dias	74
Tabela 21 - Resultado de resistência a compressão aos 28 dias	74
Tabela 22 - Resultado do ensaio de absorção de água	75
Tabela 23 - Resultado da avaliação dimensional das peças de concreto	76
Tabela 24 - Comparativo da solubilização das peças de concreto com o resíduo ..	77
Tabela 25 - Eficiência de estabilização/solidificação	77
Tabela 26 - Classificação dos tipos de um material quanto ao seu módulo de finura	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Compatibilidade entre categorias específicas de resíduos e as técnicas S/S	41
Quadro 2 - Propriedades físico-químicas do cimento CP V – ARI	42
Quadro 3 - Ensaio e normas ABNT para os ensaios	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Composição granulométrica	65
Gráfico 2 - Composição granulométrica do resíduo	82
Gráfico 3 - Resistência média em MPa dos corpos de prova aos 28 dias	84

LISTA DE SIGLAS

ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

EDXRF Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia

ETA Estação de Tratamento de Água

ETE Estação de tratamento de Esgoto

FAD Flotação por Ar Dissolvido

LETA Lodo de Estação de Tratamento de Água

LETE Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto

PAC Policloreto de Alumínio

PAVER Peças de concreto para pavimentação

PERS Política Estadual de Resíduos Sólidos

PMGIRS Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSB Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento Básico

RSU Resíduo Sólido Urbano

SF Sólidos Fixos

SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico

SS Sólidos Suspensos

ST Sólidos Totais

SV Sólidos Voláteis

UASB Upflow Anaerobic Sludge Blanket

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo geral	22
2.2 Objetivos específicos	22
3. REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1 Resíduos sólidos.....	23
3.2 Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico.....	25
3.3 Lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE)	26
3.3.1 Produção, Composição, Tratamento (processamento) e destinação final do LETE.	28
3.4 Pavimento intertravado de concreto	36
3.5 Solidificação/Estabilização de resíduos sólidos	40
4. MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1 MATERIAL	41
4.1.1 Cimento Portland.....	41
4.1.2 Agregado miúdo	43
4.1.3 Agregado graúdo.....	43
4.1.4 Lodo de estação de tratamento de esgoto.....	44
4.2 MÉTODOS.....	44
4.2.1 Caracterização do resíduo.....	46
4.2.1.1 Observação dos processos e operações na geração de LETE	46
4.2.1.2 Coleta e preparação do resíduo	46
4.2.1.3 Classificação do resíduo – análise dos extratos lixiviado e solubilizado	47
4.2.1.4 Composição química	48
4.2.1.5 Índices físicos	48
4.2.1.5.1 Massa unitária	49
4.2.1.5.2 Massa específica	49
4.2.1.5.3 Composição granulométrica	50
4.2.1.5.4 Teor de finos do material.....	50
4.2.1.5.5 Capacidade pozolânica do resíduo	51
4.3 Construção da matriz cimentícia.....	51
4.3.1 Composições preliminares.....	51

4.3.2	Verificação do desempenho mecânico	52
4.3.3	Estabelecimento da composição adequada.....	53
4.4	Produção do elemento construtivo.....	53
4.4.1	Verificação da resistência a compressão	54
4.4.2	Verificação da absorção a água	54
4.4.3	Avaliação dimensional da peça de concreto	55
4.4.4	Verificação do desempenho químico.....	55
5.	RESULTADOS	55
5.1	Caracterização do resíduo.....	55
5.1.1	Observação dos processos e operações na geração de LETE	55
5.1.2	Coleta e Preparação do resíduo como agregado.....	58
5.1.3	Classificação do resíduo – análise dos extratos lixiviado e solubilizado	61
5.1.4	Composição química do LETE	63
5.1.5	Índices físicos	63
5.1.5.1	Massa unitária.....	63
5.1.5.2	Massa específica	64
5.1.5.3	Análise granulométrica	64
5.1.5.4	Teor de finura do agregado	65
5.1.5.5	Capacidade pozolânica do resíduo	66
5.2	Construção da matriz cimentícia	68
5.2.1	Composições preliminares	68
5.2.2	Verificação do desempenho mecânico	69
5.2.3	Estabelecimento da composição adequada.....	70
5.3	Produção do elemento construtivo.....	70
5.3.1	Verificação da resistência a compressão	73
5.3.2	Verificação da absorção a água	75
5.3.3	Verificação dimensional da peça de concreto.....	75
5.3.4	Verificação do desempenho químico.....	76
6.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	78
6.1	Classificação do Resíduo	78
6.2	Caracterização do resíduo como agregado.....	80
6.3	Composição química do Resíduo	82
6.4	Avaliação mecânica da matriz cimentícia.....	83
6.5	Desempenho mecânico e físico das peças de concreto para pavimentação....	84
6.6	Desempenho químico das peças de concreto para pavimentação	85

7. CONCLUSÕES	86
7.1 Objetivo específico 1:.....	87
7.2 Objetivo específico 2:.....	87
7.3 Objetivo específico 3:.....	87
7.4 Objetivo específico 4:.....	88
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
9. REFERÊNCIAS	89

.....

1. INTRODUÇÃO

A destinação do lodo de estações de tratamento de esgoto (LETE) é um grande desafio ambiental e de saúde pública (Cusidó & Cremades, 2012). O LETE é um material semissólido subproduto dos processos de tratamento das águas residuárias municipais, oriundos de fontes residências, comerciais e industriais (AREIAS *et al.* 2020; ESMERAY & ATIS, 2019; FENG *et al.* 2014; KADIR *et al.* 2019).

O descarte de lodo de esgoto é um problema para os municípios, devido ao potencial poluidor das substâncias presentes nesse resíduo, ao rigor das regulamentações ambientais e o crescimento populacional e industrial (Liew *et al.* 2004). Em 2017, foram gerados cerca de 45 milhões de toneladas de LETE no mundo (CHANG *et al.* 2020; ZHANG *et al.* 2017). Segundo dados do SINIR (2022) foram gerados cerca de 2,5 milhões de toneladas de resíduos dos serviços públicos do saneamento básico, onde 1,5 milhões de toneladas são dos lodos de estação de tratamento de esgoto.

Espera-se que a quantidade de LETE gerada pelas cidades aumente à medida que cresça os investimentos e padrões ambientais com novas Estações de Tratamento de Esgoto (ESMERAY & ATIS, 2019).

As estratégias das cidades com relação a destinação deste resíduo são a destinação aos aterros sanitários, reuso na agricultura, aplicação na indústria civil, a incineração e até o lançamento em oceanos em alguns países (LIEW *et al.* 2004; MONTERO *et al.* 2009; SMOL *et al.* 2015).

Portanto o estudo e desenvolvimento de pesquisas que vão de encontro com os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é de suma importância, prevendo assim a proteção a saúde pública, qualidade ambiental, não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos, bem como a disposição final ambientalmente adequada. Nesse sentido diversas tecnologias vêm possibilitando esse avanço, no que tange os LETEs e onde iremos focar nesta pesquisa é o estudo sobre a aplicação do resíduo incorporado/reciclado em materiais da construção civil, como tijolos cerâmicos, telhas, peças de concreto para pavimentação, etc.

Areias *et al.* (2020), Kadir *et al.* (2019), e Martínez-Garcia *et al.* (2012) em suas pesquisas evidenciaram que o uso do lodo de estação de tratamento de esgoto incorporado em tijolos cerâmicos demonstrou ter boa aceitação mecânica, ambiental

e econômica, mas que a porcentagem de incorporação do resíduo deve ser estudada cada caso para obtenção da melhor eficiência.

Souza *et al.* (2020) demonstraram em sua pesquisa que o uso de LETE na produção de agregado leve tem revelado resultados promissores em todos os sentidos quando comparado aos agregados leves comerciais, comprovando assim um grande potencial sustentável o uso desse subproduto, por outro lado os mesmos autores ressaltam que pesquisas sobre o tema são escassas, tornando uma área de grande interesse para estudos futuros.

Em Hong Kong, Chen *et al.* (2018) substituíram 20% da massa de cimento e 50% da massa de agregados por cinza de lodo de ETE e cacos de vidro reciclado, respectivamente, na fabricação de blocos de concreto intertravados, apresentando excelentes resistências a compressão aos 28 dias (igual ou superior a 30MPa).

Na Dinamarca, Kappel *et al.* (2017) verificaram que a substituição de 20% do cimento por cinzas de lodo de ETE ricas em ferro não alterou significativamente a resistência à compressão e trabalhabilidade das argamassas.

No Brasil, Pablos *et al.* (2011) utilizou areia de fundição com argila e escória de fundição para fabricação de peças de concreto para pavimentação e obteve ótimos resultados, com resistência a compressão das peças ultrapassando os 50 MPa. Portanto é de extrema importância que essas tecnologias sejam cada vez mais aprimoradas e aperfeiçoados, para diminuirmos os problemas ambientais causados pela destinação inadequada dos LETEs.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar a viabilidade técnica da incorporação de lodo de ETE em matriz cimentícia para a produção de peças de concreto para pavimentação como alternativa para destinação final.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar a classificação do resíduo quanto ao potencial de contaminação (lixiviação, solubilização);
- Caracterizar o resíduo como aglomerado ou aglomerante;

- Definir a composição adequada das peças de concreto para pavimentação confeccionadas com o resíduo;
- Verificar a viabilidade técnica do uso do resíduo incorporado na matriz cimentícia;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Resíduos sólidos

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010, a definição de resíduos sólidos é:

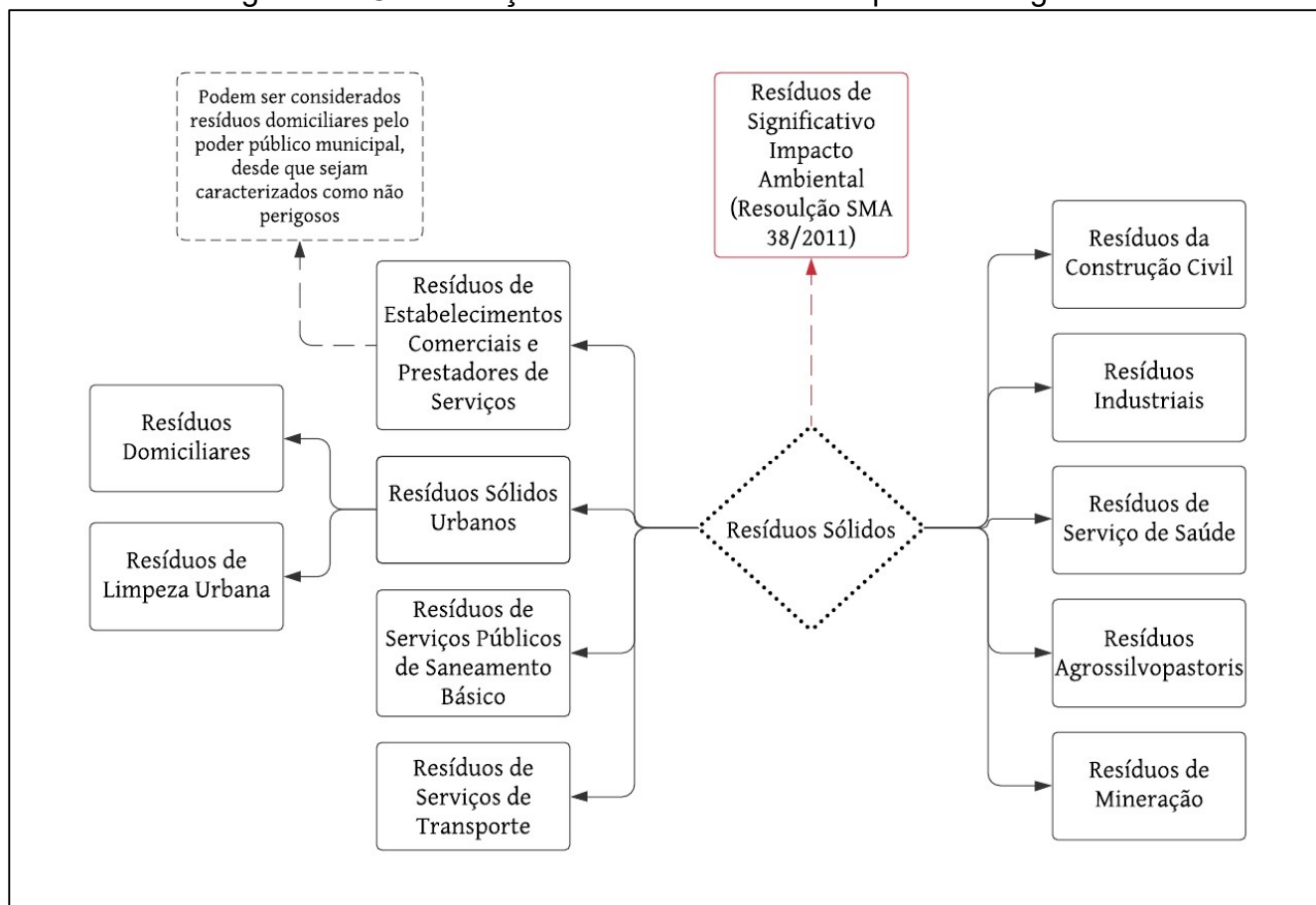
Resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. (Lei nº 12305, 2010. Inciso II, Art. 3º, parágrafo XVI).

Pode-se definir também os resíduos sólidos de acordo com a Norma Técnica NBR 10.004 (ABNT), como:

Resíduos sólidos são resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso solução técnica e economicamente inviável em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004a, p. 1).

No artigo 13 da PNRS (2010) são estabelecidas as formas de classificação dos resíduos quanto à sua origem e sua periculosidade, o que facilita a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos. Agora quanto a periculosidade, os resíduos são classificados em resíduos perigosos e resíduos não perigosos. Na figura 1 abaixo, temos os resíduos quanto sua origem.

Figura 1 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem



Fonte: Adaptado de Schalch et al, 2013)

Como podemos observar acima os resíduos sólidos apresentam grande diversidade e se originam das mais variadas atividades humanas e ambientes humanos (BIDONE e POVINELLI, 1999).

No Brasil a lógica de produção de resíduos é a mesma do resto do mundo, porém, a gestão de resíduos sólidos demorou para contemplar a complexidade do tema, o que deixa o país em atraso quando comparado aos países desenvolvidos, por exemplo (JACOBI, 2012).

Um dos maiores desafios que a sociedade moderna encontra é o equacionamento da geração excessiva e da disposição final ambientalmente

adequada dos resíduos sólidos. Com isso a preocupação mundial em relação aos resíduos sólidos, tem aumentado diante do crescimento da produção, do gerenciamento inadequado e da falta de áreas de disposição final (JACOBI e BESEN, 2011).

Pode-se observar que segundo dados da (Abrelpe, 2021), o Brasil gerou cerca de 82 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), dado semelhante ao disponibilizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico (SNIS, 2020) que mostra uma geração de em torno de 67 milhões de toneladas de RSU.

Portanto o estudo de tecnologias de tratamento, destinação e disposição final dos resíduos se torna cada vez mais importante para acharmos soluções para os problemas causados pelos resíduos. Mitigando assim a degradação dos recursos naturais, especialmente o solo e os recursos hídricos.

3.2 Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico

Entre as tipologias de resíduos sólidos definidas na PNRS, estão os Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento Básico (RSB), que são aqueles constituídos pelos resíduos gerados no conjunto de serviços de infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário e drenagem (exceto os resíduos de limpeza urbana já incluídos nos Resíduos Sólidos Urbanos), os quais constituem principalmente de lodos das Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e dos sólidos grosseiros retidos nas operações de gradeamento.

Os RSB são gerados em grandes quantidades e representam elevado custo para as ETAs e ETEs, correspondem entre 20% e 60% do custo operacional do gerenciamento nas estações (VON SPERLING; ANDREOLI; FERNANDES, 2014).

Os resíduos provenientes das estações possuem uma composição que varia de acordo com a característica da localidade e são constituídos por substâncias que podem ser aproveitadas na cadeia produtiva como matéria prima, porém detém outros elementos que podem representar perigo se não tratados e dispostos adequadamente, como metais pesados e patógenos, tornando-se fundamental seu manejo adequado para evitar que se formem passivos ambientais.

Desde a Lei 11.445/2007 que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, e garante a universalização e equidade do acesso, passando pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) e pôr fim a Lei 14.026/2020 recentemente sancionada, Lei que atualiza o novo marco legal do saneamento básico e altera alguns textos da Lei 11.445/2007 e Lei 12.305/2020, houve uma maior preocupação com a garantia dos serviços de saneamento básico para todos, expandindo assim as infraestruturas e serviços para todo país.

Devido a isso, a tendência de crescimento dos volumes tratados de água e esgoto refletem diretamente no aumento da geração dos RSB, sendo necessária a busca por soluções que incorporem esses resíduos em processos produtivos, tendo em vista que sua disposição inadequada apresenta potenciais impactos ambientais, como a poluição da água, do ar, do solo, o favorecimento de transmissão de doenças por meio dos organismos patogênicos, além da produção de odores por sua decomposição e os impactos estéticos e sociais causados nas áreas onde são dispostos (VON SPERLING; ANDREOLI; FERNANDES, 2014).

Tanto os lodos provenientes de ETA como os de ETE podem ser destinados a diversas atividades, e ao passarem por alguns tratamentos terão o seu volume reduzido, como nos processos de secagem, facilitando assim o armazenamento e transporte, onde poderão ser destinados ao uso agrícola, indústria ceramista, aproveitamento energético e compostagem. Porém, os lodos de ETE apresentam particularidades em sua composição, principalmente porque podem ser um risco sanitário e ambiental, devendo assim ter sua patogenicidade tratada por meio de alternativas de desinfecção dos lodos (VON SPERLING; ANDREOLI; FERNANDES, 2014).

3.3 Lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE)

O lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) pode ser definido como um resíduo semissólido, predominantemente orgânico, com teores variáveis de componentes inorgânicos, originado a partir do tratamento de esgotos domiciliares e/ou industriais. As características gerais de um lodo de esgoto variam principalmente com o tipo de esgoto tratado, se domiciliar, industrial ou misto; época do ano; processo de tratamento na estação; estabilização e condicionamento final (GARCÍA-DELGADO *et al.* 2007).

A quantidade gerada de lodo de esgoto também cresce proporcionalmente ao aumento dos serviços de coleta e tratamento de esgoto, que, por sua vez, deve acompanhar o crescimento populacional. Em 2010, estimativas apontavam uma produção nacional de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano, considerando que o tratamento de esgoto atingia apenas 30% da população urbana (PEDROZA *et al.* 2010). Números que já foram ultrapassados, levando em conta os dados do SNIS (2021) que estimam que 50,8% dos esgotos já são tratados no Brasil. Segundo as fontes utilizadas para base amostral do Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) do estado de São Paulo são geradas cerca de 150 mil toneladas por ano de lodo provenientes de ETE somente no estado.

A gestão de lodo provenientes de estações de tratamento esgoto é uma atividade altamente complexa e onerosa que, se mal realizada, pode comprometer as vantagens ambientais e sanitárias esperadas nos sistemas de tratamento. A importância dessa prática foi reconhecida pela Agenda 21, que incluiu o tema da gestão ambientalmente adequada de resíduos sólidos e questões relacionadas ao esgoto, e definiram as seguintes orientações para sua gestão: redução da produção, aumento máximo do reaproveitamento e reciclagem, e a promoção de tratamento ambientalmente adequado e disposição (VON SPERLING; ANDREOLI, 2007).

O lodo de esgoto ou lodo de estação de tratamento de esgoto de forma geral podem ser classificados de acordo com o momento de sua geração no processo e assim pode receber a denominação de:

Lodo primário: gerados na etapa de tratamento primário do esgoto, normalmente nos decantadores primários, que possui a função de clarificar o esgoto, removendo sólidos suspensos, que isoladamente ou em flocos podem sedimentar pelo seu próprio peso, se acumulando no fundo do decantador, formando o lodo primário (NUVOLARI, 2011). Nos decantadores primários ocorre a remoção de cerca de 40 a 60% de sólidos em suspensão. Ainda segundo Nuvolari, 2011 o teor de sólidos no lodo primário varia em torno de 1 a 7% (99 a 93% umidade) e apresenta ainda grande porcentagem de matéria orgânica não estabilizada, necessitando de tratamento no sentido de diminuição de volume e estabilização de matéria orgânica.

Lodo secundário: oriundos da etapa de tratamento secundário do esgoto, etapa cuja principal finalidade é remover matéria-orgânica dissolvida e em suspensão (a qual grande parte já foi removida no tratamento primário) por meio de processo biológico de degradação da matéria orgânica, geralmente esse tratamento

acontece em reatores anaeróbicos e em tanques de aeração/decantadores secundários, onde acontece a geração do lodo. É um lodo composto predominantemente por microrganismos, produtos extracelulares e eventuais resíduos que passaram pelo tratamento primário, em alguns casos com características mais estáveis e com menor umidade.

Lodo digerido/desidratado: é o lodo que passou por um processo de condicionamento, estabilização e desidratação e, portanto, encontra-se mais concentrado, inerte.

Como visto, o lodo pode ser gerado em diferentes quantidades e ainda com diversas composições, devido a isso se tem grande dificuldade para seu gerenciamento correto, nos itens seguintes do estudo será abordado as diferentes composições, quantidades, métodos de tratamento e possíveis destinações dos lodos gerados nas inúmeras concepções de tratamento de esgoto.

3.3.1 Produção, Composição, Tratamento (processamento) e destinação final do LETE.

Esses resíduos têm composição e volume variável que dependem do tipo de efluente e do processo utilizado. Os principais interferentes quantitativos na produção do lodo são:

Carga orgânica: o teor de sólidos voláteis está diretamente ligado à quantidade de lodo produzido, então, quanto maior a carga orgânica, maior a quantidade de lodo gerado.

Tipo de processo: a escolha do processo para o tratamento do efluente interfere na quantidade de lodo gerado. Processos biológicos, aeróbio e anaeróbio, físico-químico geram quantidades variadas de lodo.

Eficiência do sistema: à medida que se tem uma melhora na eficiência do tratamento, proporcionalmente se têm um aumento na geração de lodo.

Os lodos são gerados a partir de processos físico-químicos, mais frequentes em ETAs, mas que ainda podem ser gerados nas ETEs, e por processos biológicos, e esses se dividem basicamente em aeróbicos ou anaeróbicos. Eles podem também ser gerados simultaneamente em sistemas com processos combinados. A tabela 1 a seguir mostra as características dos lodos gerados em volume, massa e teor de sólidos em diferentes sistemas de tratamento de esgoto.

Tabela 1 - Características dos lodos gerados em diferentes sistemas de tratamento de esgoto

Sistema de Tratamento de Esgoto	Teor de Sólidos Secos (%)	Massa de lodo (gSS/habitante.d) (a)	Volume de lodo (L/habitante.dia) (b)
Tratamento Primário (convencional)	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Tratamento Primário (tanques sépticos)	3 - 6	20 - 30	0,3 - 1,0
Lagoa facultativa	5 - 15	12 - 32	0,1 - 0,25
Lagoa Anaeróbia - Lagoa Facultativa			
Lagoa anaeróbia	15 - 20	20 - 45	0,1 - 0,3
Lagoa facultativa	7 - 12	6 - 10	0,05 - 0,15
Total	-	26 - 55	0,15 - 0,45
Lagoa aerada facultativa	6 - 10	8 - 13	0,08 - 0,22
Lagoa aer. mist. completa - lagoa decantação	5 - 8	11 - 13	0,15 - 0,25
Tanque séptico + filtro anaeróbico			
Tanque séptico	3 - 6	20 - 30	0,3 - 1,0
Filtro anaeróbico	0,5 - 4,0	7 - 9	0,2 - 1,8
Total	1,4 - 5,4	27 - 39	0,5 - 2,8
Lodos ativados convencional			
Lodo primário	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,6 - 1	25 - 35	2,5 - 6,0
Total	1 - 2	60 - 80	3,1 - 8,2
Lodos ativados aeração prolongada	0,8 - 1,2	40 - 45	3,3 - 5,6
Filtro biológico de alta taxa			
Lodo primário	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	1 - 2,5	20 - 30	0,8 - 3,0
Total	1,5 - 4,0	55 - 75	1,4 - 5,2
Biofiltro aerado submerso			
Lodo primário	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,6 - 1,0	25 - 35	2,5 - 6,0
Total	1 - 2	60 - 80	3,1 - 8,2
Reator UASB	3 - 6	12 - 18	0,2 - 0,6
(a) Assumindo 0,1 kgCOD/habitante.dia e 0,06 kgSS/habitante.d			
(b) Litros de lodo/habitante.d= $[(gSS/habitante.d)/(teor\ de\ sólidos\ (%))]\times(100/1.000)$ (assumindo densidade do lodo de 1.000 kg/m ³)			

Fonte: Adaptado de Andreoli (2007).

Para expressar as características do lodo, bem como a produção em termos de massa e volume, é essencial ter uma compreensão de alguns fundamentos, como sólidos totais, voláteis e fixos, densidade do lodo, destruição de sólidos voláteis e captura de sólidos (VON SPERLING; GONÇALVES, 2007).

O lodo consiste em sólidos e água. Os Sólidos totais (ST) podem ser divididos em sólidos suspensos (SS) e sólidos dissolvidos. A maioria dos sólidos do lodo são representados por sólidos suspensos. Os sólidos suspensos e dissolvidos podem ser divididos em inorgânicos ou fixos (SF) e sólidos orgânicos ou voláteis (SV) (VON SPERLING; GONÇALVES, 2007).

A relação entre sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST) dá uma boa indicação da fração orgânica nos sólidos do lodo, bem como seu nível de digestão. Para um lodo não digerido a relação SV/ST é de 0,75 a 0,80, enquanto para o lodo digerido o intervalo é de 0,60 a 0,65 (VON SPERLING; GONÇALVES, 2007).

O peso específico das partículas de sólidos fixos (SF) é de aproximadamente 2,5 (Crites e Tchobanoglous, 2000), enquanto que para sólidos voláteis (SV) o peso específico é de aproximadamente 1,0. Para a água, o valor também é 1,0. A densidade do lodo (água mais sólidos) depende da distribuição relativa entre esses três componentes.

O peso específico dos sólidos do lodo pode ser obtido pela equação 1.1 (Metcalf e Eddy, 1991; Crites and Tchobanoglous, 2000):

$$\text{Peso específico dos sólidos} = \frac{1}{\left(\frac{SF/ST}{2,5}\right) + \left(\frac{SV/ST}{1}\right)} \quad (1.1)$$

Por sua vez, peso específico do lodo (água mais sólidos) pode ser obtido pela seguinte equação 1.2:

$$\text{Peso específico do lodo} = \frac{1}{\left(\frac{\text{fração de sólidos no lodo}}{\text{peso específico dos sól.}} + \frac{\text{fração de água no lodo}}{1,0}\right)} \quad (1.2)$$

A fração de sólidos no lodo corresponde aos sólidos secos (sólidos totais), expresso em decimais, enquanto a fração de água no lodo corresponde a umidade, também expressa em decimais (e não em porcentagem).

A destruição de sólidos voláteis ocorre por meio da digestão, que remove sólidos orgânicos biodegradáveis do lodo. Portanto, pode se dizer que houve uma remoção ou destruição de sólidos voláteis (SV). A quantidade de sólidos fixos (SF) permanece inalterada. Eficiências típicas de remoção de SV em digestão são de 40 a 50% (E= 0,40 a 0,55) (VON SPERLING; GONÇALVES, 2007).

A carga de sólidos (kg/d) antes e depois da digestão podem ser representadas pelas equações 1.3 e 1.4.

$$\text{ST afluente} = \text{SV afluente} + \text{SF afluente} \quad (1.3)$$

$$\text{ST efluente} = (1 - E) \times \text{SV efluente} + \text{SF afluente} \quad (1.4)$$

Nos estágios de tratamento de lodo em que há separação sólido-líquido (por exemplo, espessamento/adensamento e desidratação/desaguamento), nem todos os sólidos são separados do líquido e vão para a próxima etapa do tratamento. Uma

parte desses sólidos permanece como sobrenadantes nas unidades de separação, esses sobrenadantes devem ser enviados ao começo do sistema, onde serão misturados com o afluente da planta e submetidos a tratamento adicional (VON SPERLING; GONÇALVES, 2007).

A incorporação de sólidos ao lodo é conhecida como captura de sólidos (ou recuperação de sólidos). É expresso geralmente como uma porcentagem (%), com o objetivo de retratar a eficiência de incorporação de sólidos ao lodo que será encaminhado para as etapas subsequentes do processamento (VON SPERLING; GONÇALVES, 2007).

Por exemplo, se uma carga de sólidos suspensos de 200 kgSS/d passa por uma unidade de tratamento que tem a eficiência de captura de 80% de sólidos, então 160 kgSS/d ($= 0,8 \times 200 \text{ kgSS/d}$) irá fluir com o lodo para as fases de tratamento seguintes, e 40 kgSS/d ($= (1-0,8) \times 200 \text{ kgSS/d}$) será incorporado ao líquido drenado (sobrenadante) e enviado de volta para o início do sistema (VON SPERLING; GONÇALVES, 2007). Podemos observar na tabela 2 a seguir algumas características de diferentes tipos de lodo.

Tabela 2: Relação SV/ST , teor de sólidos, peso específico e densidade de tipos de lodo.

Tipos de lodo	Relação SV/ST	Teor de Sólidos Secos (%)	Peso específico dos sólidos	Peso específico do lodo	Densidade do lodo (kg/m ³)
Lodo primário	0,75 - 0,80	2 - 6	1,14 - 1,18	1,003 - 1,01	1003 - 1010
Lodo anaeróbico secundário	0,55 - 0,60	3 - 6	1,32 - 1,37	1,01 - 1,02	1010 - 1020
Lodo aeróbico secundário (conv. lodos ativ.)	0,75 - 0,80	0,6 - 1,0	1,14 - 1,18	1,001	1001
Lodo aeróbico secundário (lodos ativ. AP)	0,65 - 0,70	0,8- 1,2	1,22 - 1,27	1,002	1002
Lodo delagoa de estabilização	0,35 - 0,55	5 - 20	1,37 - 1,64	1,02 - 1,07	1020 - 1070
Lodo primário espessado	0,75 - 0,80	4 - 8	1,14 - 1,18	1,006 - 1,01	1006 - 1010
Lodo secundário espessado (conv. lodos ativ.)	0,75- 0,80	2 - 7	1,14 - 1,18	1,003 - 1,01	1003 - 1010
Lodo secundário espessado (lodos ativ. AP)	0,65 - 0,70	2 - 6	1,22 - 1,27	1,004 - 1,01	1004 - 1010
Lodo misto espessado	0,75 - 0,80	3 - 8	1,14 - 1,18	1,004 - 1,01	1004 - 1010
Lodo misto digerido	0,60 - 0,65	3 - 6	1,27 - 1,32	1,007 - 1,02	1007 - 1020
Lodo desidratado	0,60 - 0,65	20 - 40	1,27 - 1,32	1,05 - 1,1	1050 - 1100

Fonte: Adaptado Andreoli (2007).

Como visto as diversas etapas de tratamento de esgoto geram LETEs com características variadas, e em sua grande maioria com baixos teores de sólidos, ocasionando assim dificuldades no gerenciamento e disposição do LETE, portanto

tratar esse resíduo é fundamental para se conseguir uma eficiência econômica e ambiental apropriada no processo de gerenciamento do mesmo.

Além dos volumes de LETE serem elevados, em suas composições existem metais, organismos patogênicos e substâncias orgânicas, que causam problemas ambientais e sanitários devido a sua toxicidade. A presença desses contaminantes no LETE é extremamente variável, dependendo tanto do efluente como do sistema de tratamento.

As águas residuais (esgoto doméstico) de populações saudáveis apresentam substancialmente menos patógenos do que as de populações insalubres. Da mesma forma, o lodo de esgoto doméstico tem baixo teor de metais pesados, e geralmente não apresentam riscos ambientais. A maioria dos contaminantes químicos no lodo é consequência do lançamento de efluentes industriais na rede de esgoto (DA SILVA *et al.* 2007).

Metais presentes em águas residuais ocorrem principalmente devido a descargas de efluentes industriais das seguintes indústrias em sistemas de esgotos públicos:

- galvanoplastia;
- indústrias químicas (fabricação de compostos orgânicos, curtimento, indústria farmacêutica, fabricação de compostos inorgânicos, lavanderias, indústria de óleo, fabricação de corantes e pigmentos);
- indústrias de processamento de metal (fundições);

Alguns dos metais encontrados nos efluentes industriais que afetam os LETEs são: cádmio, cobre, zinco, níquel, mercúrio, cromo, chumbo, arsênico e selênio.

Os efluentes industriais também são fontes de compostos orgânicos indesejados, os mais comuns são os cianetos, fenóis, cloretos, benzenos, clorofórmio, 2,4-dimetilfenol, naftaleno, butilbenzilftalato, acroleína, xileno, cresol, acetofenona, metil-sobutil-acetona, difenilamina, anilina e acetato de etilo (DA SILVA *et al.* (2007).

Em ETEs não deveria ocorrer o recebimento de tais metais e compostos orgânicos pôr as estações não estarem preparadas para tratar efluentes com essas especificações e em seguida terem de lidar com essas contaminações no seu resíduo (lodo), dificultando o tratamento, a reciclagem e a destinação do LETE.

Depois da geração do lodo propriamente dita, etapas de estabilização, condicionamento e desidratação são esperadas para que esse resíduo possa ser encaminhado para uma destinação final ambientalmente adequada.

Os processos de estabilização visam estabilizar a fração biodegradável presente no LETE, reduzindo os odores desagradáveis, reduzindo ou eliminando a capacidade de putrefação da matéria orgânica, e a concentração de organismos patogênicos; os processos de estabilização podem ser divididos em estabilização biológica, química e térmica. Nos processos biológicos de estabilização, bactérias específicas (aeróbias ou anaeróbias) promovem a estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo; nos processos químicos de estabilização, a oxidação química ocorre eliminando bactérias e odores, alguns produtos químicos são usados para isso, como a cal ou o cloro; nos processos térmicos, a estabilização da fração volátil ocorre com o aumento da temperatura em ambiente hermético (LUDUVICE, 2007).

Os processos de condicionamento, e desidratação tem o principal objetivo a remoção de água do lodo, possibilitando assim um aumento do teor de sólidos, redução de custos com transporte devido à diminuição de volume, a melhoria no manuseio e transporte, redução de odores, aumento do poder calorífico com a diminuição da umidade e redução da produção de lixiviado quando o lodo é descartado em aterros sanitários.

Forças intermoleculares de diferentes tipos são responsáveis pela ligação da água aos sólidos do lodo, devido a isso quatro classes de águas podem ser listadas de acordo com a facilidade de separação, são elas águas livres, água adsorvida, água capilar e água celular, essas terminologias podem ter variações.

O processo de condicionamento faz com que o lodo libere mais facilmente a água incorporada nos sólidos, provocando uma etapa de desidratação mais eficiente, segundo Gonçalves *et al.* 2001, o condicionamento pode ser realizado por intermédio do emprego de produtos químicos (sais metálicos, cal e polímeros) ou processos físicos, dentre os quais o mais comum é o aquecimento do lodo.

A desidratação de lodo é uma operação unitária que reduz o volume do lodo em excesso por meio da redução de seu teor de umidade, a seleção de processo de desidratação depende do tipo de lodo e da área disponível. Para ETEs de pequeno porte localizadas em regiões onde não há restrição quanto à área, processos naturais como leitos de secagem são considerados a melhor alternativa. Da mesma

forma, ETEs de médio e grande portes situados em regiões metropolitanas utilizam a desidratação mecânica. Os principais processos utilizados para a desidratação natural ou mecânica em nosso país são: leitos de secagem, lagoas de lodo, centrífugas, prensas desaguadoras e filtros-prensa, esses processos podem se adaptar conforme condições ambientais, econômicas e tecnológicas (GONÇALVES *et al.* 2001).

Nas figuras 2, 3 e 4 abaixo podemos ver algumas dessas técnicas.

Figura 2: Técnica de desidratação por leito de secagem coberto, em ETE.



Fonte: Van der Hoeven, 2022.

Figura 3: Modelo de centrífuga de desidratação de lodo.



Fonte: Miki, 2018.

Figura 4: Filtro prensa de desidratação de lodo.



Fonte: Giordano, 2004

Após a desidratação do lodo, esse pode ser destinado de forma mais adequada, existem várias opções para a destinação final dos lodos, a mais comum é a disposição em aterros sanitários, mas para isso esse deve ser devidamente estabilizado, e desidratado (teor de sólidos entre 25 a 30%), outra alternativa bastante desenvolvida é a disposição controlada do resíduo no solo, mas para essa aplicação, estudos preliminares devem ser feitos no solo para constatar se a disposição deste não causará impactos negativos ao solo, as águas subterrâneas, e como as espécies presentes no solo irão se comportar com disposição do resíduo.

Outra alternativa é a aplicação industrial do lodo principalmente na fabricação de materiais utilizados na construção civil, alguns exemplos podem ser a utilização na fabricação de materiais cerâmicos, artefatos de concreto, e utilização na construção de bases de certos tipos de pavimento; para essas aplicações estudos vêm sendo desenvolvidos para analisar a viabilidade técnica, ambiental e econômica desta destinação.

Por último, uma aplicação que não tem tanta viabilidade é a sua incineração, devido aos altos custos e a geração de cinza que também necessitam de alguma disposição posterior.

No presente estudo o LETE foi gerado nas etapas de tratamento biológico (reatores UASB), e tratamento físico-químico (flotação por ar dissolvido), o lodo gerado nas diferentes etapas foram misturados, condicionados (polímero) e desidratados mecanicamente por meio de centrifugas, e então foi estudado sua viabilidade para aplicação na fabricação de peças de concreto para pavimentação, depois de secagem em leito de secagem natural e beneficiamento. As etapas de preparo do lodo até sua aplicação serão desenvolvidas ao longo do trabalho.

3.4 Pavimento intertravado de concreto

Os pavimentos intertravados de concreto foram surgindo e evoluindo ao longo do tempo. Pode-se fazer um breve histórico da pavimentação intertravada até chegar aos pisos intertravados de concreto. Segundo Fernandes (2016), há 2.500 a.C., na Grécia, os habitantes da ilha de Creta utilizavam pedras justapostas apoiadas a uma camada de areia na construção de caminhos. Knaption (1996) relata que os Etruscos, que dominaram a Itália entre 800 a 350 a.C., foram os primeiros povos a unirem locais distantes por trechos pavimentados. O mesmo autor cita que

os povos Romanos herdaram muito do conhecimento dos Etruscos sobre pavimentação e começaram a estabelecer ligações entre a capital e os locais conquistados. Com a necessidade de rápida movimentação tanto do exército quanto de tesouros conquistados, a realização de pavimentos foi essencial para garantir a dimensão que teve o império Romano. Muller (2005) expõe que entre 400 a.C. e 200 a.C., os romanos chegaram a alcançar uma extensão de mais de 120.700 quilômetros dos seus caminhos - cerca de trinta estradas saíam de Roma e se conectavam a tantas outras.

A evolução dos pisos para pavimentação levou milênios até finalmente chegarem nas peças de concreto intertravadas. Fernandes (2016) relata que a primeira cidade pavimentada com peças pré-fabricadas de concreto foi Stuttgart, na Alemanha em 1963. O mesmo expõe que na atualidade a Alemanha é o maior produtor mundial de peças pré-fabricadas de concreto para pavimentação, com mais de 200 milhões de metros quadrados produzidos ao ano.

Dessa forma notamos que na atualidade o uso dessa tecnologia é bastante empregado, assim, Leal (2018) menciona que as peças de concreto pré-fabricado, estão consolidadas no que se refere à tecnologia de fabricação, buscando não mais só atender as solicitações mecânicas impostas pelo tráfego, mas também introduzir conceitos de acessibilidade, sustentabilidade e conservação ambiental.

A norma ABNT NBR 9781 (2013) define peça de concreto como componente pré-moldado de concreto, utilizado como material de revestimento em pavimento intertravado. Além de definir as peças (ou blocos) de concreto para pavimentação, define pavimento intertravado como, pavimento flexível cuja sua estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto justapostas em uma cama de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.

Essas peças intertravadas constituem uma eficaz solução para uso em ruas, calçadas, calçadões e praças, devido apresentarem vantagens em relação aos métodos convencionais.

Vantagens essas indicadas por Hallack (2001), possuem facilidade e rapidez de assentamento sem a necessidade do uso de argamassa e mão de obra especializada, podendo ser retirados sempre que possível para realização de reparos nos elementos ou no subsolo, além de possuírem alta resistência a abrasão,

menor absorção solar, com resistência ao ataque de óleos combustíveis e apresentarem maior permeabilidade, proporcionando uma micro drenagem das águas pluviais, diminuindo o seu escoamento.

A seguir pode-se citar algumas características de calçadas de pavimento intertravado para ambientes externos, levando em consideração os aspectos de uso, tais como: abrasão, tráfego de pedestres, cadeirantes e intempéries. As principais características desse tipo de pavimento são (ABCP, 2010): superfície antiderrapante, conforto térmico, liberação ao tráfego, resistência e durabilidade, produto ecológico, diversidade de cores.

Os blocos pré-moldados de concreto são definidos de acordo com a ABNT NBR 9781: 2013 em 4 tipos básicos, Tipo 1: peças de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinha de peixe.

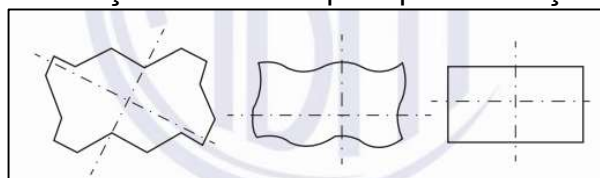
Tipo 2: Peças de concreto com formato único, diferente do retangular e que só podem ser assentadas em fileiras. Genericamente, apresenta o formato "I" (ABCP,2010).

Tipo 3: Peças de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triedros etc., com pesos superiores a 4 kg. Vulgarmente o bloco que, pelo seu peso e tamanho, não pode ser apanhado com uma mão só (ABCP, 2010).

Tipo 4: Conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento.

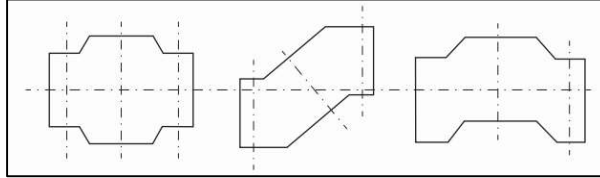
As figuras 5, 6, 7 e 8 abaixo ilustra as tipologias das peças de concreto para pavimentação:

Figura 5: Peça de concreto para pavimentação tipo 1



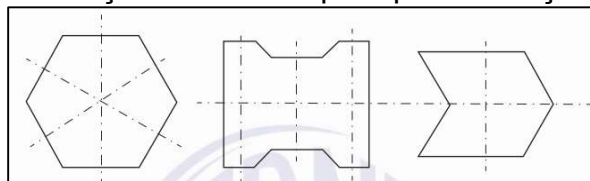
Fonte: ABNT NBR 9781:2013

Figura 6: Peça de concreto para pavimentação tipo 2



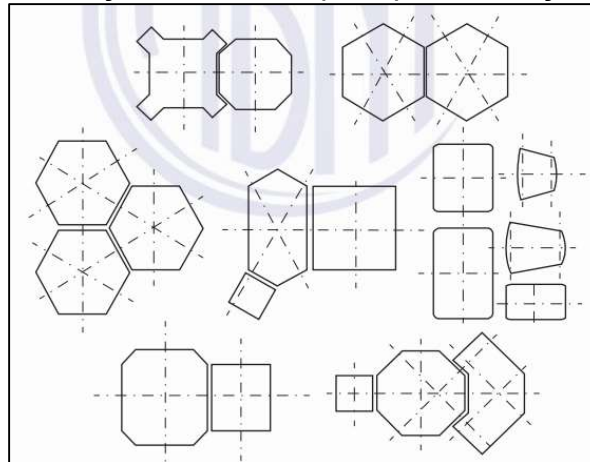
Fonte: ABNT NBR 9781:2013

Figura 7: Peça de concreto para pavimentação tipo 3



Fonte: ABNT NBR 9781:2013

Figura 8: Peça de concreto para pavimentação tipo 4



Fonte: ABNT NBR 9781:2013

Como observado, atualmente os PAVERS tem grande potencial para introduzir mais ainda a ideia de sustentabilidade e conservação ambiental, visto isso pesquisas na área para a fabricação de pavers com características mais sustentáveis são essenciais para minimizarmos os danos ambientais, garantindo uma melhor qualidade de vida. Ponto esse que vem de encontro com a incorporação de resíduos na matriz cimentícia desse elemento, podendo introduzir cada vez mais a ideia de reaproveitamento e destinação adequada dos resíduos produzidos em conjunto com o desenvolvimento econômico.

3.5 Solidificação/Estabilização de resíduos sólidos

A técnica de solidificação/estabilização (S/S) previne ou atenua a emissão de substâncias químicas nocivas existentes nos resíduos. Essa técnica geralmente não destrói o contaminante, mas o imobiliza ou restringe a sua capacidade de lixiviação e solubilização, transformando-o menos nocivo ao ambiente. A contaminação ocorre quando a água da chuva ou de outras fontes dilui os poluentes e o carrega para as águas subterrâneas ou superficiais.

O processo de solidificação consiste em envolver o resíduo em um bloco sólido impermeável no qual permanece encapsulado. A estabilização ocorre por meio de reações químicas que diminuem a capacidade poluidora das substâncias químicas presentes. Os dois processos ocorrem simultaneamente e é utilizado principalmente para o encapsulamento de substâncias metálicas e radioativas.

A solidificação ocorre através da mistura do resíduo com um agente de ligação (aglomerante). Os agentes de ligação mais comuns são o cimento, cal, asfalto, argila e cinza. Semelhante à solidificação, a estabilização também envolve a mistura do resíduo com o agente de ligação. Porém, o aglomerante gera uma reação química com os contaminantes que o torna menos suscetível às liberações no ambiente.

Barth e Percin (1990) dividem os processos de solidificação/estabilização em dois grandes grupos: inorgânicos e orgânicos. Os principais processos inorgânicos utilizam como agente de ligação o cimento, materiais pozolânicos, o gesso, a cal, e os silicatos. Nos processos orgânicos os materiais experimentalmente usados, incluem resinas epóxi, asfalto, poliéster, ureia-formaldeído e poliolefinas.

As vantagens e desvantagens dessa técnica variam de acordo com o tipo de processo empregado, das características do resíduo, dos aglomerantes utilizados e de condições locais específicas como localização geográfica, clima e legislação. O Quadro 1 mostra algumas características sobre a compatibilidade entre resíduos e aglomerantes para melhor aplicação das técnicas de S/S.

Quadro 1 – Compatibilidade entre categorias específicas de resíduos e as técnicas S/S

Compostos presentes nos resíduos	Tipos de Tratamento de Solidificação/Estabilização			
	Baseado em cimento	Baseado em cal	Termoplásticos	Polímeros Orgânicos
Solventes orgânicos e óleo	Impedem a cura e podem escapar na forma de vapor	Impedem a cura e podem escapar na forma de vapor	Orgânicos podem vaporizar-se com o calor	Podem impedir ou retardar o endurecimento do polímero
Sólidos orgânicos (plásticos, resinas e alcatrão)	Bom - em geral aumentam a durabilidade	Bom - em geral aumentam a durabilidade	Possível uso com agente ligante	Podem impedir ou retardar o endurecimento do polímero
Oxidantes	Compatível	Compatível	Pode causar colapso na matriz	Pode causar colapso na matriz
Sulfatos	Pode retardar o endurecimento do cimento	Compatível	Pode desidratar causando defeitos	Compatível
Halogênios	Facilmente lixiviado do cimento	Facilmente lixiviado do cimento	Podem ocorrer reações indesejáveis	Compatível
Metais pesados	Compatível	Compatível	Compatível	pH ácido solubiliza os metais
Materiais radioativos	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível

Fonte: Caetano 2016, adaptado de (MELCHERT, 2012; WILES, 1989; OLIVEIRA, 2003).

A técnica S/S baseada em cimento Portland é uma técnica simples, de fácil aplicação, e utiliza o cimento, um material acessível. Chandler *et al.* (1997), apresenta as seguintes vantagens dessa técnica: a) amplamente disponível a um custo razoável; b) técnicas de mistura e manuseio bem desenvolvidas; c) equipamentos necessários disponíveis; d) tolerante a variações químicas do resíduo; e) resistência do produto final pode ser controlada pela quantidade de cimento adicionada ao processo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

4.1.1 Cimento Portland

Optou-se pela utilização do cimento CP-V-ARI para a fabricação dos concretos adotados na pesquisa por ser livre de adições e por sua capacidade de atingir altas

resistências nos primeiros dias de aplicação, além da sua disponibilidade no mercado. A sua utilização é interessante, pois como se adquire altas resistências em baixas idades, o tempo de desforma e cura são menores do que concretos convencionais (PAGNUSSAT,2004). É o cimento utilizado pelas indústrias fabricantes de blocos para pavimentação e devido à alta resistência, apresenta maior durabilidade. (HELENE; TUTIKIAN,2011).

Para o ensaio da determinação do índice de pozolanicidade com o cimento, foi utilizado o cimento CP II-F-32, exigido pela norma que discorre sobre o ensaio. A tabela 3 e Quadro 2, mostra a composição do cimento e as especificações físico-químicas do cimento utilizado.

Tabela 3 – Composição do cimento CP V – ARI

Substância	Concentração (% em massa)
Silicato tricálcico	20 - 70
Silicato dicálcico	10 - 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 - 15
Sulfato de cálcio	2 - 8
Aluminato tricálcico	1 - 15
Carbonato de cálcio	0 - 25
Óxido de magnésio (livre)	0 - 6
Óxido de cálcio (livre)	0 - 2

Fonte: Cimento Nacional, 2018.

Quadro 2 – Propriedades físico-químicas do cimento CP V – ARI

Estado físico	Sólido	Taxa de evaporação	Não Aplicável
Forma	Pó	Ponto de fulgor	Não Aplicável
Cor	Cinza	Temperatura de autoignição	Não Aplicável
Odor	Característico	Limites de explosividade superior	Não Aplicável
Ph	13	Limites de explosividade inferior	Não Aplicável
Ponto de ebulição	Não Aplicável	Pressão de vapor	Não Aplicável
Faixa de temperatura de ebulição	Não Aplicável	Massa específica aparente	1,2 g/cm ³
Faixa de destilação	Não Aplicável	Densidade	2,99 g/cm ³
Ponto de fusão	Não Aplicável	Solubilidade em ácido clorídrico	99%l
Temperatura de decomposição	Não Aplicável	Solubilidade em água	1,5 g/l

Fonte: Cimento Nacional, 2018.

4.1.2 Agregado miúdo

Foi utilizado para a produção das matrizes de concreto e das peças de concreto para pavimentação, foi utilizada uma areia comum de granulometria média (Tabela 4). Essa areia foi adotada para que as granulometrias do resíduo (característica de areia fina) se complementassem e assim ocorresse o empacotamento, fenômeno em que os poros deixados pelos materiais de maior fração são preenchidos pelos de menor fração.

Tabela 4: Granulometria da areia comum média

Peneiras (mm)	Médias Retidas (%)	Média Retida Acumulada (%)
9,5	0,0	0
6,3	0,0	0
4,8	0,0	0
2,4	3,5	3
1,2	17,4	21
0,6	22,8	44
0,3	24,8	69
0,15	18,7	87
Resíduo	12,4	100
Totais	100	
Módulo de finura		2,24
Diâmetro máximo		2,4

Fonte: Laboratório Central da L.A Falcão Bauer, 2021.

4.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo adotado foi a brita zero, conhecida popularmente como pedrisco. A Tabela 5 apresenta o resultado da caracterização granulométrica da brita zero utilizada.

Tabela 5: Granulometria do pedrisco

Peneiras (mm)	Médias Retidas (%)	Média Retida Acumulada (%)
75	0	0
63	0	0
50	0	0
37,5	0	0
31,5	0	0
25	0	0
19	0	0
12,5	0	0
9,5	3	3
6,3	44	47
4,75	28	75
2,36	23	98
1,2	1	99
0,6	0	99
0,3	0	99
0,15	0	99
Resíduo	1	100
Totais	100	
Módulo de finura		5,72
Diâmetro máximo		9,5

Fonte: Laboratório Central da L.A Falcão Bauer, 2021.

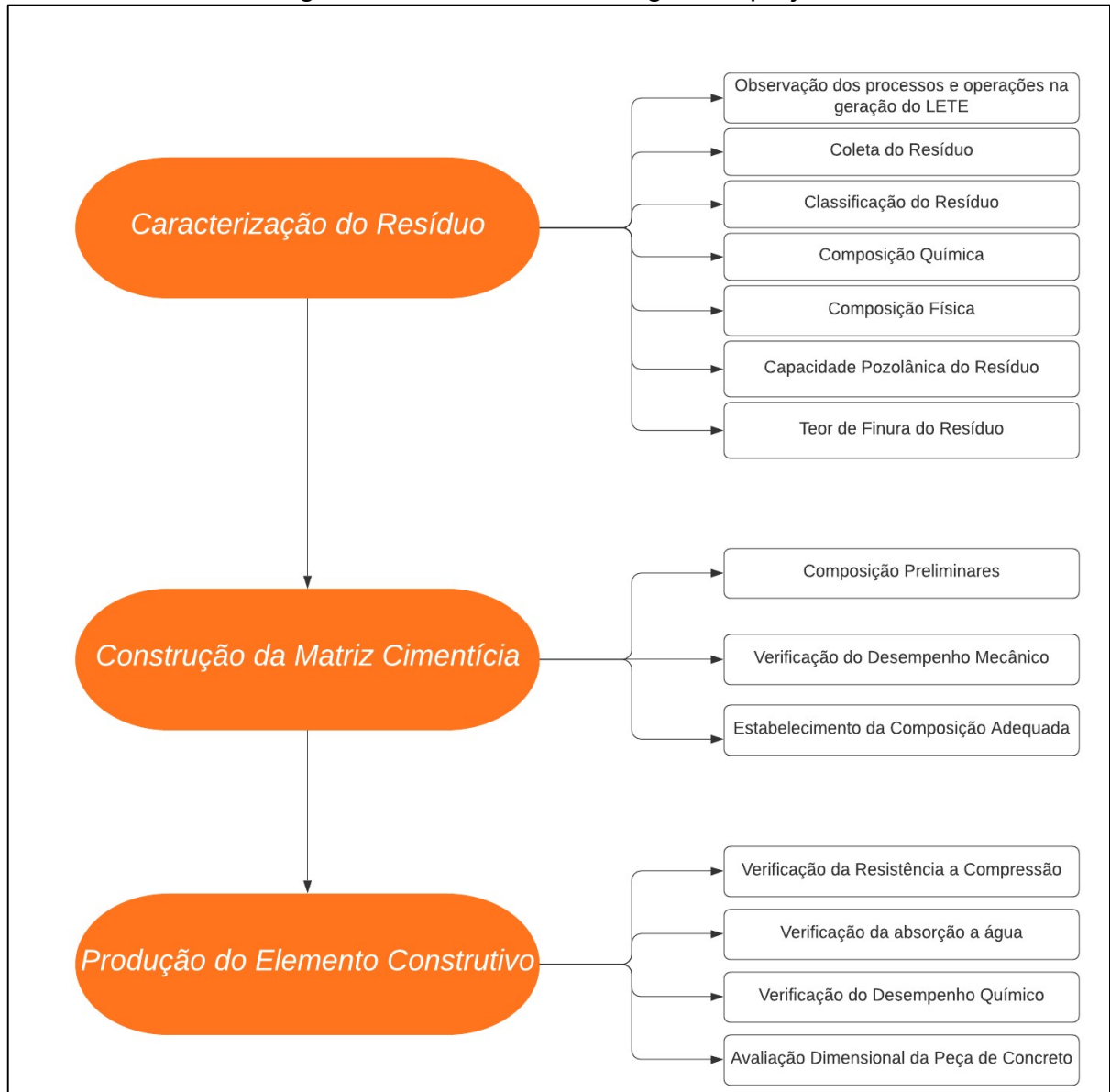
4.1.4 Lodo de estação de tratamento de esgoto

O lodo foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto Monjolinho, localizada na cidade de São Carlos/SP, logo após seu adensamento através de centrifugas, o resíduo tem coloração preta e apresenta mau cheiro, sua caracterização será apresentada no item 4.2.1.

4.2 MÉTODOS

A estrutura metodológica da pesquisa é constituída por 3 etapas principais e experimentais. Na Figura 9 estão expostas as etapas dos procedimentos experimentais através do fluxograma da Estrutura Metodológica:

Figura 9: Estrutura Metodológica do projeto



Fonte: Autor, 2021.

Com base na estrutura metodológica, o Quadro 3 apresenta os ensaios necessários para atingir os objetivos da pesquisa e suas respectivas normas

Quadro 3 – Ensaio e normas ABNT para os ensaios

Caracterização do Resíduo	1 Coleta do resíduo	NBR 10.007/2004
	2 Preparo do resíduo	
	3 Ensaio de lixiviação	NBR 10.005/2004
	4 Ensaio de solubilização	NBR 10.006/2004
	5 Composição química	FRX
	6 Massa unitária	NBR NM 52/2009
	7 Massa específica	NBR NM 52/2009
	8 Composição granulométrica	NBR NM 248/2003
	9 Teor de finos	NBR NM 46/2003
	10 Capacidade pozolânica do resíduo	NBR 5.752/2014
Construção da Matriz Cimentícia	11 Determinação da resistência mecânica	NBR 5.739/2018
Produção do Elemento Construtivo	12 Resistência a compressão	NBR 9.781/2013
	13 Verificação da absorção a água	NBR 9.781/2013
	14 Avaliação dimensional	NBR 9.781/2013
	15 Ensaio de solubilização	NBR 10.006/2004

Fonte: Autor, 2021.

4.2.1 Caracterização do resíduo

4.2.1.1 Observação dos processos e operações na geração de LETE

Para conhecimento do processo de geração do resíduo, visitas técnicas foram realizadas na estação com o acompanhamento de técnicos da estação para esclarecimento de dúvidas. A estação de tratamento de esgoto monjolinho – ETE Monjolinho, está localizada na cidade de São Carlos, na Estrada Municipal Washington José Pêra, Bairro Bela Vista.

4.2.1.2 Coleta e preparação do resíduo

O lodo foi coletado logo após sua desidratação por centrifugação, o mesmo foi armazenado em tambores de plástico e transportados para o Laboratório de Compostagem, localizado cerca de 6 quilômetros de distância da estação, na USP, São Carlos. Todos os procedimentos de amostragem foram executados segundo as exigências e orientações da norma técnica ABNT NBR 10.007:2004. Na figura 10 abaixo podemos observar o momento da coleta.

Figura 10: Coleta do lodo da ETE logo após centrifugação



Fonte: Autor, 2021.

No laboratório o resíduo foi preparado para a utilização como agregado da seguinte forma: foi submetido a secagem natural por 15 dias, em seguida foi triturado e armazenado em sacos plásticos totalmente fechados para posterior utilização nas etapas de fabricação do PAVER e nos ensaios de granulometria, teor de finura, massa específica, massa unitária e capacidade pozolânica do resíduo. Os ensaios de lixiviação, solubilização e espectrometria por fluorescência de raio x, foi utilizado o lodo in natura, ou seco em estufa apropriada, no laboratório da Embrapa.

4.2.1.3 Classificação do resíduo – análise dos extratos lixiviado e solubilizado

A NBR 10004:2004 – Resíduos Sólidos, Classificação – classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. Os resíduos são classificados em perigosos (Classe I) ou não perigosos (Classe II). E ainda os resíduos não perigosos são classificados em não inertes (Classe II-A) ou em inertes (Classe II –B). Para isso, são utilizadas outras duas normas: a NBR 10005:2004 – Obtenção do Extrato Lixiviado e a NBR 10006:2004 – Obtenção do Extrato Solubilizado. São essas normas que estabelecem os procedimentos para identificar as substâncias presentes no resíduo.

Para a obtenção do extrato lixiviado, primeiramente, a amostra do resíduo passa em uma peneira de malha 9,5mm para avaliar o tamanho das partículas.

Nessa condição, ela está pronta para a etapa de extração. O resíduo, então, é misturado a uma solução composta por ácidos e essa mistura é agitada mecanicamente durante 18 horas, à temperatura de 25 °C com rotação de 30 rpm em um equipamento denominado de extrator. Após esse período, a amostra é filtrada, primeiramente, por um papel filtro simples e depois em membranas mais finas com o auxílio de um compressor à vácuo. O filtrado obtido é denominado extrato lixiviado e a análise dos parâmetros desse lixiviado é realizada conforme o estabelecido pela 22a edição da Standard Methods SW 846, de 2012 que indica vários procedimentos, dependendo do parâmetro que está sendo analisado.

Para o ensaio de solubilização, a amostra é submetida à temperatura de 42°C para a sua secagem, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar e exaustão. Em seguida, é adicionada à amostra 1000 ml de água destilada, deionizada e isenta de orgânicos e essa mistura é submetida a agitação manual em baixa velocidade por 5 minutos. Após essa etapa, o recipiente é fechado com filme PVC e fica em repouso por 7 dias em temperatura constante.

A filtração e a análise do solubilizado segue os mesmos procedimentos realizados para o lixiviado, sendo que a diferença é a quantidade limite para cada um dos parâmetros.

4.2.1.4 Composição química

Para se conhecer a composição química do lodo foi aplicado o método de Fluorescência de Raios X por dispersão de energia (EDXRF).

A EDXRF trata-se de uma técnica analítica nuclear, instrumental, multielementar e simultânea baseada na medição das intensidades de raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra a partir de excitação por meio de um feixe de raios-X. O termo “energia dispersiva” refere-se à técnica de detecção dos raios-X emitidos, que é efetuada por um detector de silício (Si) que gera um espectro de intensidade em função da energia. A intensidade da energia característica emitida pelos componentes da amostra está relacionada com a concentração de cada elemento presente na amostra (ALEXANDRE & BUENO, 2006).

4.2.1.5 Índices físicos

4.2.1.5.1 Massa unitária

Massa unitária é definida como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume, incluindo os vazios. O fenômeno da massa unitária surge porque não é possível empacotar as partículas dos agregados de tal forma que não haja espaços vazios. O conhecimento da massa unitária é necessário para a dosagem dos materiais em um traço. Para dosar em volume, a massa unitária é usada para converter quantidades expressas em massa em quantidades expressas em volume (NEVILLE, 1982).

O ensaio para a determinação da massa unitária do resíduo foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 45:2006 – Agregados, determinação da massa unitária e do volume de vazios. Para o seu cálculo, o primeiro passo é obter o volume e a massa do recipiente vazio. Em seguida, o resíduo é colocado no recipiente em três camadas, sendo que cada camada correspondente a 1/3 do volume do recipiente e é necessário que ao final da deposição de cada camada sejam executadas 25 batidas para compactação do material. Preenchido todo o volume do recipiente com o resíduo, a superfície é alisada com uma régua e a pesagem é realizada. A massa do agregado é a diferença da massa do recipiente cheio e a massa do recipiente vazio. São necessárias três determinações e o resultado é a média dos resultados individuais obtidos, calculado pela massa do agregado dividido pelo volume do recipiente.

4.2.1.5.2 Massa específica

Os procedimentos para a determinação da massa específica são estabelecidos pela ABNT NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente.

A determinação da massa específica deve ser a média dos resultados de duas determinações e expressos em g/cm³ com duas casas decimais. Na unidade de volume está incluso os poros internos das partículas.

A determinação da massa específica é importante para o cálculo de dosagem dos materiais e cálculo do consumo de materiais.

4.2.1.5.3 Composição granulométrica

A composição granulométrica do lodo seguirá a Norma Técnica ABNT NBR NM 248:2003, a fim de se classificar o tamanho das partículas dos materiais para compor um traço de concreto a ser utilizado na fabricação dos pavers. Para isso, será pesado 1 kg de cada material e colocar-se-á numa série de peneiras com abertura de malha em ordem crescente da base até o topo, encaixando o fundo na base desta série. O conjunto de peneiras será colocado em um peneirador elétrico para promover a agitação mecânica, durante 10 minutos. Após, será feita a medida de massa do material retido em cada fração. Com base nas massas retidas determinasse-a a porcentagem retida individual e cumulada.

4.2.1.5.4 Teor de finos do material

Esse ensaio é realizado com base na ABNT NBR NM 46:2001 – Agregados, determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. O método consiste em secar a amostra de ensaio à temperatura de 110 °C até a massa da amostra permanecer constante. Após a secagem e a determinação da massa, a amostra é colocada em um recipiente e coberta de água, sendo vigorosamente agitada para que se obtenha a completa separação das partículas mais finas que 75 μm , que permanecem em suspensão. Em seguida, essa água de lavagem é passada pela peneira para a retirada do material fino. Essa operação é repetida até que a água de lavagem fique clara. O material que ficou retido na peneira é levado à estufa onde permanece em temperatura constante de 105°C por 24 horas e por fim essa massa retida na peneira é determinada através de sua pesagem.

O teor de materiais finos permite prever o desempenho das pastas de cimento Portland, porque, quando presentes em grandes quantidades nos agregados podem prejudicar seu total envolvimento pela pasta de cimento. Porém, em quantidades adequadas facilitam o auto adensamento garantindo uma melhor compactação e preenchimento dos vazios existentes entre os grãos. O empacotamento pode ser otimizado, diminuindo a porosidade do sistema (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

4.2.1.5.5 Capacidade pozolânica do resíduo

As pozolanas são materiais naturais ou artificiais contendo sílica ativa, a qual, na presença de água e cal, formam silicatos de cálcio que apresentam propriedades aglomerantes. Se o resíduo apresentar propriedades aglomerantes ele entra na matriz de concreto substituindo parte do cimento. A análise da capacidade pozolânica do resíduo foi realizada de acordo com a NBR 5752:2014 e NBR 12653:2014.

4.3 Construção da matriz cimentícia

4.3.1 Composições preliminares

Para estabelecimento das composições preliminares das matrizes cimentícias, utilizando o resíduo como agregado, adotaremos uma resistência desejável de $f_{ck28dias} = 35$ Mpa, mas para um rigoroso controle de qualidade, será determinado a resistência média aos 28 dias pela seguinte expressão (1):

$$f_{cm28} = f_{ck28} + 1,65 \cdot S_d \quad (1)$$

$$f_{cm28} = 35 \text{ Mpa} + 1,65 \cdot 4$$

$$f_{cm28} = 41,6 \text{ Mpa}$$

De acordo com Andolfato (2002), o traço em massa dos agregados pode ser determinado pelas seguintes equações:

$$A = 0,5 \cdot \frac{X}{Y} - 1, \text{ sendo } A = \text{agregado miúdo (areia)} \quad (2)$$

$$B = 0,5 \cdot \frac{X}{Y}, \text{ sendo } B = \text{agregado graúdo (brita)} \quad (3)$$

Os parâmetros X e Y serão obtidos, respectivamente, por meio das tabelas 6 e 7 abaixo:

Tabela 6: Fator X (água/cimento) em função da resistência

Fator água/cimento	Resistência medida aos 28 dias (f_{cm}) - Mpa
0,37	45
0,4	40
0,45	35

Tabela 7: Relação Y para concreto, em função do diâmetro dos agregados

Diâmetro máximo do agregado	Concreto sem aditivo	Concreto com Aditivo
19 mm	9%	8%
25mm	8,5%	7,5%

Interpolando os dados da Tabela 6 para um $f_{cm} = 41,6$ obtém-se $X = 0,37$ e pela Tabela 7 obtém-se $Y = 0,09$. Com esses dados, calcula-se os valores de A e B:

$$A = 0,5 * \frac{0,37}{0,09} - 1 = 1,06$$

$$B = 0,5 * \frac{0,37}{0,09} = 2,06$$

Determinou-se, assim, o traço em massa: 1: 1,06: 2,06. Porém, com a adequação da consistência em laboratório o traço de referência ficou sendo o 1: 1,2: 1,8: 0,35.

Para os demais traços, houve a substituição da areia pelo LETE, em massa, nas proporções de 3%, 6%, 12%, foram escolhidas essas porcentagens levando em conta trabalhos acadêmicos com o mesmo resíduo, onde foi observado uma variação entre 3% e 20%.

As porcentagens podem parecer baixas, mas serão responsáveis por destinar 45 a 180 mil toneladas de lodo de esgoto no Brasil anualmente.

Esse método foi utilizado por Costa (2011) em sua pesquisa substituindo a areia natural por lodo de ETA em matrizes de concreto.

4.3.2 Verificação do desempenho mecânico

Antes da execução dos ensaios de resistência à compressão, foi produzido os corpos de prova de acordo com o estabelece a NBR 5738:2015. Essa norma discorre sobre as condições de moldagem, desforma, preparação de topos, transporte e cura de corpos cilíndricos de concreto. O ensaio de resistência a compressão é regido pela norma NBR 5739:2018, é um ensaio simples e rápido em que são necessários apenas os corpos de prova e uma prensa hidráulica. Para cada traço foram fabricados 2 corpos de prova, nas dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, totalizando 8 corpos de prova para esse ensaio.

Na Tabela 8 a seguir, está exposto a quantidade de total materiais utilizados para a confecção de 2 corpos de prova para cada porcentagem (0, 3, 6, 12%) e o total dos materiais utilizados:

Tabela 8: Teor de Substituição e quantidade de materiais para confecção dos corpos de prova

Substituição	Cimento (g)	Pedrisco (g)	Água (g)	Areia (g)	Lodo (g)
0%	2480	4464	868	2974	0
3%	2480	4464	868	2884	90
6%	2480	4464	868	2795	179
12%	2480	4464	868	2617	357
Total	9920	17856	3472	11270	626

Fonte: Autor, 2021.

4.3.3 Estabelecimento da composição adequada

Após a realização do teste de resistência à compressão, a composição da matriz que apresentou desempenho mecânico satisfatório foi a composição utilizada para a fabricação das peças de concreto para pavimentação.

4.4 Produção do elemento construtivo

Nessa etapa, foram produzidos 30 blocos de concreto para pavimentação. A fôrma utilizada para a prensagem das peças foi do Tipo 1 com faces laterais retas e com 6 cm de altura. Os blocos de concreto foram produzidos em uma fábrica localizada na cidade de Tabatinga/SP, utilizando uma vibro prensa (prensa eletro hidráulica) da marca Menegotti, modelo MBP-4. Foram moldados 10 blocos por vez como podemos observar na figura 11 abaixo:

Figura 11: Vibro Prensa no momento da moldagem das peças



Fonte: Autor, 2021.

4.4.1 Verificação da resistência a compressão

O procedimento de ensaio de resistência à compressão seguiu as recomendações propostas pelo Anexo A da NBR 9781:2013. Para esse ensaio foi necessária uma amostra mínima de 6 blocos de concreto. Realizou-se ensaios nas idades de 7 e 28 dias. Os blocos de concreto devem apresentar um $f_{pk28} = 35\text{Mpa}$, conforme utilização para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

4.4.2 Verificação da absorção a água

O procedimento de ensaio de determinação da absorção de água seguirá as recomendações propostas pelo Anexo B da NBR 9781:2013. As amostras devem apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%. Não sendo admitido nenhum valor individual maior que 7%. Foi necessária amostra mínima de 3 peças de concreto para esse ensaio. Esse dado define o volume dos poros, o ensaio consiste na aferição das massas das peças para pavimentação em estado seco e em estado saturado.

4.4.3 Avaliação dimensional da peça de concreto

Para realização do ensaio dimensional seguiu-se o Anexo D da NBR 9781:2013, de modo que a avaliação foi realizada sempre em planos paralelos ou perpendiculares às arestas das peças, conforme sua tipologia, e nunca ultrapassando o limite de tolerância de mais ou menos 3 mm para todas as dimensões.

4.4.4 Verificação do desempenho químico

Foi realizado o ensaio de solubilização para a verificação da eficiência da técnica de estabilização/solidificação do resíduo sólido nos blocos de concreto. O ensaio de lixiviação não foi necessário, pois o resíduo foi classificado como não perigoso. É realizado de acordo com os parâmetros da NBR 10006:2004 e analisado de acordo com os parâmetros da NBR 10004:2004. Foram necessárias 2 peças para esse ensaio. O resultado foi comparado com o resultado da análise do resíduo in natura, determinando a eficiência de estabilização das matrizes de cimento Portland, de acordo com a equação 4:

$$E_{est} = \frac{C_r - C_m}{C_r} * 100 \quad (4)$$

Onde:

E_{est} = Eficiência de estabilização na matriz (%);

C_r = Concentração do elemento no resíduo in natura (mg/L);

C_m = Concentração do elemento na matriz solidificada (mg/L).

Para esse ensaio, as peças de concreto passaram por um processo de trituração, pois o procedimento para obtenção do extrato é feito a partir de materiais que apresentam granulometria menor que 9,5mm.

5. RESULTADOS

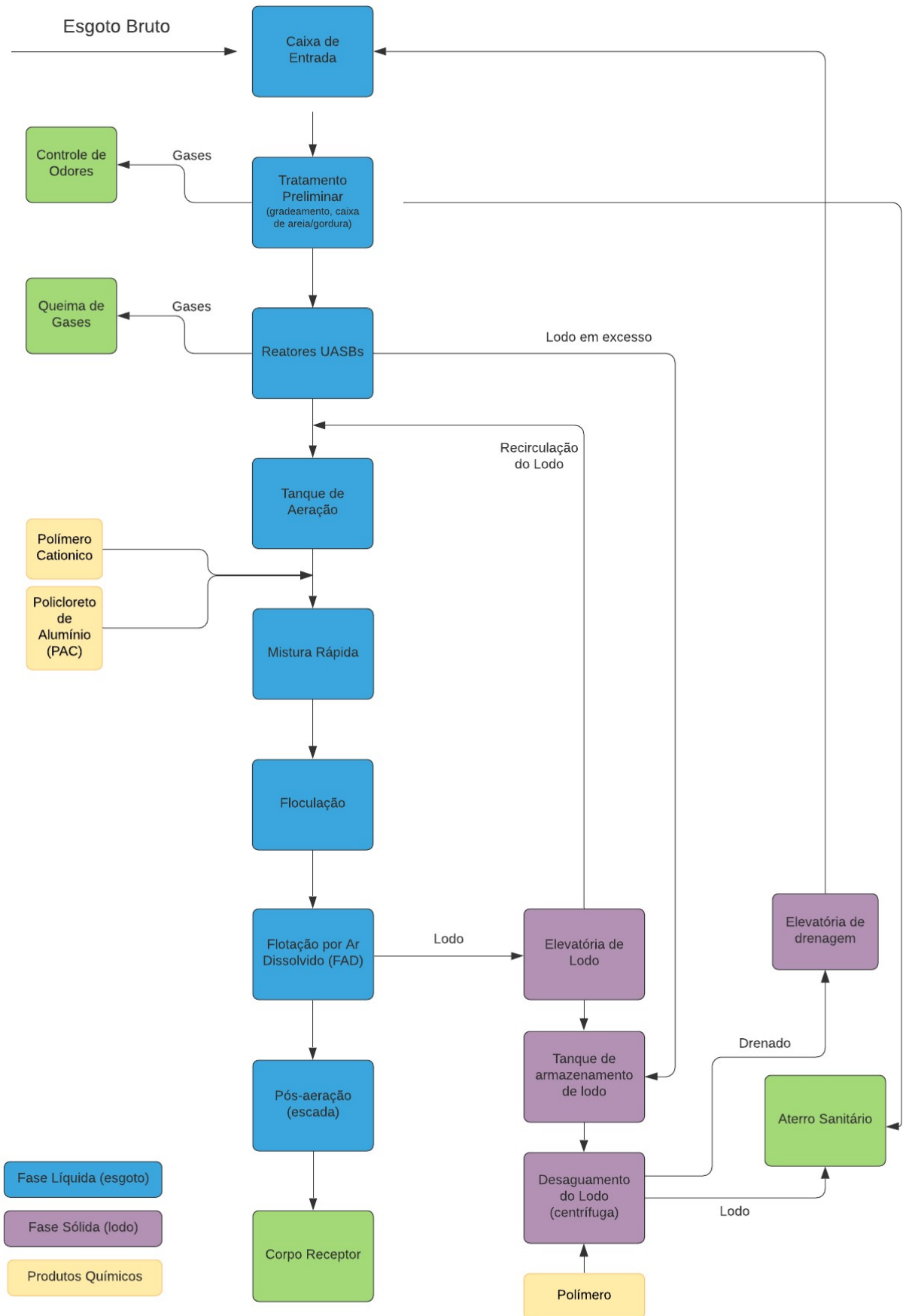
5.1 Caracterização do resíduo

5.1.1 Observação dos processos e operações na geração de LETE

Os processos e operações de tratamento do esgoto sanitário da fase líquida da ETE é realizada por meio de tratamento preliminar (gradeamento/caixa de areia/gordura), seguido por reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), mistura rápida, floculação, flotação por ar dissolvido (FAD) e pós-aeração. A parte

sólida (lodo) gerada nos reatores UASB e nos flotores de ar dissolvido é desaguada por meio de centrífugas, e em seguida este lodo é enviado ao aterro sanitário de Guatapar/SP, que fica a cerca de 90 quilmetros de distância da estcao, tornando sua destinacao com custo de transporte muito cara, fazendo com que a incorporacao do resíduo em um artefato da construcao civil, uma boa solucao tanto econmica quanto ambiental, já que o artefato pode ser produzido em uma fábrica de artefatos localizada mais próxima a estcao. Na figura 12 abaixo podemos observar no fluxograma todos os detalhes dos processos e operaoes da ETE Monjolinho.

Figura 12 – Fluxograma da ETE Monjolinho São Carlos-SP em 2021.



Fonte: Autor, 2021.

A estação de tratamento de esgotos Monjolinho (ETE Monjolinho) é responsável por tratar o maior volume de esgoto no município de São Carlos, é projetada apenas para tratamento de esgotos domésticos, porém, pontualmente recebe lançamentos de efluentes industriais. Todo o lodo gerado na estação é encaminhado para o aterro sanitário de Guatapar/SP, em 2019 foi gerado aproximadamente 4.145 toneladas de lodo. O lodo da ETA Vila Pureza (esto de tratamento de água) do município  encaminhado também a ETE Monjolinho, onde este chega com teor de umidade extremamente elevado (98 a 99%), onde  misturado ao esgoto doméstico no início da esto e sofre os processos e operaes já citados (Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do município de São Carlos, 2019).

5.1.2 Coleta e Preparo do resíduo como agregado

Para utilizao do resíduo (LETE) como agregado miúdo, o material passou por uma etapa de beneficiamento. Primeiro, o resíduo coletado foi disposto em placas de plástico duro com perfuraes e submetido a secagem natural (ar livre) por 15 dias, no décimo quinto dia, o lodo já seco, foi triturado e armazenado para posteriores ensaios. No primeiro dia de secagem o lodo ficou dentro do laboratório de compostagem por estar chovendo e de noite, no segundo dia ele já foi disposto embaixo da antiga esto de tratamento de esgoto da USP/São Carlos, por se tratar de um local aberto lateralmente, mas coberto para evitar problemas com as chuvas.

Ensaios que necessitavam do lodo in natura foram feitos antes da etapa de secagem natural.

Nas figuras 13 até 20 abaixo podemos acompanhar as etapas de secagem e trituraamento.

Figura 13: 1º dia de secagem



Fonte: Autor, 2021.

Figura 14: 3º dia de secagem



Fonte: Autor, 2021.

Figura 15: 6º dia de secagem



Fonte: Autor, 2021.

Figura 16: 9º dia de secagem



Fonte: Autor, 2021.

Figura 17: 13° dia de secagem



Fonte: Autor, 2021

Figura 18: 15° dia de secagem



Fonte: Autor, 2021.

Figura 19: Lodo triturado ao 15° dia de secagem



Fonte: Autor, 2021.

Figura 20: Liquidificador industrial utilizado no processo de trituração



Fonte: Autor, 2021.

Todo o lodo triturado passou por peneira com abertura de 9,5 mm.

5.1.3 Classificação do resíduo – análise dos extratos lixiviado e solubilizado

Os ensaios para classificação do resíduo de lodo da ETE foram realizados no Laboratório de Saneamento (LABSAN) do Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC- USP. Nos resultados (Tabela 9) da análise do lixiviado do resíduo em estudo, todos os elementos identificados ficaram dentro dos limites exigidos pela norma NBR 10004:2004, atendendo então ao anexo F da mesma. Sendo assim, é possível afirmar que o resíduo é classificado como Classe II, não perigoso.

Tabela 9: Ensaio de lixiviação do resíduo de LETE

Parâmetro	Unidade	Resultado	Limite Máximo
Bário	mg/L	0,56	70
Cádmio	mg/L	0,025	0,5
Chumbo	mg/L	< LD	1
Cromo Total	mg/L	< LD	5
Fluoretos	mg/L	0,03	150
Prata	mg/L	0,024	5
Selênio	mg/L	< LD	1
ph do Lixiviado	-	5,15	-
LD: Limite de Detecção			

Fonte: Laboratório de Saneamento – EESC, 2021. Adaptado pelo autor.

Já na análise do extrato solubilizado do resíduo, foram detectados alguns elementos que ultrapassaram os limites permitidos pelo anexo G da NBR 10004:2004. Os elementos cádmio, fenóis totais, ferro total, manganês, nitrato e prata, ultrapassaram os limites dados pela norma. Por esse motivo, o resíduo é classificado como Classe II A, não perigosos e não inerte (Tabela 10).

Tabela 10: Ensaio de solubilização do resíduo de LETE

Parâmetro	Unidade	Resultado	Limite Máximo
Alumínio	mg/L	< LD	0,2
Bário	mg/L	0,33	0,7
Cádmio	mg/L	0,023	0,005
Chumbo	mg/L	<LD	0,01
Cianeto	mg/L	<LD	0,07
Cloreto	mg/L	72,5	250
Cobre	mg/L	<LD	2
Cromo Total	mg/L	<LD	0,05
Fenóis Totais	mg/L	8,45	0,01
Ferro Total	mg/L	0,856	0,3
Fluoretos	mg/L	0,08	1,5
Manganês	mg/L	0,213	0,1
Nitrato	mg/L	47,2	10
Prata	mg/L	0,114	0,05
Selênio	mg/L	<LD	0,01
Sódio	mg/L	160	200
Sulfatos	mg/L	220	250
Surfactantes	mg/L	0,45	0,5
Zinco	mg/L	0,23	5
pH do Solubilizado	-	7,04	-
LD: Limite de Detecção			

Fonte: Laboratório de Saneamento – EESC, 2021. Adaptado pelo autor.

5.1.4 Composição química do LETE

Os ensaios para determinação da composição química do lodo de ETE, foram feitos no Laboratório de Ressonância Magnética Nuclear da CAQI (Central de Análises Químicas Instrumentais), no Instituto de Química de São Carlos. Foram analisadas duas amostras de lodo in natura, como requerido pelo técnico do laboratório. Na tabela 11 abaixo podemos observar os resultados, ressaltando-se que os óxidos não são detectados, são apenas estimativas das concentrações considerando a sua forma mais estável.

Tabela 11: Composição química do LETE pelo método EDXRF

AMOSTRA 1			
Elementos	100% m/m	Óxidos	100% m/m
Al	27,205	Al ₂ O ₃	32,839
Si	16,507	SiO ₂	20,391
P	6,525	P ₂ O ₅	8,162
S	9,647	SO ₃	12,739
K	0,455	K ₂ O	0,275
Ca	10,596	CaO	7,286
Ti	3,812	TiO ₂	2,944
Fe	23,212	Fe ₂ O ₃	14,367
Zn	2,041	ZnO	0,997
AMOSTRA 2			
Elementos	100% m/m	Óxidos	100% m/m
Al	27,125	Al ₂ O ₃	32,764
Si	16,909	SiO ₂	20,900
P	6,464	P ₂ O ₅	8,084
S	9,302	SO ₃	12,286
K	0,471	K ₂ O	0,286
Ca	10,564	CaO	7,269
Ti	4,020	TiO ₂	3,105
Fe	23,227	Fe ₂ O ₃	14,370
Zn	1,917	ZnO	0,936

Fonte: Autor, 2021.

5.1.5 Índices físicos

5.1.5.1 Massa unitária

Esse ensaio foi determinado pela NBR NM 45:2006 – Agregados, determinação da massa unitária e do volume de vazios. E o resultado está expresso na Tabela 12.

Tabela 12: Massa Unitária do resíduo de LETE

Amostra	Massa Unitária (kg/dm³)
1	0,87
2	0,88
3	0,89
4	0,90
5	0,89
Média	0,886

Fonte: Autor, 2021.

5.1.5.2 Massa específica

Esse ensaio foi determinado segundo a NBR NM 52:2009 – Agregado Miúdo - determinação de massa específica e massa específica aparente. E o seu resultado está expresso na tabela 13 abaixo:

Tabela 13: Massa específica do resíduo de LETE

Massa Específica	Unidade (g/cm³)
Agregado seco	0,97
Agregado S.S.S (saturado superfície seca)	1,43
Real	1,78

Fonte: Laboratório Central da L.A Falcão Bauer, 2021. Adaptado pelo Autor.

5.1.5.3 Análise granulométrica

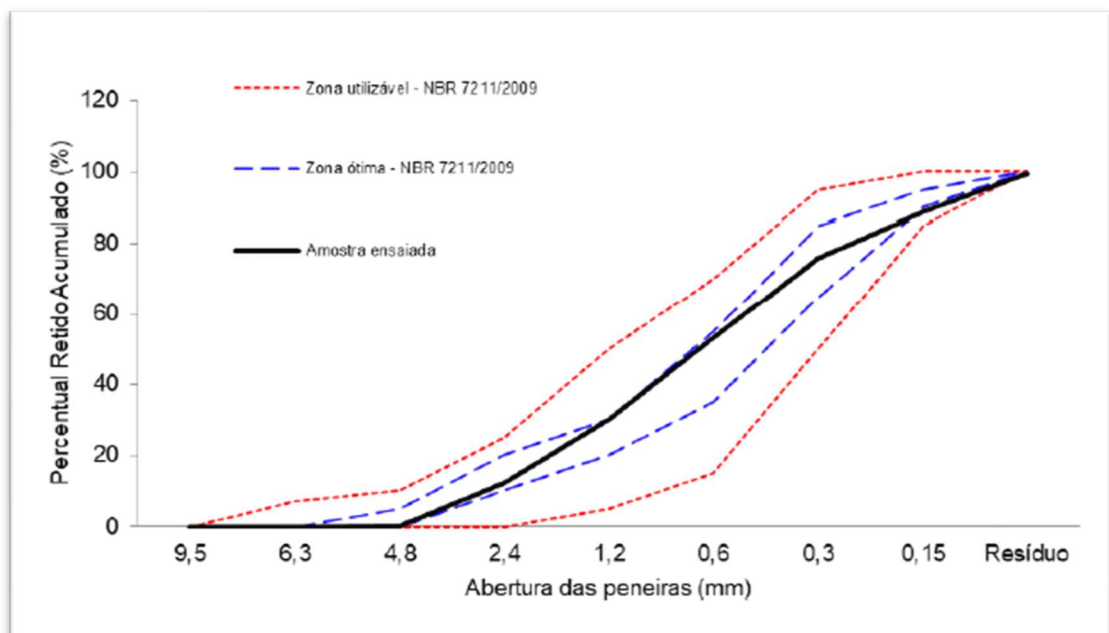
A análise granulométrica envolve a determinação de três parâmetros relativos às partículas: composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura. A dimensão máxima característica é especificada pelo diâmetro da peneira onde 5% ou menos das partículas ficam retidas, o módulo de finura é definido pela soma das porcentagens acumuladas retidas nas peneiras e é tanto maior quanto maior o agregado. O resultado do ensaio está expresso na Tabela 14 e no gráfico 1.

Tabela 14: Composição granulométrica do LETE beneficiado como agregado

Peneiras (mm)	Médias Retidas (%)	Média Retida Acumulada (%)
9,5	0	0
6,3	0	0
4,8	0,1	0
2,4	12,2	12
1,2	18	30
0,6	23	53
0,3	22,7	76
0,15	12,7	89
Resíduo	10,7	99
Totais	99	-
Módulo de Finura		2,61
Diâmetro máximo		4,8

Fonte: Laboratório Central da L.A Falcão Bauer, 2021. Adaptado pelo Autor.

Gráfico 1: Composição Granulométrica



Fonte: Laboratório Central da L.A Falcão Bauer, 2021.

5.1.5.4 Teor de finura do agregado

Esse ensaio é determinado pela NM 46:2001- Agregados, determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem - e o resultado é expresso em percentual. É calculado de acordo com a fórmula 5 abaixo.

A massa inicial de resíduo utilizada para o ensaio foi de 500 g e o procedimento foi repetido duas vezes, como especificado pela norma.

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (5)$$

onde:

m: porcentagem de material mais fino que a peneira de 75 μ por lavagem;

m_i: massa original da amostra seca após a lavagem; em gramas;

m_f: é a massa da amostra seca após a lavagem, em gramas.

Sendo assim, pela média aritmética das duas determinações, o índice de finura encontrado para o LETE foi de 21,2%. O ensaio foi realizado no Laboratório Central L.A Falcão Bauer.

5.1.5.5 Capacidade pozolânica do resíduo

A capacidade pozolânica do resíduo foi estabelecida pela NBR 5752:2014 – Materiais pozolânicos, determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e NBR 15894-3:2010 – Metacalium para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação da finura por meia da peneira 45 μ m. Os testes foram realizados a fim de se cumprir 2 requisitos físicos da norma NBR 12653:2014 - Materiais Pozolânicos – Requisitos, para comprovar a pozônilicidade do resíduo ou não.

Na tabela 15 abaixo podemos observar os requisitos exigidos para que resíduo seja classificado como material pozolânico.

Tabela 15: Requisitos físicos que atestam a pozolanicidade do material

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 μ m	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15894-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751
(*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas..				

Fonte: ABNT NBR 12653:2014.

As análises foram realizadas no Laboratório Central L.A Falcão Bauer, para o ensaio segundo a NBR 5752:2014 foram fabricados 2 tipos de corpos de prova para posterior ensaio de compressão, o primeiro tipo de CP foi fabricado sem adição do resíduo, já o segundo com substituição de 25% do cimento Portland CP II F 32 pelo resíduo, os resultados dos ensaios de compressão estão expressos na tabela 16 abaixo:

Tabela 16: Resistência a compressão dos 2 tipos de CPs

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NBR 7215:96)							
(MPa)							
IDADE: 28 DIAS	AMOSTRA PADRÃO				AMOSTRA COM ADIÇÃO		
	A				B		
	CP - 1	CP - 2	CP - 3		CP - 1	CP - 2	CP - 3
	36,3	35,1	33,5		7,6	7,7	8,1
	CP - 4	CP - 5	CP - 6		CP - 4	CP - 5	CP - 6
34,6	34,5	34,2	8,0	7,4	7,9		
Amostra	Data de moldagem	DRM (%)	Resistência média (MPa)				
A - Padrão	13/08/21	4,8	34,7				
B - (com adição)	13/08/21	5,0	7,8				

Ensaio em Repetição: Ocorre quando mais de um valor apresenta desvio relativo máximo (DRM) em relação à média superior a 6%.

Fonte: Laboratório Central L.A Falcão Bauer, 2021

Com esses resultados, foi calculado o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, pela fórmula (10):

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} * 100 \quad (6);$$

onde:

Icimento: índice do desempenho com cimento Portland aos 28 dias;

f_{cB}: resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25% de material pozolânico expresso em megapascals (MPa);

f_{cA}: resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP-II-F-32 expresso em megapascals (MPa).

Desta forma obteve-se o seguinte resultado:

$$Icimento = \frac{7,8}{34,7} * 100$$

$$Icimento = 22,5\%$$

Já para o ensaio de obtenção do material retido na peneira 45 µm foi utilizado os procedimentos da NBR 15894-3:2010 e o resultado encontrado foi o de 78,5% de resíduo retido na peneira de 45 µm.

5.2 Construção da matriz cimentícia

5.2.1 Composições preliminares

A resistência característica à compressão das peças de concreto para pavimentação deve ser de no mínimo 35MPa para áreas de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais, e de no mínimo 50MPa para áreas de tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.

Dessa forma, foi estabelecido um traço de referência 1: 1,2: 1,8: 0,35, como visto no item 4.3.1, o traço de referência é um traço padrão, sem adição do resíduo, para efeito de comparação.

A determinação da resistência mecânica, para esse traço, foi realizada conforme a NBR 5739:2018 no Laboratório de Sistemas Estruturais na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Para isso, foram moldados 2 corpos de prova nas dimensões de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura. Como pode-se observar na Tabela 17 abaixo:

Tabela 17: Resistência a compressão – traço de referência

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força máxima (N)	Resistência a compressão (Mpa)
CP 1	7853,98	407186,3	51,84
CP 2	7853,98	380251,34	48,42
Média			50,13

Fonte: Laboratório de Sistemas Estruturais da UFSCar, adaptado pelo autor (2021).

Estabelecido o traço de referência, parte da areia natural foi substituída pelo resíduo em porcentagens de 3%, 6%, e 12%. Para cada porcentagem de substituição foram

confeccionados 2 corpos de provas, nas figuras 21 e 22 abaixo pode-se observar os CPs confeccionados, e no momento do ensaio de compressão.

Figura 21: Corpos de provas cilíndricos, logo após a retificação.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 22: Corpo de prova no momento do ensaio de compressão



Fonte: Autor, 2021.

5.2.2 Verificação do desempenho mecânico

Os corpos de prova com as diferentes porcentagens de resíduo foram conservados em atmosfera úmida para a cura inicial, onde permaneceram por 24h com a face superior protegida por uma placa plana. Em seguida, foram desmoldados e submetidos à cura em água saturada de cal até a data da ruptura. A ruptura foi realizada 28 dias após a confecção das matrizes (Figura 23). Os resultados do ensaio estão expressos na Tabela 18.

Tabela 18: Resultados – resistência a compressão aos 28 dias dos corpos de prova com teores de substituição

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força máxima (N)	Resistência a compressão (MPa)	Teor de Substituição	Média (MPa)
CP 1	7853,98	407.186,30	51,84	0%	50,1
CP 2	7853,98	380.251,34	48,42	0%	
CP 3	7853,98	319.400,84	40,67	3%	41,9
CP 4	7853,98	338.583,47	43,11	3%	
CP 5	7853,98	269.110,69	34,26	6%	34,8
CP 6	7853,98	276.862,84	35,25	6%	
CP 7	7853,98	176.638,48	22,49	12%	23,7
CP 8	7853,98	195.920,02	24,95	12%	

Fonte: Laboratório de Sistemas Estruturais da UFSCar, adaptado pelo autor (2021).

5.2.3 Estabelecimento da composição adequada

O corpo de prova com 6% de substituição da areia natural pelo resíduo apresentou uma resistência média (34,8 MPa) muito próxima ao limite mínimo de 35Mpa estabelecido pela NBR 9781:2013 para áreas de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais. Sendo assim, esse traço foi escolhido para a produção das peças de concreto para pavimentação.

5.3 Produção do elemento construtivo

As peças de concreto para pavimentação foram produzidas no município de Tabatinga, São Paulo. A fábrica produz peças de concreto para pavimentação e artigos de cimento. A área de produção conta com uma correia transportadora (Figura 23) tanque de mistura (Figura 24), uma prensa eletro hidráulica e pátio coberto (Figura 25) para a cura inicial dos blocos de modo manual.

Figura 23: Correia transportadora



Fonte: Autor, 2021

Figura 24: Tanque de mistura



Fonte: Autor, 2021

Figura 25: Pátio coberto onde os pavos são armazenados para cura inicial



Fonte: Autor, 2021.

A proporção dos materiais utilizados nessa etapa do experimento, seguiu o estabelecido pelo traço referência com exceção da quantidade de água (Tabela 19). A água foi adicionada aos poucos enquanto os materiais estavam no tanque de mistura, o teste feito para verificar a umidade é manual, identificando quando o concreto atinge a consistência seca, ou seja, não solta água quando pressionado na palma da mão, mas tem umidade suficiente para ser moldado.

Tabela 19: Traço de referência utilizado na confecção dos pavers

1	:	1,2	:	1,8	:	0,18
Cimento (kg)		Areia (kg)	Resíduo 6% substituição	Pedrisco (kg)		Água (kg)

Fonte: Autor, 2021.

Esses materiais, foram dispostos no tanque de mistura, depois de misturados por um período suficiente para sua homogeneização (em torno de 10 minutos) foram encaminhados para a correia transportadora que levava a mistura até a prensa eletro hidráulica onde o material se transformava nos pavers. A fôrma utilizada para prensagem das peças é do Tipo I com faces laterais retas e com 6 cm de altura.

Foram fabricados um total de 30 peças de concreto para pavimentação. Esses blocos foram levados para cura inicial no pátio da fábrica, onde permaneceram por 5 dias, até serem transportados para o Laboratório de Compostagem, do departamento de Hidráulica e Saneamento da USP. A cura úmida continuou sendo realizada manualmente até o dia 23, onde foi feito ensaio de resistência à compressão com 6 peças de concreto. O restante das peças continuou passando pelo processo de cura úmida até o dia 28, onde foi realizado outro ensaio de resistência a compressão. Nas figuras 26 e 27 vemos as peças de concreto logo após a confecção, e no momento do ensaio de compressão respectivamente.

Figura 26: Peças de concreto com 6% de teor de substituição após confecção



Fonte: Autor, 2021.

Figura 27: Ensaio de resistência a compressão na peça de concreto



Fonte: Autor, 2021.

5.3.1 Verificação da resistência a compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com os procedimentos do Anexo A da norma ABNT NBR 9781:2013 – Peças de concreto para pavimentação, especificação e métodos de ensaio. Foram realizados ensaios nas idades de 23 dias e 28 dias. Para aferir à resistência à compressão são

necessários 6 blocos para cada idade de ruptura. Os resultados estão expressos na Tabela 20 e Tabela 21.

Tabela 20: Resultado de resistência a compressão aos 23 dias

Corpo de Prova	Força máxima (kgf)	Resistência a compressão (MPa)
CP 1	7.314,17	12,64
CP 2	9.246,06	15,98
CP 3	6.880,60	11,89
CP 4	8.052,24	13,92
CP 5	8.782,25	15,18
CP 6	10.528,62	18,20
Resistência média em MPa (Fp)		14,63
Desvio Padrão em MPa (s)		2,315
Resistencia compressão estimada em MPa (f _{pk})		12,50

Fonte: Laboratório de Sistemas Estruturais da UFSCar, adaptado pelo autor (2021).

Tabela 21: Resultado de resistência a compressão aos 28 dias

Corpo de Prova	Força máxima (kgf)	Resistência a compressão (MPa)
CP 1	6.769,69	11,70
CP 2	10.449,97	18,06
CP 3	12.960,62	22,40
CP 4	6.106,23	10,55
CP 5	10.161,60	17,56
CP 6	8.270,04	14,29
Resistência média em MPa (Fp)		15,76
Desvio Padrão em MPa (s)		4,435
Resistencia compressão estimada em MPa (f _{pk})		11,68

Fonte: Laboratório de Sistemas Estruturais da UFSCar, adaptado pelo autor (2021).

Nota-se, pela tabela Hz, que o fator F_{pk} para a idade de 23 dias foi de 12,50 Mpa, o que corresponde à 36% do F_{pk} de 35Mpa estabelecido pela NBR 9781:2013 para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha na idade de 28 dias. Segundo a norma, as peças de concreto com idade inferior a 28 dias devem

apresentar no mínimo 80% do Fpk de 35Mpa, dessa forma, o resultado desse ensaio foi inferior ao parâmetro da norma.

No caso da peça de concreto, com idade de ruptura de 28 dias, o fator Fpk obtido foi de 11,68 Mpa, resultado que apresentou resistência 23,32 Mpa abaixo do estabelecido pela norma, nota-se também que o Fpk aos 28 dias ficou menor que o Fpk aos 23 dias, devido ao desvio padrão das peças de concreto aos 28 dias ter sido maior, e isso ocorreu mesmo que a média aritmética aos 28 dias tenha sido superior a média aos 23 dias. Observa-se então que quanto mais uniforme as resistências das peças de concreto, o fator fpk se torna mais elevado.

5.3.2 Verificação da absorção a água

O ensaio de absorção de água seguiu os procedimentos do Anexo B da NBR 9781:2003 – Peças de concreto para pavimentação, especificação e métodos de ensaio. A amostra de peças de concreto deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%. Para esse ensaio, foi determinada a aferição da absorção em três peças de concreto, obtendo-se assim a média dos resultados. A tabela 22 apresenta os dados de absorção de água das peças com idade de 60 dias. O resultado apresentou índices que atendem a norma.

Tabela 22: Resultado do ensaio de absorção de água

Peça de concreto	Massa Seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção %
1	2281	2380	4,34
2	2250	2401	6,71
3	2275	2391	5,10
Média			5,38

Fonte: Autor, 2021.

5.3.3 Verificação dimensional da peça de concreto

O ensaio de avaliação dimensional da peça seguiu os procedimentos do Anexo D da NBR 9781:2003 - Peças de concreto para pavimentação, especificação e métodos de ensaio. A amostra de peças de concreto deve apresentar tolerância de ± 3 milímetros de largura, comprimento e espessura, e índice de forma (IF) menor ou igual a 4, sendo o índice de forma a relação entre o comprimento e a espessura da

peça de concreto. Levando em conta que as peças de concreto utilizadas, considera de medida de coordenação de (200 x 100 x 60 mm), elas devem variar no máximo ± 3 mm para cada dimensão.

A tabela 23 apresenta os dados da avaliação dimensional em 6 peças de concreto, e apresentou resultados que atendem a norma.

Tabela 23: Resultado da avaliação dimensional das peças de concreto

Peças de Concreto	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Índice de Forma (IF)
1	199,00	99,10	57,50	3,46
2	201,10	98,50	57,10	3,52
3	199,50	97,80	57,72	3,46
4	201,20	98,60	58,00	3,47
5	201,10	100,10	57,90	3,47
6	198,50	98,00	57,60	3,45

Fonte: Autor, 2021.

5.3.4 Verificação do desempenho químico

As peças de concreto foram submetidas ao ensaio de solubilização para verificar se o potencial poluidor encontrado no resíduo foi encapsulado pela matriz do cimento. O resultado do ensaio está disposto na Tabela 24, onde de azul estão destacados os elementos que foram estabilizados/solidificados, de amarelo os elementos que tiveram suas concentrações diminuídas, mas ainda permaneceram acima dos parâmetros especificados pela NBR 10004:2004, de verde os elementos que não foram estabilizados, sofreram um aumento de concentração mas continuaram com as concentrações abaixo dos parâmetros especificados pela norma e de vermelho os elementos que no resíduo, não apareceram ou apareceram em concentrações menores que o exigido pela norma, mas na composição das peças de concreto, apareceram em concentrações maiores e acima do parâmetro exigido pela norma, em branco estão os elementos que não foram encontrados nas peças e nem no resíduo.

Tabela 24: Comparativo da solubilização das peças de concreto com o resíduo

Parâmetro	Unidade	Limite Máximo	Resultado no Resíduo	Resultado encapsulamento
Alumínio	mg/L	0,2	< LD	2,39
Bário	mg/L	0,7	0,33	<LD
Cádmio	mg/L	0,005	0,023	0,019
Chumbo	mg/L	0,01	<LD	<LD
Cianeto	mg/L	0,07	<LD	<LD
Cloreto	mg/L	250	72,5	41
Cobre	mg/L	2	<LD	0,059
Cromo Total	mg/L	0,05	<LD	<LD
Fenóis Totais	mg/L	0,01	8,45	0,079
Ferro Total	mg/L	0,3	0,856	<LD
Fluoretos	mg/L	1,5	0,08	0,45
Manganês	mg/L	0,1	0,213	<LD
Nitrato	mg/L	10	47,2	6,954
Prata	mg/L	0,05	0,114	<LD
Selênio	mg/L	0,01	<LD	<LD
Sódio	mg/L	200	160	240
Sulfatos	mg/L	250	220	36
Surfactantes	mg/L	0,5	0,45	0,87
Zinco	mg/L	5	0,23	0,056
pH do Solubilizado	-	-	7,04	12,43
LD: Limite de Detecção				

Fonte: Autor, 2021.

Com esses dados comparativos foi possível calcular a eficiência de estabilização das peças, conforme pode ser visto na Tabela 25.

Tabela 25: Eficiência de estabilização/solidificação

Elementos	Eficiência de Estabilização (%)
Alumínio	0
Bário	100
Cádmio	17,4
Cloreto	43,4
Cobre	0
Fenóis Totais	99,1
Ferro Total	100
Fluoretos	0
Manganês	100
Nitrato	85,3
Prata	100
Sódio	0
Sulfatos	83,6
Surfactantes	0
Zinco	75,7

Fonte: Autor, 2021.

Apesar de alguns elementos não se estabilizarem ou não se estabilizarem o suficiente para que a concentração ficasse abaixo dos parâmetros da norma, em sua maioria os elementos tiveram elevado grau de estabilização.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

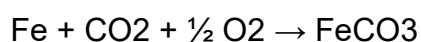
6.2 Classificação do Resíduo

O resíduo recebeu a classificação II-A, não-perigoso e não-inerte, em decorrência das substâncias cádmio (0,023 mg/L), fenóis totais (8,45 mg/L), ferro (0,856 mg/L), manganês (0,213 mg/L), nitrato (47,2 mg/L) e prata (0,114 mg/L) terem ultrapassado os limites estabelecidos pela NBR 10004:2004 na análise do extrato solubilizado.

O cádmio é um dos elementos que mais oferece riscos potenciais para a saúde humana, pois se acumula em organismos aquáticos, possibilitando sua entrada na cadeia alimentar. Pode ser fator para vários processos patológicos no homem, incluindo disfunção renal, hipertensão, aterosclerose, inibição no crescimento, doenças crônicas em idosos e câncer. É um metal de grande interesse relacionado à aplicação agrícola do lodo de ETEs, sendo desnecessário ao metabolismo vegetal e animal (SCALIZE, 2003). O cádmio é utilizado em televisores, pigmentos corante, ligas metálicas, baterias e estabilizadores em produtos de PVC, além de serem encontrados em mariscos, ostras, peixes de água salgada, em alguns tipos de chá e na fumaça do cigarro.

Fenol e seus derivados são substâncias encontradas em diversos processos industriais. Essas substâncias causam uma constante preocupação do ponto de vista ambiental devido ao alto grau de toxicidade, bioacumulação nas diferentes cadeias alimentares, mesmo em baixas concentrações e persistência no ambiente (CAETANO, 2016).

O ferro à temperatura ambiente, encontra-se no estado sólido, é extraído da natureza sob a forma de minério de ferro, é um dos elementos mais abundantes do universo, o núcleo da Terra é formado principalmente por ferro e níquel (NiFe). O ferro aparece principalmente em águas subterrâneas devido à dissolução do minério pelo gás carbônico da água, conforme a reação:



O carbonato ferroso é solúvel e frequentemente é encontrado em águas de poços contendo elevados níveis de concentração de ferro. Nas águas superficiais, o nível de ferro aumenta nas estações chuvosas devido ao carreamento de solos e à ocorrência de processos de erosão das margens. Também poderá ser importante a contribuição devida a efluentes industriais, pois muitas indústrias metalúrgicas desenvolvem atividades de remoção da camada oxidada (ferrugem) das peças antes de seu uso, processo conhecido por decapagem, que normalmente é procedida através da passagem da peça em banho ácido. Nas águas tratadas para abastecimento público, o emprego de coagulantes à base de ferro provoca elevação em seu teor.

O manganês é o 12º elemento químico mais abundante da crosta terrestre e seus principais minérios são a pirolusita e a rodocrosita, seus principais usos são na fabricação de ligas metálicas, baterias elétricas, vidros, fotografias e produtos químicos diversos.

O manganês está presente em todos os tipos de solos e que, conseqüentemente, pode ser também encontrado em leitos de rios e fundos de lagos. Caso a concentração de oxigênio na água seja suficiente, o manganês permanecerá em sua forma insolúvel (valência +4) e por muitas vezes será encontrado precipitado nos lodos de lagos e rios. Em situações em que o oxigênio dissolvido na água se encontra em baixos teores, ocorre uma reação química que faz com que o manganês se solubilize, aparecendo sua versão com valência +2 (COSTA, 2011). No caso da ETE, todo manganês que está no estado solúvel deve ser precipitado devido a coagulação pelo PAC (policloreto de alumínio).

Os nitratos são compostos que possuem o ânion nitrato em sua composição (NO_3^-). Embora existam nitratos tanto inorgânicos quanto orgânicos, os inorgânicos são os que mais se destacam. Os compostos de nitrogênio, como um todo, são utilizados na indústria de fertilizantes e, com os nitratos, não é diferente. Os nitratos são de suma importância para a produção da biomassa vegetal, ajudando a promover um crescimento mais rápido de produtos hortícolas, conferindo-lhes folhas mais vistosas e de maiores dimensões, mas em contraponto são geradores de grandes problemas de contaminação de corpos d'água superficiais e subterrâneos.

Na indústria alimentícia, os nitratos, em especial o de sódio, são utilizados como conservantes de alimentos, impedindo a proliferação de bactérias nocivas no

bacon, presunto, salame, queijos, salsichas e outros tipos de alimentos processados.

A prata é um dos mais conhecidos metais preciosos, principalmente por conta da dificuldade de encontrar esse tipo de minério e, devido a isso, por ele ser extremamente raro. A forma mais abundante de prata na Terra hoje é como um traço de metal em conjunto com outros minérios de metal. As principais fontes de prata são extraídas como minério de cobre, cobre-níquel, chumbo e chumbo-zinco. Na natureza, é mais provável que a prata seja encontrada como um composto.

Sua presença também pode ocorrer nos efluentes líquidos de laboratórios de processamento fotográfico, clínicas radiológicas, hospitais, indústria de produção de espelhos e joalherias e componentes eletrônicos (por ser o metal mais condutivo) (Bober *et al.* 1992). Como podemos observar, a prata está bastante restrita ao segmento da industrial.

De acordo com *et al.* (2007), os efluentes industriais são as principais fontes de contaminação das águas dos rios por metais pesados. Indústrias metalúrgicas, de tintas, de cloro e de plásticos utilizam diversos materiais pesados em suas linhas de produção e acabam lançando parte deles nos cursos d'água.

Como observado a ETE em questão trata o lodo da ETA Vila Pureza, que faz adução de águas superficiais e subterrâneas, e a ETE também recebe efluentes industriais esporadicamente. Por esse motivo foi encontrado concentrações em excesso dos elementos cádmio, fenóis, ferro, manganês, nitrato e prata.

6.2 Caracterização do resíduo como agregado

O resíduo sólido foi utilizado como agregado miúdo na composição do concreto, devido a sua capacidade pozolânica ter sido de 22,5% e a porcentagem de material retido em peneira 45 μm ter sido 78,5%, foi decidido utilizar o mesmo como agregado e não aglomerante devido a essas características. A qualidade do resíduo como agregado foi avaliada através dos ensaios: teor de finura, massa específica, massa unitária e composição granulométrica.

O teor de finura do material é utilizado para calcular a porcentagem das partículas com dimensão menor do que 75 μm . O índice de finura encontrado para a LETE foi de 21,2%. Esse resultado mostrou-se relativamente alto, caracterizando um fator potencialmente prejudicial para o desempenho do concreto. A ABNT 7211:2009

estabelece um limite máximo de 3% para concretos submetido a desgaste superficial e de 5% para concretos protegidos do desgaste superficial, e é recomendado a remoção dessas partículas finas para que o concreto alcance resistências mais elevadas.

O resultado obtido para a massa específica foi de 1,78 g/cm³, o que leva a classificar o LETE como agregado médio, devido o mesmo se encontrar entre 1 e 2 g/cm³, pois para agregados leves a massa específica deve ser menor que 1g/cm³ e para agregados pesados maior que 2g/cm³. A massa unitária foi de 0,886 kg/L.

Com relação a composição granulométrica do resíduo, a classificação do material quanto ao módulo de finura, segundo a NBR 7211:1983 tem as seguintes determinações (Tabela 26):

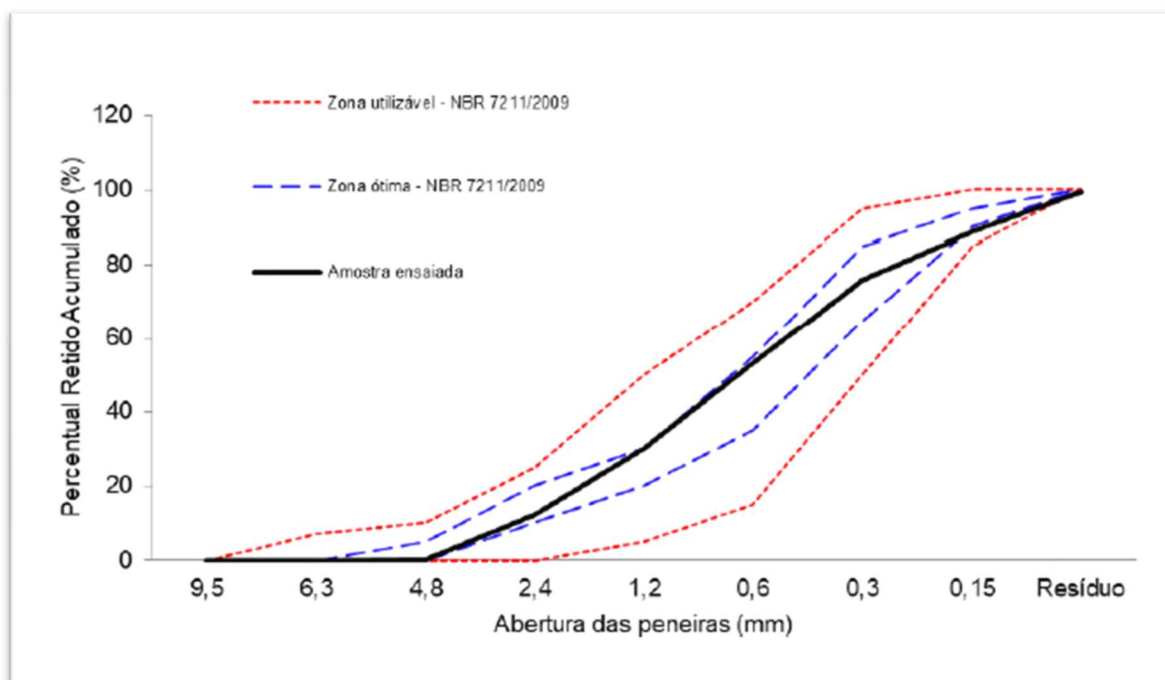
Tabela 26: Classificação dos tipos de um material quanto ao seu módulo de finura

Classificação	Módulo de finura (mm)
Areia grossa	Entre 3,35 e 4,05
Areia média	Entre 2,40 e 3,35
Areia fina	Entre 1,97 e 2,40
Areia muito fina	Menor que 1,97

Fonte: ABNT NBR 7211, 1983.

Assim, analisando as determinações dos ensaios de granulometria, pode-se dizer que o resíduo tem característica de areia média (2,61 mm). Analisando a curva das porcentagens, em massa, retidas acumuladas (Gráfico 2), observa-se que o resíduo em sua totalidade está na zona utilizável estabelecida pela NBR 7211:2009 para o agregado miúdo e permaneceu em sua maioria na zona ótima. Evidenciando sua utilização como agregado miúdo no traço de concreto.

Gráfico 2: Composição granulométrica do resíduo



Fonte: Laboratório Central da L.A Falcão Bauer, 2021

É possível analisar, também, pela curva, que o resíduo está bem graduado sem apresentar descontinuidades no conjunto. Apresenta granulometrias complementares o que pode favorecer o empacotamento.

6.3 Composição química do Resíduo

Os elementos predominantes na composição química do lodo com visto no item 5.1.4 foram o Alumínio, o Silício e o Ferro, que em sua forma mais estável são representadas pelos óxidos de alumínio ou alumina (Al_2O_3), dióxido de silício ou sílica (SiO_2) e o óxido de ferro ou hematita (Fe_2O_3). Como dito por Areais et al., 2020, alguns óxidos são predominantes na composição química do LETE, em quantidades relevantes são eles: SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e CaO , resultado encontrado na pesquisa.

A presença majoritária do óxido de alumínio acontece principalmente ao fato da ETE, utilizar o policloreto de alumínio (PAC) como coagulante, e tratar o lodo da ETA Vila Pureza que utiliza como coagulante o sulfato de alumínio.

A presença do silício se deve provavelmente ao fato desse elemento estar amplamente presente na natureza (segundo elemento mais abundante na superfície da Terra), sua forma pura não pode ser encontrada na natureza, mas os compostos

de silício como a sílica são encontrados abundantemente em solos, presente na argila, feldspato, granito, quartzo e areia, o que leva a incorporação desse elemento na água bruta tratada pela ETA, armazenando assim a sílica no LETA posteriormente tratado pela ETE e introduzido no LETE.

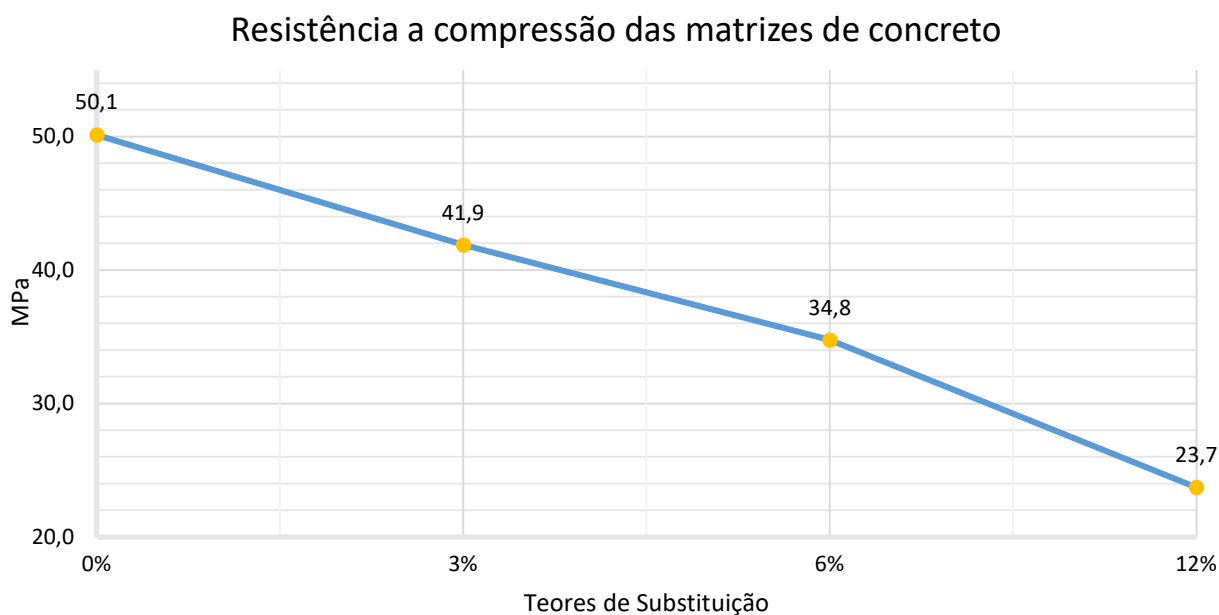
A presença do elemento ferro já era esperada, no item 6.1 podemos notar a presença comum do ferro tanto em águas subterrâneas como superficiais, e levando em conta que o município se abastece das duas formas de, e ainda trata efluentes industriais pontualmente, esse elemento dificilmente não seria encontrado precipitado ao lodo. Segundo dados das estações de tratamento de água e esgoto, não é utilizado nenhum coagulante com o elemento ferro em sua composição (sulfato férrico e cloreto férrico).

A presença desses óxidos é de grande importância, pois a maior parte dos minerais (95%) que constituem o cimento são a cal (CaO), a sílica, a alumina e o óxido de ferro, todos encontrados no LETE, e presentes no cimento utilizado na pesquisa, como mostra o item 4.1.1.

6.4 Avaliação mecânica da matriz cimentícia

A partir dos ensaios mecânicos preliminares realizados com as matrizes de concreto utilizando o resíduo sólido lodo de estação de tratamento de esgoto, é possível verificar que o resíduo ocasionou uma queda na resistência mecânica do concreto, como demonstrado no gráfico 3.

Gráfico 3: Resistência média em MPa dos corpos de prova aos 28 dias



Fonte: Autor, 2021.

A adição de 6% de resíduo, como parte do agregado miúdo na matriz de concreto, ocasionou uma queda na resistência de 31% em relação ao concreto referência. Com essa queda na resistência, o índice ficou levemente abaixo (0,2MPa) do estabelecido pela norma vigente e por essa diferença ser muito pequena, a porcentagem de substituição de 6% foi utilizada para a confecção das peças de concreto no esforço de se tratar a máxima quantidade de resíduo possível.

6.5 Desempenho mecânico e físico das peças de concreto para pavimentação

As peças de concreto para pavimentação produzidas apresentaram bom desempenho físico, já o desempenho mecânico apresentou-se insatisfatório. Na avaliação física, por meio do ensaio de absorção de água, e ensaio dimensional das peças, os resultados ficaram dentro do parâmetro da norma. Na avaliação mecânica, por meio do ensaio de resistência à compressão, o resultado com a idade de 23 dias está abaixo do valor de resistência exigido pela norma (80% de 35MPa).

Na avaliação de resistência à compressão na idade de 28 dias, o resultado também ficou inferior do estabelecido pela norma (35MPa), e ainda apresentou uma baixa de 6,5% no valor da resistência a compressão estimada aos 23 dias, isso ocorreu mesmo quando a resistência média a compressão aos 28 dias foi superior a

resistência média a compressão aos 23 dias em 7,1%, percebe-se então que o desvio padrão elevado devido à grande variação na resistência a compressão dos PAVERs foi de notável agravo para a diminuição da resistência a compressão estimada, resultado esse que pode ser explicado devido o resíduo ter elevado teor de sulfatos (como mostra o ensaio de solubilização, tabela 10), e o mesmo reage com o aluminato tricálcico do cimento hidratado causando expansões, fissuração, descamação do betão, amolecimento e desintegração, e com o passar do tempo prejudicando ainda mais a resistência do artefato devido as patologias acima citadas.

Por isso, é sugerido que as peças de concreto para pavimentação produzidas com adição de lodo de estação de tratamento de esgoto, sejam produzidas com cimento do tipo resistência a sulfato, evitando assim que a resistência do artefato seja prejudicada.

Também é recomendado a amostragem de maiores quantidades de PAVER, assim como, a confecção das peças de concreto com um teor de substituição menor que 6% da areia natural pelo resíduo; uma diminuição na quantidade de agregado graúdo, desde que não prejudique o processo produtivo da peça de concreto, um aumento na altura da peça e ainda a incorporação de um aditivo plastificante a matriz cimentícia; seriam esses, pontos de estudo importantes para obtenção de um melhor desempenho mecânico dos blocos.

Para a avaliação das matrizes de cimento e das peças de concreto para pavimentação confeccionadas com o resíduo sólido do LETE produzidas para o experimento, foram empregadas normas e especificações que foram elaboradas para os materiais convencionais. No entanto, os resíduos sólidos não são matérias-primas convencionais e carece de normas e critérios que avaliem as tecnologias empregadas para o seu tratamento, assim como diretrizes para disposição e o uso seguro dos produtos finais obtidos. Essa demanda se tornou maior com a valorização dos resíduos sólidos como bem econômico e social pela Política Nacional de Resíduos Sólidos.

6.6 Desempenho químico das peças de concreto para pavimentação

O bloco de concreto para pavimentação produzido com o resíduo foi classificado como sendo de classe IIA – não perigoso e não inerte. Após o processo

de solidificação/estabilização, os 6 elementos (Cádmio, Fenóis, Ferro, Manganês, Nitrato e Prata) encontrados no resíduo acima do limite recomendado apresentaram diminuição nas suas concentrações, mostrando uma eficiente estabilização. Dos 6 elementos, 4 tiveram seus limites diminuídos abaixo do requerido pela norma, apenas os elementos Fenóis e Cádmio continuaram acima do limite exigido, ressalta-se que os Fenóis tiveram 99,1% de eficiência em estabilização, mas mesmo assim continuaram acima dos padrões recomendados. Alguns elementos não foram encapsulados e ainda tiveram aumento nas concentrações, são eles: Alumínio, Sódio e Surfactantes, que antes abaixo dos limites estabelecidos pela norma, agora com concentrações superiores, outros 2 elementos tiveram um aumento na concentração, são eles: Cobre, e Fluoretos, mas seu ganho de concentração não ultrapassou o requerido pela norma.

Em resumo, dos 19 elementos aferidos no ensaio de solubilização, 4 deles não tiveram alteração da concentração, 10 deles tiveram suas concentrações diminuídas, e 5 tiveram suas concentrações aumentadas; a eficiência de estabilização dos elementos que decresceram suas concentrações obtiveram valores elevados.

Os acréscimos nas concentrações dos elementos que ultrapassaram o padrão exigido pela norma (antes não verificado); alumínio, sódio e surfactantes, ocorreram possivelmente devido a introdução dos materiais cimento, água, pedrisco, e areia na matriz cimentícia que compõe a peça intertravada de concreto. Não foi realizado o ensaio de solubilização da peça de concreto com o traço de referência, devido a indisponibilidade de tempo, mas podemos observar por exemplo na pesquisa de Sgorlon 2014; a presença em excesso de alumínio nos PAVERS referência, tanto em PAVERS em escala piloto (2,22 mg/L), como PAVERS em escala industrial (10,53 mg/L); a presença do sódio também foi encontrado nos PAVERS de escala piloto (21,92mg/L) e industrial (64,32 mg/L) da mesma pesquisa, valores proporcionalmente menores que o alumínio, mas que podem ter influenciado para concentrações maiores na peça de concreto com resíduo (PAVER com resíduo).

7. CONCLUSÕES

Devido a pesquisa ter ocorrido no período de quarentena da pandemia do COVID-19, alguns desafios ocorreram, estes relacionados com a dificuldade para

obtenção do resíduo, principal objeto de estudo; dificuldade para utilização dos laboratórios (laboratórios fechados e depois com horários reduzidos), e outros locais importantes para obtenção dos resultados da pesquisa, além da carga emocional causada pelo medo e insegurança que o vírus trouxe, apesar disso os resultados foram obtidos e indicaram que não é tecnicamente viável a incorporação de lodo de ETE em matriz cimentícia para a produção de peças de concreto para pavimentação para as condições estudadas e testadas, apesar de alguns requisitos obterem desempenho adequado, a resistência mecânica da peça não alcançou o requerido pela norma, se fazendo necessário o aprimoramento das técnicas para que se torne viável tecnicamente a incorporação do resíduo nas peças de concreto para pavimentação.

Com base nos resultados apresentados, foi possível delinear as seguintes conclusões para os objetivos específicos propostos:

7.1 Objetivo específico 1:

- Verificar sua classificação quanto ao potencial de contaminação (lixiviação, solubilização).

Conclusão: Quanto ao potencial de contaminação, o resíduo sólido lodo de estação de tratamento de esgoto foi classificado como classe IIA - não perigoso e não inerte. As substâncias cádmio, fenóis totais, ferro, manganês, nitrato, e prata ultrapassaram os limites estabelecidos pela NBR 10004:2004 na análise do extrato solubilizado.

7.2 Objetivo específico 2:

- Caracterizar o resíduo como aglomerado ou aglomerante;

Conclusão: O resíduo foi utilizado como agregado devido os resultados de capacidade pozolânica e composição granulométrica do mesmo demonstrarem melhor aceitação como agregado do que aglomerante.

7.3 Objetivo específico 3:

- Definição da composição adequada das peças de concreto para pavimentação confeccionadas com o resíduo.

Conclusão: Definiu-se 6% o teor de substituição da areia natural pelo resíduo na produção das peças de concreto para pavimentação, devido a um corpo de prova ter ficado acima do requerido pela norma (35 MPa), e por priorizar maiores porcentagens de substituição, aumentando assim as quantidades destinadas do resíduo.

7.4 Objetivo específico 4:

- Verificar a viabilidade técnica do uso do resíduo incorporado na matriz cimentícia;

Conclusão: A resistência à compressão das peças de concreto para pavimentação com 6% de substituição obteve valores abaixo dos requeridos pela norma (NBR 9781: 2013, Anexo A); por outro lado tiveram resultados compatíveis com os requeridos pela norma quando se trata de absorção a água e verificação dimensional das peças. Referente a contaminação, a peça de concreto foi classificada como classe IIA - não perigoso e não inerte.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar os ensaios mecânicos, físicos e químicos após 1 ano da confecção das peças de concreto com o resíduo para verificar se não houve perda da qualidade.

Realizar a confecção de peças de concreto com cimento resistente a sulfato, com traços de referência diferentes, com a introdução de aditivo plastificante, e por fim confeccionar as peças em larga escala, evitando problemas com a introdução/revolvimento dos materiais nas máquinas industriais.

Investigar as contaminações presentes nos materiais convencionais, principalmente no cimento, em função do traço de referência da pesquisa.

9. REFERÊNCIAS

ACHON, C.L.; BARROSO, M.M.; CORDEIRO, J.S. Leito de drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 13, n. 1, p. 54-62, 2008.

ALEXANDRE T. L.; BUENO, M. I. M. S. Classification of some species, genera and families of plants by x-ray spectrometry. X-ray spectrometry, v. 35, n.4, p. 257- 260, 2006.

ANDOLFATO, R. P. Controle Tecnológico Básico do Concreto. Apostila. Universidade Estadual Paulista –UNESP, Ilha Solteira, SP,2002.

ANDRADE, C. F.; SILVA, C. M.; OLIVEIRA, F. C. Gestão ambiental de saneamento: uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de ETA e seus impactos na qualidade das águas. In: V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Anais... Belo Horizonte: IBEAS, p. 1-11, 2014.

ANDREOLI, C.V. (2001) Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Projeto PROSAB 2. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 282 p

ANDREOLI C.V.; SPERLING M.V.; FERNANDES F. Sludge treatment and disposal Biological wastewater treatment series 6, IWA Publishing, London (2007).

AREIAS, I. O. R., VIEIRA, C. M. F., COLORADO, H. A., DELAQUA, G. C. G., MONTEIRO, S. N., & AZEVEDO, A. R. G. (2020). Could city sewage sludge be directly used into clay bricks for building construction? A comprehensive case study from Brazil. Journal of Building Engineering, 31, 101374

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Manual de Pavimento Intertravado. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Abrelpe). Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil- 2021. São Paulo: Abrelpe; 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781 -Peças de concreto para pavimentação – Especificação e método de ensaio, Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2. ed. Rio de Janeiro. 2015.

_____. NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3. ed. Rio de Janeiro. 2018.

_____. NBR 5752 – Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, 3. ed. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação. 3. ed. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 10.004 -Resíduos Sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 10.005 -Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 10.006 - Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 2004.

_____. NBR 10.007 -Amostragem de resíduos sólidos, 2. ed. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 12653 – Materiais pozolânicos – Requisitos 3. ed. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 15894-3 – Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NM 45 -Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 2. ed. 2006.

_____. NM 46 – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira de 75 micrometros, por lavagem. 2001.

_____. NM 52 -Agregados miúdos – Determinação de massa específica e massa específica aparente, 2. ed. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NM 53 -Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, 2. ed. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NM 248 -Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003

BARTH, E.F.;PERCIN,P. Stabilization and Solidification of hazardous wastes – Pollution technology review.V. Park Ridge, Noyes Data,1990.

BENLALLA, A., ELMOUSSAOUTI, M., DAHHOU, M., ASSAFI, M.: Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. Appl. Clay Sci. 118, 171–177 (2015)

BHARATHIRAJA, B., YOGENDRAN, D., RANJITH KUMAR, R., CHAKRAVARTHY, M., and PALANI, S. 2014. Biofuels from sewage sludge-A review. Int. J. Chem. Tech. Res. 6:4417–4427.

BIDONE F. R. A., POVINELLI J. Conceitos básicos de resíduos sólidos. EESC USP. São Carlos. ed. 1, 1999. p. 120.

BIOCICLO; CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DAS BACIAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. Estudo de viabilidade para instalação e operação de centrais de lodos nas Bacias PCJ. Americana/SP. 2011.

BOBER, T.W.; DAGON, J.; and FOWLER H.E. Treatment of photographic processing wastes. Handbook of Industrial Waste Treatment, v.1, L. K. Wang e M. H. S. Wang (eds.), Marcel Dekker, Inc., New York, 1992.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm. Acesso em: 20 fev. 2022.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 20 fev. 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, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm#. Acesso em: 20 fev. 2022.

CAETANO, A.J. Reaproveitamento do resíduo Terra da Shredder através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland para aplicação na construção civil. 2016. 102f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

CASTRO, A.L. de; PANDOLFELLI V.C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. IN: Cerâmica, n.55, p.18-32, 2009.

CHANDLER, A.J. et al. Studies in Environmental Science. Volume 67. Municipal Solid Waste Incinerator Residues. 974p. 1997.

CHANG, Z., LONG, G., ZHOU, J. L., & MA, C. (2020). Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104606.

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

CIMENTO NACIONAL. FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS – FISPQ. Cimento Nacional. 2018. Disponível em: <https://www.cimentonacional.com.br/produto/max-performance-cp-v-ari>, Acesso em: 20/02/2022

CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. (Coordenador). *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: ABES, 1999. cap. 1, p. 1-19.

COSTA, C.J.A. Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado com Cloreto de Polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas. 2011. 140 f. Dissertação Mestrado (Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CUSIDÓ, J. A., & CREMADES, L. V. (2012). Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies. *Waste management*, 32(6), 1202-1208.

DA SILVA, S.M.C.P; FERNANDES, F; SOCCOL, V.T; MORITA, D.M. in: ANDREOLI C.V.; SPERLING M.V.; FERNANDES F. *Sludge treatment and disposal Biological wastewater treatment series 6*, IWA Publishing, London, 2007. p. 31-47.

DEMIRBAS, A., TAYLAN, O., and KAYA, D. 2016. Biogas production from municipal sewage sludge (MSS). *Energy Sour. Part A* 34:3027–3033.

DURSUN, D., AYOL, A., and DENTEL, S. K. 2004. Physical characteristics of a waste activated sludge: conditioning responses and correlations with a synthetic surrogate. *Water Sci. Technol.* 50:129–136

ESMERAY, E., & ATIS, M. (2019). Utilization of sewage sludge, oven slag and fly ash in clay brick production. *Construction and Building Materials*, 194, 110- 121.

FARIAS, M. S. S.; LIMA, V. L. A.; NETO, J. D.; LEITE, E. P. F.; LIRA, V. M.; FRANCO, E. S. (2007) Avaliação dos níveis de boro e chumbo na água do rio Cabelo – João Pessoa-PB. *Revista Engenharia Ambiental*, v.4, n.1, p. 024-031, jan/jun.

FENG, Y., ZHANG, Y., QUAN, X., & CHEN, S. (2014). Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron. *Water research*, 52, 242-250.

FERNANDES, I. Blocos e Pavos – Produção e Controle de Qualidade. 7 ed. Ribeirão Preto, Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2016. 200p.

FERNANDEZ, L.P., MIKOWSKI, P.C.B., MACIOSKI, G., NAGALLI, A., FREIRE, F.B., 2018. Study of water treatment sludge incorporation into interlocking concrete pavers. *Revista Matéria* 23. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0490>.

FONTANA, A. O. Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantadores e reuso de água de lavagem dos filtros – Estudo de caso ETA Cardoso. Dissertação Mestrado, UFSCar, São Carlos, São Paulo, 2004.

GARCÍA-DELGADO, M.; RODRÍGUEZ-CRUZ, M. S.; LORENZO, L. F.; ARIENZO, M.; SÁNCHEZ-MARTÍN, M.J. Seasonal and time variability of heavy metal content and of its chemical forms in sewage sludges from different wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, v.382, n.1, p.82-92, 2007.

GIORDANO, Gandhi et al. Tratamento e controle de efluentes industriais. *Revista ABES*, v. 4, n. 76, p. 1-84, 2004.

GOMES, R.K., EDNA, P., SANTOS, D.B.G.D., MAURICIO, C., 2017. Potential uses of waste sludge in concrete production. *Manag. Environ. Qual. Int. J.* 28 (6), 821–838.

GONÇALVES, R. F., LUDUVICE, M., LIMA, M. R. P., RAMALDES, D. D. C., FERREIRA, A. C., TELES, C. R., & ANDREOLI, C. V. (2001). Desidratação de lodo de esgotos. Em: *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*, p. 57-86.

HALLACK, A. (2001). Pavimento Intertravado: Uma solução Universal. *Revista Prisma*. São Paulo, v, 1, dezembro 2001. p.25-27.

HELENE, P.; TUTIKIAN, F.B. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In ISAIA, C.G. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. IBRACON. 2011.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C.; PAULON, V.; 2005. Co disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. *Cerâmica* 51, 85aal.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDREÓLI, C.V. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental. *Quim. Nova*, v. 29, n. 1, p. 79-84, 2006.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. Rio de Janeiro, 2010.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011.

JACOBI, P. R. Desafios e Reflexões sobre resíduos sólidos nas cidades brasileiras. In: SANTOS, M.C. L., DIAS, S. L.F.G.(Org.) *Resíduos sólidos urbanos e os impactos socioambientais*. São Paulo: IEE-USP, 2012. p. 31 a 34.

MARTÍNEZ-GARCÍA, C., ELICHE-QUESADA, D., PÉREZ-VILLAREJO, L., IGLESIAS-GODINO, F. J., & CORPAS-IGLESIAS, F. A. (2012). Sludge valorization

from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. *Journal of environmental management*, 95, S343-S348.

M. KACPRZAK, E. NECZAJA, K. FIJAŁKOWSKIA, A. GROBELAKA, A. GROSSERA, M. WORWAGA, A. RORATA, H. BRATTEBOB, Å. ALMÂSC, B.R. SINGHC. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development *Environ. Res.*, 156 (2017), pp. 39-46.

NEVILLE, A.M. *Propriedades do Concreto*. Tradução: Salvador E. Giamusso. São Paulo: Pini, 1982.

KADIR, A. A., AMIRULAMRAN, SALIM, N. A., HASSAN, M., & HASHAR, N. N. H. (2019). Sewage Sludge Incorporating into Fired Clay Brick: indoor air quality testing. *International Journal of Innovative Technology And Exploring Engineering*, 8(12), 1113-1118.

KAPPEL, A.; OTTOSEN, L. M.; KIRKELUND, G.M. Colour, compressive strength and workability of mortars with an iron rich sewage sludge ash. *Construction and Building Materials*, v. 157, p. 1199–1205, 2017

KNAPTON, J. Romans and their roads: the original small element pavement technologists. In: *INTERNATIONAL CONCRETE BLOCK PAVING CONFERENCE*, 5., jun. 1996, Tel-Aviv, Israel. *Proceedings...* Tel-Aviv, Israel, 1996. p. 17-52.

LEAL, Cleber E. F. Peças para pavimento intertravado de concreto: estudo de viabilidade técnica na incorporação de agregado reciclado. 2018. 153 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2018.

LIEW, A. G., IDRIS, A., SAMAD, A. A., WONG, C. H., JAFFAR, M. S., & BAKI, A. M. (2004). Reusability of sewage sludge in clay bricks. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 6(1), 41-47.

LUDUVICE, M. Sludge stabilisation. In: ANDREOLI C.V.; SPERLING M.V.; FERNANDES F. *Sludge treatment and disposal Biological wastewater treatment series 6*, IWA Publishing, London, 2007. p. 48-52.

MAZIVIERO, G.T. Avaliação do potencial citotóxico, genotóxico e mutagênico de lodo de esgoto por meio dos sistemas – teste *allium cepa* e *tradescantia pallida*. 2011. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas). UNESP/Rio Claro/SP/2011.

MELCHERT, M.B.M. Solidificação e estabilização de resíduos de catalisadores contendo níquel e alumínio em cimento Portland. 2012. Tese Doutorado (Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MIKI, Marcelo Kenji. Hidrólise do lodo em digestores anaeróbios mesofílicos: otimização global na recuperação de recursos. 29º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, 2018.

MOLINA, T. (2010) Caracterização e tratamento de água de lavagem de filtros de ETA com o uso de polímeros sintéticos e amido de batata. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 2, n. 3, p. 28-44

MONTERO, M. A., JORDÁN, M. M., HERNÁNDEZ-CRESPO, M. S., & SANFELIU, T. (2009). The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science*, 46(4), 404-408.

MULLER, R. M. Avaliação de Transmissão de Esforços em Pavimentos Intertravados de Blocos de Concreto. 2005. 234f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

NUVOLARI, A. et al. Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2011. 565p.

OLIVEIRA, D.M. Aplicação da técnica de solidificação e estabilização para resíduos oleosos da indústria petrolífera, utilizando solo argiloso e bentonita, 2003. Dissertação Mestrado (Engenharia Ambiental) -Programa de Pós-Graduação de engenharia ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2003.

PABLOS, J. M. et. al. Estudo para utilização de resíduos sólidos industriais, gerados pelos descartes de areia de fundição aglomeradas com argila e pelas escórias de

alto forno, na composição dos concretos. seminário sobre resíduos sólidos na construção civil, v. 2.

PAGNUSSAT, D.T. Utilização de escória granulada de fundição (EGF) em blocos de concreto para pavimentação. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 145 p. 2004.

PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F., PICLKER, A. D. C., LEAL, E. R. M., & MILHOMEM, C. D. C. (2010). Produção e tratamento de lodo de esgoto—uma revisão.

POLICE, A., GIORDANO, C., LAERA, G., SATURNO, D., and MININNI, G. 2007. Physical characteristics of the sludge in a complete retention membrane bioreactor. *Water Res.* 41:1832–1840

REALI, M. A. P. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In: REALI, M. A. P. (Coordenador). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 240 p. 1999.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. Imobilização da fase sólida de lodos de estação de tratamento de água (ETAs). In: ANDREOLI, C.V. (Coordenador). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 282 p. 2001.

SÃO CARLOS. Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos do município de São Carlos-SP. São Carlos, 2019.

SCALIZE, P. S. (2003) Disposição de resíduos gerados em estações de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto. São Carlos- SP. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos-SP.

SGORLON, J. G. (2014). Utilização de resíduos da indústria galvanotécnica no desenvolvimento e fabricação de blocos de concreto para pavimentação

intertravada. Maringá – PR. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá. Maringá-PR.

SMOL, M., KULCZYCKA, J., HENCLIK, A., GORAZDA, K., & WZOREK, Z. (2015). The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 95, 45-54.

SOUZA, M. M. D., ANJOS, M. A. S. D., ARAÚJO, A. L. C., SOARES, A. V. D. O., & SOUZA, P. C. A. D. (2020). Uso do lodo de esgoto na produção de agregados leves: uma revisão sistemática de literatura. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 25.

VAN DER HOEVEN. Van der Hoeven – Estufas agrícolas e agrícolas. Disponível em <<https://vdh.com.br/>>. Acesso em: 09 de fevereiro de 2022.

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.). Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 444 p.

VON SPERLING, M., GONÇALVES, R.F. Sludge characteristics and production. In: ANDREOLI C.V.; SPERLING M.V.; FERNANDES F. Sludge treatment and disposal biological wastewater treatment series 6, IWA Publishing, London, 2007. p. 4-16.

VON SPERLING, M., ANDREOLI, C. V. Introduction to sludge management. In: ANDREOLI C.V.; SPERLING M.V.; FERNANDES F. Sludge treatment and disposal biological wastewater treatment series 6, IWA Publishing, London, 2007. p. 1-3.

SCHALCH, V.; CASTRO, M.A.S.; CORDOBA, R.E. Tratamento e disposição final ambientalmente adequada de resíduos sólidos urbanos (apostila). São Carlos: EESC-USP, 51 p. 2013.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos 2020. Disponível em: <http://www.snis.gov.br>. Acesso em 20/01/2022.

TAFAREL, N.F., MACIOSKI, G., CARVALHO, K.Qd., NAGALLI, A., FREITAS, D.C.D., PASSIG, F.H., 2016. Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. *Matéria (Rio de Janeiro)* 21, 974reto

WILES, C.C. Solidification/Stabilization Technology. In: Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. Chapter 8. McGraw-Hill, 1989.

ZHANG, Q., HU, J., LEE, D. J., CHANG, Y., & LEE, Y. J. (2017). Sludge treatment: current research trends. *Bioresource technology*, 243, 1159-1172.

ZHAO, Y.Q., ZHAO, X.H, E BABATUNDE, A.O. (2009). Use of dewatered alum sludge as main substrate in treatment reed bed receiving agricultural wastewater: Long-term trial. *Bioresource Technology*, 1002(2), 644-649