



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCOS DAVID DOS SANTOS

**REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA COM META-ANÁLISE SOBRE O
LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA COM AVALIAÇÃO DO
CICLO DE VIDA EM BLOCOS CERÂMICOS**

Recife

2024

MARCOS DAVID DOS SANTOS

**REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA COM META-ANÁLISE SOBRE O
LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA COM AVALIAÇÃO DO
CICLO DE VIDA EM BLOCOS CERÂMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Recife

2024

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB

S237r

Santos, Marcos David dos.

Revisão sistemática da literatura com meta-análise sobre o lodo de estações de tratamento de água com avaliação do ciclo de vida em blocos cerâmicos / Marcos David dos Santos – 2024.

186 f.: il., figs., qds., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Revisão da literatura. 3. Meta-análise. 4. Lodo. 5. Estação de tratamento de água. 6. Avaliação do ciclo de vida. 7. Bloco cerâmico. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2024-53

MARCOS DAVID DOS SANTOS

**REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA COM META-ANÁLISE SOBRE O
LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA COM AVALIAÇÃO DO
CICLO DE VIDA EM BLOCOS CERÂMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 01/03/2024.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Holmer Savastano Junior (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo

Participação por videoconferência
Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama (Examinador Externo)
Universidade Federal do Espírito Santo

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Adolpho Guido de Araujo (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as oportunidades concedidas nesta existência.

À minha família, em especial aos meus pais, Maria Djanira dos Santos e Marcos José dos Santos, expresso minha profunda gratidão por todo incentivo e por proporcionarem o melhor em todos os aspectos da vida.

Ao professor Arnaldo Carneiro, agradeço pela dedicação ao seu trabalho, pela presteza constante, boa vontade e preocupação demonstrada para com todos os seus orientandos.

Ao professor Pedro Guzzo, expresso minha gratidão pela compreensão e apoio ao longo desta trajetória.

Estendo meus agradecimentos aos meus amigos Igor e Hérculys, companheiros de mestrado, pela parceria nas tarefas do cotidiano e pela convivência diária.

Aos colegas da UFPE, Dayvson, Filipe, Yane, Iranilza, Danilo, Eduardo e Jônathas, agradeço pelo convívio e pelas experiências compartilhadas.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco - FACEPE, expresso minha gratidão pela concessão de recursos de auxílio à pesquisa e pela bolsa concedida.

Agradeço também a Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA por me proporcionar a oportunidade de participar deste projeto de grande importância tanto para a indústria quanto para a sociedade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica, meu sincero agradecimento.

Por fim, estendo meus agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Agradeço por cada apoio, conselho e colaboração que tornaram possível a realização desta conquista.

RESUMO

A gestão dos resíduos provenientes das estações de tratamento de água (ETAs) e os impactos resultantes de sua disposição inadequada representam desafios contemporâneos que requerem alternativas para o reaproveitamento e descarte adequado desses materiais. O lodo de ETA, conhecido também como LETA, quando descartado em leitos de rios próximos às estações ou em corpos d'água, pode acarretar em impactos ambientais significativos. Assim, torna-se essencial investigar alternativas para reintegrar esse resíduo na cadeia produtiva, aumentando seu valor agregado. Dada a grande quantidade de material gerado diariamente pelas ETAs, a indústria da construção civil emerge como um destino promissor para a utilização desses resíduos como matéria-prima na produção de novos materiais. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo apresentar uma revisão sistemática da literatura, com uma meta-análise sobre o uso e aplicação do lodo de ETA, além de realizar uma avaliação do ciclo de vida em blocos cerâmicos. A pesquisa foi conduzida por meio de buscas no banco de dados da Scopus, seguidas de uma análise qualitativa e quantitativa dos documentos utilizando o software VOSviewer, seguida de uma análise sistemática para síntese das informações obtidas. Adicionalmente, foi realizada uma avaliação do ciclo de vida simplificada para os blocos cerâmicos, juntamente com uma análise estatística dos dados utilizando os softwares Jamovi 2.3.21 e Statistica 10. Os resultados revelaram que as principais soluções para reutilização do LETA na construção civil incluem sua incorporação em compósitos, agregados, produtos cerâmicos, geopolímeros e na geotecnia. No que diz respeito aos blocos cerâmicos, a análise da ACV demonstrou que o aumento do teor de lodo de ETA na mistura resulta em maior emissão de CO₂ e demanda de energia primária, independentemente do método de secagem utilizado. Contudo, a escolha de métodos de secagem eficientes e misturas com menor teor de lodo mostraram-se medidas eficazes para reduzir o impacto ambiental. Destaca-se que a secagem mecânica por filtro prensa apresentou-se como mais sustentável que a centrífuga, com menores emissões de CO₂ e demanda de energia. O bloco cerâmico com 10% de substituição de argila por lodo mostrou-se como a proporção ideal, incorporando uma quantidade significativa de lodo sem diferenças estatisticamente significativas em relação às proporções menores. Em suma, os resultados indicam que é viável destinar o lodo de ETA de forma adequada

para evitar impactos ambientais adversos, ao mesmo tempo em que se promove a confecção de novos produtos para o mercado construtivo, visando um crescimento econômico e sustentável.

Palavras-chave: revisão da literatura; meta-análise; lodo; estação de tratamento de água; avaliação do ciclo de vida; bloco cerâmico.

ABSTRACT

The management of waste from water treatment plants (WTPs) and the resulting impacts of their improper disposal represent contemporary challenges that require alternatives for reuse and proper disposal of these materials. WTP sludge, also known as WTPS, when disposed of in riverbeds near the plants or in water bodies, can lead to significant environmental impacts. Thus, it is essential to investigate alternatives to reintegrate this waste into the production chain, increasing its added value. Given the large amount of material generated daily by WTPs, the construction industry emerges as a promising destination for the use of these wastes as raw materials in the production of new materials. In this context, this study aims to present a systematic literature review, with a meta-analysis on the use and application of WTP sludge, as well as to perform a life cycle assessment on ceramic blocks. The research was conducted through searches in the Scopus database, followed by a qualitative and quantitative analysis of the documents using VOSviewer software, followed by a systematic analysis for synthesis of the obtained information. Additionally, a simplified life cycle assessment was carried out for ceramic blocks, along with a statistical analysis of the data using Jamovi 2.3.21 and Statistica 10 software. The results revealed that the main solutions for the reuse of WTPS in construction include its incorporation into composites, aggregates, ceramic products, geopolymers, and geotechnics. Regarding ceramic blocks, the LCA analysis demonstrated that increasing the WTP sludge content in the mixture results in higher CO₂ emissions and primary energy demand, regardless of the drying method used. However, the choice of efficient drying methods and mixtures with lower sludge content proved to be effective measures to reduce environmental impact. It is noteworthy that mechanical drying by filter press was found to be more sustainable than centrifugal drying, with lower CO₂ emissions and energy demand. The ceramic block with 10% clay substitution by sludge proved to be the ideal proportion, incorporating a significant amount of sludge without statistically significant differences compared to lower proportions. In summary, the results indicate that it is feasible to properly dispose of WTP sludge to avoid adverse environmental impacts, while promoting the creation of new products for the construction market, aiming for economic and sustainable growth.

Keywords: literature review; meta-analysis; sludge; water treatment station; life cycle assessment; ceramic block.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Esquema de uma ETA convencional com tratamento de lodo..	29
Figura 2 –	Fluxograma do levantamento bibliográfico sobre o uso e aplicação do LETA na construção civil.....	40
Figura 3 –	Fluxograma com os filtros utilizados na metodologia PRISMA para a revisão.....	42
Figura 4 –	Quantidade de documentos publicados por ano.....	44
Figura 5 –	Fonte da publicação por número de documentos publicados...	45
Figura 6 –	Visualização do <i>VOSviewer</i> de uma rede de acoplamento bibliográfico de periódicos.....	48
Figura 7 –	Visualização do <i>VOSviewer</i> de uma rede de acoplamento bibliográfico de periódicos (Densidade).....	49
Figura 8 –	Quantidade de documentos publicados por autor.....	50
Figura 9 –	Visualização do <i>VOSviewer</i> de uma rede de cocitação de autores.....	52
Figura 10 –	Quantidade de documentos publicados por afiliação.....	53
Figura 11 –	Quantidade de documentos publicados por país.....	55
Figura 12 –	Quantidade de documentos por tipo de publicação.....	56
Figura 13 –	Quantidade de documentos publicados por área temática.....	57
Figura 14 –	Visualização do <i>VOSviewer</i> de uma rede de coocorrência de termos.....	59
Figura 15 –	Quantidade de documentos publicados por fonte de financiamento.....	60
Figura 16 –	Imagens de MEV do agregado leve com LETA.....	72
Figura 17 –	Imagens de MEV do agregado artificial, A) estrutura da superfície interna; B) ampliação de 1000x.....	73
Figura 18 –	Agregado leve, A) seção transversal e B) ampliação de x100..	73
Figura 19 –	Imagens de MEV das amostras, A) 40% LETA e 60% de EAF com relação SS/HS de 1,50; B) 80% LETA e 20% de EAF com relação SS/HS de 1,50; C) 40% LETA e 60% de EAF com relação SS/HS de 0,67; D) mapeamento EDS da amostra com 40% LETA e 60% de EAF com relação SS/HS	

	de 0,67.....	79
Figura 20 –	Imagens de MEV do MAA e vários conteúdos de LETA, A) 0%; B) 10% e C) 20%.....	80
Figura 21 –	Imagens de MEV das amostras do CFMP às 24 horas.....	81
Figura 22 –	Imagens de MEV de argamassa, A) referência; B) 10% de LETA e C) 30% de LETA e escória de alto forno após o teste RAS.....	82
Figura 23 –	Imagens de MEV com diferentes conteúdos de LETA, A) referência; B) 10% e C) 30% aos 28 dias.....	83
Figura 24 –	Imagens de MEV do lodo de ETA calcinado, A) 105 °C, B) 200 °C, C) 400°C, D) 600 °C, E) 800 °C, F) 1000 °C, G) 1200 °C e H) 1200 °C.....	84
Figura 25 –	Imagens de MEV com ampliação de 800x de pasta, A) referência e B) com LETA calcinado a 825 °C aos 28 dias de hidratação.....	84
Figura 26 –	Imagens de MEV de LETA calcinado, A) 800 °C, B) 600 °C, C) 800 °C e D) 900 °C tratado com solução de cal.....	85
Figura 27 –	Diagrama ternário $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, indicando as composições do cimento Portland CPV, dos MCSs mais utilizados atualmente e do dos LETAs empregados como ligantes analisados nesta revisão.....	86
Figura 28 –	Imagens de MEV de argamassa com A) 5% de LETA não calcinado e B) 10% de LETA calcinado; DWTS – Lodo de ETA e ITZ- Zona de transição interfacial.....	90
Figura 29 –	Imagens de MEV da matriz de argamassa.....	91
Figura 30 –	Imagens de MEV de argamassas com A) 5% de LETA e a/c = 0,4; B) 5% de LETA e a/c = 0,5; C) 5% de LETA e a/c = 0,6; D) 5% de LETA e a/c = 0,5; E) 10% de LETA e a/c = 0,5; F) Microfissuras na pasta da argamassa com 5% de LETA e a/c = 0,6.....	92
Figura 31 –	Imagens de MEV de concretos de espuma reforçada com LETA/MP em diferentes ampliações.....	96
Figura 32 –	Análise EDS do LETA com PM.....	97

Figura 33 –	Imagens de MEV de concreto com LETA aos 28 dias, nas proporções de A) 0%; B) 10%; C) 20% e D) 30%.....	97
Figura 34 –	Imagens de MEV de concreto com LETA aos 28 dias, nas proporções de A) 0%; B) 10%; C) 20% e D) 30%.....	98
Figura 35 –	Imagens de MEV de amostras de blocos de concreto curado normalmente (N) ou por carbonatação precoce (C) com 0% e 30% de teor de LETA, A e B) 30%-C, C) 30%-N, D) 0%-C, e E) 0%-N.....	99
Figura 36 –	Efeito da substituição de areia por lodo de ETA na resistência à compressão do concreto.....	100
Figura 37 –	Imagens de MEV dos tijolos cerâmicos calcinados a 1050 °C com A) 5% de LETA e B) 40% de LETA.....	104
Figura 38 –	Imagens de MEV de tijolo incorporando 70% do lodo de ETA, 15% de vidro e 15% de resíduos de mármore.....	105
Figura 39 –	Microestrutura dos corpos cerâmicos após queima à temperatura de 1000 °C: A), B) tijolo de referência; C), D) tijolo com 40% LETA; E), F) tijolo com 40% de LETA e 40% de vidro; G), H) tijolo com 60% de LETA; I), J) tijolo com 60% de LETA e 40% de vidro.....	106
Figura 40 –	Imagens de MEV das amostras com 50% de LETA, 25% de vidro e 25% de sais de neutralização ácida após calcinação a 1100°C.....	107
Figura 41 –	Imagens de MEV da morfologia da superfície da amostra A) não revestida com OCU e B) revestida com OCU. Círculos indicam os poros apresentados na superfície dos corpos de prova.....	108
Figura 42 –	Imagens de MEV de tijolos com 100% LETA (A, B e C).....	109
Figura 43 –	Imagens de MEV (4000x) de tijolo com 100% do lodo de ETA: a) 900 °C; B) 1000 °C; C) 1100°C.....	109
Figura 44 –	Imagens de MEV em diferentes ampliações de superfícies de fratura das amostras A) 100% LETA e B) 40% LETA e 60% RTQ queimadas a 1000 °C.....	110
Figura 45 –	Imagens de MEV de geopolímeros GP1=22,3% de LETA e	

	GP2= 0% de LETA.....	115
Figura 46 –	Imagens de MEV aos 28 dias de argamassas geopoliméricas de A e B) referência e C e D) 60% de LETA.....	115
Figura 47 –	Imagens de MEV do geopolímero nas proporções LETA/cinza da casca de arroz= 50:50 curado em A) 27-30 °C e B) 60 °C...	116
Figura 48 –	Imagens de MEV de amostras do geopolímero curadas por 7 dias com diferentes conteúdos de ativador alcalino.....	117
Figura 49 –	Imagens de MEV do geopolímero na razão ativador alcalino/cinza volante de 1,2, calcinado a 85 °C por 3 dias e curado por 7 dias, para diferentes razões $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de A) 50:50, B) 70:30, C) 80:20, D) 90:10 e E) 100:0.....	118
Figura 50 –	Imagem MEV (Ampliação x500) de A) argila; B) argila e lodo de ETA e C) lodo de ETA.....	125
Figura 51 –	Imagens de MEV da mistura do solo e lodo de ETA.....	126
Figura 52 –	Imagens de MEV para as misturas MCBR com a/c de 0,65 e níveis variados de LETA, sendo A) 0%, B) 20%, C) 40% e D) 80%.....	126
Figura 53 –	Imagens de MEV: A) lodo de ETA; B) solo argiloso; C) solo argiloso e lodo de ETA.....	127
Figura 54 –	Processos elementares de extração de argila e lodo e de produção de telhas e blocos cerâmicos. A etapa de prensagem ocorre apenas para as telhas cerâmicas.....	139
Figura 55 –	Comparações múltiplas entre as misturas para emissão de CO_2 (kg) do lodo de ETA obtido por centrífuga e filtro prensa...	143
Figura 56 –	Comparações múltiplas entre as misturas para demanda de energia primária (MJ) do lodo de ETA obtido por centrífuga e filtro prensa.....	145
Figura 57 –	Emissão de CO_2 (kg) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e LETA por centrífuga.....	150
Figura 58 –	Demanda de energia primária (MJ) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e LETA por centrífuga.....	150
Figura 59 –	Emissão de CO_2 (kg) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e lodo de ETA por filtro prensa.....	154

Figura 60 –	Demanda de energia primária (MJ) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e lodo de ETA por filtro prensa.....	155
Figura 61 –	Emissão de CO ₂ (kg) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e lodo de ETA por centrífuga e filtro prensa...	156
Figura 62 –	Demanda de energia primária (MJ) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e lodo de ETA por centrífuga e filtro prensa.....	157

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Características dos métodos de desidratação mecânica.....	37
Quadro 2 –	Resumo dos documentos selecionados para revisão.....	64
Quadro 3 –	Principais fases dos materiais formados com lodo de ETAs em sua constituição.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Características gerais do lodo dos decantadores e da água de lavagem dos filtros das principais ETAs da RMR.....	31
Tabela 2 –	Composição química em óxidos de várias amostras de LETA.....	130
Tabela 3 –	Resumo dos dados do consumo de energia, relativos ao ano de 2020.....	141
Tabela 4 –	Resumo do estudo de energia.....	141
Tabela 5 –	Dados de energia primária e emissão de CO ₂ de um bloco cerâmico de argila <i>in natura</i>	141
Tabela 6 –	Produção de LETA <i>in natura</i> por centrífuga.....	147
Tabela 7 –	Dados de energia primária e emissão de CO ₂ para um bloco cerâmico de lodo <i>in natura</i> por centrífuga.....	148
Tabela 8 –	Emissão de CO ₂ (kg) e demanda de energia primária (MJ) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm das misturas (argila e LETA por centrífuga).....	149
Tabela 9 –	Produção de LETA <i>in natura</i> por filtro prensa.....	152
Tabela 10 –	Dados de energia primária e emissão de CO ₂ para um bloco cerâmico de lodo <i>in natura</i> por filtro prensa.....	152
Tabela 11 –	Emissão de CO ₂ (kg) e demanda de energia primária (MJ) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm das misturas (argila e LETA por filtro prensa).....	153
Tabela 12 –	Emissão de CO ₂ por unidade de tijolo, por metro quadrado e para uma construção simples.....	160
Tabela 13 –	Demanda de energia primária por unidade de tijolo, por metro quadrado e para uma construção simples.....	161

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCE	American Society of Civil Engineers
AWWA	American Water Works Association
ANOVA	Análise de variância
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ACV	Avaliação do ciclo de vida
ADAC	Avaliação do Desempenho Ambiental da Construção
VED15	Bloco para alvenaria sem função estrutural com resistência característica à compressão de 1,5 MPa
CFMP	Cimento de fosfato de magnésio e potássio
CPC	Cimento Portland comum
CCOP	Cinza combustível de óleo de palma
CMC	Cinza de madeira de carvalho
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
ESF	Escória de alto forno
EDS	Espectroscopia de raios-X por energia dispersiva
ETA	Estação de tratamento de água
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
HS	Hidróxido de sódio
CBR	Índice de Suporte Califórnia
LETA	Lodo de estação de tratamento de água
MMF	Materiais de mudança de fase
MAA	Material ativado por álcalis
MCS	Material cimentício suplementar

MCBR	Material controlado de baixa resistência
MJ	Megajoule
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MEC	Ministério da Educação
MME	Ministério de Minas e Energia
NSFC	National Natural Science Foundation of China
NBR	Norma brasileira
NM	Norma Mercosul
OCU	Óleo de cozinha usado
PM	Palmitato de metila
PF	Perda ao fogo
kg	Quilograma
kW	Quilowatt
RAA	Reação álcali-sílica
RMR	Região Metropolitana do Recife
RCD	Resíduos de construção e demolição
RTQ	Resíduos de tijolos queimados
AS	Sílica ativa
SS	Silicato de sódio
Sidac	Sistema de informação do desempenho ambiental da construção
SPIPA	Strategic Partnerships for the Implementation of the Paris Agreement
TA0L100	Tijolo cerâmico produzido com 0% de argila e 100% de lodo
TA10L90	Tijolo cerâmico produzido com 10% de argila e 90% de lodo
TA100L0	Tijolo cerâmico produzido com 100% de argila e 0% de lodo
TA15L85	Tijolo cerâmico produzido com 15% de argila e 85% de lodo
TA20L80	Tijolo cerâmico produzido com 20% de argila e 80% de lodo
TA25L75	Tijolo cerâmico produzido com 25% de argila e 75% de lodo
TA30L70	Tijolo cerâmico produzido com 30% de argila e 70% de lodo
TA35L65	Tijolo cerâmico produzido com 35% de argila e 65% de lodo
TA40L60	Tijolo cerâmico produzido com 40% de argila e 60% de lodo

TA45L55	Tijolo cerâmico produzido com 45% de argila e 55% de lodo
TA05L95	Tijolo cerâmico produzido com 5% de argila e 95% de lodo
TA50L50	Tijolo cerâmico produzido com 50% de argila e 50% de lodo
TA55L45	Tijolo cerâmico produzido com 55% de argila e 45% de lodo
TA60L40	Tijolo cerâmico produzido com 60% de argila e 40% de lodo
TA65L35	Tijolo cerâmico produzido com 65% de argila e 35% de lodo
TA70L30	Tijolo cerâmico produzido com 70% de argila e 30% de lodo
TA75L25	Tijolo cerâmico produzido com 75% de argila e 25% de lodo
TA80L20	Tijolo cerâmico produzido com 80% de argila e 20% de lodo
TA85L15	Tijolo cerâmico produzido com 85% de argila e 15% de lodo
TA90L10	Tijolo cerâmico produzido com 90% de argila e 10% de lodo
TA95L05	Tijolo cerâmico produzido com 95% de argila e 5% de lodo
t	Tonelada
ZTI	Zona de transição interfacial

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂	Dióxido de carbono
Al(OH)₃	Hidróxido de alumínio
NaOH	Hidróxido de sódio
Al₂O₃	Óxido de alumínio
CaO	Óxido de cálcio
Fe₂O₃	Óxido de ferro
P₂O₅	Óxido de fósforo
MgO	Óxido de magnésio
K₂O	Óxido de potássio
SiO₂	Óxido de silício
Na₂O	Óxido de sódio
TiO₂	Óxido de titânio
Na₂SiO₃	Silicato de sódio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
1.1	JUSTIFICATIVA.....	24
1.2	OBJETIVO.....	25
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
2	LODO DE ETA.....	27
2.1	RESÍDUOS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	27
2.1.1	Tratamento da água e geração do lodo de ETA.....	27
2.1.2	Características gerais do lodo de ETA.....	29
2.1.3	Disposição final do lodo de ETA.....	32
2.2	MÉTODOS DE DESIDRATAÇÃO MECÂNICA.....	33
2.2.1	Prensa desaguadora.....	33
2.2.2	Centrífuga.....	34
2.2.3	Filtro prensa.....	35
2.2.4	Filtro rotativo a vácuo.....	36
2.2.5	Principais características dos métodos de desidratação mecânica.....	37
2.3	LODO DE ETA E SUAS PECULIARIDADES.....	38
3	REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE APLICAÇÕES DO LODO DE ETA PARA A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	40
3.1	PESQUISA NA BASE DE DADOS.....	41
3.2	DADOS GERAIS OBTIDOS NA BASE DE DADOS SCOPUS.....	43
3.2.1	Documentos por ano.....	44
3.2.2	Documentos por fonte de publicação.....	45
3.2.3	Documentos por autor.....	50
3.2.4	Documentos por afiliação.....	53
3.2.5	Documentos por país ou território.....	54
3.2.6	Documentos por tipo de publicação.....	56
3.2.7	Documentos por área temática.....	57
3.2.8	Documentos por fonte de financiamento.....	60
3.2.9	Conclusão acerca dos dados gerais obtidos na base de dados da Scopus.....	61

3.3	LISTA DOS DOCUMENTOS SELECIONADOS.....	62
4	ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	67
4.1	DADOS GERAIS OBTIDOS NA BASE DE DADOS SCOPUS.....	67
4.1.1	Agregados.....	69
4.1.2	Ligantes.....	74
4.1.3	Argamassas.....	87
4.1.4	Concretos.....	92
4.1.5	Cerâmicas.....	101
4.1.6	Geopolímeros.....	110
4.1.7	Geotecnia.....	118
4.2	IMPORTÂNCIA DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E MINERALÓGICAS DO LODO DE ETA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	128
4.3	CONCLUSÃO ACERCA DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA.....	133
5	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	135
5.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO LODO DE ETA PELO SIDAC.....	137
5.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA AOS DADOS DO LODO DE ETA RESULTANTES DA CENTRÍFUGA E FILTRO PRENSA.....	142
5.3	LODO DE ETA OBTIDO POR CENTRÍFUGA.....	146
5.4	LODO DE ETA OBTIDO POR FILTRO PRENSA.....	151
5.5	CORRELAÇÕES DO LODO DE ETA OBTIDO POR CENTRÍFUGA E FILTRO PRENSA.....	156
5.6	ANÁLISE COMPARATIVA.....	158
6	CONCLUSÃO.....	162
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	166
	REFERÊNCIAS.....	168
	APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	181
	APÊNDICE B – TESTES ESTATÍSTICOS.....	182

1 INTRODUÇÃO

Diariamente, uma quantidade significativa de lodo de ETAs são gerados em todo o mundo, representando um dos maiores desafios globais em gestão de resíduos (Ahmad *et al.*, 2016; Gomes *et al.*, 2019). No Brasil, um estudo sobre saneamento básico revelou um aumento de 14,4% no volume distribuído per capita de água tratada em todas as regiões do país (IBGE, 2010). Conforme destacado neste estudo, as ETAs estão presentes em 85% dos 5.570 municípios brasileiros, totalizando aproximadamente 7.500 unidades espalhadas em uma área de 8.516 milhões de quilômetros quadrados. Além disso, o processo de tratamento, frequentemente realizado com coagulantes à base de alumínio, ferro ou cal, é empregado em 69,2% das estações de tratamento de água no Brasil, com o objetivo de remover impurezas da água.

Tradicionalmente, esses elevados volumes de resíduos são descartados sem tratamento prévio em aterros ou descarregados em cursos d'água próximos, criando vários impactos ambientais e de gestão de resíduos (Gomes *et al.*, 2019). Além disso, é importante ressaltar o risco ecológico do descarte do lodo de águas residuais no meio ambiente, como poluição das águas superficiais e subterrâneas, poluição por poeira em áreas circunvizinhas devido à secagem da camada superficial do lodo) e acúmulo de metais pesados no solo.

A produção de materiais de construção, por exemplo, os materiais cerâmicos, são uma alternativa promissora para o aproveitamento e uso do lodo devido ao seu potencial de fornecer uma ligação mais eficaz de metais pesados em estado insolúvel (Mymrin *et al.*, 2017). Outros estudos, como por exemplo, o de Pham *et al.* (2021) utilizaram com sucesso o lodo de ETA como adição para argamassas. Alqam, Jamrah e Daghlis (2011) demonstraram que o lodo de ETA pode substituir de 10% a 50% em massa do cimento Portland na produção de ladrilhos para pavimentação de uso externo. Sales e Souza (2009) empregaram o lodo de ETA para a produção de argamassas e concretos alcançando resultados mecânicos satisfatórios para os produtos fabricados. Deviatkin (2013) avaliou o potencial energético de uma ETA para a produção de cimento e ardósia. Kyncl (2008) utilizou lodo de ETA para recuperação de alumina e para produção de cimento.

A constituição do lodo de ETA apresenta semelhanças com a argila devido a diversos fatores. Primeiramente, a presença de argilominerais e partículas menores contribui para a alta plasticidade do lodo, influenciada pela matéria orgânica e pela composição da água tratada (Teixeira *et al.*, 2004). Estudos demonstram que a quantidade de argila no lodo pode variar conforme o tratamento aplicado após a coleta, o que sugere uma similaridade estrutural com a argila (Monteiro *et al.*, 2008; Tartari *et al.*, 2011; Araújo, 2015; Ackah, 2018). Além disso, a composição química do lodo de ETA revela a presença de óxidos majoritários, como SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , semelhantes aos encontrados na argila (Ramadan, 2008; Kizinievič. *et al.*, 2013; Tantawy e Mohamed, 2017; Tuner *et al.*, 2019). A reação entre os componentes do lodo e os coagulantes utilizados durante o tratamento resulta na formação de óxidos como Al_2O_3 , comumente encontrados em cerâmicas produzidas com argila (Benlalla *et al.*, 2015; Ackah, 2018). Ademais, a temperatura influencia as propriedades do lodo de ETA, assim como ocorre na cerâmica, evidenciando outra semelhança estrutural (Monteiro *et al.*, 2008; Kizinievič. *et al.*, 2013; Tantawy e Mohamed, 2017). Logo, a semelhança química e estrutural entre o lodo de ETA e a argila é destacada como ponto de partida para diversos estudos que visam a substituição parcial das argilas pelo lodo na produção de cerâmica (Teixeira *et al.*, 2004; Ramadan, 2008; Monteiro *et al.*, 2008).

Contudo, a aplicação como material de construção requer uma análise prévia em termos de propriedades mecânicas e condições ambientais. Por exemplo, Teixeira *et al.* (2011) utilizaram porcentagens de 10% e 20% do lodo de ETA em substituição à argila para temperaturas de queima de ≥ 1000 °C. Benlalla *et al.* (2015) analisaram tijolos cerâmicos com 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% do lodo de ETA calcinados em temperaturas de 800, 900 e 1000 °C. As maiores resistências à compressão foram obtidas para os tijolos com 30% do lodo de ETA quando comparado aos tijolos tradicionais para uma temperatura de queima de 1000 °C. Kizinievic *et al.* (2013) investigaram a performance de tijolos com lodo de ETA em porcentagens de 0 a 40%, de modo que maiores resistências à compressão dos tijolos foram obtidas para os tijolos com 5% e 10% do lodo de ETA em comparação a tijolos convencionais. Hassan *et al.* (2014) produziram em laboratório tijolos de argila com 3%, 6%, 9% e 12% de LETA em laboratório e alcançaram resistências à compressão de 14, 15, 9 e 7 MPa, respectivamente. Além disso, diferentes aditivos

como pó de granito, cinza de casca de arroz e cinza do lodo de esgoto, também podem ser utilizados com maiores dosagens do lodo de ETA em tijolos.

Considerando o exposto, verifica-se uma vasta gama de usos e aplicações do lodo proveniente das ETAs, desde o uso como material cimentício suplementar, em argamassas e concretos, a usos em geopolímeros e na indústria cerâmica. Dos trabalhos citados, as porcentagens utilizadas como substituição ou adição em compostos cimentícios ou na cerâmica, varia de acordo com a composição química, mineralógica, estação do ano e geografia local.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo realizar o estado da arte sobre os usos e aplicações do lodo de ETA para a indústria da construção civil. Além disso, aplicar uma ACV em blocos cerâmicos, a fim de demonstrar os resultados dos impactos ambientais decorrentes da reutilização deste material. Com isto, espera-se contribuir para uma lacuna na literatura, dada a ausência de análises sobre os impactos ambientais específicos desses materiais alternativos, além de fornecer uma referência prática e dados tangíveis que possam auxiliar em decisões futuras na seleção e promoção de hábitos mais conscientes e sustentáveis para o setor da construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

Existe uma quantidade expressiva de artigos científicos, oriundos de dissertações e teses, que avaliam o uso do lodo de ETA, com testes realizados e comprovados. Desta forma, tem-se a necessidade de realizar uma revisão compondo o estado da arte dos usos desse material a fim de melhor delinear o conhecimento adquirido até o presente e identificar lacunas de estudo para futuros trabalhos.

A partir do resultado de diversos estudos, o uso do lodo de ETA como parte da composição da matéria-prima para a indústria da cerâmica apresenta grande potencial para absorver esse resíduo como parte da argila que será calcinada para preparação de peças como tijolos, telhas e outros utensílios pra indústria da construção civil. A utilização do lodo de ETA é uma alternativa promissora para as companhias de saneamento, oferecendo um destino adequado para o lodo, e para as indústrias do setor cerâmico, com a minimização do extrativismo da argila.

No decorrer dos anos, o lodo de ETA tem sido despejado em cursos de água próximos às estações de tratamento ou em aterros, causando problemas como assoreamento de rios ou contaminação do lençol freático com sulfato de alumínio, que é um resíduo solúvel com alta capacidade de poluição e degradação da fauna e flora.

A Região Metropolitana do Recife (RMR) é abastecida majoritariamente por seis grandes sistemas administrados pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA): Tapacurá, Botafogo, Alto do Céu, Caixa d'Água, Grajaú e Suape. A vazão total de todas essas ETAs é estimada em 7000 l/s e pode gerar durante o ano um total de 20000 t do lodo de decantação. Desta forma, é necessária a identificação de uma destinação viável para este material.

Esse cenário levou ao desenvolvimento de um projeto conjunto entre a COMPESA e a UFPE/CNPq, intitulado “Utilização do lodo de ETA como matéria prima na indústria cerâmica - O estado da arte para propor um catálogo de uso e aplicação”, vinculado ao Edital 14/2020-PBPG 2021.1. A presente dissertação se encontra inserida no contexto desse projeto e os resultados apresentados doravante nortearão as próximas etapas.

1.2 OBJETIVO

O presente estudo propõe uma revisão sistemática da literatura com meta-análise, com o propósito de investigar o uso e a aplicação do lodo de ETA como matéria-prima para a indústria da construção civil, assim como aplicar uma ACV em blocos cerâmicos.

O objetivo geral deste estudo é alcançado através dos seguintes objetivos específicos:

- Sistematizar as características físicas, químicas e mineralógicas do lodo de ETA, analisar as informações relacionadas aos produtos formados na microestrutura das misturas dos principais componentes da indústria da construção civil, compilar as quantidades utilizadas nas aplicações, além de reunir os principais dados físico-mecânicos;
- Realizar uma análise simplificada da ACV do lodo de ETA em blocos cerâmicos, com base na revisão sistemática da literatura, abordando as emissões de CO₂ e os gastos energéticos associados;

- Identificar a composição ótima de lodo de ETA na mistura do bloco cerâmico, utilizando como referência os dados obtidos na ACV.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 6 Seções, além das referências bibliográficas e apêndices.

A primeira Seção abordou uma introdução ao assunto, contextualizando a problemática do lodo de ETA, apresentando o problema de disposição final para esse resíduo que é gerado em grande escala pelas estações, as justificativas, com foco principal na sustentabilidade, para a realização desse tipo de estudo, além dos objetivos geral e específicos no trabalho e a estrutura na qual está organizada esta dissertação.

A Seção 2 está dividida em 3 partes e apresenta o referencial teórico. O primeiro item trata sobre o tratamento de água, geração do lodo de ETA, características gerais e disposição final do LETA. No segundo item, detalha-se os métodos de desidratação mecânica. No terceiro item, são apresentadas as peculiaridades do lodo de ETA.

A Seção 3 apresenta a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho, em que são descritas as variáveis e etapas investigadas.

A Seção 4 expõe os resultados obtidos ao longo do estudo e respectivas discussões, com base nos artigos selecionados na revisão sistemática da literatura.

A Seção 5 oferece uma visão geral da ACV, destacando um modelo simplificado conhecido como Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). Além disso, esta seção abrange a metodologia utilizada e os resultados alcançados na aplicação da ACV em blocos cerâmicos.

Por fim, a Seção 6 contempla as considerações finais do trabalho, decorrentes dos resultados obtidos e as sugestões para novas pesquisas sobre o assunto.

2 LODO DE ETA

2.1 RESÍDUOS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

O tratamento e a disposição do lodo proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETAs) têm passado por transformações significativas devido ao aumento das regulamentações ambientais. Anteriormente, a prática comum era o descarte desse lodo em corpos d'água, porém, devido à crescente preocupação com a preservação ambiental, essa abordagem agora é restrita. Nos Estados Unidos, desde 1972, o lodo de ETAs foi classificado como resíduo industrial sujeito a restrições legais (Richter, 2001).

Diversas alternativas surgiram para lidar com o lodo de ETAs de maneira mais sustentável, incluindo sua aplicação no solo, disposição em aterros sanitários, incineração, utilização em materiais de construção e recuperação de áreas degradadas, entre outras práticas (Araújo, 2006; Andrade, Silva e Oliveira, 2014, 2014). Para tornar viáveis essas alternativas, é essencial realizar a desidratação do lodo, reduzindo seu volume e aumentando sua densidade. Essa desidratação pode ser alcançada por meio de tecnologias como lagoas de secagem e dispositivos mecânicos, incluindo filtros prensa, prensas desidratadoras e centrífugas (Richter, 2001; Giordano, 2004).

Além disso, é fundamental determinar as características físicas e químicas do lodo de ETA para otimizar seu aproveitamento. Esses atributos podem variar dependendo das condições locais do manancial, dos métodos de tratamento empregados, da estação do ano e outros fatores. Essa análise permite um melhor entendimento do lodo e contribui para a escolha da alternativa de disposição mais adequada, considerando os aspectos ambientais e regulatórios envolvidos.

2.1.1 Tratamento da água e geração do lodo de ETA

Um sistema de tratamento de água envolve vários processos unitários que visam remover impurezas e contaminantes da água bruta, tornando-a segura e potável. O processo de tratamento de água envolve várias etapas: captação da água de fontes naturais, pré-cloração para desinfecção inicial, coagulação para aglutinação de partículas, floculação para formação de flocos maiores, sedimentação

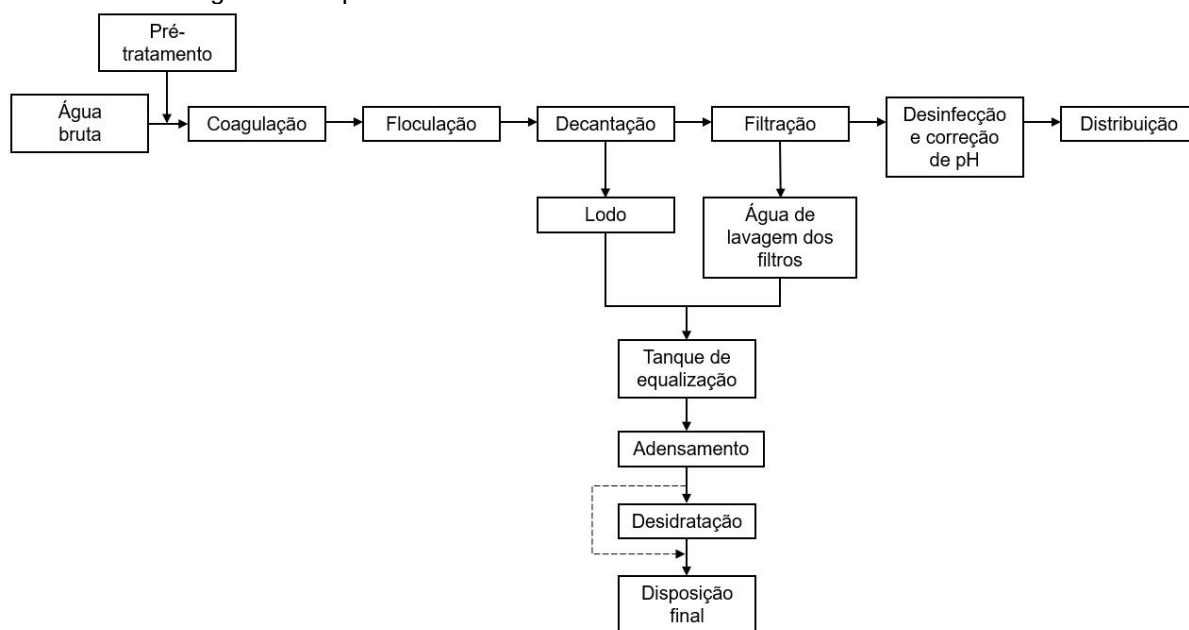
para separar sólidos, filtração para remoção de partículas e desinfecção para eliminação de microrganismos. Outras etapas opcionais incluem correção de pH, degaseificação, adição de produtos químicos e armazenamento antes da distribuição (PROSAB, 1999; 2001; Tavares, 2003; Araújo, 2006; Montalvan, 2016).

O lodo pode ser gerado em ETAs convencionais ou não convencionais, sendo resultante dos decantadores e da água de lavagem dos filtros através de processos de coagulação, floculação e decantação das partículas presentes na água bruta (PROSAB, 1999; 2001). Uma ETA convencional se apoia em tecnologias tradicionais, como por exemplo, filtração e cloração, já uma ETA não convencional busca incorporar métodos mais alternativos, como membranas avançadas, tratamentos oxidativos e processos biológicos. A flexibilidade e adaptabilidade das ETAs não convencionais as tornam ideais para enfrentar desafios, como a presença de poluentes específicos, escassez de água ou requisitos ambientais locais rigorosos, enquanto as ETAs convencionais são projetadas para atender a padrões e regulamentos estabelecidos, muitas vezes aplicáveis a uma ampla gama de condições e contextos (PROSAB, 1999; 2001; Tavares, 2003; Araújo, 2006; Montalvan, 2016).

No geral, o tratamento do lodo segue algumas etapas, dentre as quais destaca-se: a sedimentação, onde as partículas sólidas se separam da água; coleta do lodo dos tanques de sedimentação; adensamento para reduzir o teor de água no lodo; desidratação, seja ela mecânica ou não; e por fim, a disposição final do lodo, que pode envolver: aterros sanitários, aplicação agrícola, uso na construção civil, entre outros, dependendo das regulamentações ambientais e das características do lodo tratado (PROSAB, 1999; Richter, 2001; Tavares, 2003).

A Figura 1 ilustra a sequência de processos em uma ETA convencional, incluindo o tratamento do lodo.

Figura 1- Esquema de uma ETA convencional com tratamento de lodo



Fonte: Adaptado de Richter (2001); Tavares (2003)

2.1.2 Características gerais do lodo de ETA

O lodo é um material resultante da combinação da água e das partículas sólidas que estavam originalmente presentes na água de origem, acrescido dos produtos que surgem como resultado da adição de substâncias químicas durante o processo de tratamento (PROSAB, 2001). As principais fontes desse lodo são os resíduos que se depositam no fundo (ou ficam na superfície) após a decantação ou flotação, bem como a água utilizada para lavar os filtros. A remoção dos lodos dos decantadores ou filtros influencia suas características finais, especialmente a concentração de partículas (Tavares, 2003; Montalvan, 2016).

As características do lodo também podem ser afetadas por processos adicionais, como troca iônica ou separação por membranas, embora esses processos sejam raramente empregados. Os resíduos podem conter metais pela água superficial e impurezas dos produtos químicos usados no tratamento (PROSAB, 1999; Tavares, 2003; Montalvan, 2016). A caracterização dos lodos é importante para considerações ambientais e geotécnicas, incluindo pH, sólidos, metais, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), tamanho de partículas, resistência específica e outras propriedades, que são importantes para projetos de tratamento e disposição de lodos (PROSAB, 2001).

As características gerais do lodo de ETA podem ser influenciadas por alguns fatores, incluindo a origem do manancial que abastece a estação, a presença ou ausência de períodos de estiagem em virtude da época do ano, a existência ou não de materiais orgânicos suspensos e também conforme os processos de tratamento aplicados, como visto anteriormente. Como por exemplo, a Tabela 1 apresenta os valores das características físico-químicas do lodo dos decantadores e da água de lavagem dos filtros em 6 estações de tratamento de água (Alto do Céu, Botafogo, Caixa D'água, Gurjaú, Suape e Tapacurá) localizadas na RMR. Esses dados oferecem uma visão das particularidades do lodo em diferentes contextos, evidenciando como os diversos fatores mencionados podem influenciar as propriedades do lodo resultante do tratamento de água nessas estações.

As principais características físico-químicas do lodo dos decantadores encontradas por Tavares (2003) estão descritas a seguir:

Alta umidade dos lodos nas ETAs, com média em torno de 93%. A ETA Gurjaú tem lodo mais denso, com baixo teor de água, em comparação com a ETA Tapacurá, que possui maior umidade devido a um maior controle em suas descargas. A concentração de sólidos no lodo varia consideravelmente, com médias de 1,1% para ETA Tapacurá e 21,3% para ETA Gurjaú, sendo classificado como resíduo sólido com sólidos totais acima de 6.000 mg/L. A relação DQO/DBO indica baixa biodegradabilidade, com valores de 4 a 16 em todas as ETAs, evidenciando resistência à degradação biológica. O lodo contém metais como alumínio e ferro devido ao uso de sulfato de alumínio como coagulante. Já para a água de lavagem dos filtros, os índices de cloreto permanecem abaixo de 110 mg/L, mesmo em ETAs com lodos dos decantadores com valores superiores a 250 mg/L. A DBO representa cerca de 30% da DQO, variando entre 20% e 55%, com uma média de relação DQO/DBO de 3,5. Os sólidos totais oscilam entre 0,4 g/L e 1,0 g/L, com cerca de 70% de sólidos totais fixos e 30% de sólidos totais voláteis. A presença de alumínio e outros metais se deve as partículas floculantes retidas nos filtros, resultando em altas concentrações de metais, incluindo o ferro.

Tabela 1- Características gerais do lodo dos decantadores e da água de lavagem dos filtros das principais ETAs da RMR

Parâmetros	ETAs					
	Alto de Céu	Botafogo	Caixa D'Água	Gurjaú	Suape	Tapacurá
Temperatura (°C)	26-26,4	26-26,4	26,4-27	26-26,1	25-26	27-27,1
pH	5,5-5,9	6,2-6,3	5,7-5,9	5,3-6,2	5,8-6,0	6,5-6,8
Condutividade (mS/cm)	83-122	121-172	74-88	119-217	317-598	389-421
STD (mg/L)	35-72	65-125	31-41	37-135	25-140	168-177
Cor (uC)	782-19200	1400-36000	395-1417	984-107900	549-20850	583-36360
Turbidez (uT)	333-160400	627-54843	553-9118	454-29862	198-19890	2871-67478
DQO (mg/L)	149-12040	379-11627	177-7092	376-48941	271-51109	305-49128
DBO (mg/L)	37-21230	76,2-4070	98,2-2348	106-4980	87-3267	88-10200
Fósforo (mg/L)	0,5-438	4,6-2340	3,0-142	9,4-378	5,0-350	7,6-125
Sulfato (mg/L)	41-956	27,2-2790	22,3-719	21-837	47-610	56-2805
Cloreto (mg/L)	54-118	73,7-284	23,1-27	56-170	28-38	109-291
Umidade (%)	93-99	97-99,4	97-99,5	79-99,9	97-99,9	99,8-99
Sólidos totais (mg/L)	620-77167	773,3-32571	415-31932	556-201845	543-52690	934-38266
Sólidos totais fixos (mg/L)	247-61142	536,1-24367	951-23126	391-165819	440-42207	568-24084
Sólidos totais voláteis (mg/L)	373-16025	230,8-8204	382-5135	165-37905	335-10483	366-14181
Sólidos suspensos (mg/L)	252-15165	535,4-28450	736-30383	785-52186	614-19372	622-7291
Sólidos suspensos fixos (mg/L)	162-10929	338,1-21327	613-22442	593-43937	308-14656	415-4281
Sólidos suspensos voláteis (mg/L)	90-4236	197,3-7123	123-7941	192,7-8248	306-4716	207-3010
Al (mg/L)	47,4-1237	54-1706	2,4-351,1	23,4-1582	56-1127	98-2405
Ca (mg/L)	5,9-10,2	10,6-13,3	5,0	6,1-7,7	8,0-14,5	22,1-39,7
Fe (mg/L)	30,3-1398	55,6-530,8	3,2-22,2	36,7-104,1	67,1-491,7	44-247,8
Mg (mg/L)	3,1-3,6	5,2-6,1	2,3-2,9	2,6-3,6	3,4-5,5	1,9-10
Cr (mg/L)	0,5-0,8	0,3-0,6	0,4	0,3	0,4-1,1	0-0,5
Cu (mg/L)	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0	0-0,2	0
Mn (mg/L)	0,8-1,7	1,3-19,9	0,2-0,3	0,8-1,6	1,5-15,7	0,2-37,3
Ni (mg/L)	0,1-0,2	0-1,3	0,1	0-0,7	0,1-1,4	0-1,2
Pb (mg/L)	-	-	-	-	-	-
Zn (mg/L)	0,1-0,5	0,1-0,8	0,1	0-0,1	0,1-1,2	0-0,1

Fonte: Adaptado de Tavares (2003)

2.1.3 Disposição final do lodo de ETA

A disposição final do lodo de ETA é uma etapa crítica no gerenciamento de resíduos sólidos resultantes do processo de tratamento da água. A escolha da opção de disposição final do lodo depende de diversos fatores, incluindo a composição do lodo, transporte, regulamentações ambientais locais e fatores econômicos (Richter, 2001). A seguir estão algumas das alternativas para a disposição final do lodo de ETA:

- **Aterro sanitário:** Esta é uma opção em que o lodo é transportado para aterros sanitários licenciados projetados para receber resíduos sólidos. Entretanto, o uso de aterros sanitários para disposição de lodo pode ser problemático devido ao potencial de contaminação do solo e da água subterrânea, logo, medidas de contenção e de proteção ambiental são necessárias. Por conta do seu elevado custo de implantação e gastos com transporte, acaba sendo uma das últimas alternativas de escolha viáveis do ponto de vista econômico e ambiental a ser levada em consideração (Richter, 2001; Januário; Ferreira Filho, 2007; Achon e Cordeiro, 2015);
- **Solos:** Em alguns casos, a depender da concentração de metais pesados no lodo, é considerada uma alternativa viável de disposição, principalmente para corrigir o pH do solo e melhorar sua porosidade, aumentando a retenção de umidade e coesividade. No entanto, a principal limitação do lodo de sulfato de alumínio, por exemplo, é sua tendência a fixar o fósforo no solo, dificultando sua assimilação pelas plantas, o que leva a restrições na aplicação. Um dos principais desafios também incluem os custos de transporte e a relutância dos agricultores em adotar esse método (Aboy, 1999; Richter, 2001; Lenzi *et al.*, 2003; Achon e Cordeiro, 2015);
- **Incineração:** O lodo pode ser incinerado em instalações de incineração de resíduos sólidos. A incineração reduz significativamente o volume do lodo, porém, é um processo caro, podendo atingir custos de até R\$ 2.000,00/t de lodo após a desidratação (SABESP, 2002; Hendges, 2017). A incineração também pode gerar emissões de poluentes atmosféricos, o que requer tecnologias de controle de poluição adequadas;

- Construção civil: O lodo pode ser aplicado de maneira sustentável na construção civil. Ele pode ser empregado para produzir materiais de construção como blocos cerâmicos e concreto, em sub-base como reforço para as estradas e até mesmo como material de enchimento em projetos de desenvolvimento, seguindo as regulamentações ambientais. Isso contribui para reduzir o desperdício e promover práticas construtivas mais ecológicas (Richter, 2001; Teixeira *et al.*, 2002; Januário e Ferreira Filho, 2007; Andrade, Silva e Oliveira, 2014).

A escolha da melhor alternativa de disposição final do lodo de ETA deve ser baseada em uma análise abrangente das características do lodo, regulamentações locais e considerações ambientais. Muitas vezes, a combinação das várias dessas opções é usada para um gerenciamento mais eficiente e sustentável do lodo.

2.2 MÉTODOS DE DESIDRATAÇÃO MECÂNICA

De acordo com Richter (2001), no mercado brasileiro existem vários equipamentos de desidratação, que atendem à exigência de produzir uma torta (lodo semiseco) com pelo menos 20% de sólidos. As tecnologias para secagem de lodos se baseiam em dois princípios: separação por sedimentação em um campo de forças (como, gravidade e centrifugação) e filtração (quando os sólidos são grandes o suficiente para serem retidos em um meio ou superfície filtrante). Esses princípios são aplicados por equipamentos como: prensa desaguadora, centrífuga, filtro prensa e filtro rotativo a vácuo (Samudio, 1994; Richter, 2001; Giordano, 2004; Santos, 2009).

2.2.1 Prensa desaguadora

A prensa desaguadora, também conhecida como "Belt Filter" ou filtro prensa de correia, é um equipamento utilizado para desidratar sólidos suspensos em líquidos, comumente empregado em processos de tratamento de efluentes industriais e de estações de tratamento de água e esgoto. Sua principal função é separar a fase líquida da fase sólida de uma suspensão, resultando em um bolo

sólido seco e uma corrente líquida clarificada (Richter, 2001; Gonçalves, Luduvise e Von Sperling, 2007).

A prensa desaguadora opera em quatro etapas distintas. Primeiro, a suspensão contendo sólidos é introduzida na máquina por meio de uma correia transportadora, que permite a drenagem do líquido enquanto retém os sólidos. Em seguida, durante a etapa de desidratação, a pressão é aplicada à suspensão à medida que ela avança na correia, normalmente por meio de rolos, comprimindo os sólidos e forçando o líquido a ser expelido, resultando em um bolo de sólidos cada vez mais seco. Após a desidratação, o bolo de sólidos formado na correia é removido, podendo ser um processo manual ou automático, dependendo do sistema. Por fim, para manter a eficiência da prensa desaguadora, a correia precisa ser periodicamente limpa e lavada, removendo qualquer resíduo sólido remanescente (Gonçalves *et al.*, 2001; Richter, 2001).

A prensa desaguadora é eficaz na separação de líquidos de suspensões de sólidos, reduzindo consideravelmente o volume de resíduos a serem descartados. Isso torna a máquina valiosa em tratamento de efluentes, diminuindo os custos de disposição de resíduos. Além disso, sua tecnologia de correia permite operações contínuas, sendo também adequada para aplicações industriais em larga escala. Uma desvantagem em comparação com outros métodos mecanizados é que ele requer mais água devido à necessidade de lavar as telas, além de ruído excessivo e manutenção periódica (Giordano, 2004; Lisboa, 2018).

2.2.2 Centrífuga

Uma centrífuga é um dispositivo de separação que aproveita a força centrífuga para separar componentes líquidos de sólidos ou para separar diferentes líquidos com densidades diferentes. Para a desidratação de lodos esse processo é composto por duas etapas diferentes: clarificação e compactação. Na clarificação, a fase líquida é removida dos sólidos, enquanto na compactação, a água que está nos poros e entre as partículas sólidas é retirada da massa do lodo (Samudio, 1994; Gonçalves *et al.*, 2001; Gonçalves, Luduvise e Von Sperling, 2007).

No processo de secagem mecânica usando centrífuga, a suspensão de lodo é alimentada no tambor da centrífuga por meio de um tubo central. O tambor gira rapidamente, criando uma força centrífuga que separa a água do lodo, expelindo-a

através de aberturas na parede do tambor e deixando os sólidos mais densos na superfície interna. Os sólidos desidratados são empurrados para a parte de trás do tambor por um transportador, enquanto o líquido expelido é coletado separadamente. O processo pode ser controlado ajustando a velocidade de rotação da centrífuga, com velocidades mais altas resultando em lodos mais secos, mas também aumentando o desgaste do equipamento (Richter, 2001).

A secagem mecânica por centrífuga é eficaz na redução do teor de umidade do lodo, resultando em uma torta de lodo mais seca e um volume menor de resíduos a serem descartados. Essa técnica é preferida em muitas aplicações devido à sua eficiência e capacidade de processar lodos de alta concentração. Além disso, ela é frequentemente usada em estações de tratamento de águas residuais e em indústrias para reduzir o custo e o volume de disposição de resíduos líquidos. A desvantagem desse método está associada ao elevado custo de manutenção e de energia elétrica, além de profissionais especializados (Lisboa, 2018).

2.2.3 Filtro prensa

O filtro prensa é um equipamento amplamente utilizado no processo de secagem mecânica de lodos em várias aplicações industriais, incluindo o tratamento de águas residuais, resíduos industriais e lodos de ETA.

No processo de secagem mecânica usando filtro prensa aplicado a lodos, a suspensão de lodo é alimentada no equipamento por meio de uma bomba. Em seguida, a suspensão passa por placas filtrantes intercaladas com lonas filtrantes, onde as partículas sólidas são retidas e a água é forçada a passar através delas. Após a filtração, as placas filtrantes são pressionadas para extrair mais água dos sólidos, formando um bolo de sólidos mais seco. O bolo desidratado é então removido das placas, podendo ser feito de forma manual ou automática. Para manter a eficiência do filtro prensa, é necessário realizar a limpeza periódica das placas e das lonas para remover resíduos sólidos remanescentes. Esse processo reduz significativamente o teor de umidade dos lodos, tornando-os mais compactos e fáceis de manusear, o que é benéfico para a gestão de resíduos e tratamento de águas residuais (Miki, 1998; Richter, 2001).

O filtro prensa é uma solução eficaz para reduzir o teor de umidade dos lodos, tornando-os mais secos e compactos. Segundo Giordano (2004), o lodo seco

proveniente do filtro prensa, geralmente, contém a maior quantidade de sólidos entre os processos mecânicos, chegando a cerca de 50%. Isso resulta em uma redução significativa no volume de resíduos a serem descartados, o que é benéfico tanto em termos de custos quanto de gestão ambiental. O processo é empregado em várias indústrias e aplicações para otimizar a remoção de água dos lodos e melhorar a eficiência dos processos de tratamento de água.

2.2.4 Filtro rotativo a vácuo

O filtro rotativo a vácuo é um equipamento utilizado para a separação de sólidos e líquidos em uma suspensão, especialmente em processos industriais que envolvem grandes volumes de líquidos (Richter, 2001).

O filtro possui um tambor cilíndrico revestido com uma tela permeável que permite a passagem do líquido enquanto retém as partículas sólidas (Fontana, 2004). A operação inclui a alimentação da suspensão no tambor, a aplicação de vácuo para aspirar o líquido através da tela, seguida pela remoção dos sólidos desidratados por meio de uma lâmina raspadora ou rolo de prensa (Santos, 2009). O bolo de sólidos resultante é descarregado para posterior processamento ou descarte. Este equipamento é amplamente utilizado em diversas indústrias devido à sua capacidade de processar grandes volumes de suspensão e obter sólidos secos de alta qualidade (Fontana, 2004; Santos, 2009).

O filtro rotativo a vácuo é utilizado em várias indústrias, incluindo química, farmacêutica, de alimentos e bebidas, assim como em tratamento de água e efluentes. Suas principais vantagens incluem a capacidade de processar grandes volumes de suspensão, a obtenção de um sólido seco de alta qualidade e a eficiência na remoção de líquidos de sólidos. Além disso, ele é adequado para operações contínuas, tornando-o uma escolha popular em aplicações industriais. A desvantagem está associada ao alto custo energético e operacional, além disso o filtro rotativo a vácuo não é adequado para lodos leves (sulfato de alumínio) mesmo com o uso de polímeros para condicionamento, devido à obstrução rápida dos poros da tela. (Richter, 2001; Giordano, 2004; Santos 2009).

2.2.5 Principais características dos métodos de desidratação mecânica

O Quadro 1 mostra uma síntese das características referentes as tecnologias de desidratação mecânica abordadas, com destaque para aplicações, limitações e custo relativo de implantação.

Quadro 1- Características dos métodos de desidratação mecânica				
Técnica	Equipamento	Aplicações	Limitações	Custo
Prensa desaguadora		Capaz de obter um lodo relativamente seco, com 40-50% de sólidos secos. Lodo de sulfato 15 a 20%.	Sua eficiência é muito sensível às características da suspensão. As correias podem se deteriorar rapidamente na presença de material abrasivo.	Baixo
Centrífuga		Capaz de obter um lodo desidratado com 15-35% de sólidos. Lodo de sulfato 16-18%. Lodos de cal desidratam mais facilmente. Taxa de captura de sólidos entre 90-98%. Adequada para áreas com limitação de espaço.	Não tão efetiva na desidratação como a filtração. O tambor está sujeito à abrasão.	Médio
Filtro prensa		Usado para desidratar sedimentos finos. Capaz de obter torta (lodo semiseco) com 40-50% de sólidos em lodos de cal, com uma taxa de captura de até 98%.	Necessita a aplicação de cinza e cal. Elevação do pH a 11,5. Troca do meio filtrante demorada. Elevado custo operacional e de energia.	Alto
Filtro rotativo a vácuo		Mais indicado para desidratar sedimentos finos granulares, podendo obter torta de até 35-40% de sólidos e uma taxa de captura entre 88 a 95%.	É o método menos eficaz de filtração. Elevado consumo de energia.	Mais alto

Fonte: Adaptado de Richter (2001)

Conforme evidenciado no Quadro 1, os métodos de desidratação mecânica apresentam variáveis que influenciam diretamente sua eficiência, especialmente em

relação ao teor de sólidos gerado durante o processo. Essa eficiência está sujeita às características específicas do lodo em questão. Além disso, o custo de implantação surge como uma variável importante no processo de aquisição desses métodos, sendo intrinsecamente relacionado à quantidade do lodo de ETA gerado.

Dessa forma, torna-se essencial realizar um estudo de caso a caso para uma escolha mais aprimorada do equipamento de secagem a ser adotado, ao considerar as variáveis de eficiência e custo de implantação, bem como as particularidades do lodo de ETA. Esse estudo detalhado permite uma avaliação criteriosa das características do lodo, das restrições financeiras e das limitações operacionais, orientando a seleção do método de desidratação mecânica mais adequado para atender às demandas específicas de cada situação.

2.3 LODO DE ETA E SUAS PECULIARIDADES

Da análise dos itens anteriores, é perceptível que as características do lodo proveniente de ETAs são fortemente influenciadas pelo tipo de estação e pelos processos adotados, que podem ser convencionais ou não. Essas características estão intrinsecamente ligadas às propriedades físicas e químicas, as quais, por sua vez, estão relacionadas ao manancial de origem e aos métodos de desidratação mecânica. Nesse contexto, a disposição final do lodo emerge como um desafio persistente nos dias atuais.

O histórico revela que, ao longo de muito tempo, o descarte inadequado do lodo de ETA em cursos d'água e aterros provocaram impactos ambientais significativos, como o assoreamento de rios e a contaminação do lençol freático. Essa problemática decorre pela solubilidade do resíduo, tornando-o suscetível à poluição ambiental e prejudicando a fauna e flora locais (Sales *et al.*, 2010; Achon, 2015; Mymrin *et al.*, 2017; Marchiori *et al.*, 2021)

A literatura existente ressalta a importância de realizar um levantamento do estado atual da pesquisa (estado da arte) sobre o uso e aplicação do lodo de ETA. A abundância de artigos científicos, com testes comprovados, oferece uma base sólida para apontar soluções e preencher lacunas identificadas nos estudos. A revisão sistemática da literatura é, portanto, essencial para consolidar e sintetizar o conhecimento existente, identificar metodologias eficazes, resultados significativos e proporcionar uma base para pesquisas futuras e aplicações práticas.

Além disso, a análise de ciclo de vida é conduzida neste trabalho devido à carência de estudos nesse tipo de análise. Essa avaliação é importante para mensurar o impacto ambiental dos materiais alternativos que incorporam lodo de ETA, sendo uma ferramenta essencial para a tomada de decisão. (Seo e Kulay, 2006; Coltro, 2007; Horne, Grant e Verghese, 2009). A compreensão abrangente do ciclo de vida permitirá identificar áreas críticas para aprimorar a sustentabilidade, incluindo a redução do consumo de recursos, eficiência energética, minimização de resíduos e mitigação de emissões de CO₂, contribuindo para práticas mais eficientes e sustentáveis na indústria da construção (Curran, 2012).

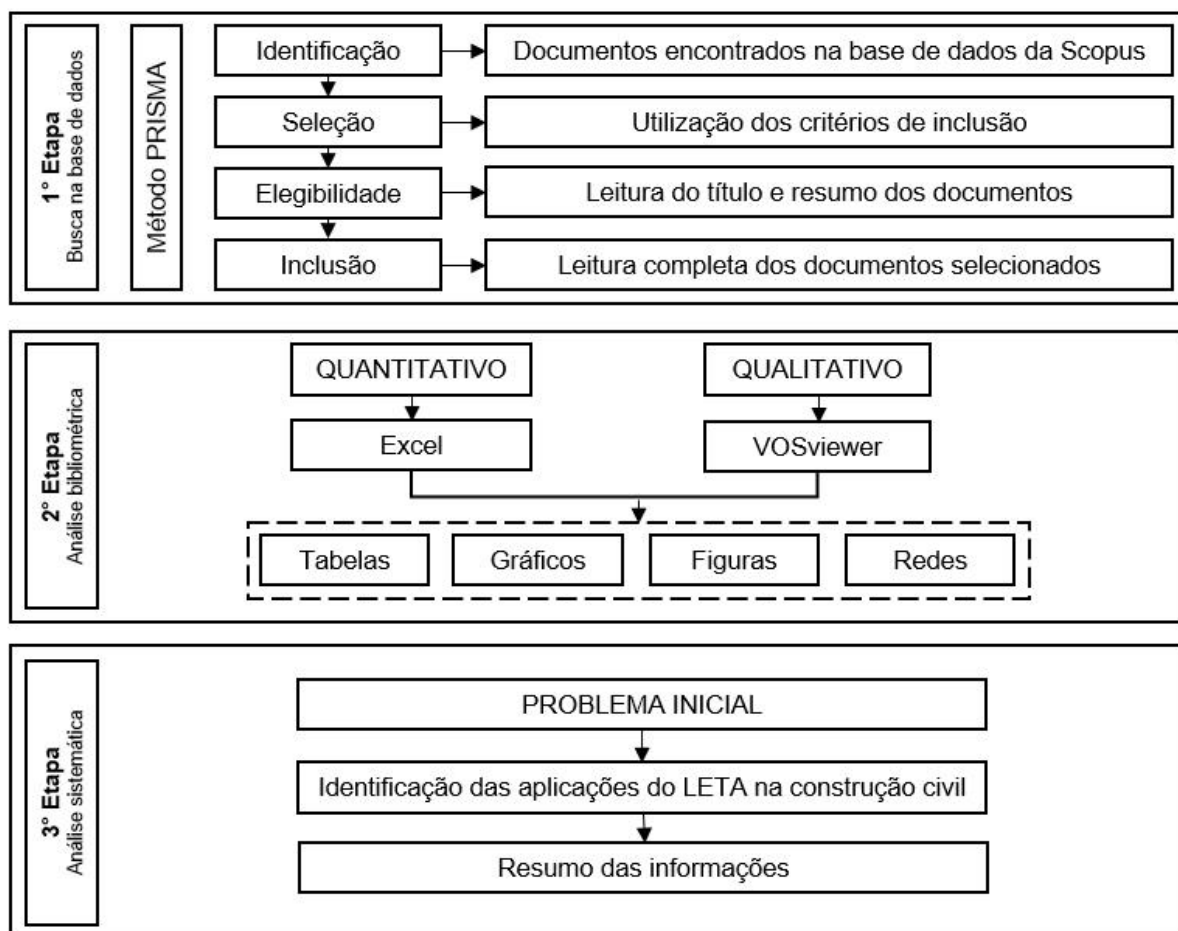
Dessa forma, a próxima Seção propõe a metodologia para a realização da revisão sistemática, visando facilitar a compreensão e interpretação dos dados obtidos ao longo da pesquisa.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE APLICAÇÕES DO LODO DE ETA PARA A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Na presente Seção, será abordada a metodologia que orientou a condução da revisão sistemática da literatura.

A pesquisa foi realizada com a utilização de um modelo híbrido composto por diversas fases sistematizadas, cujo propósito é investigar a perspectiva geral, a utilidade e os resultados alcançados (Pluye e Hong, 2014). Para atingir esse objetivo, o estudo passou por três fases, as quais delinearam a abordagem metodológica: (1) coleta de dados na base de informações, (2) avaliação bibliométrica e (3) análise sistemática, conforme Figura 2.

Figura 2- Fluxograma do levantamento bibliográfico sobre o uso e aplicação do LETA na construção civil



Fonte: Adaptado de Aguiar (2023)

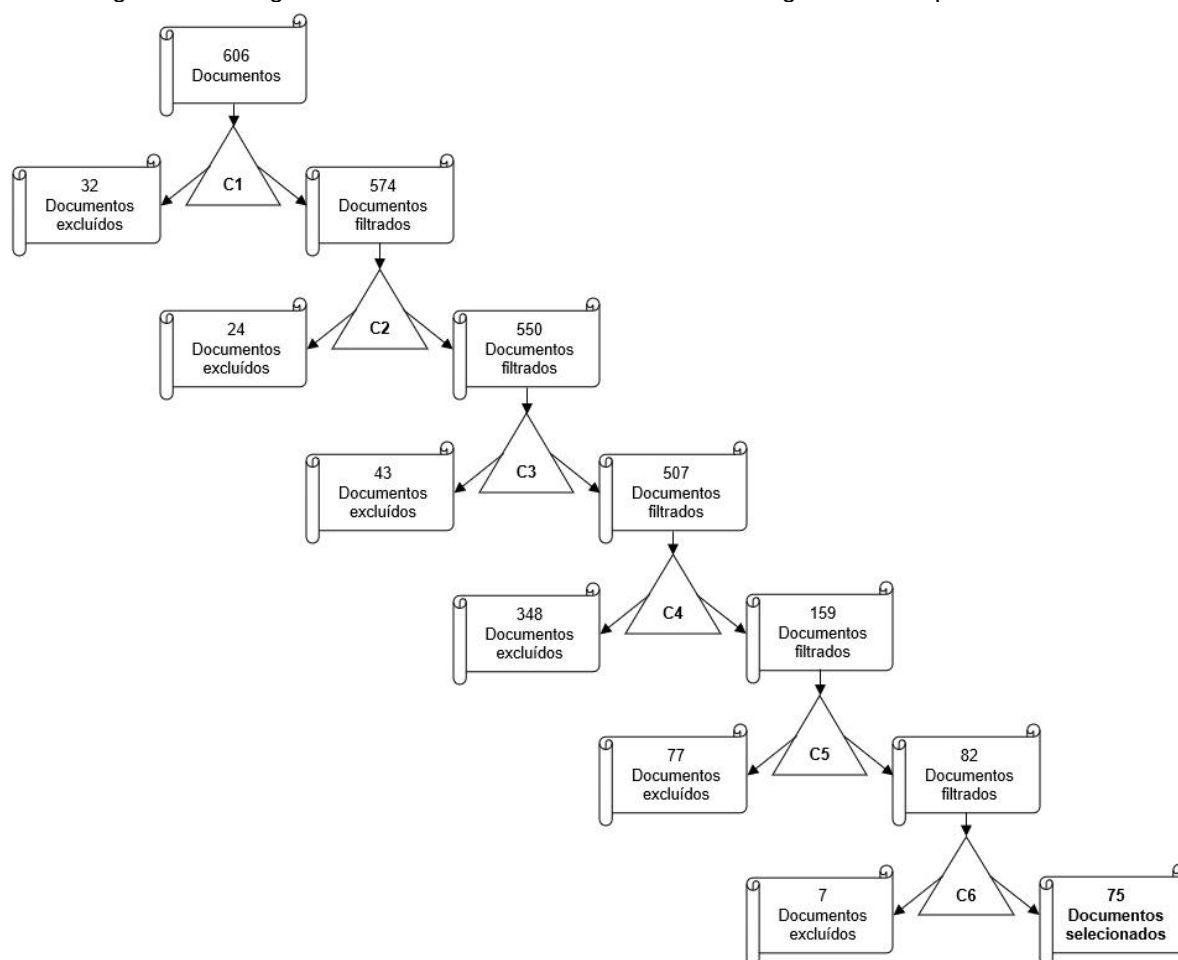
3.1 PESQUISA NA BASE DE DADOS

A pesquisa foi conduzida utilizando a base de dados Scopus, acessada por meio do portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A escolha dos artigos para a investigação seguiu a metodologia Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses (PRISMA), compreendendo quatro fases distintas: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão (Moher *et al.*, 2010). Para alcançar esse objetivo, a pesquisa, que abrangeu o período até setembro de 2023, iniciou-se na base de dados SCOPUS, realizando uma busca inicial com a palavra-chave "water treatment sludge". Utilizando os filtros Article title, Abstract e Keywords na mesma base de dados, foi possível refinar a busca e focar nos campos das palavras-chave. Essa abordagem proporcionou a ampla seleção de estudos pertinentes à revisão sistemática.

Na etapa de Identificação foram obtidos 606 documentos. Na etapa de Seleção, antes da leitura do título e resumo, foram utilizados 6 critérios. O primeiro critério foi relacionado à data de publicação, restringindo a pesquisa aos artigos publicados de 1990 a setembro de 2023, com a finalidade de reunir as publicações mais relevantes acerca do tema. O segundo foi relacionado ao tipo de documento, apenas artigos publicados em anais de congresso, periódicos e revisões. O terceiro critério diz respeito ao estágio de publicação, no qual foram incluídos somente os artigos em estágio final, isto é, aqueles que foram efetivamente publicados, excluindo os artigos que foram aceitos, mas ainda estão pendentes de revisão. O quarto critério foi relacionado ao idioma, restringindo a pesquisa apenas aos artigos publicados em língua inglesa. A etapa de Elegibilidade consistiu na leitura dos títulos e resumos dos trabalhos que foram filtrados na etapa de Seleção, foram excluídos os estudos que não eram compatíveis com materiais aplicados na indústria da construção civil. Na etapa de Inclusão, os 82 artigos restantes foram lidos na íntegra, retirando-se também alguns artigos que não se enquadravam no escopo desta pesquisa (7 documentos). Após aplicação da metodologia PRISMA nas bases de dados, foram exportados 75 artigos para posterior estudo bibliométrico.

Na Figura 3, temos os critérios empregados para avaliar os documentos da revisão sistemática.

Figura 3- Fluxograma com os filtros utilizados na metodologia PRISMA para a revisão



Fonte: O Autor (2024).

Onde:

- C1= Ano de publicação (1990-2023): 574 documentos;
- C2= Tipo de documento (Artigos publicados em anais de congresso, periódicos e revisões): 550 documentos;
- C3= Estágio de publicação (Final) e idioma (inglês): 507 documentos;
- C4= Leitura do título e resumo: 159 documentos;
- C5= Leitura do texto completo: 82 documentos;
- C6= Artigos selecionados: 75 documentos.

A metodologia PRISMA foi observada como uma ferramenta que minimiza a possibilidade de vieses na revisão sistemática da literatura. A utilização das etapas de seleção pelo número de artigos selecionados foi eficiente para a produção da revisão sistemática e análise bibliométrica, dada a redução no número de artigos analisados.

A pesquisa que se concentra em dados bibliométricos proporciona uma visão abrangente da literatura, bem como da evolução e desenvolvimento das questões abordadas (Najmi *et al.* 2017). A análise bibliométrica foi realizada para avaliar tanto a quantidade quanto a qualidade dos indicadores. Utilizou-se o Microsoft Office para analisar os documentos e, posteriormente, gerar representações gráficas das informações extraídas.

Para a análise qualitativa, recorreu-se ao software *VOSviewer* a fim de criar redes bibliométricas. Nessa ferramenta, as cores identificam os grupos formados (clusters), os círculos representam os elementos de análise e seus impactos na área de estudo são indicados pelo tamanho dos círculos, enquanto as linhas que conectam os círculos e sua espessura refletem as conexões entre os elementos e a intensidade de sua relação na análise.

Consequentemente, foram construídas redes de acoplamento bibliográfico (revelando as relações entre periódicos, a fim de compreender a estrutura social do campo de pesquisa), de cocitação (destacando os autores mais citados, para entender o impacto e a influência das pesquisas na área de estudo) e de coocorrência de termos (mostrando as palavras presentes nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos, bem como a frequência de ocorrência dessas palavras nos textos, com o objetivo de identificar as palavras mais comuns).

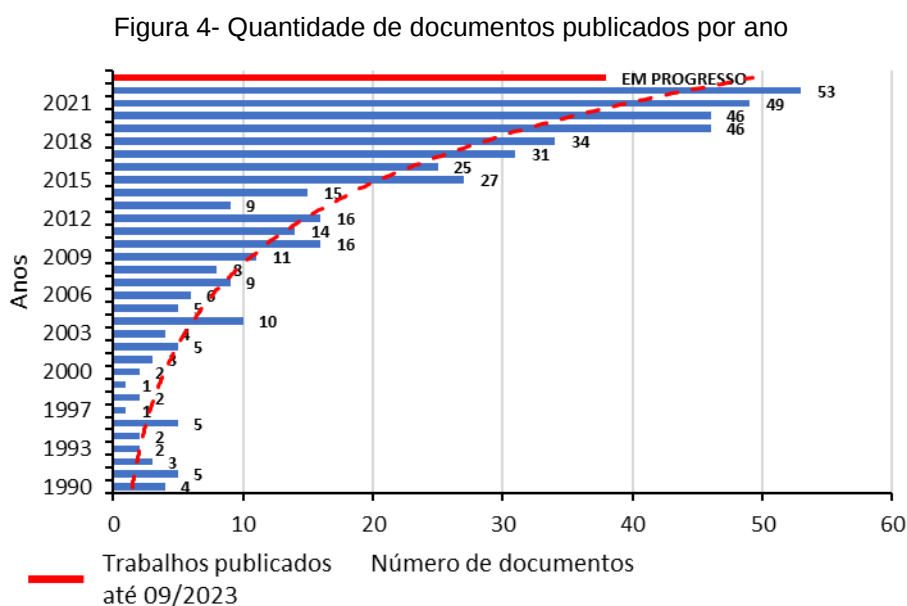
Foram também criadas tabelas com a finalidade de exibir diversas informações relacionadas ao Iodo de ETA, as aplicações mais comuns na construção civil e os principais avanços resultantes das pesquisas, servindo como orientação para estudos futuros na área.

3.2 DADOS GERAIS OBTIDOS NA BASE DE DADOS DA SCOPUS

Para os dados apresentados nesta seção, foram empregados os filtros C1, C2 e C3 da metodologia, conforme apresentados na Figura 3, a fim de investigar o uso e a aplicação do Iodo em seu contexto geral.

3.2.1 Documentos por ano

O dado “documentos por ano”, ilustrado na Figura 4, representa a quantidade de trabalhos publicados entre 1990 até setembro de 2023, totalizando 507 documentos.



Fonte: O Autor (2024).

De acordo com a Figura 4, observam-se três intervalos de concentração de trabalhos publicados, cada um caracterizado por acontecimentos e desenvolvimentos específicos:

No primeiro intervalo, abrangendo os anos de 1990 a 2003, foram publicados 39 documentos (média de 3 artigos por ano). Destaca-se que, em 1996, a American Society of Civil Engineers (ASCE), juntamente com a American Water Works Association (AWWA), lançou a publicação "Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residuals". Este trabalho propôs estratégias para o reaproveitamento do lodo de ETA, considerando sua aplicação inovadora em diversas áreas.

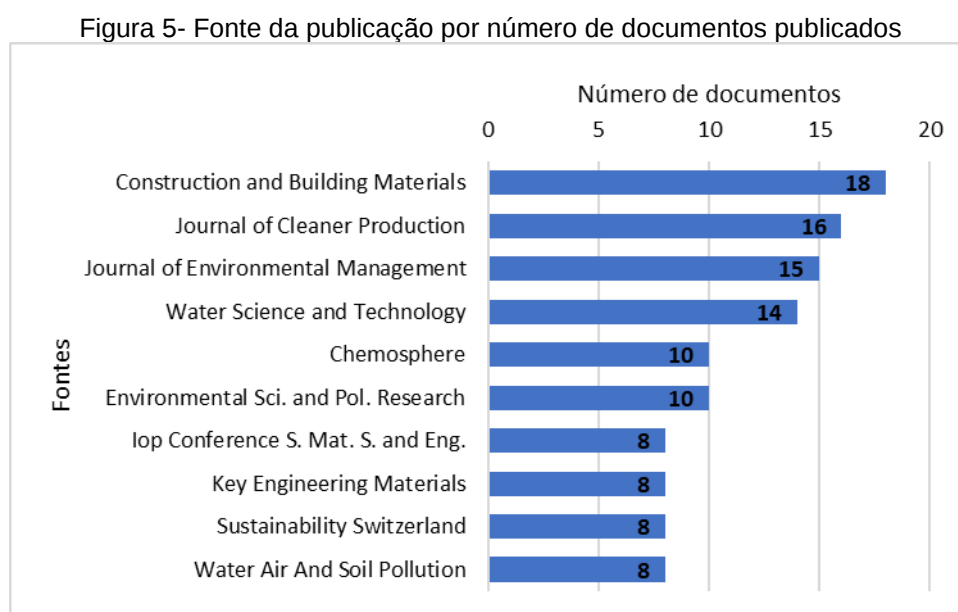
No segundo intervalo, entre 2004 e 2014, observa-se 119 documentos publicados (média de aproximadamente 11 artigos por ano). Neste período, o lodo de ETA foi categorizado como resíduo sólido pertencente à classe II A (não inerte), conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), proibindo seu lançamento em corpos d'água ou na rede pública de esgoto sanitário. A Resolução CONAMA nº 357 (17 de março

de 2005) e a Resolução CONAMA nº 430 (13 de maio de 2011) estabeleceram condições e padrões de lançamento de efluentes, enquanto a Lei nº 9.605 foi aprovada, impondo punições civil, administrativa e criminal pelo descarte inadequado de resíduos.

No terceiro intervalo, de 2015 a setembro de 2023, houve um crescimento exponencial na quantidade de publicações, totalizando 349 documentos publicados. A maioria desses trabalhos foi publicado nos últimos anos, representando cerca de 68,84% do total de documentos analisados. Esse aumento expressivo pode ser atribuído, possivelmente, à implementação de leis, regulamentos e diretrizes nacionais e internacionais desde a década de 2000, refletindo um maior interesse e preocupação com o tratamento e disposição do lodo de ETA, bem como com as questões ambientais e a sustentabilidade.

3.2.2 Documentos por fonte de publicação

O dado “documentos por fonte de publicação” representa a quantidade de documentos publicados por fonte de publicação (para as 10 fontes que mais publicaram), como ilustrado na Figura 5.



Fonte: O Autor (2024).

Os periódicos Construction and Building Materials, Journal of Cleaner Production e Journal of Environmental Management são os que apresentam o maior

número de documentos publicados, com 18, 16 e 15, respectivamente. Isso sugere que esses periódicos têm um interesse significativo sobre o lodo e podem ser considerados como importantes fontes para encontrar pesquisas na área.

Além disso, é interessante observar que há uma presença considerável de trabalhos publicados em periódicos relacionados ao meio ambiente, como *Chemosphere*, *Environmental Science and Pollution Research* e *Water Air and Soil Pollution*, com 10 trabalhos cada. Isso indica uma preocupação crescente com as questões ambientais associadas ao lodo e sugere que esses periódicos são meios importantes para o compartilhamento de pesquisas sobre o lodo.

Por outro lado, é interessante notar que também existem publicações em conferências, como *Iop Conference Series Materials Science And Engineerin* e *Key Engineering Materials*, com 8 trabalhos cada. Em suma, os dados revelam que há um interesse significativo e uma ampla disseminação de pesquisas sobre o lodo de estação de tratamento de água em uma variedade de fontes de publicação, incluindo periódicos especializados, revistas científicas ambientais e conferências acadêmicas.

Na Figura 6, cada círculo representa um periódico, sendo os círculos grandes associados a periódicos com um maior número de publicações, enquanto os círculos pequenos representam aqueles com uma quantidade reduzida de trabalhos. Geralmente, a proximidade entre dois periódicos na visualização indica uma relação mais forte entre eles com base no acoplamento bibliográfico, ou seja, periódicos próximos tendem a citar as mesmas publicações, enquanto os distantes geralmente não compartilham as mesmas fontes.

As cores dos círculos indicam grupos de periódicos que estão relativamente relacionados entre si. No total, foram identificados 6 grupos, utilizando um critério mínimo de 5 publicações, totalizando 24 periódicos analisados.

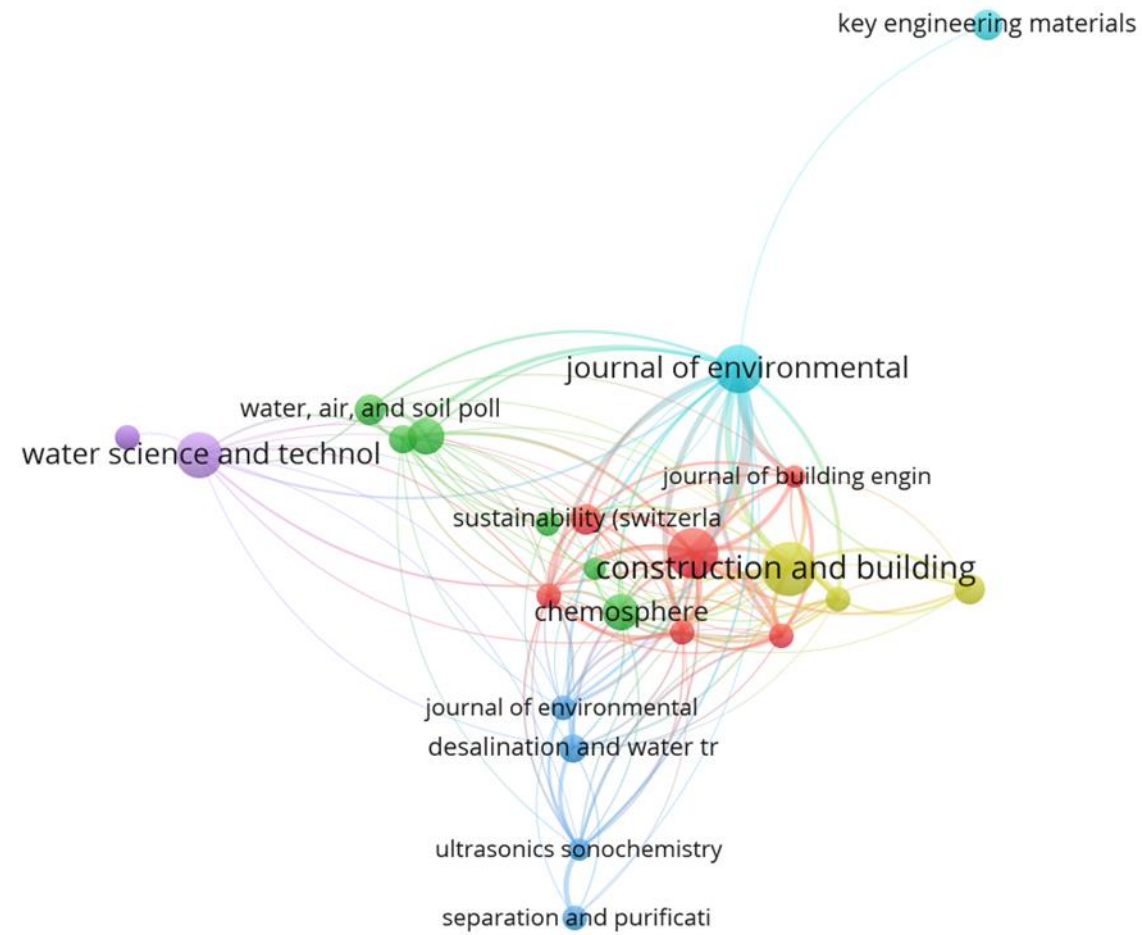
Tanto o grupo vermelho quanto o grupo verde são compostos por seis periódicos. O grupo azul escuro é formado por 4 periódicos, enquanto os grupos amarelo e lilás possuem 3 periódicos cada. Já o grupo azul claro inclui 2 periódicos.

Observa-se que a revista *Construction and Building Materials*, pertencente ao grupo amarelo, apesar de ter um maior número de documentos publicados (com 18 trabalhos), é o segundo periódico mais citado, com 867 citações. Por outro lado, a revista *Journal of Cleaner Production*, com 16 trabalhos publicados, é o periódico mais citado, com 908 citações, pertencendo ao grupo vermelho.

Outro destaque é a Journal of Hazardous Materials, que é o terceiro periódico mais citado, com 489 citações, apesar de ter apenas 5 trabalhos publicados, sendo parte do grupo verde.

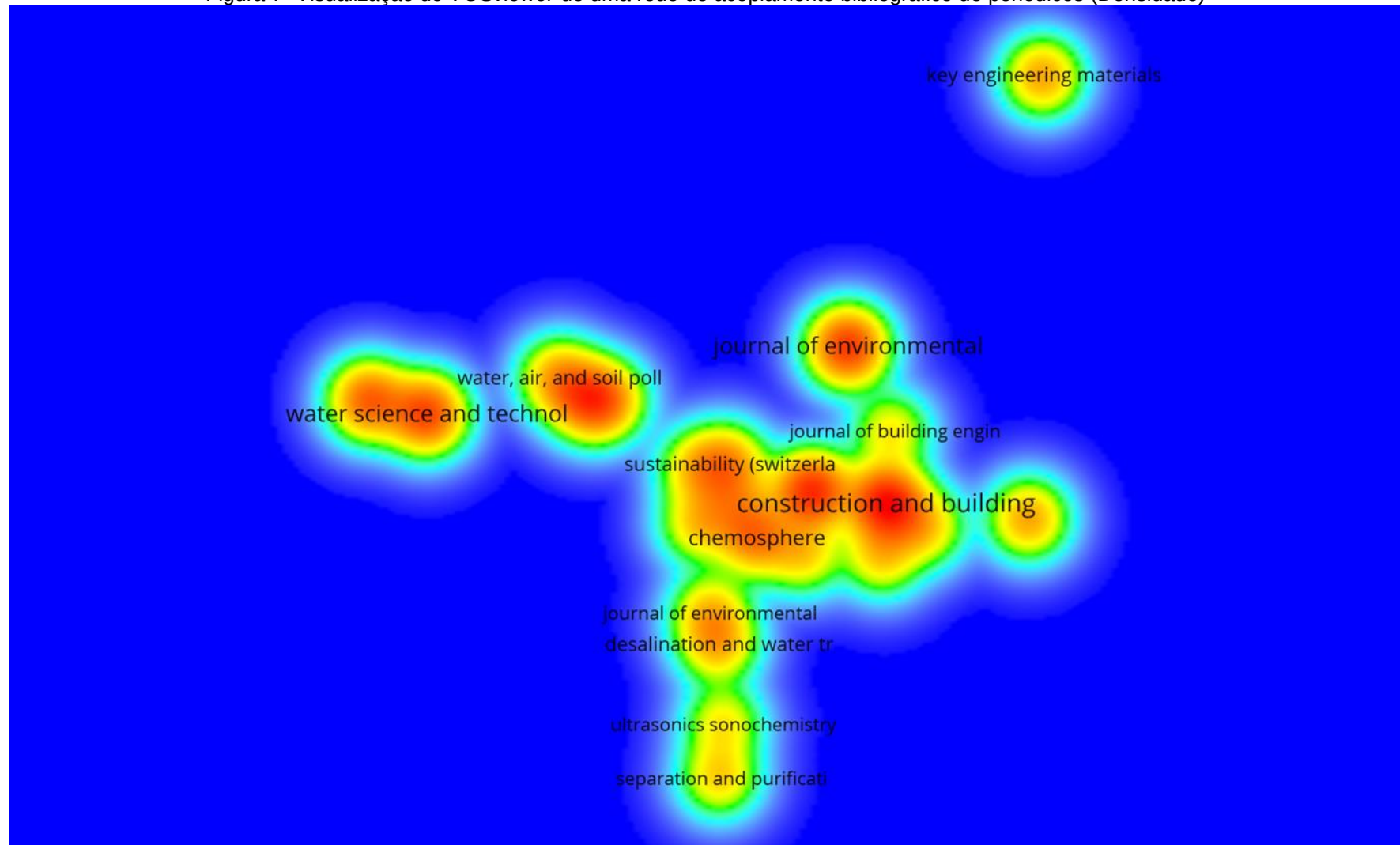
A identificação desses 6 grupos é evidenciada na visualização de densidade, conforme ilustrado na Figura 7, que ressalta a distribuição e intensidade das conexões entre os elementos da rede, identificando periódicos mais densamente conectados e áreas menos densas.

Figura 6- Visualização do VOSviewer de uma rede de acoplamento bibliográfico de periódicos



Fonte: O Autor (2024).

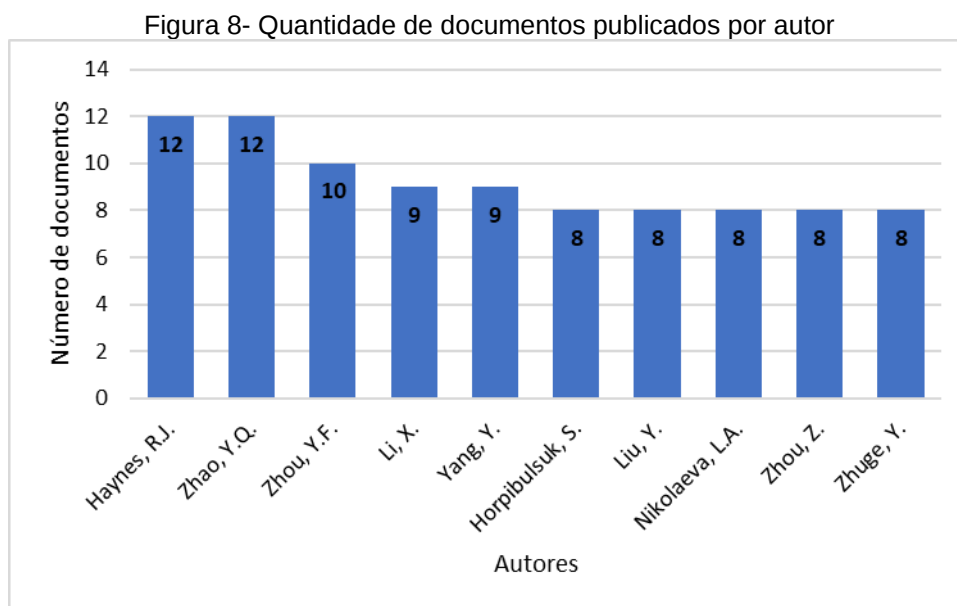
Figura 7- Visualização do VOSviewer de uma rede de acoplamento bibliográfico de periódicos (Densidade)



Fonte: O Autor (2024).

3.2.3 Documentos por autor

A Figura 8 ilustra o dado “documentos por autor”, que representa a quantidade de artigos publicados durante o intervalo de tempo desta pesquisa por autor (para os 10 autores que mais publicaram).



Fonte: O Autor (2024).

Os autores que mais se destacam em termos de quantidade de publicações são Haynes, R.J., e Zhao, Y.Q., ambos com 12 artigos cada. Essa equivalência no número de publicações sugere uma contribuição substancial e consistente desses pesquisadores ao longo do período analisado.

Na sequência, temos Zhou, Y.F., com 10 artigos, e Li, X., e Yang, Y., ambos com 9 artigos cada. Esses autores também desempenham um papel significativo na produção científica relacionada ao uso do lodo de ETA, indicando uma participação ativa e contínua no campo de estudo.

Horpibulsuk, S.; Liu, Y.; Nikolaeva, L.A.; Zhou, Z.; e Zhuge, Y. apresentam uma quantidade consistente de 8 artigos cada. Essa uniformidade na produção sugere uma contribuição estável desses autores ao longo do período analisado, podendo indicar áreas específicas de especialização ou colaborações recorrentes.

Na Figura 9, cada círculo representa um pesquisador e o tamanho de cada círculo está relacionado ao número de citações recebidas por esse autor. Na visualização, pesquisadores próximos uns dos outros tendem a ter uma relação mais

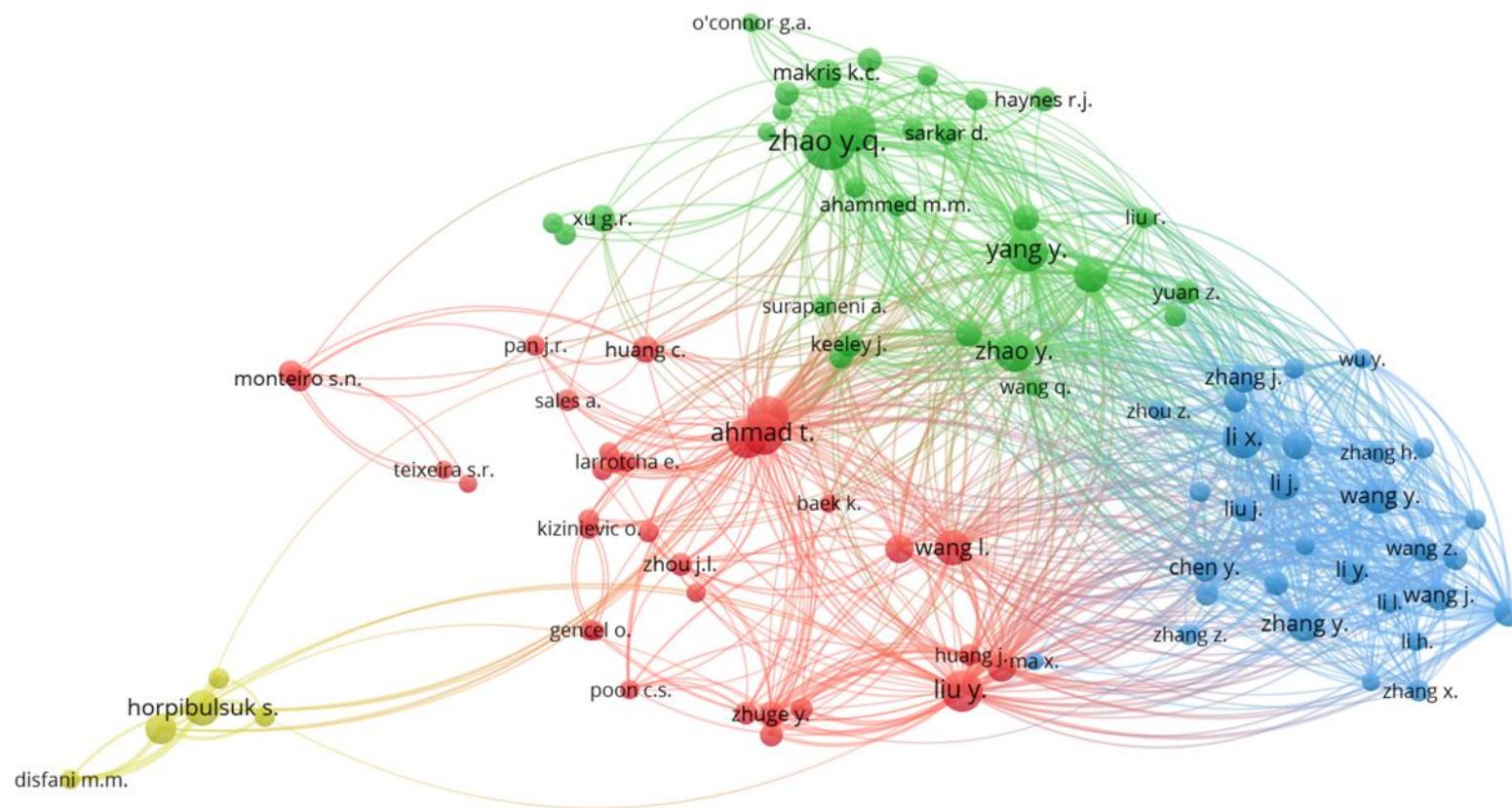
forte do que aqueles que estão distantes. Observa-se 4 grupos de autores com base no critério de pelo menos 40 citações, totalizando 97 autores.

O grupo vermelho, composto por 32 autores, inclui o quarto e quinto autores mais citados. O autor Ahmad, T., com 169 citações em 5 artigos publicados e o autor Liu, Y., com 164 citações em 8 trabalhos publicados.

Tanto o grupo verde quanto o grupo azul abrangem um total de 30 autores. O grupo amarelo, por sua vez, é formado por 5 autores.

Os destaques da rede de cocitação de autores incluem Zhao, Y.Q., com 12 documentos publicados, sendo o mais citado com 277 citações e Babatunde, A.O., que, apesar de ter apenas 4 trabalhos publicados, recebeu 199 citações. O terceiro autor mais citado, com cerca de 171 citações, é Yang, Y., que tem um total de 9 publicações. Todos esses autores pertencem ao grupo verde.

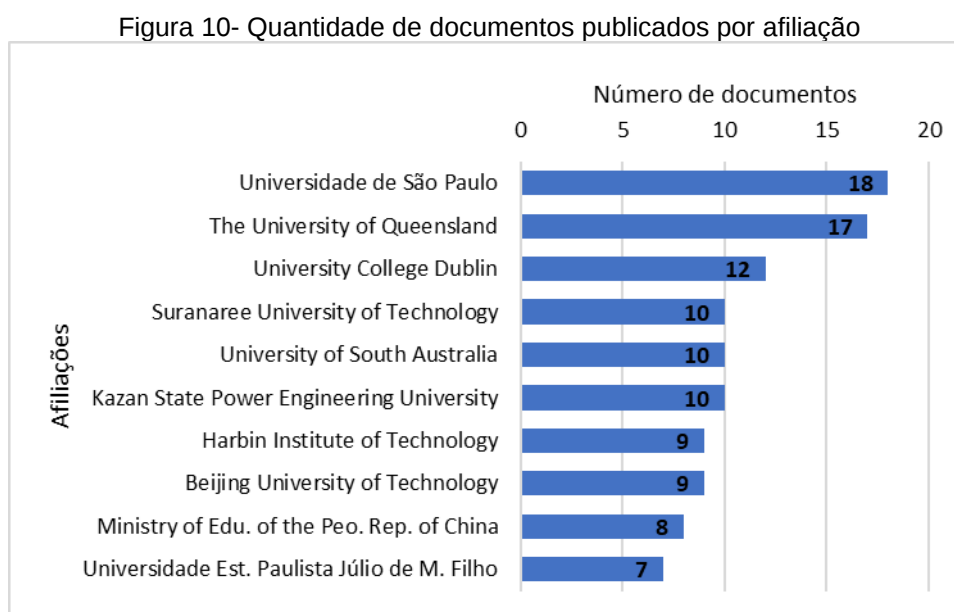
Figura 9- Visualização do VOSviewer de uma rede de cocitação de autores



Fonte: O Autor (2024).

3.2.4 Documentos por afiliação

O dado “documentos por afiliação” representa a quantidade de documentos publicados nas três últimas décadas por instituições, como ilustrado na Figura 10, para as 10 maiores instituições.



Fonte: O Autor (2024).

A instituição que se destaca com o maior número de documentos na base da Scopus é a Universidade de São Paulo, com um total de 18 artigos. A USP, como instituição brasileira, assume uma posição proeminente, contribuindo significativamente para o cenário científico nacional.

Na sequência, temos a The University of Queensland, uma instituição australiana que ocupa o segundo lugar com 17 artigos. Reconhecida pelo seu compromisso com a pesquisa e ensino intensivo, a universidade também mantém diversos centros de pesquisa colaborativos, consolidando sua presença no cenário acadêmico internacional.

Em terceiro lugar, a University College Dublin, localizada na capital da República da Irlanda, Dublin, merece destaque com sua posição como uma das principais universidades de pesquisa na Europa. Com uma localização estratégica e um perfil de pesquisa robusto, a instituição contribui para o avanço do conhecimento em diversas áreas.

3.2.5 Documentos por país ou território

O dado “documentos por país ou território” representa a quantidade de documentos publicados por país, distribuídos durante o intervalo de tempo, conforme ilustra a Figura 11.

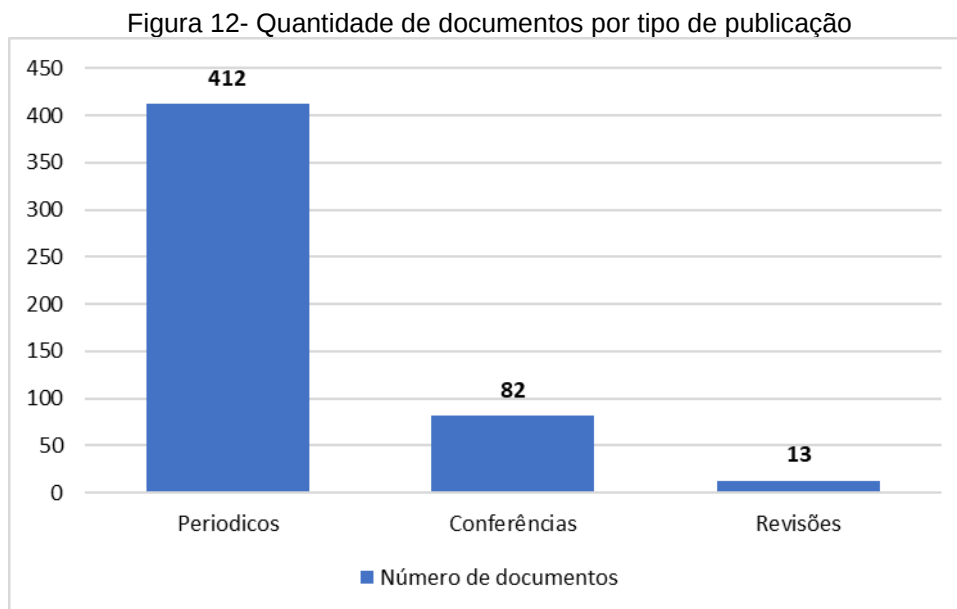
Os países como China, Austrália, Brasil, Estados Unidos e Rússia destacam-se por apresentarem um número significativo de artigos publicados, sugerindo uma indústria possivelmente mais desenvolvida no tratamento e utilização do lodo de ETA. Essa quantidade de publicações também reflete o interesse e investimento desses países em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao uso do LETA, indicando um esforço em busca de soluções ambientalmente sustentáveis para o gerenciamento de tais resíduos.

Observa-se uma variabilidade considerável nos volumes de artigos publicados em diferentes regiões, por exemplo, nos países asiáticos como China, Austrália, Tailândia e Índia registram números relativamente altos, possivelmente relacionados às crescentes preocupações com segurança alimentar, gestão de resíduos e sustentabilidade ambiental na região. Por outro lado, nações com grandes populações ou indústrias de tratamento de água significativas, como Japão e Canadá, exibem quantidades relativamente baixas de artigos publicados, sugerindo uma oportunidade para pesquisas adicionais ou uma área onde a pesquisa existente não está sendo completamente documentada.

A presença de países com apenas um artigo publicado sugere um interesse em explorar o uso do lodo de ETA, mas possivelmente enfrentando limitações de recursos ou infraestrutura para conduzir mais pesquisas. Nesses cenários, programas de capacitação e colaborações internacionais podem fortalecer a capacidade de pesquisa nessas regiões. Além disso, destaca-se a importância da colaboração entre países para avançar na pesquisa sobre o uso do lodo de ETA em diversas aplicações, permitindo que países com menos publicações se beneficiem da experiência e dos recursos de nações mais avançadas nesse campo.

3.2.6 Documentos por tipo de publicação

A Figura 12, ilustra o item “documentos por tipo de publicação”, que apresenta a quantidade de trabalhos científicos publicados por tipo de recorrência.



Fonte: O Autor (2024).

Com um total de 412 artigos publicados em periódicos, representando aproximadamente 81% do total de documentos, é perceptível que este formato de publicação é predominante na divulgação de pesquisas sobre o uso do LETA. Isso sugere que os pesquisadores tendem a optar por periódicos devido à sua credibilidade acadêmica e à possibilidade de alcançar um público mais amplo.

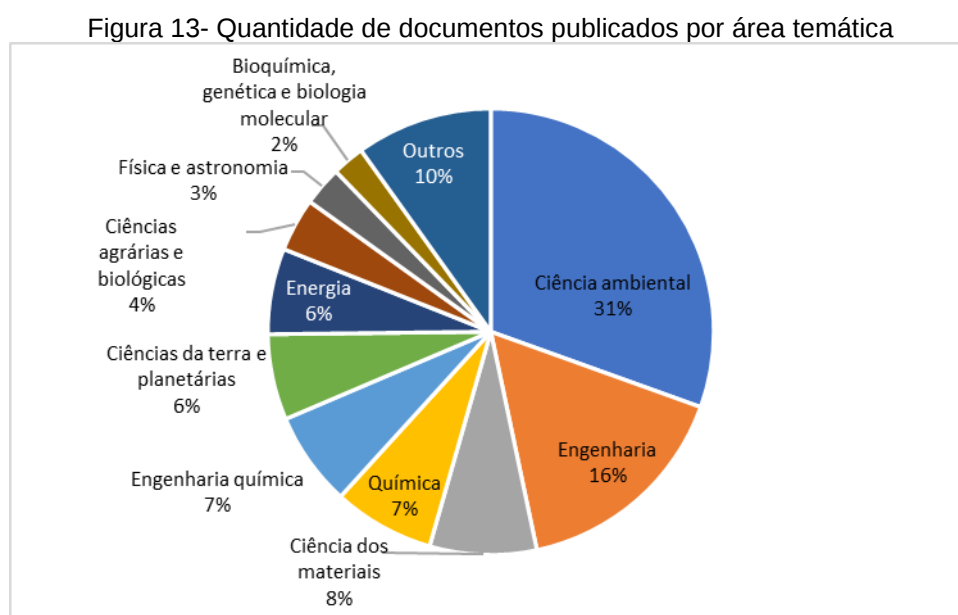
Embora a quantidade de artigos em conferências (82), cerca de 16% do total de documentos, ser consideravelmente menor em comparação com os periódicos, ainda constituem uma parte significativa do corpo de pesquisa. As conferências frequentemente fornecem uma plataforma para compartilhar resultados preliminares, ideias inovadoras e pesquisas em andamento, indicando uma atividade contínua e dinâmica na pesquisa.

Apesar de serem menos numerosas em comparação com os periódicos e conferências, as revisões (13) desempenham um papel crucial na síntese e organização do conhecimento existente sobre o assunto, oferecendo uma visão abrangente das tendências, descobertas e lacunas na literatura, além de orientar a direção de futuras pesquisas e práticas mais relevantes a serem adotadas.

A variedade de tipos de publicações ressalta a importância de uma abordagem diversificada na disseminação de resultados de pesquisa. Enquanto os periódicos são cruciais para estabelecer credibilidade e impacto acadêmico, as conferências podem facilitar a comunicação rápida de descobertas e estimular colaborações, e por fim, as revisões desempenham um papel complementar ao consolidar o conhecimento existente e identificar áreas de interesse para investigações futuras.

3.2.7 Documentos por área temática

O dado “documentos por área temática” representa a quantidade de trabalhos científicos publicados por área, conforme ilustra a Figura 13.



Fonte: O Autor (2024).

A ciência ambiental emerge como a área temática dominante nesse campo de estudo, representando 30,48% do total com 299 publicações. Esse destaque reflete o crescente interesse na compreensão e mitigação dos impactos ambientais decorrentes do uso do lodo de ETA, bem como na busca por soluções para o gerenciamento desses resíduos.

A engenharia, com 159 publicações (16,21%), abrangendo desde o desenvolvimento de tecnologias para o tratamento e aplicação do lodo de ETA até o design de sistemas e o avanço de novas técnicas para explorar seu potencial. A

química e a engenharia química, com 72 (7,34%) e 67 (6,83%) publicações, respectivamente, desempenham um papel fundamental na compreensão das propriedades químicas do lodo de ETA e na criação de processos para sua transformação em produtos úteis.

Além disso, outras áreas como ciências dos materiais, ciências da terra e planetárias, energia e ciências agrárias e biológicas também contribuem significativamente para o estudo do lodo de ETA, evidenciando a interdisciplinaridade e a amplitude das pesquisas relacionadas a este tema. Dessa forma, a colaboração entre diversas áreas, incluindo ciências ambientais, engenharia, química, biologia e outras, é essencial para enfrentar os desafios associados ao uso do lodo de ETA, conforme refletido na distribuição de publicações em diversas áreas temáticas.

A Figura 14 exibe a representação visual de uma rede de coocorrência de termos. Nesta visualização, cada círculo representa um termo e o tamanho de cada círculo reflete o número de publicações que incluem o termo correspondente em seus títulos, resumos ou palavras-chave. Termos que coocorrem com frequência tendem a estar próximos uns dos outros na visualização. Utilizando o software *VOSviewer*, os termos foram agrupados em 7 grupos, com um critério mínimo de 5 coocorrências, totalizando 417 itens.

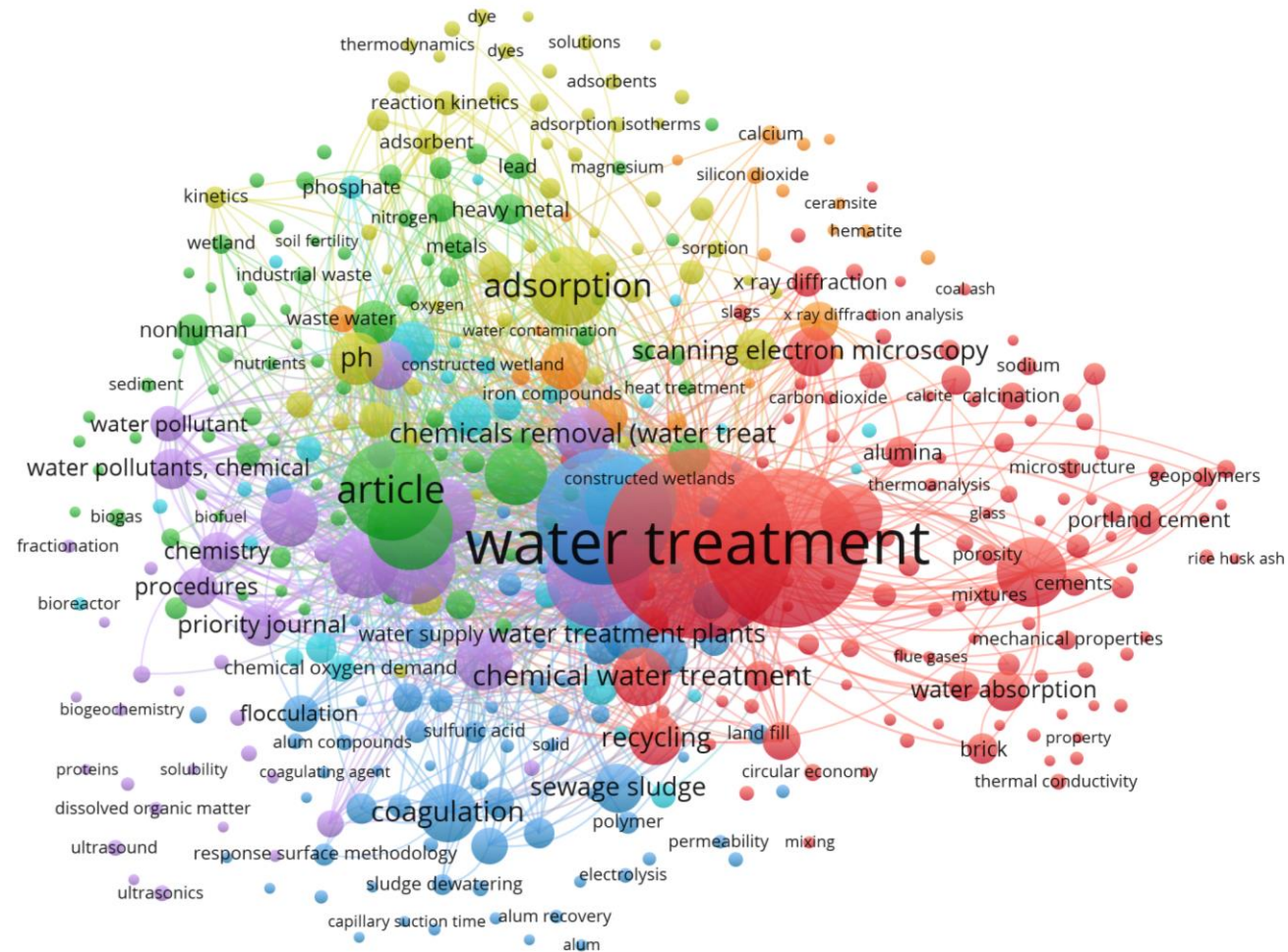
O grupo vermelho, o maior em número de itens com um total de 116, engloba os termos com as duas maiores coocorrências nos trabalhos analisados, "water treatment" (283) e "water treatment sludge" (222), refletido predominantemente nas áreas das engenharias e das ciências ambientais.

O grupo azul escuro, composto por 73 itens, inclui o terceiro termo mais frequente, "sludge" (177), que está associado às áreas de ciência dos materiais, química e engenharia química.

O grupo verde, com 80 itens, concentra termos relacionados às ciências da terra e planetárias, bem como às ciências agrárias e biológicas.

Os grupos amarelo, roxo, azul claro e laranja, compostos por 54, 40, 33 e 21 itens, respectivamente, abrangem os termos que se relacionam com as demais áreas de estudo mencionadas acima.

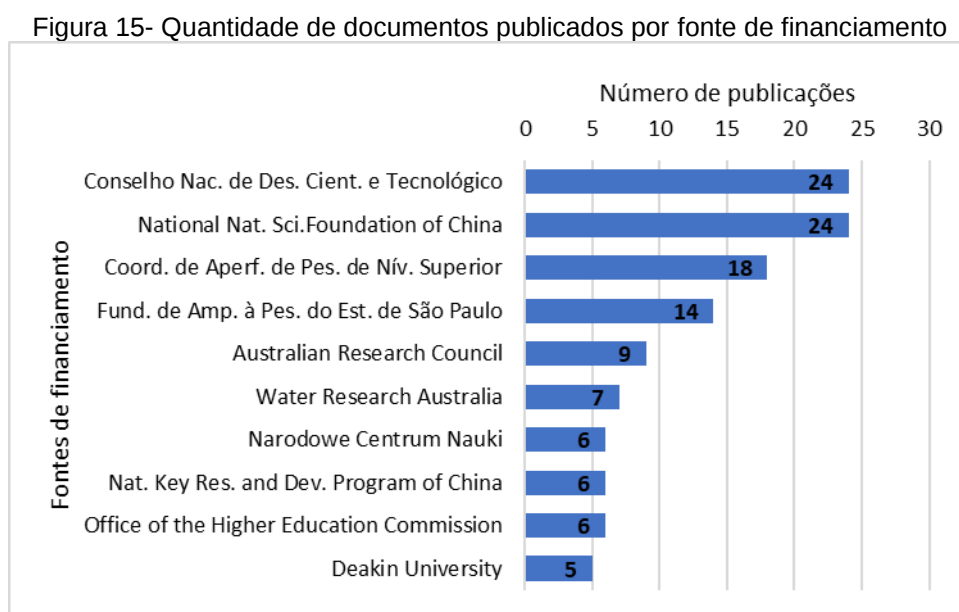
Figura 14- Visualização do VOSviewer de uma rede de coocorrência de termos



Fonte: O Autor (2024).

3.2.8 Documentos por fonte de financiamento

O item “documentos por fonte de financiamento” representa a quantidade de documentos publicados durante as 3 últimas décadas por patrocinador de financiamento, como ilustrado na Figura 15 (para os 10 maiores patrocinadores).



Fonte: O Autor (2024).

Fontes de financiamento como o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) destacam-se com um número significativo de trabalhos publicados, totalizando 24 e 18, respectivamente.

Agências como a National Natural Science Foundation of China e o Australian Research Council também demonstram sua relevância ao financiar um número considerável de trabalhos, registrando 24 e 9 publicações, respectivamente. Esses dados refletem a importância da colaboração e do financiamento internacional para a pesquisa sobre a utilização do lodo de ETA.

O envolvimento ativo das instituições acadêmicas, exemplificado pelo financiamento de 5 trabalhos pela Deakin University, ressalta a contribuição dessas instituições na condução de estudos nessa área. Além disso, o apoio específico para pesquisa em água, como o fornecido pelo Water Research Australia, evidencia um interesse particular em financiar estudos aplicados relacionados ao tratamento e uso do lodo de ETA.

Por fim, a contribuição de programas governamentais específicos, como o National Key Research and Development Program of China, indica o reconhecimento governamental da importância desse campo de estudo e a necessidade de investimentos estratégicos para o avanço nessa área.

3.2.9 Conclusão acerca dos dados gerais obtidos na base de dados da Scopus

A partir do que foi apresentado nas Seções 3.2.1 ao 3.2.8 observamos que ao examinar o tópico documentos por ano, é possível identificar a evolução das pesquisas, revelando mudanças nas práticas de tratamento de lodo e tendências na sua aplicação.

A avaliação dos documentos por ano e por fonte contribui para a identificação das fontes mais confiáveis na área.

A análise dos documentos por autor permite reconhecer autores especialistas, essenciais para avaliar a credibilidade das pesquisas.

A abordagem dos documentos por afiliação fornece informações sobre as instituições de pesquisa mais ativas, indicando possíveis centros de excelência.

A categorização por país ou território ajuda a identificar variações regionais nas práticas de tratamento de lodo, considerando fatores ambientais e regulatórios.

A diferenciação por tipo de documento é útil para compreender a diversidade de informações disponíveis.

A organização por área temática facilita a compreensão das diferentes aplicações do lodo na construção civil, enquanto a análise dos documentos por fonte de financiamento ajuda a identificar influências externas nos estudos.

Ao integrar esses elementos na revisão de literatura, podemos construir uma análise abrangente e crítica do estado atual do conhecimento, contribuindo para a identificação de lacunas, áreas de consenso, controvérsias e fornecendo uma base sólida para futuras investigações e aplicações conforme apresentado na Seção seguinte.

3.3 LISTA DOS DOCUMENTOS SELECIONADOS

O Quadro 2 fornece um resumo dos 75 documentos selecionados para a revisão, apresentando informações relevantes sobre autores, países, fontes de publicação e aplicações abordadas em cada estudo. Todos esses estudos convergem para um objetivo comum: investigar a viabilidade do uso do lodo de ETA como matéria-prima na produção de diversos materiais de construção. Essas pesquisas exploram os efeitos dessa utilização, abrangendo desde a resistência mecânica até aspectos ambientais, destacando potenciais benefícios.

Por exemplo, trabalhos como os de Lee *et al.* (2021), Mañosa *et al.* (2021) e Huang e Wang (2013) indicam que a incorporação do lodo de ETA na fabricação de agregados leves pode resultar em melhorias nas propriedades, como resistência, porosidade e densidade. He *et al.* (2023) destaca a utilização de lodo rico em manganês na produção de concreto, apontando a redução na quantidade de cimento e melhorias na porosidade e densidade, proporcionando vantagens ambientais.

Além de focar nos benefícios específicos dos materiais produzidos, esses estudos também ressaltam a importância mais ampla da reciclagem do lodo de ETA na produção de materiais de construção sustentáveis. Autores como Teoh *et al.* (2022), Starostina, Shevtsova e Starostina (2019) e Kizinievič *et al.* (2018) sublinham a relevância dessa prática para reduzir a pegada de carbono, minimizar a poluição ambiental e preservar recursos naturais. A incorporação do lodo de ETA, conforme evidenciado nas pesquisas, emerge como uma contribuição significativa para a redução da poluição e oferece benefícios ambientais substanciais.

Entretanto, alguns estudos, como Gencel *et al.* (2022) e Erdogmus *et al.* (2021), destacam a necessidade crítica de avaliar a viabilidade econômica da utilização de resíduos na fabricação de materiais de construção. Embora esses materiais possam ser mais sustentáveis, os custos associados à coleta, processamento e incorporação de resíduos também são fatores determinantes.

Outras pesquisas, como as de Katte *et al.* (2017), Gencel *et al.* (2021, 2022) e Sutcu *et al.* (2022), demonstram que agregados leves produzidos a partir do lodo de ETA atendem aos padrões e requisitos estabelecidos pelas normas, como a ASTM C330. No entanto, é importante ressaltar que a quantidade e o tipo de resíduos adicionados podem impactar as propriedades dos materiais de construção,

sugerindo a necessidade de pesquisas adicionais para uma avaliação completa dos efeitos dessas adições.

Na próxima Seção, temos as principais aplicações do lodo de ETA, em duas formas distintas, na sua forma bruta (*in natura*) e calcinada, explorando diversas formas de utilização. Diversos trabalhos analisaram a aplicação do lodo de ETA na fabricação de agregados leves, ligantes, argamassas, concretos, cerâmicas, geopolímeros e obras geotécnicas, proporcionando uma visão abrangente das possíveis utilizações do lodo de ETA para a indústria da construção civil.

Quadro 2- Resumo dos documentos selecionados para revisão

Número	Autores	País	Fonte	Aplicações
1	Erdogmus <i>et al.</i> (2023)	Turquia	Energy and Buildings	Concreto
2	He <i>et al.</i> (2023)	China	Journal of Building Engineering	Concreto
3	Nguyen <i>et al.</i> (2023)	Austrália	Transportation Engineering	Geotecnia
4	Yang <i>et al.</i> (2023)	China	Construction and Building Materials	Ligante, MCS
5	Duan <i>et al.</i> (2022)	Austrália	Journal of Cleaner Production	Ligante, MCS
6	Güner (2022)	Turquia	Journal of Material Cycles and Waste Management	Geotecnia
7	Seddik <i>et al.</i> (2022)	Egito	Construction and Building Materials	Cerâmicas
8	Al-Rawashdeh <i>et al.</i> (2022)	Jordânia	Civil Engineering Journal	Argamassa
9	Fiore <i>et al.</i> (2022)	Brasil	Cleaner Engineering and Technology	Geotecnia
10	Teoh <i>et al.</i> (2022)	Malásia	Journal of Building Engineering	Cerâmicas
11	Ho <i>et al.</i> (2022)	Vietnã	Journal of Cleaner Production	Geotecnia
12	Qin <i>et al.</i> (2022)	China	Journal of Building Engineering	Ligante, MCS
13	Duan <i>et al.</i> (2022)	Austrália	Journal of Cleaner Production	Ligante, MCS
14	Gencel <i>et al.</i> (2022)	Turquia	Archives of Civil and Mechanical Engineering	Cerâmicas
15	Sutcu <i>et al.</i> (2022)	Romênia	Archives of Civil and Mechanical Engineering	Cerâmicas
16	Harja <i>et al.</i> (2022)	Turquia	Construction and Building Materials	Cerâmicas
17	Marchiori <i>et al.</i> (2022)	Portugal	Open Civil Engineering Journal	Geotecnia
18	Batista dos Santos <i>et al.</i> (2021)	Brasil	Journal of Building Engineering	Geopolímeros
19	Erdogmus <i>et al.</i> (2021)	Turquia	Journal of Building Engineering	Cerâmicas
20	Gencel <i>et al.</i> (2021)	Turquia	Construction and Building Materials	Cerâmicas
21	Bandieira <i>et al.</i> (2021)	Brasil	Materials and Structures/Materiaux et Constructions	Cerâmicas
22	Lee <i>et al.</i> (2021)	Coreia do Sul	Journal of Cleaner Production	Agregados
23	Pham <i>et al.</i> (2021)	Vietnã	Construction and Building Materials	Argamassa
24	Li <i>et al.</i> (2021)	Austrália	Construction and Building Materials	Argamassa
25	He <i>et al.</i> (2021)	China	Journal of Cleaner Production	Ligante, MCS
26	Shamaki <i>et al.</i> (2021)	Reino Unido	Construction and Building Materials	Ligante, MCS
27	Mañosa <i>et al.</i> (2021)	Espanha	Construction and Building Materials	Agregados
28	Marchiori <i>et al.</i> (2021)	Portugal	Materials Science Forum	Geotecnia
29	Amornpunyapat; Panyakapo; Panyakapo (2021)	Tailândia	Engineering Journal	Concreto
30	Bağrıaçık; Güner (2020)	Turquia	KSCE Journal of Civil Engineering	Geotecnia

Número	Autores	País	Fonte	Aplicações
31	Krasinikova; Stepanov; Makarov (2020)	Rússia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Concreto
32	Liu <i>et al.</i> (2020)	Austrália	Journal of Cleaner Production	Concreto
33	Sverguzova; Sapronova; Fomina (2020)	Rússia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Cerâmicas
34	Duan <i>et al.</i> (2020)	Austrália	Journal of Composites Science	Ligante, MCS
35	Iqbal <i>et al.</i> (2020)	Paquistão	International Journal of GEOMATE	Geotecnia
36	Bastidas-Martínez <i>et al.</i> (2020)	Colômbia	Archives of Civil Engineering	Geotecnia
37	Iamchaturapatr; Piriyaikul (2020)	Tailândia	Key Engineering Materials	Geopolímeros
38	Starostina; Shevtsova; Starostina (2019)	Rússia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Cerâmicas
39	Godoy <i>et al.</i> (2019)	Brasil	Construction and Building Materials	Ligante, MCS
40	Ying; Awang (2019)	Malásia	International Journal of Engineering and Advanced Technology	Agregados
41	Zdeb; Tracz; Adamczyk (2019)	Polônia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Ligante, MCS
42	Nawagamuwa; Wijesooriya (2018)	Sri Lanka	International Journal of Geo-Engineering	Geotecnia
43	Kwek; Awang (2018)	Malásia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Agregados
44	de Oliveira Andrade <i>et al.</i> (2018)	Brasil	Journal of Cleaner Production	Argamassa
45	Kizinievič <i>et al.</i> (2018)	Lituânia	Journal of Material Cycles and Waste Management	Cerâmicas
46	Ho; Orbecido; Promentilla (2018)	Filipinas	MATEC Web of Conferences	Geopolímeros
47	Orbecido <i>et al.</i> (2018)	Filipinas	MATEC Web of Conferences	Geopolímeros
48	Kizinievič; Kizinievič (2017)	Lituânia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Cerâmicas
49	Suksiripattanapong <i>et al.</i> (2017)	Tailândia	Journal of Materials in Civil Engineering	Geopolímeros
50	Geraldo; Fernandes; Camarini (2017)	Brasil	Journal of Cleaner Production	Geopolímeros
51	Hwang <i>et al.</i> (2017)	Taiwan	Construction and Building Materials	Ligante, MCS
52	Mymrin <i>et al.</i> (2017)	Brasil	Journal of Cleaner Production	Cerâmicas
53	Katte <i>et al.</i> (2017)	Namíbia	International Journal of Civil Engineering and Technology	Cerâmicas
54	Ahmad; Ahmad; Alam (2016)	Arábia Saudita	Journal of Cleaner Production	Outros
55	Nimwinya <i>et al.</i> (2016)	Tailândia	Journal of Cleaner Production	Geopolímeros
56	Montalvan; Boscov (2016)	Brasil	Geotechnical Special Publication	Geotecnia
57	Aziz <i>et al.</i> (2016)	Malásia	International Journal of GEOMATE	Geotecnia
58	Horpibulsuk <i>et al.</i> (2016)	Tailândia	Journal of Materials in Civil Engineering	Geopolímeros
59	Suksiripattanapong <i>et al.</i> (2015)	Tailândia	Lowland Technology International	Geopolímeros
60	Suksiripattanapong <i>et al.</i> (2015)	Tailândia	Construction and Building Materials	Geopolímeros

Número	Autores	País	Fonte	Aplicações
61	Suksiripattanapong <i>et al.</i> (2015)	Tailândia	Construction and Building Materials	Geopolímeros
62	Nor <i>et al.</i> (2015)	Malásia	Jurnal Teknologi	Cerâmicas
63	Tantawy (2015)	Arábia Saudita	Materials Research Bulletin	Ligante, MCS
64	Poowancum; Nimwinya; Horpibulsuk (2015)	Tailândia	RILEM Bookseries	Geopolímeros
65	El-Didamony; Amer; Mohammed (2014)	Egito	Advances in Cement Research	Ligante, MCS
66	Huang; Wang (2013)	Taiwan	Construction and Building Materials	Agregados
67	Kizinievič <i>et al.</i> (2013)	Lituânia	Construction and Building Materials	Cerâmicas
68	Chen (2013)	China	Key Engineering Materials	Argamassa
69	Sales <i>et al.</i> (2011)	Brasil	Construction and Building Materials	Concreto
70	Alqam; Jamrah; Daghlis (2011)	Jordânia	Jordan Journal of Civil Engineering	Ligante, MCS
71	Sales <i>et al.</i> (2010)	Brasil	Construction and Building Materials	Concreto
72	Sales; de Souza (2009)	Brasil	Construction and Building Materials	Argamassa
73	O'Kelly (2008)	Irlanda	Canadian Geotechnical Journal	Geotecnia
74	Roque; Carvalho (2006)	Portugal	5th ICEG Environmental Geotechnics	Geotecnia
75	Wang <i>et al.</i> (1992)	Estados Unidos	Journal of Environmental Engineering	Geotecnia

Fonte: O Autor (2024).

4 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

4.1 APLICAÇÕES DO LETA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

As pesquisas voltadas ao uso e aplicação do lodo de ETA tiveram início nos anos 70, por meio de estudos ambientais que relataram formas de coleta, manuseio e descarte para o lodo de ETA. O estudo de Clark (1970), intitulado “*Water treatment sludge drying and drainage on sand beds*”, constatou que os lodos, provenientes de quatro tipos de processos de tratamento, variavam em características químicas, dependendo da fonte de água bruta, do tipo de tratamento e do método de remoção do lodo das bacias de sedimentação. O autor propôs equações e metodologias que permitem a um projetista prever a área de leito de secagem necessária para lodos de tratamento de água, visando reduzir o volume de água do material para descarte final.

A partir dos anos 90, outras áreas começaram a ser exploradas, como a geotecnia, inicialmente para estabilizar solos e aterros (Wang *et al.*, 1992). A razão para a utilização do lodo de ETA nesse contexto está relacionada aos elevados teores de alumínio, silício e ferro em sua constituição, tornando-se um facilitador para a estabilização de solos e derivados com altos teores de cromo, chumbo, cádmio, entre outros (Marchiori *et al.*, 2021; Guner, 2022; Nguyen *et al.*, 2023).

O setor da construção civil também possibilitou novas alternativas para o reaproveitamento do lodo de ETA. A aplicação desse resíduo na construção civil busca a reciclagem e o uso responsável de resíduos sólidos, contribuindo para a sustentabilidade e a redução do impacto ambiental (Kyncl, 2008; Alqam, Jamrah e Daghlal, 2011; Deviatkin, 2013; Mymrin *et al.*, 2017). O lodo de ETA, resultante do tratamento da água nas ETAs, encontra aplicação em diversas atividades na construção civil, categorizadas nos grupos a seguir:

Grupo 1: Aplicação em componentes da construção civil

- Produção de concreto e argamassa: Incorporação do lodo de ETA na produção de concreto e argamassa como parte dos materiais, podendo substituir parcialmente agregados, areia ou cimento, reduzindo a demanda por recursos naturais e tornando os materiais mais sustentáveis;

- Fabricação de tijolos e blocos cerâmicos: Utilização do lodo de ETA como componente na fabricação de tijolos ou blocos de construção, não apenas reduzindo o desperdício, mas também criando produtos finais mais leves e termicamente isolantes;
- Produção de blocos de proteção contra erosão: Utilização do lodo de ETA na produção de blocos para proteção contra erosão, empregados na estabilização de margens de rios, canais e encostas íngremes.

Grupo 2: Aplicação em áreas geotécnicas

- Recobrimento de aterros sanitários: Aplicação do lodo de ETA como cobertura em aterros sanitários para minimizar o odor, controlar a erosão e promover o crescimento de vegetação em áreas de descarte de resíduos sólidos;
- Estabilização de solos: Mistura do lodo de ETA com solos instáveis em áreas de construção para aprimorar propriedades de compactação e resistência, sendo especialmente útil em projetos de pavimentação, fundações e estradas;
- Construção de estradas: Utilização do lodo de ETA na construção de estradas, principalmente na preparação da base ou sub-base, para estabilizar o solo e reduzir a necessidade de materiais naturais, como cascalho;
- Revestimento de taludes e áreas erodidas: Aplicação do lodo de ETA em taludes e áreas propensas à erosão para controlar o desgaste do solo e promover a revegetação;
- Enchimento para áreas em desenvolvimento: Em alguns casos, o lodo de ETA desidratado pode servir como material de enchimento em áreas em desenvolvimento, desde que esteja em conformidade com as normas ambientais e de qualidade.

É interessante observar que a aplicação do lodo de ETA nessas categorias exige uma análise detalhada da composição química do lodo, especialmente em relação aos óxidos, como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , MgO , Na_2O , P_2O_5 , TiO_2 , entre outros. Essa variação na constituição pode ser justificada pela região ou formação geográfica onde o lodo de ETA é coletado, mudanças climáticas (períodos

de chuva e estiagem), tipo de coagulante empregado no tratamento, entre outros quesitos.

No ramo da construção civil, o lodo de ETA tem sido predominantemente atribuído à produção de novos compósitos, como agregados miúdos e graúdos, ligantes, como material cimentício suplementar (MCS), na substituição da argila para produção de material cerâmico, na formação de geopolímeros, entre outros. A seguir, são descritas algumas aplicações específicas do lodo de ETA na construção civil.

4.1.1 Agregados

Na indústria da construção civil a produção de componentes à base de material cimentício, como argamassas e concreto, pode ter na sua constituição o que denominamos de agregado, que pela NBR 9935 (ABNT, 2011) são materiais sem forma ou volume definidos, geralmente inertes, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de materiais cimentícios. Além disso, uma característica importante atribuída ao agregado é a estabilidade química dessa rocha matriz, para evitar patologias como a reação álcali-agregado, além de proporcionar uma menor retração das pastas, compõe aproximadamente 70% do volume total das misturas confeccionadas e aumentam a resistência superficial ao desgaste de concretos e argamassas NBR 15577-6 (ABNT, 2018).

O aperfeiçoamento de materiais e a inovação de técnicas construtivas possibilitou a incorporação de resíduos que anteriormente eram descartados em grandes quantidades de maneira irregular, como os resíduos de construção e demolição (RCD), LETA, entre outros. Logo, com a expectativa de aproveitamento do lodo de ETA, foram realizadas pesquisas para avaliar o potencial desse resíduo como agregado leve e metodologias foram criadas na tentativa de encontrar materiais alternativos para a produção de agregados miúdos e graúdos, especialmente na confecção de agregados leves.

A compreensão das características dos agregados leves é fundamental para a formulação e fabricação de argamassas e concretos de baixa densidade. Essas características podem variar substancialmente devido à classificação dos agregados e aos métodos de produção empregados. As propriedades das argamassas e

concretos dependem das características individuais de cada componente e da maneira como eles interagem, uma vez que são materiais não uniformes.

Na construção civil, quando se substituem agregados tradicionais por agregados leves, as propriedades das argamassas e concretos que mais sofrem influência são: trabalhabilidade, densidade, elasticidade, propriedades térmicas, resistência mecânica, deformação, contração e a espessura da interface entre a matriz de cimento e o agregado (Kawabata, 2008).

Os agregados leves podem ser categorizados como naturais ou artificiais. Agregados leves naturais são aqueles encontrados na natureza e não passam por processos industriais de conformação ou modificação. Geralmente, esses agregados são usados sem beneficiamento, embora sejam menos comuns no Brasil e mais prevalentes em países europeus (Santis, 2016). Agregados leves artificiais podem ser produzidos por meio do tratamento térmico de matérias-primas naturais, como vermiculita, argila, ardósia e folhelho, ou de subprodutos industriais, como a escória de alto forno e a cinza volante (Maycá; Cremonini e Recena, 2008).

Conforme Angelin (2014), existem dois métodos comuns para a produção de agregados leves: forno rotativo e sinterização. O processo de sinterização envolve a mistura da matéria-prima com uma quantidade apropriada de combustível, como carvão moído ou coque. Esse material é então submetido a altas temperaturas com o auxílio de uma grelha móvel, resultando na expansão devido à formação de gases (Gomes, 1998). O processo de forno rotativo, também conhecido como nodulação, capitaliza as características de materiais que aumentam de volume, como certas argilas quando expostas a altas temperaturas, geralmente entre 1000 e 1350 °C, devido à retenção de gases pela camada externa vítrea das partículas.

Diversos estudos têm sido conduzidos para explorar os procedimentos relacionados ao uso e aplicação do ETA como agregado leve. Um desses estudos, conduzido por Lee *et al.* (2021), analisou a viabilidade da confecção de agregados leves utilizando até 30% em massa de lodo de ETA como substituto. Os resultados indicaram que o agregado leve produzido com uma substituição de 30% em massa de lodo atende aos padrões exigidos para uso estrutural, apresentando propriedades de engenharia comparáveis aos agregados convencionais. Os concretos elaborados com esse tipo de agregado demonstraram resistências satisfatórias, variando entre 21-34,8 MPa aos 28 dias. Além disso, quando empregado como material filtrante, o

agregado leve mostrou um desempenho de filtração superior ao da areia comum, devido à presença de poros microdimensionados.

Mañosa *et al.* (2021) realizaram uma investigação similar, porém com foco na substituição de até 50% em massa da argila expandida pelo lodo de ETA na fabricação de agregados leves. Os resultados sugeriram que, com níveis de substituição de até 15% em massa do lodo de ETA pela argila, não houve perdas significativas nas propriedades físicas e mecânicas dos agregados leves produzidos. Pelo contrário, observou-se um aumento na resistência dos agregados com a substituição de até 15%, devido à redução da porosidade da argila causada pela introdução do lodo de ETA com propriedades não expansivas. Além disso, testes realizados em concretos com agregado leve convencional e com substituição de 7% em massa de lodo apresentaram propriedades físicas, mecânicas e térmicas semelhantes, com concentrações de metais pesados abaixo dos limites estabelecidos pela Comissão Europeia.

O estudo conduzido por Ying e Awang (2019) investigou a utilização de resíduos de cinza combustível de óleo de palma (CCOP) e lodo de ETA como substitutos dos agregados grossos naturais na produção de concreto. Os resultados indicaram que diferentes proporções da mistura de CCOP com lodo de ETA influenciaram o desempenho do agregado artificial. Uma mistura de 60% de lodo e 40% de CCOP foi apontada como a proporção ideal, resultando na maior resistência entre os agregados artificiais testados.

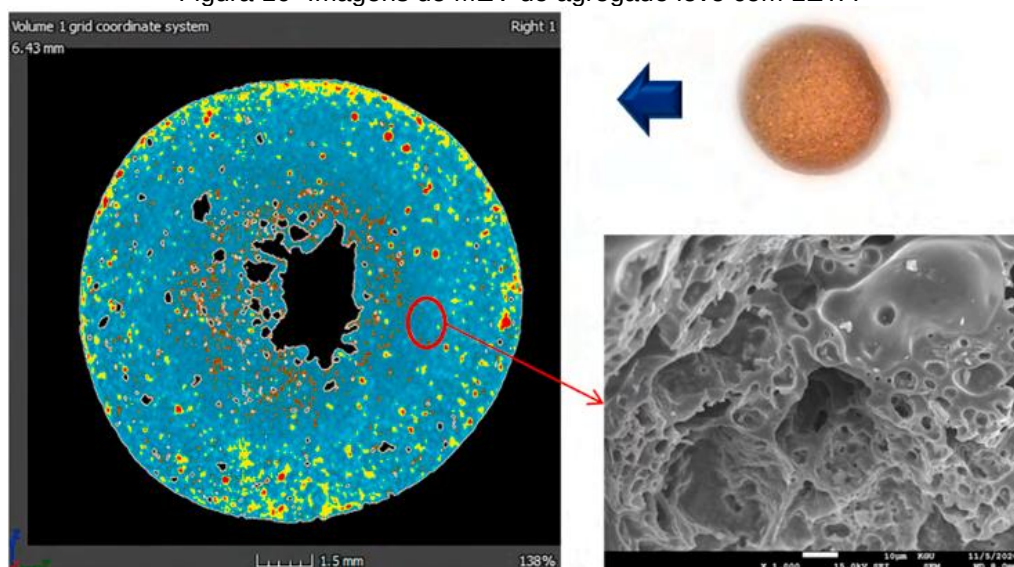
Kwek e Awang (2018) ressaltam o potencial dos resíduos de cinzas de combustível de óleo de palma e lodo de ETA na produção de agregados leves artificiais como uma alternativa sustentável para o concreto. Testes laboratoriais demonstraram que esses agregados artificiais apresentam massa específica de 1,5 a 1,7 kg/m³ e capacidade de absorção de água de 10% a 20%. Os autores também observaram que até 50% de agregados naturais podem ser substituídos sem comprometer significativamente a resistência à compressão do concreto.

Huang e Wang (2013) também investigaram o uso de lodo de ETA na produção de agregados leves, abrangendo amostras de lodo de dez ETAs em Taiwan. Todas as amostras do lodo de ETA podem ser empregadas na confecção de agregados leves, de modo que 5 delas podem ser utilizadas tanto na produção de agregado leve estrutural quanto não estrutural. Os agregados resultantes apresentaram em média densidade de partículas de 1,35 g/cm³ ou 0,98 g/cm³,

densidade aparente de 726 kg/m³ ou 518 kg/m³ e absorção de água de 6,9% ou 9,7% para o agregado leve estrutural e não estrutural, respectivamente. Além disso, o agregado leve estrutural resultante atende aos requisitos da ASTM C330 para aplicação em concreto leve estrutural.

Os estudos de Lee *et al.* (2021) e Ying e Awang (2019) exploram a microestrutura de agregados leves artificiais produzidos a partir de materiais como lodo de ETA e CCOP. Lee *et al.* sugerem que a expansão desses agregados leves é influenciada pela presença de microporos gerados pela queima da matéria orgânica. Suas observações de microestrutura revelam uma rede de microporos que aumentam a área de superfície específica do agregado, tornando-o adequado não apenas para construção, mas também como meio filtrante (Figura 16).

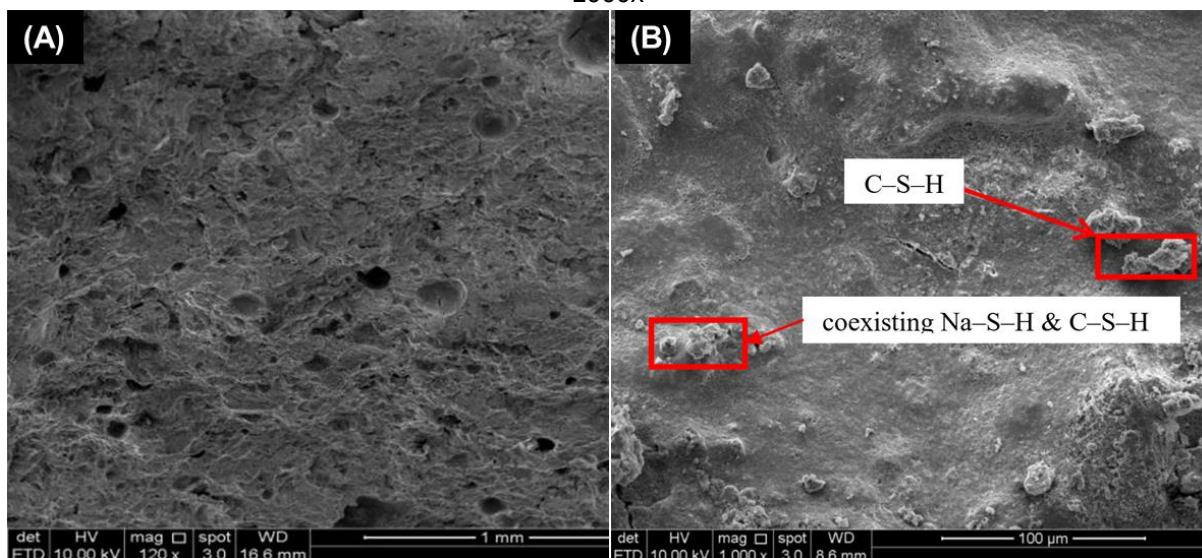
Figura 16- Imagens de MEV do agregado leve com LETA



Fonte: Lee *et al.* (2021)

Por outro lado, Ying e Awang (2019) destacam a influência da composição dos materiais e a formação de géis Na-S-H e C-S-H na microestrutura dos agregados leves. Eles explicam que a presença de microporos facilita o processo de hidratação e a reação entre os materiais. A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (EDS) permite identificar a composição e a relação Si/Al, contribuindo para entender a formação dos agregados (Figura 17).

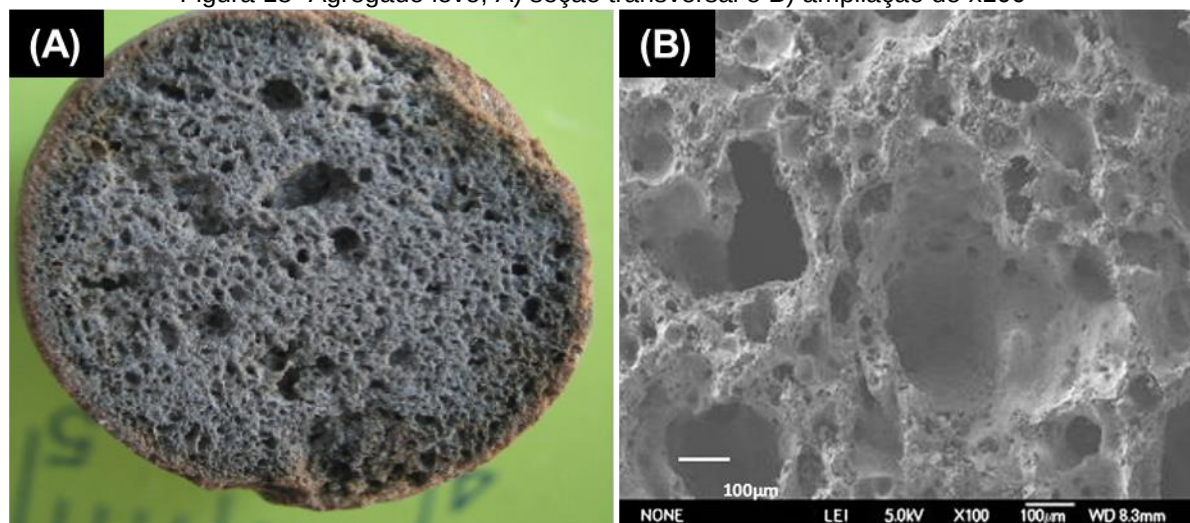
Figura 17- Imagens de MEV do agregado artificial, A) estrutura da superfície interna; B) ampliação de 1000x



Fonte: Ying e Awang (2019)

Huang e Wang (2013) mencionam que os processos de transformação de lodo em agregados leves resultam em uma fase vítrea com poros irregulares, enfatizando a importância da estrutura e composição na produção desses agregados (Figura 18). Em conjunto, esses estudos evidenciam a complexidade da microestrutura dos agregados leves artificiais e como diversos fatores influenciam suas propriedades.

Figura 18- Agregado leve, A) seção transversal e B) ampliação de x100



Fonte: Huang e Wang (2013)

4.1.2 Ligantes

O ligante, geralmente pulverulento, desempenha o papel de promover a união entre os grãos dos agregados. Pode ser categorizado como aéreo ou hidráulico. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os ligantes aéreos, como cal aérea e gesso, endurecem devido à ação química do dióxido de carbono no ar e não resistem bem à exposição prolongada à água, enquanto que os ligantes hidráulicos reagem ao entrar em contato com a água, por meio de uma reação de. Exemplos conhecidos incluem cal hidráulica e cimento Portland, sendo mais adequados para ambientes externos devido à sua maior resistência à ação prolongada da água em comparação com ligantes aéreos.

A adoção de materiais como substitutos ao cimento Portland desempenha um papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais negativos associados às indústrias cimenteiras. Dentre as alternativas viáveis, destaca-se a utilização de resíduos, com ênfase no lodo de ETA, para a produção de pozolanas. A inclusão do lodo de ETA como MCS, seja ativado por álcalis, misturado com outras pozolanas ou calcinado em diferentes temperaturas, proporciona uma série de benefícios substanciais (El-Didamony, Amer e Mohammed, 2014; Duan et al., 2022; Yang et al., 2023). Essa prática promove a sustentabilidade ambiental ao reduzir o descarte em aterros sanitários, minimizando assim o impacto ambiental. Além disso, a utilização do LETA pode oferecer uma alternativa economicamente vantajosa, contribuindo para a gestão eficiente de recursos. Aprimorando a resistência mecânica e as propriedades pozolânicas do LETA, beneficiando a durabilidade e as características estruturais do concreto. A ativação alcalina, o controle da retração e expansão, juntamente com a menor pegada de carbono, destacam-se como vantagens adicionais (Hwang et al., 2017; Qin et al., 2022).

A versatilidade do LETA permite seu uso em diferentes misturas, proporcionando oportunidades para o desenvolvimento de concretos com propriedades específicas. No entanto, é essencial conduzir estudos detalhados para garantir o desempenho adequado nas aplicações desejadas, considerando as condições de processamento e interações com outros componentes do concreto.

Nesse contexto, emerge o interesse por soluções tecnológicas que visam à reintegração eficiente do LETA na qualidade de MCS em matrizes de cimento Portland. Ao analisar os dados apresentados no Quadro 2, foram identificados uma

quantidade expressiva de artigos que utilizam o LETA como MCS, observando-se o seu emprego em três subdivisões apresentadas a seguir:

- **Material ativado por álcalis:**

O estudo conduzido por Duan *et al.* (2022) investigou o desenvolvimento de um material ativado por álcalis (MAA), utilizando lodo de ETA e escória de alto-forno (EAF), com o objetivo de mitigar o impacto ambiental na produção de cimento. Os resultados obtidos revelaram que a argamassa elaborada com uma proporção de 40% de lodo de ETA e 60% de escória de alto-forno, combinada com uma proporção de 1,5 de silicato de sódio/hidróxido de sódio (SS/HS), alcançou a maior resistência à compressão, atingindo 67 MPa. Além disso, a análise da microestrutura do MAA demonstrou uma matriz mais compacta em comparação com os materiais de cimento convencionais.

Em um estudo anterior, Hwang *et al.* (2017) investigaram o comportamento de um MAA produzido com substituições de 0%, 10% e 20% em massa de lodo de ETA, cinza volante, EAF e uma solução de NaOH. Os resultados indicaram que os níveis de lixiviação de metais pesados no lodo de ETA estavam abaixo dos limites regulamentares estabelecidos para a região de Taiwan. No entanto, a adição do lodo de ETA resultou na diminuição da trabalhabilidade e no aumento do peso unitário em comparação com as amostras de referência. Ademais, níveis mais elevados de teor de lodo de ETA reduziram a absorção de água e aumentaram os valores de resistência à compressão do material.

- **Mix com outras pozolanas:**

O estudo realizado por Qin *et al.* (2022) abordou o desenvolvimento de um cimento de fosfato de magnésio e potássio (CFMP), utilizando lodo de ETA e sílica ativa (SA). Os resultados demonstraram que a combinação de lodo de ETA e SA resultou em melhorias significativas na fluidez, no tempo de pega e na resistência à compressão do MAA em idades iniciais. Destaca-se que a proporção mais eficaz testada consistiu em 10% de SA e 40% de lodo de ETA. Além dos benefícios imediatos, essa combinação contribuiu para o refinamento da estrutura de poros, favorecendo a formação de produtos de hidratação que influenciam positivamente a resistência. A substituição parcial de óxido de magnésio por lodo de ETA não apenas promove um sistema de baixo carbono, mas também demonstra a capacidade de reciclagem de resíduos de lodo, aumentando o desempenho do MAA

em idades iniciais. No entanto, é importante observar que o estudo não fornece detalhes sobre a influência desses materiais na durabilidade e na resistência à compressão em idades posteriores.

Duan *et al.* (2022) abordaram a questão da reação álcali-sílica (RAS) decorrente do uso extensivo de vidro reciclado como agregado em materiais à base de cimento. O estudo propôs misturas com lodo de ETA e escória de alto forno para o desenvolvimento do ligante. Até 30% em massa do cimento foi substituído por lodo de ETA e escória de alto forno, resultando em argamassas com resistência à compressão de 37 MPa, em comparação com o valor de 34 MPa obtido na referência. A análise microestrutural evidenciou que o alumínio presente no lodo de ETA limita a formação de géis RAS prejudiciais, favorecendo a geração de hidrato de silicato de cálcio e alumínio (C-A-S-H), impedindo a transformação dos géis RAS em géis de baixa fluidez.

Em um outro estudo Duan *et al.* (2020) avaliaram a aplicação do lodo de ETA como MCS para mitigar os efeitos da RAS em argamassas. A substituição de 10% em massa de lodo de ETA pelo cimento potencializou as propriedades mecânicas da argamassa, resultando em maiores resistências à compressão e flexão. A substituição de 20% em massa de lodo de ETA também alcançou resistências equivalentes em comparação às amostras de referência e resistências superiores ao ataque da RAS. Além disso, o lodo de ETA reduziu a absorção capilar de água, melhorando a durabilidade do material cimentício.

He *et al.* (2021) investigaram o uso de lodo de ETA como MCS, analisando seus efeitos na composição e no desempenho de compósitos de cimento Portland. Os resultados indicaram que uma argamassa com 10% de lodo de ETA apresentou maior resistência à compressão aos 90 dias, enquanto teores mais elevados (20% e 30%) resultaram em reduções. O lodo de ETA também demonstrou atividade pozolânica, reagindo com os produtos de hidratação do cimento para melhorar a compactação da microestrutura e reduzir a retração por secagem.

El-Didamony, Amer e Mohammed (2014) investigaram o processo de configuração e endurecimento de misturas frescas de cimento Portland comum (CPC), lodo de ETA e gesso anidro. Substituições de 5%, 10% ou 15% em massa de gesso anidro foram feitas no lodo ou no cimento Portland, resultando em cimento supersulfatado. A substituição de 15% de lodo de ETA por gesso anidro acelerou o tempo de pega final e aumentou a densidade e resistência, enquanto a substituição

de 5% de CPC por gesso anidro resultou em resultados semelhantes, mas com extensão do tempo final de pega. Concluiu-se que o cimento supersulfatado pode ser preparado com 10% a 15% de lodo de ETA substituído por gesso anidro ou 5% de CPC substituído por gesso anidro.

Alqam, Jamrah e Daghlis (2011) analisaram a utilização do lodo de ETA para substituir o cimento na produção de ladrilhos para pavimentação de uso externo. Foram empregadas percentagens de substituição de cimento por lodo de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em massa. O estudo demonstrou que todos os ladrilhos produzidos apresentaram uma taxa de absorção de água de cerca de 10%. Além disso, os ladrilhos produzidos, com exceção da substituição de 50% de lodo por cimento, atenderam aos requisitos de resistência à flexão de 2,8 MPa para ladrilhos de uso externo, e os resultados da lixiviação de metais dos ladrilhos foram insignificantes.

- **Calcinado em diferentes temperaturas:**

Yang *et al.* (2023) conduziram uma avaliação abrangente sobre a utilização do lodo de ETA tratado termicamente como material cimentício suplementar, explorando uma faixa de temperaturas de 105 a 1200 °C. Os resultados destacaram que o lodo de ETA submetido à calcinação a 800 °C apresentou a maior reatividade, evidenciando potencial para atividade pozolânica. Este comportamento reativo contribuiu significativamente para a formação de hidrato de aluminossilicato de cálcio (C-A-S-H) no cimento, indicando uma promissora aplicação do lodo de ETA calcinado em diversas temperaturas como MCS.

No estudo de Shamaki *et al.* (2021), investigaram-se os efeitos da calcinação do lodo de ETA em diferentes temperaturas (475 a 1100 °C) nas propriedades físicas e na reatividade do material. Os resultados revelaram que a temperatura mais eficaz para a calcinação é de 825 °C, resultando na formação de alumina pouco cristalina, a qual demonstrou uma reação rápida com o gesso, resultando na formação de etringita e exercendo um impacto positivo na hidratação da alita. Apesar da metaestabilidade, a alumina pouco cristalina transformou-se em alumina altamente cristalina a 1100 °C. Pastas contendo lodos, embora apresentassem menor reatividade devido à cristalização das fases de alumina, evidenciaram um efeito de maior enchimento que levou a melhorias nas propriedades mecânicas.

O estudo conduzido por Godoy *et al.* (2019) explorou o potencial do lodo de ETA no desenvolvimento de MCS. A partir dos dados obtidos, foi identificado que a

calcinação do lodo de ETA a 600 °C por 1 hora é a condição mais promissora para a produção de um MCS equivalente a uma pozolana convencional. Em contraste, a obtenção de uma pozolana altamente ativa requer temperaturas de calcinação mais elevadas, especificamente 750 °C e 800 °C, mantidas por 1 hora.

Zdeb, Tracz e Adamczyk (2019) realizaram a caracterização das propriedades básicas de aglomerantes contendo lodo de ETA calcinado. O LETA foi calcinado em temperaturas de 400, 600 e 800 °C por 2 horas. O lodo de ETA calcinado a 800 °C apresentou alta atividade pozolânica e pode ser considerado um MCS promissor em aglomerantes à base de cimento.

Por fim, o estudo conduzido por Tantawy (2015) concentrou-se na caracterização e atividade pozolânica do lodo de ETA calcinado em diferentes temperaturas (600 a 900°C) por 3 horas. Os resultados indicaram que a calcinação a 800°C é suficiente para aprimorar significativamente suas propriedades pozolânicas. Essas descobertas sugerem que o lodo calcinado pode ser empregado como um material pozolânico eficaz para melhorar tanto a resistência quanto a durabilidade de materiais à base cimentícia, como o concreto.

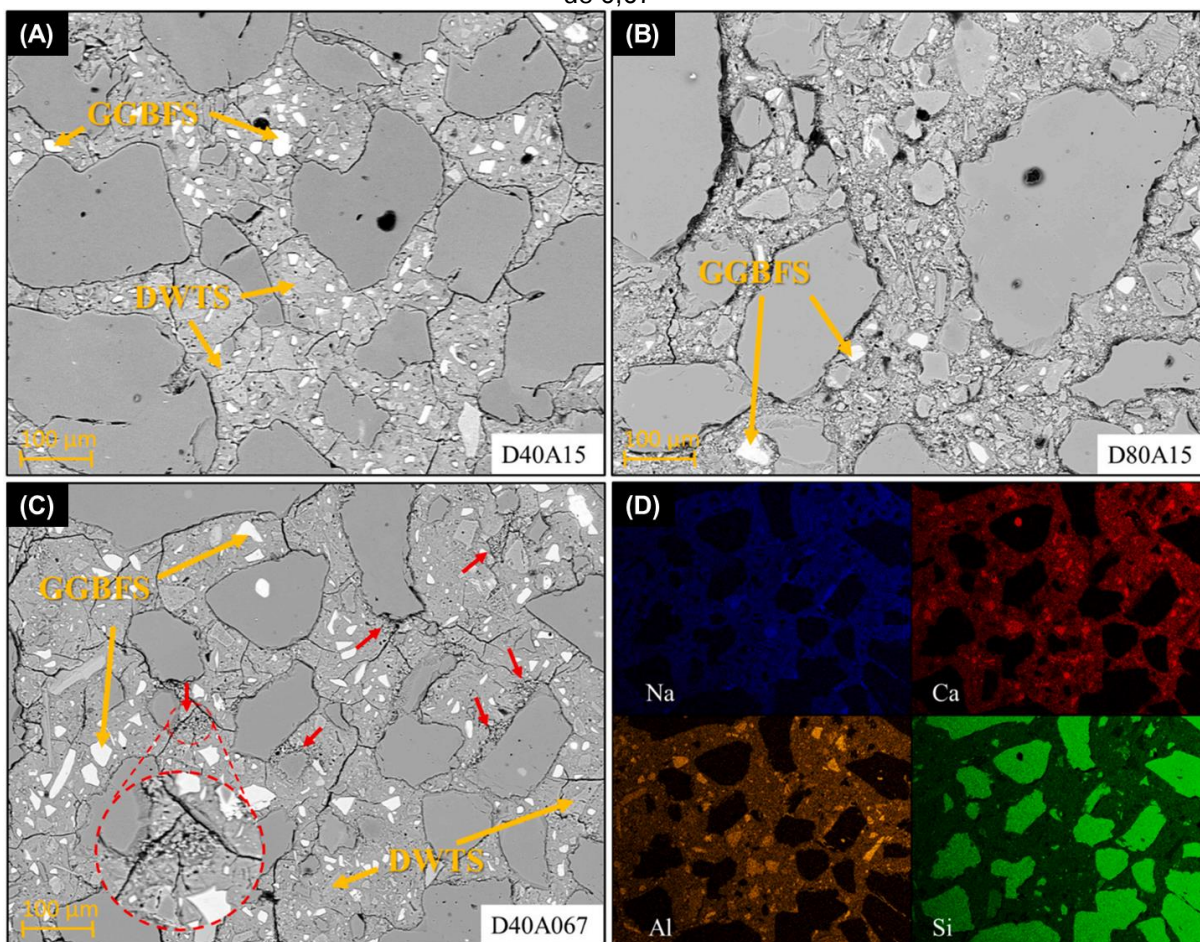
Os resultados microestruturais do emprego do lodo ETA ao cimento desempenham um papel fundamental na compreensão das mudanças e melhorias nas propriedades desses materiais de construção. O ensaio microscópico revela detalhes sobre a estrutura interna dos materiais, incluindo a compacidade da matriz, a formação de gel, a taxa de reação química e a influência das condições de tratamento. Logo, análises microestruturais desempenham papel importante para otimizar o desempenho do cimento com LETA, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e eficazes na construção civil. Os principais resultados microestruturais dos estudos analisados estão listados a seguir:

1. Duan *et al.* (2022) - Material ativado por álcalis

- Investigou a influência da proporção de SS/HS em uma matriz de MAA na microestrutura, como ilustrado na Figura 19.
- Apontou que uma proporção mais elevada de SS/HS resulta em uma matriz mais compacta, que, por sua vez, apresenta melhor desempenho mecânico.
- Descreveu a formação de géis ricos em alumínio a partir de espécies de alumina dissolvidas no lodo de ETA quando a proporção de SS/HS é baixa.
- Observou que um excesso de alumina no lodo de ETA pode prejudicar a dissolução da sílica, afetando a reatividade do material.

- Destacou que o aumento da sílica solúvel no ativador pode aprimorar a resistência das amostras com altas proporções de lodo de ETA.

Figura 19- Imagens de MEV das amostras, A) 40% LETA e 60% de EAF com relação SS/HS de 1,50; B) 80% LETA e 20% de EAF com relação SS/HS de 1,50; C) 40% LETA e 60% de EAF com relação SS/HS de 0,67; D) mapeamento EDS da amostra com 40% LETA e 60% de EAF com relação SS/HS de 0,67



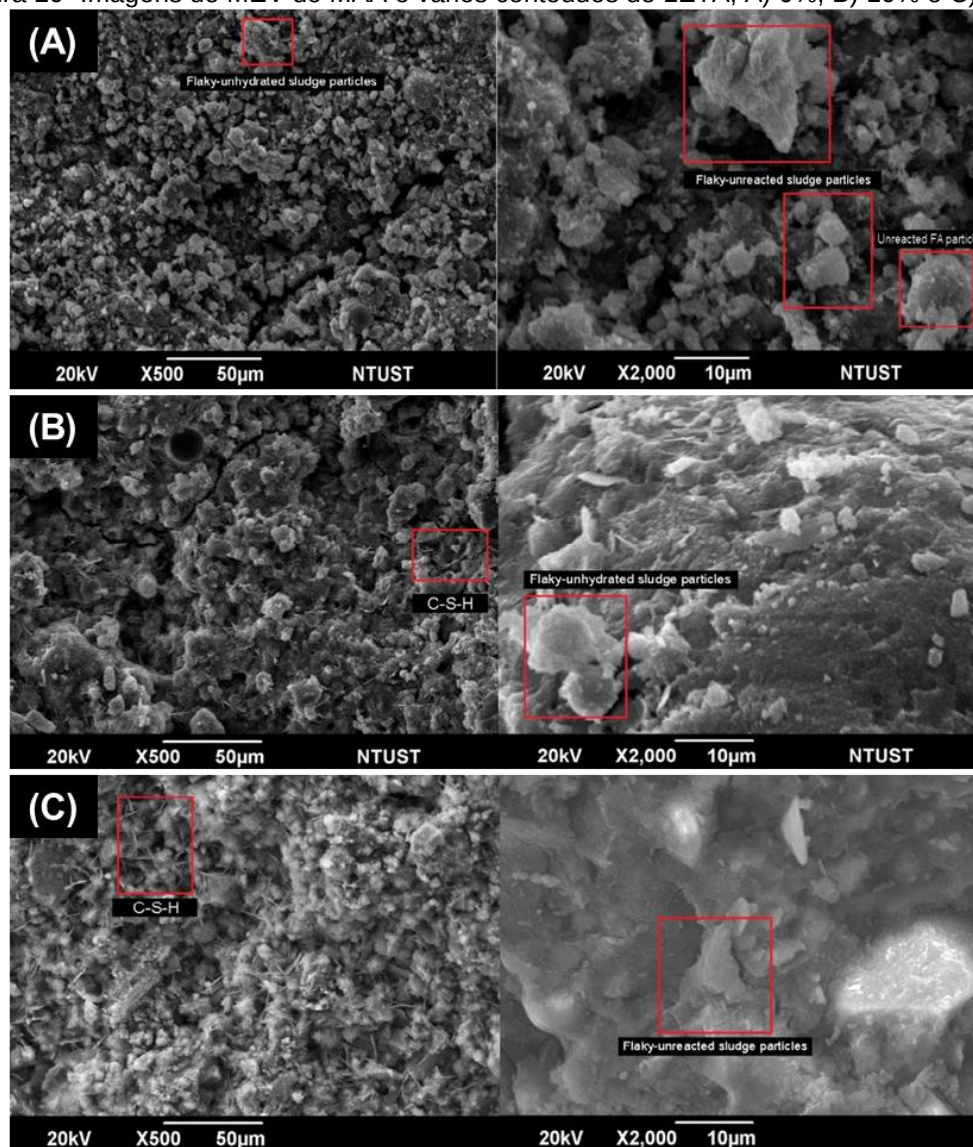
Fonte: Duan *et al.* (2022)

2. Hwang *et al.* (2017) - Material ativado por álcalis

- Investigou a microestrutura do MAA com diferentes teores de lodo de ETA, conforme apresentado na Figura 20.
- Observou que as mudanças químicas ocorreram principalmente nas bordas e superfícies das partículas, o que sugere uma reação química estimulada pela solução ativadora alcalina.
- Verificou-se que a adição de lodo de ETA acelera a taxa de reação, resultando na redução do número de partículas não reagidas e na formação de mais gel C-S-H.

- Constatou-se que a presença de gel é fundamental para preencher os vazios entre as partículas sólidas, o que contribui para tornar a estrutura mais densa e para o desenvolvimento da resistência à compressão do MAA.

Figura 20- Imagens de MEV do MAA e vários conteúdos de LETA, A) 0%; B) 10% e C) 20%



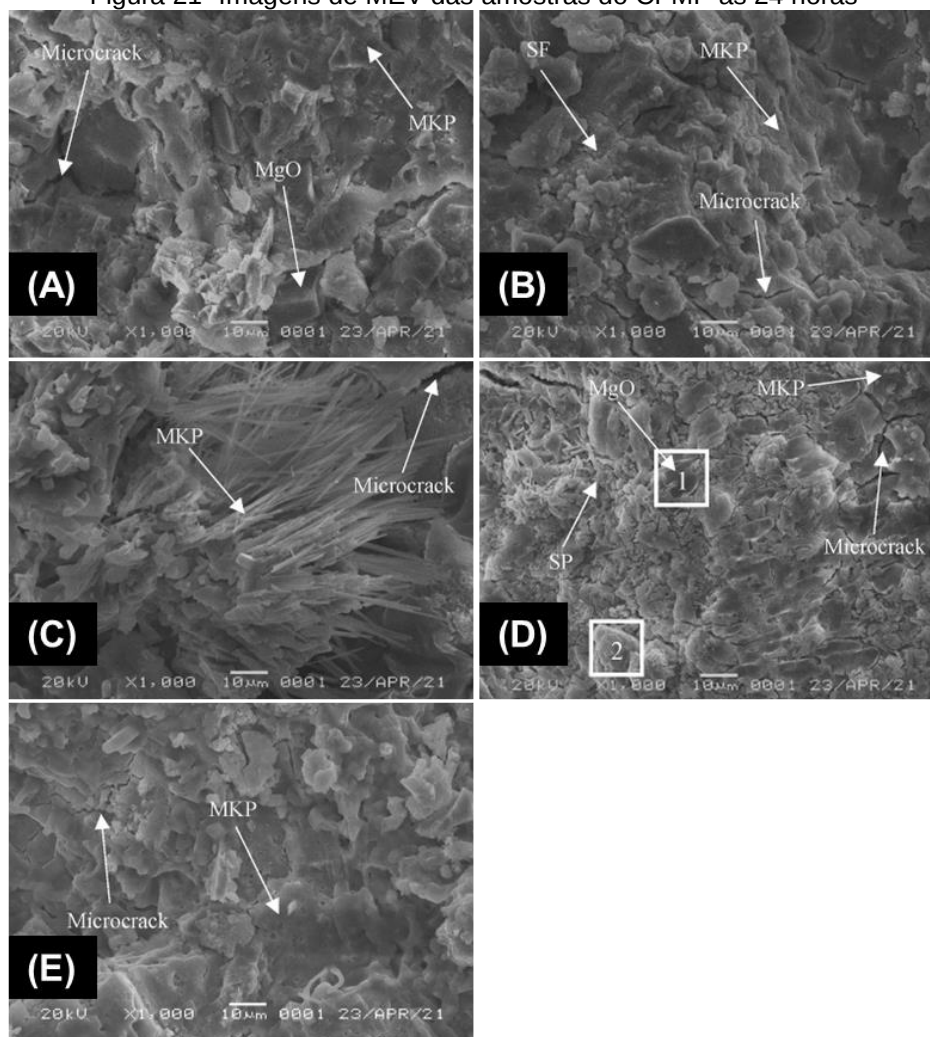
Fonte: Hwang *et al.* (2017)

3. Qin *et al.* (2022) – Mix com outras pozolanas

- Apresentou a morfologia da amostra de CFMP com diferentes teores de sílica ativa (SA) e lodo de ETA, conforme ilustrado na Figura 21.
- Observou que as amostras com maior teor de SA exibiram uma microestrutura mais densa e compacta, caracterizada por menos defeitos e microfissuras.

- Mencionou que a adição de lodo de ETA pode promover a hidratação do sistema CFMP, aumentando o teor de cristais de fosfato de potássio.
- Destacou a compatibilidade química entre o gel de fase de fosfato de alumínio amorfo e os cristais de fosfato de potássio, resultando em uma microestrutura mais densa e suave.

Figura 21- Imagens de MEV das amostras do CFMP às 24 horas



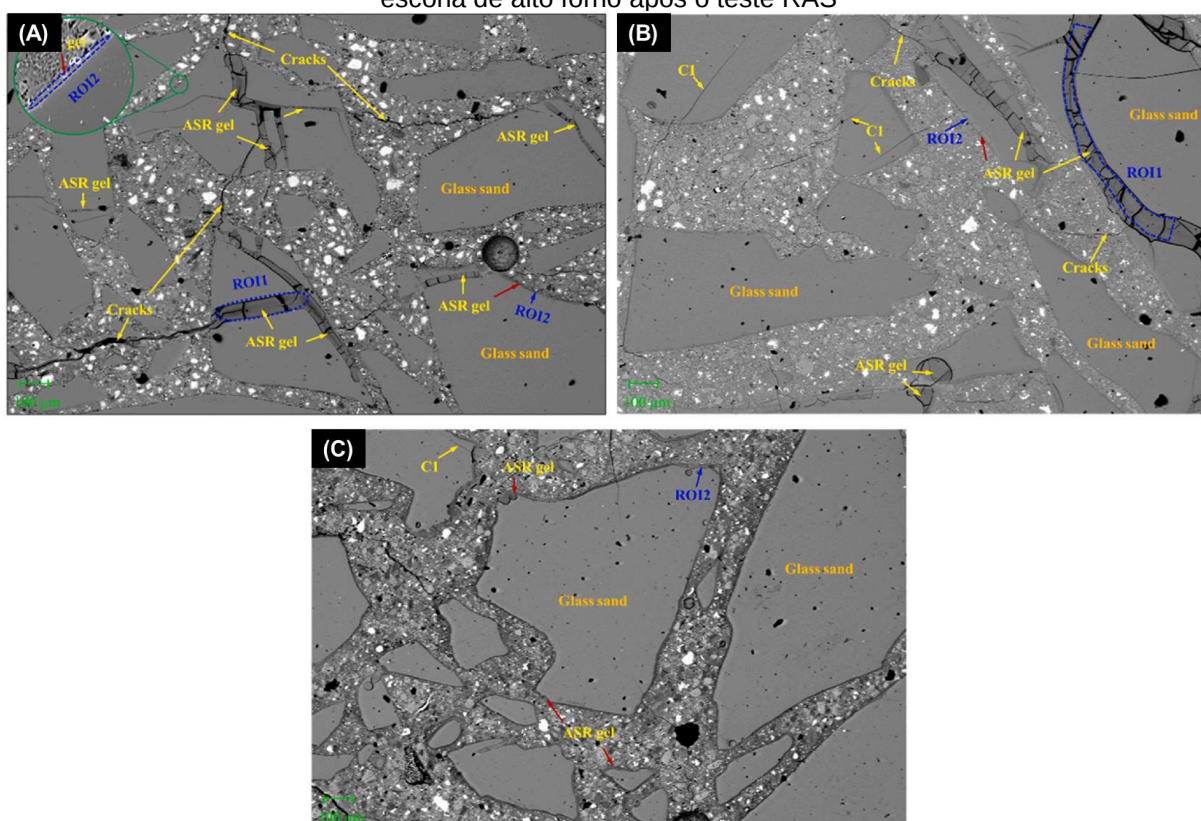
Fonte: Qin *et al.* (2022)

4. Duan *et al.* (2022) - Mix com outras pozolanas

- Investigou a formação de géis da reação álcali-sílica (RAS) em amostras de cimento, conforme apresentado na Figura 22.
- Relatou que os géis de RAS se formaram principalmente no interior e ao redor do agregado de vidro, bem como em fissuras na matriz de cimento.

- Explicou que a formação inicial de géis de RAS pode ocorrer na interface entre o agregado de vidro e a matriz, sendo influenciada pelas características das fissuras no agregado.
- Mencionou a influência dos íons alcalinos e íons Ca^{2+} na composição dos géis de RAS, além de descrever o papel das camadas de C-A-S-H (géis de alumínio e sílica) na prevenção da expansão induzida por RAS e na composição dos géis de RAS.

Figura 22- Imagens de MEV de argamassa, A) referência; B) 10% de LETA e C) 30% de LETA e escória de alto forno após o teste RAS



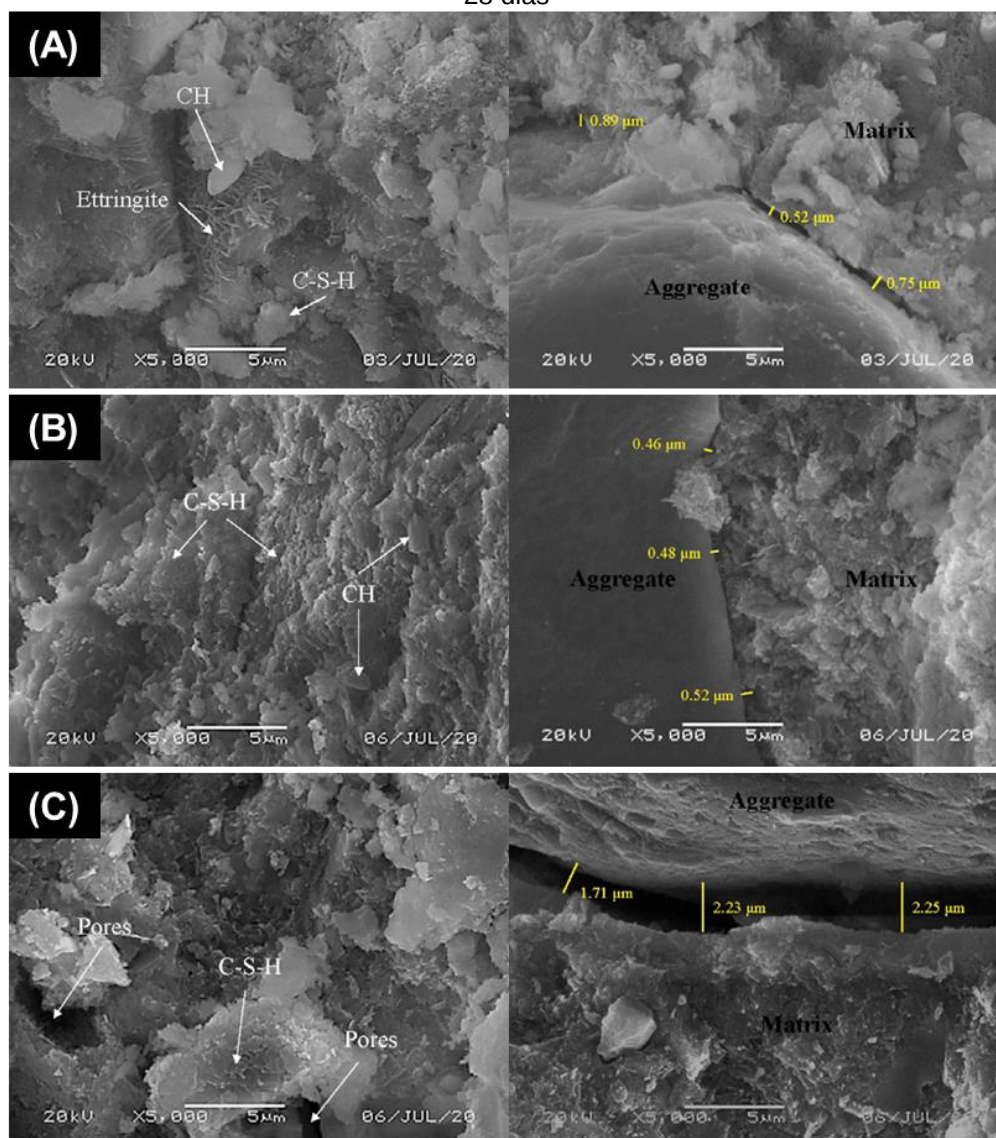
Fonte: Duan *et al.* (2022)

5. He *et al.* (2021) - Mix com outras pozolanas

- Estudou a microestrutura da argamassa com diferentes teores de lodo de ETA, conforme ilustrado na Figura 23.
- Observou-se que a microestrutura do grupo de referência era densa, apresentando plaquetas de portlandita, fibras de C-S-H e etringita.
- A adição de uma pequena quantidade de lodo de ETA melhorou a compacidade da matriz e a zona de transição interfacial (ZTI).

- Quando a taxa de substituição de lodo de ETA foi alta, em torno de 30%, a microestrutura tornou-se mais solta, com poros na matriz.

Figura 23- Imagens de MEV com diferentes conteúdos de LETA, A) referência; B) 10% e C) 30% aos 28 dias



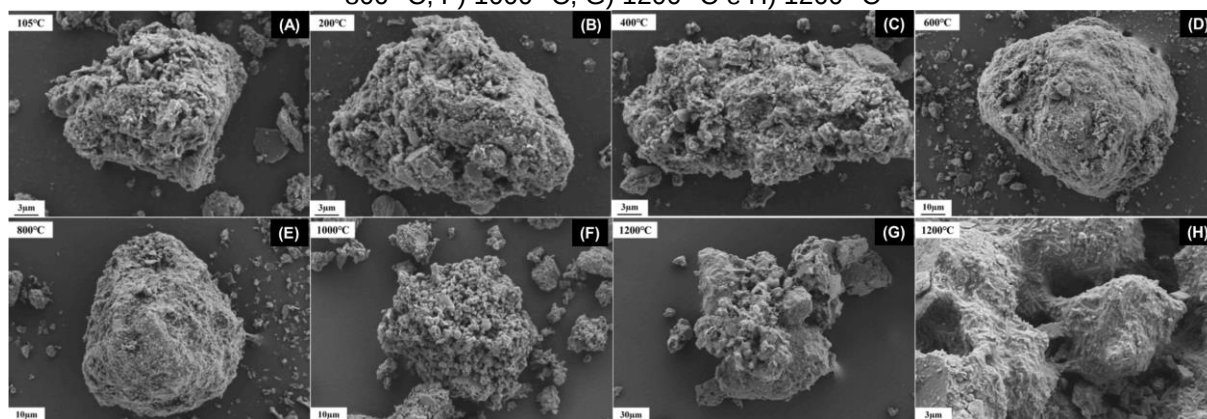
Fonte: He *et al.* (2021)

6. Yang *et al.* (2023) - Calcinado em diferentes temperaturas

- Descreveu as mudanças na microestrutura das partículas de lodo em função das diferentes temperaturas de calcinação, conforme apresentado na Figura 24.
- Mencionou a desidroxilação das partículas de lodo em altas temperaturas, resultando em uma forma suave e aglomerada das partículas.

- Observou que as altas temperaturas causam o colapso e a aglomeração das partículas de lodo, formando uma estrutura densa de mulita.

Figura 24- Imagens de MEV do lodo de ETA calcinado, A) 105 °C, B) 200 °C, C) 400°C, D) 600 °C, E) 800 °C, F) 1000 °C, G) 1200 °C e H) 1200 °C

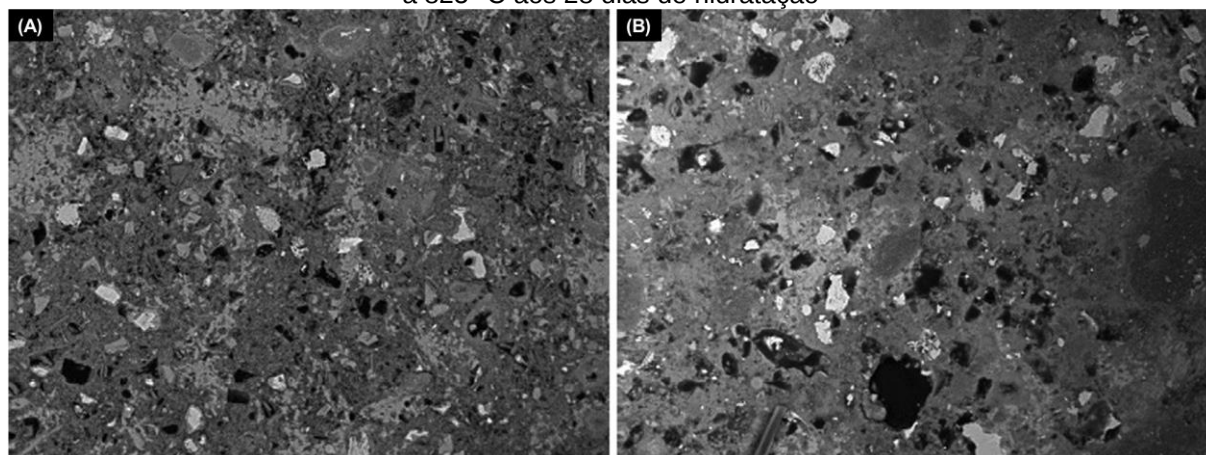


Fonte: Yang *et al.* (2023)

7. Shamaki *et al.* (2021) - Calcinado em diferentes temperaturas

- Analisou a microestrutura de pastas de cimento com diferentes adições de lodo calcinado em várias temperaturas (Figura 25).
- Observou que a porosidade diminui à medida que a hidratação avança, e que a adição de lodo calcinado melhora a compacidade da matriz, especialmente quando calcinado a 1100 °C.
- Destacou que o lodo calcinado a 825 °C apresenta uma forma irregular, como ilustrado na Figura 25, enquanto o calcinado a 1100 °C possui partículas mais finas que preenchem os vazios na matriz.

Figura 25- Imagens de MEV com ampliação de 800x de pasta, A) referência e B) com LETA calcinado a 825 °C aos 28 dias de hidratação

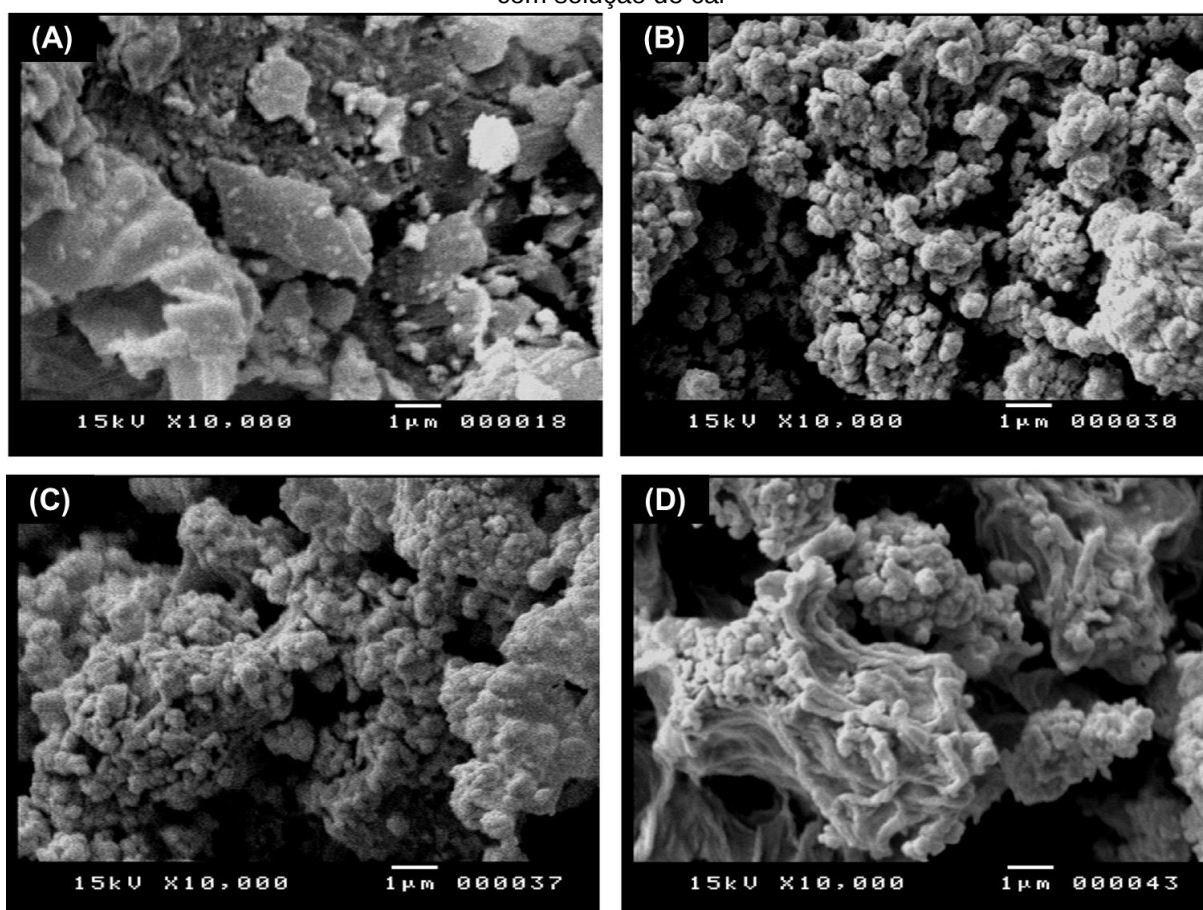


Fonte: Shamaki *et al.* (2021)

8. Tantawy (2015) - Calcinado em diferentes temperaturas:

- Estudou a microestrutura do lodo de ETA calcinado em diferentes temperaturas e tratado com solução de cal, conforme ilustrado na Figura 26.
- Observou que a calcinação do lodo resultou na desidratação do $\text{Al}(\text{OH})_3$, na formação de Al_2O_3 e na cristalização de sílica amorfa, afetando a microestrutura.
- Constatou que a hidratação do lodo calcinado com cal em alta temperatura levou à formação de produtos de reação pozolânica, como hidratos de aluminato de cálcio e hidratos de silicato de cálcio, preenchendo alguns dos poros da pasta.

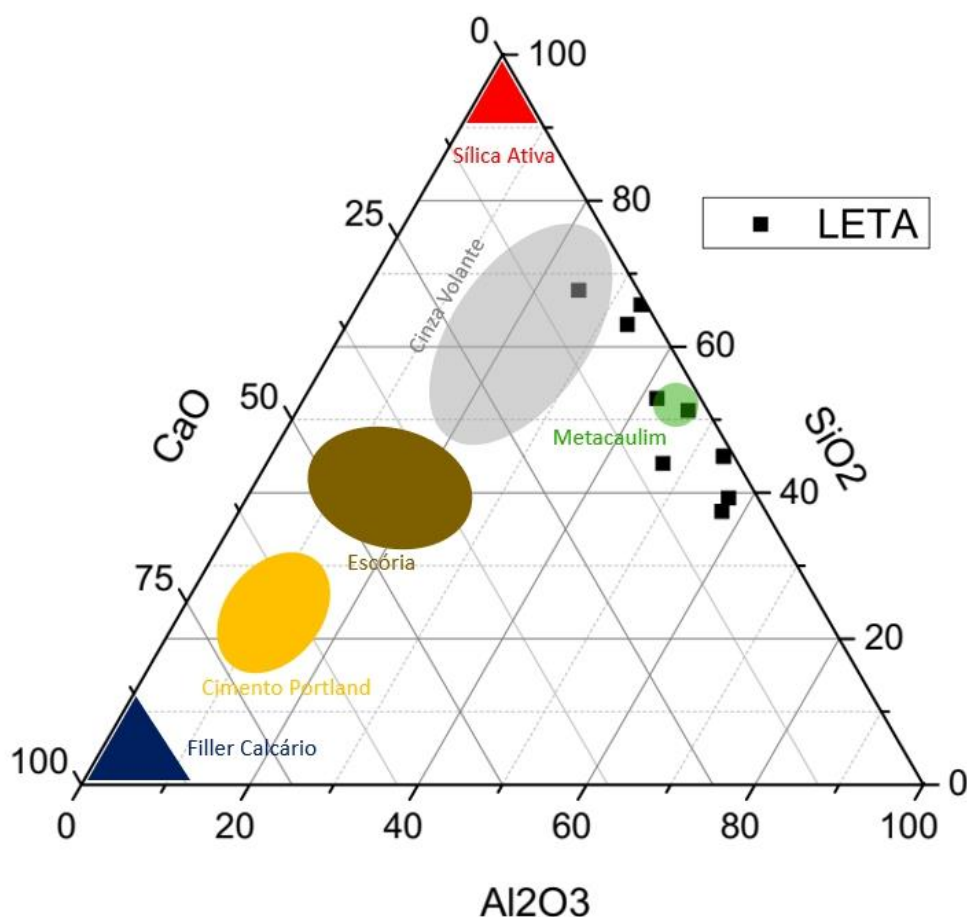
Figura 26- Imagens de MEV de LETA calcinado, A) 800 °C, B) 600 °C, C) 800 °C e D) 900 °C tratado com solução de cal



Fonte: Tantawy (2015)

A Figura 27 apresenta na forma de diagrama ternário, as composições do lodo de ETA empregados como ligantes para os trabalhos analisados.

Figura 27- Diagrama ternário $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, indicando as composições do cimento Portland CPV, dos MCSs mais utilizados atualmente e dos LETAs empregados como ligantes analisados nesta revisão



Fonte: Adaptado de Lothenbach; Scrivener e Hooton (2011)

A partir dos dados apresentados podemos analisar como a composição química do lodo pode influenciar a sua aplicabilidade como ligante em pastas cimentícias:

- Alto teor de SiO_2 : Lodos com alto teor de sílica (SiO_2), como os apresentados em Godoy *et al.* (2019), Zdeb; Tracz; Adamczyk (2019) e El-Didamony; Amer; Mohammed (2014), podem melhorar a capacidade de ligação do lodo, uma vez que a sílica é um componente importante para a formação de ligações químicas em materiais cimentícios;
- Al_2O_3 : A presença de alumina (Al_2O_3) em níveis moderados, como em Yang *et al.* (2023), Duan *et al.* (2022), Qin *et al.* (2022) e He *et al.* (2021), pode contribuir para a resistência e durabilidade do material cimentício;
- CaO : A presença de cal (CaO), em quantidades moderadas, como em Duan *et al.* (2022), Duan *et al.* (2020), Zdeb; Tracz; Adamczyk (2019) e

Tantawy (2015), pode atuar como ativador e melhorar as propriedades de ligação e endurecimento do material;

- Baixo teor de SiO_2 : Lodos com baixo teor de sílica, como Shamaki *et al.* (2021), podem ter desempenho limitado como ligantes em pastas cimentícias devido à falta de um componente importante para a formação de ligações químicas.

A composição química do lodo de ETA desempenha um papel fundamental na aplicação do lodo como ligante em pastas cimentícias. A presença de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) em níveis adequados, juntamente com a quantidade apropriada de cal (CaO), pode contribuir para o sucesso da utilização do lodo como material de construção. É importante realizar testes de laboratório e estudos de dosagem para determinar as proporções ideais de cada componente para alcançar as propriedades desejadas como ligante ou MCS.

4.1.3 Argamassas

As argamassas são uma mistura homogênea de agregados miúdos, ligantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada *in loco* ou em indústria NBR 13281-2 (ABNT, 2023). Esta norma classifica as argamassas de acordo com a sua aplicação em: argamassas para assentamento, argamassas para revestimento de paredes e tetos, argamassa de uso geral, argamassa para reboco, argamassa decorativa em camada fina e argamassa decorativa em monocamada.

As características desejadas para as argamassas variam conforme a aplicação prevista, sendo a trabalhabilidade, retenção de água, consistência e plasticidade consideradas propriedades no estado fresco, enquanto permeabilidade, densidade e resistência mecânica destacam-se como propriedades no estado endurecido.

A incorporação de resíduos como materiais de construção em argamassas emerge como uma prática de crescente importância na busca por soluções sustentáveis na construção civil. Nesse contexto, o lodo de ETA se destaca como uma alternativa promissora, ressaltando a necessidade de explorar esse recurso de maneira inovadora e consciente. Diversas pesquisas vêm examinando a viabilidade do uso do lodo de ETA nas argamassas, visando reduzir os resíduos gerados por

Estações de Tratamento de Água. Essa abordagem não apenas reduz a dependência de recursos naturais não renováveis, mas também destaca a importância de práticas inovadoras no desenvolvimento de novos materiais para o setor da construção.

Al-Rawashdeh *et al.* (2022) conduziram um estudo sobre a viabilidade de utilizar o lodo de ETA na produção de argamassa. O lodo, após ser calcinado a 900 °C, foi utilizado na preparação de argamassas, com diferentes proporções de substituição pela areia: 5%, 10%, 15% e 20%. Os resultados indicam que a substituição de até 10% do lodo calcinado resultou em uma leve redução na trabalhabilidade e densidade, mas com um aumento de 10% na resistência. Porém, proporções de lodo acima de 10% mostraram um aumento significativo na absorção de água e uma diminuição na resistência mecânica.

Pham *et al.* (2021) também investigaram o potencial do lodo de ETA, tanto calcinado a 600 °C por 1 hora quanto não calcinado, na fabricação de argamassas. Eles substituíram a areia por lodo em massa nas proporções de 0%, 5% e 10% e observaram que a argamassa com 5% de lodo de ETA apresentou uma resistência à compressão equivalente ao grupo de referência. No entanto, houve uma redução na resistência nas argamassas com 10% de substituição, independentemente do lodo de ETA ter sido calcinado ou não. Além disso, não foram observados efeitos significativos na resistência à flexão. A resistência de aderência aumentou consideravelmente para as amostras com 5% (calcinação e não calcinação) e 10% (calcinação), devido à melhor aderência entre as partículas e à melhor absorção capilar, devido à interconectividade dos poros causada pela extração do conteúdo orgânico.

Li *et al.* (2021) analisaram dois métodos de tratamento do lodo de ETA (calcinação a 900 °C por 1 hora e tratamento com solução de NaOH) como substitutos de cinzas volantes e areia em diferentes proporções de substituição (5%, 10% e 15%) na produção de argamassas. Para a substituição em volume de cinzas volantes, o tratamento térmico mostrou uma melhor resistência à compressão com uma taxa de substituição de até 15%, enquanto o método com NaOH apresentou melhor resistência com uma taxa de substituição de até 10%, em comparação com as misturas de referência. Para a substituição da areia, a porcentagem ótima foi de 5% para ambos os métodos de tratamento, mas as misturas com lodo de ETA

tratado termicamente mostraram uma resistência superior às amostras tratadas com NaOH, pelos mesmos motivos de substituição.

Oliveira Andrade *et al.* (2018) investigaram os efeitos das propriedades mecânicas, de durabilidade e análises microestruturais de argamassas de reboco com diferentes níveis de substituição (2,5%, 5%, 7,5% e 10% em massa) de areia pelo lodo de ETA, com o objetivo de verificar se atendem aos requisitos mínimos normativos e aos aspectos práticos de aplicação em obras. Com relação às propriedades mecânicas, a resistência à compressão das argamassas com lodo de ETA foi menor em comparação com a amostra de referência e não houve diferenças significativas na resistência à flexão. Em geral, as argamassas com relação a/c de 0,5 e com 5% de lodo de ETA são adequadas para produção, com um menor teor de cimento.

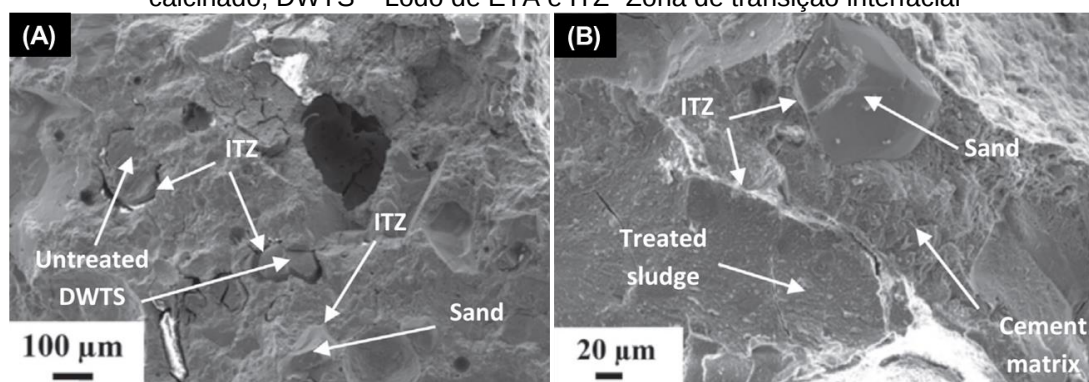
O estudo de Chen (2013) investigou o uso do lodo de ETA, com substituição de 20% em massa, como material de mistura no cimento e seu impacto na carbonatação e durabilidade da argamassa. Os resultados mostraram que a argamassa com lodo de ETA apresentou maior resistência à carbonatação em comparação com a argamassa de referência. A presença do lodo de ETA misturado com cimento resultou na formação de monossulfato (AFm) do tipo monocarboaluminato, sugerindo seu potencial uso na produção de cimento.

Sales e Souza (2009) avaliaram a incorporação de lodo de ETA e entulhos de construção e demolição em argamassas e concretos. O lodo de ETA foi substituído nas proporções de 1%, 2%, 3%, 4% e 5% em massa pela areia. A argamassa produzida com substituição de 2% de areia por lodo de ETA apresentou menor resistência à compressão quando comparada à argamassa de referência. No entanto, a substituição de até 4% de areia por lodo de ETA aumentou a resistência à compressão de todos os concretos em comparação com as amostras de referência. Os resultados indicam que a aplicação de lodo de ETA não prejudica o lixiviado futuro desses produtos, podendo atuar como regulador de consistência e plasticidade e até aumentar a resistência dos materiais.

Dos seis estudos analisados, três se concentram na exploração das microestruturas das argamassas que incorporam o lodo de ETA, com uma ênfase particular na análise da interface entre esses materiais e a matriz de cimento. No estudo conduzido por Pham *et al.* (2021), foi identificado um problema de adesão entre o lodo de ETA não tratado e a matriz de cimento, evidenciado pela presença

de microfaturas entre as partículas do lodo e a matriz de cimento. No entanto, o lodo de ETA calcinado demonstrou uma melhor adesão com a matriz de cimento, resultando em uma superfície mais homogênea e um melhor desempenho em termos de resistência mecânica e retração, atribuídos à reatividade pozolânica do lodo de ETA calcinado (Figura 28).

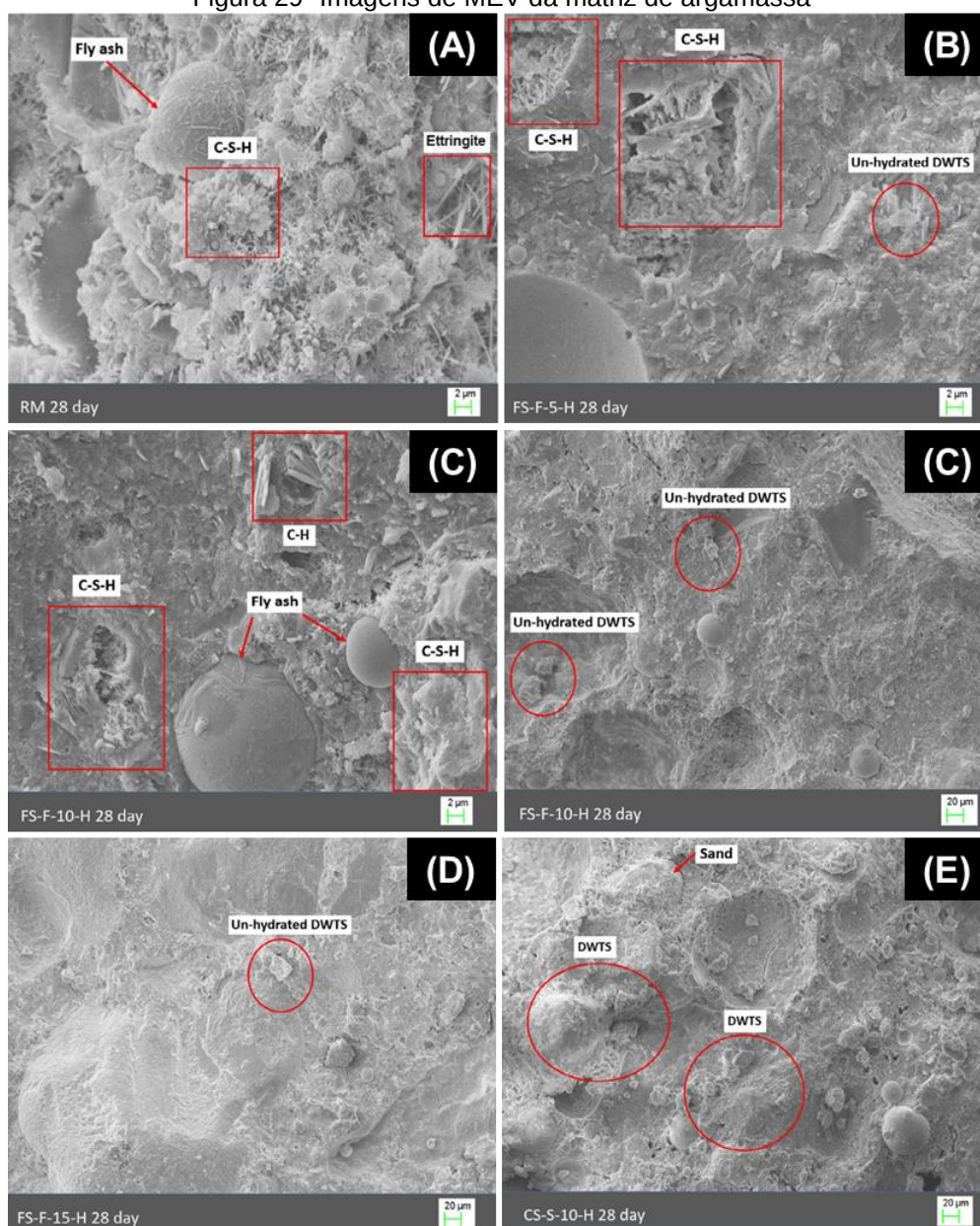
Figura 28- Imagens de MEV de argamassa com A) 5% de LETA não calcinado e B) 10% de LETA calcinado; DWTS – Lodo de ETA e ITZ- Zona de transição interfacial



Fonte: Pham *et al.* (2021)

No estudo realizado por Li *et al.* (2021), as análises por MEV revelaram perspectivas promissoras em relação à substituição parcial em volume de cinza volante pelo lodo tratado. Houve uma integração eficiente das partículas de lodo com as partículas de cinza volante, sugerindo a viabilidade de manter a resistência por meio de uma substituição apropriada. É importante ressaltar que a reação pozolânica e a presença de partículas finas do lodo de ETA atuam como locais de nucleação para a formação de C-S-H, trazendo benefícios significativos na produção de materiais mais sólidos e densos, como indicado na Figura 29.

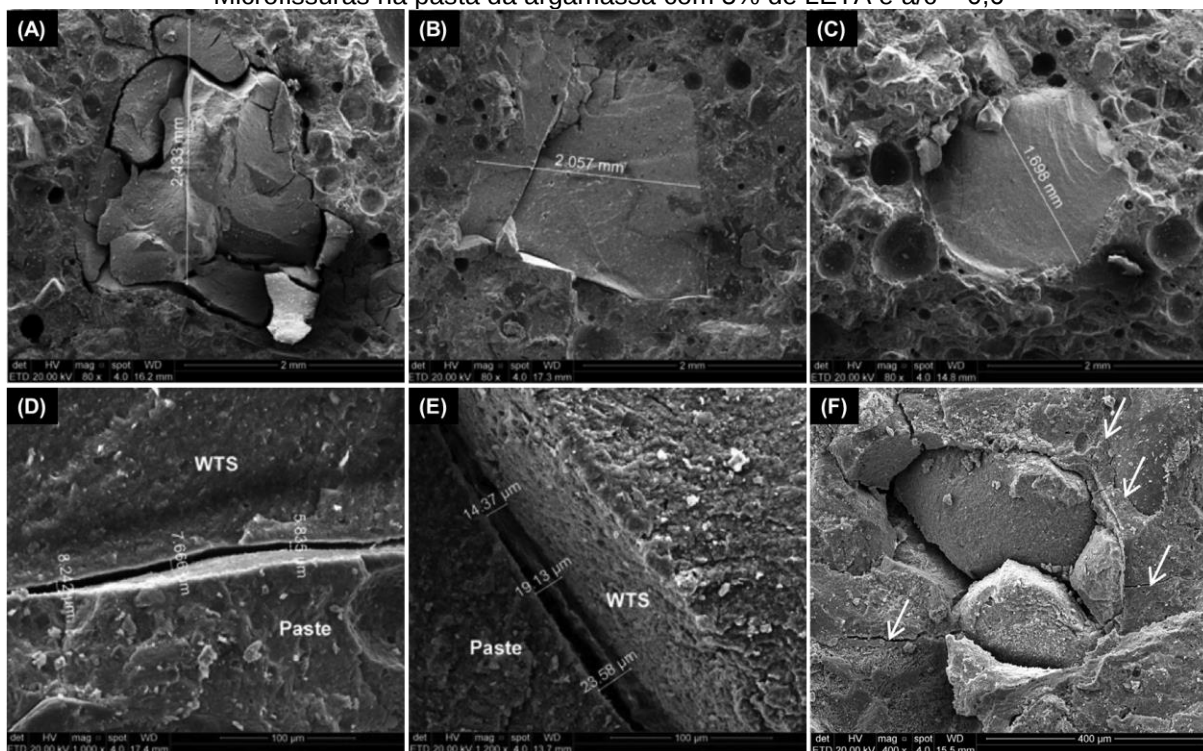
Figura 29- Imagens de MEV da matriz de argamassa



Fonte: Li *et al.* (2021)

Por fim, o estudo realizado por Oliveira Andrade *et al.* (2018) observou a presença de microfissuras no lodo de ETA, correlacionadas com a redução da resistência desse material em comparação com o agregado natural. O aumento na substituição de lodo de ETA está associado ao aumento do comprimento da ZTI, devido à transformação da água em pasta no lodo de ETA durante o processo de cura (Figura 30).

Figura 30- Imagens de MEV de argamassas com A) 5% de LETA e $a/c = 0,4$; B) 5% de LETA e $a/c = 0,5$; C) 5% de LETA e $a/c = 0,6$; D) 5% de LETA e $a/c = 0,5$; E) 10% de LETA e $a/c = 0,5$; F) Microfissuras na pasta da argamassa com 5% de LETA e $a/c = 0,6$



Fonte: de Oliveira Andrade *et al.* (2018)

Em suma, os estudos destacam a importância da análise microestrutural para uma compreensão mais profunda da interação entre o lodo de ETA e a matriz de cimento, além de seus impactos na resistência e nas propriedades mecânicas das argamassas. Essas pesquisas indicam que a reatividade pozolânica do lodo calcinado desempenha um papel crucial nas propriedades das argamassas, oferecendo perspectivas promissoras para a substituição de outros materiais pozolânicos, como a cinza volante, ressaltando a viabilidade e o potencial impacto positivo dessa prática na busca por soluções ambientais na indústria da construção.

4.1.4 Concretos

O concreto é um material de construção fabricado a partir da mistura entre ligante (um ou mais), agregados graúdos e miúdos, água e aditivos. O material permaneceu no mercado, sem alterações significativas devido ao seu baixo custo aliado a disponibilidade dos seus materiais componentes em grande parte das localidades, além de sua versatilidade, adaptabilidade e durabilidade (Mehta e Monteiro, 2008). O concreto pode ser classificado como estrutural, aplicada em

elementos como sapatas, pilares e lajes, ou não estrutural, destinada a partes menos exigentes da construção, como o concreto magro para lastros de pisos.

As inovações tecnológicas no campo do concreto têm impulsionado profissionais a explorar novas composições e aplicações, visando aprimorar os canteiros de obras. Isso resultou em pesquisas inovadoras e potenciais para a fabricação de materiais alternativos, com características similares aos materiais tradicionais, com ênfase na utilização do LETA em materiais cimentícios. A introdução do LETA em concretos é uma prática estratégica na construção civil, promovendo sustentabilidade ao reutilizar lodo como recurso construtivo e reduzindo o consumo de recursos naturais não renováveis, o que resulta em benefícios ambientais. Além disso, melhora as propriedades do concreto, como resistência mecânica e durabilidade, elevando a qualidade dos materiais de construção para atender padrões normativos. A incorporação do LETA pode também reduzir custos de produção e estimular inovações na indústria da construção, ao mesmo tempo em que atende a requisitos ambientais, fortalecendo a imagem corporativa de empresas comprometidas com práticas sustentáveis.

Os estudos conduzidos por Erdogmus *et al.* (2023) investigaram a utilização do lodo de ETA em aplicações de armazenamento térmico de energia com materiais de mudança de fase (MMF). O estudo examinou a capacidade do lodo de ETA, que foi empregado como substância de suporte na síntese de compósitos de palmitato de metila (PM) estáveis, quando incorporado em concreto espumado em proporções de 50% e 100% em volume. O concreto produzido (LETA/PM) demonstrou a habilidade de manter o ambiente interno mais frio por cerca de 8 horas e 40 minutos, exibindo uma diferença máxima de 2,97 °C em relação à amostra de referência, especialmente durante períodos de exposição solar intensa e elevada temperatura ambiente. Entretanto, a resistência à compressão aos 28 dias diminuiu para 6,97 MPa em comparação com a mistura de referência.

He *et al.* (2023) exploraram a utilização do lodo de ETA na produção de concreto. Neste estudo, foram produzidos diferentes tipos de concreto ao substituir parte do cimento por lodo de ETA calcinado a 800 °C por 2 horas, em proporções de 10%, 20% e 30% em massa. A resistência à compressão aos 90 dias do concreto com 10% de lodo de ETA apresentou um aumento de 7,91%, enquanto a retração por secagem aos 150 dias foi reduzida em 14,84% em comparação com o concreto de referência. Sob a perspectiva das características microestruturais, a adição de

10% de lodo de ETA reduziu o conteúdo da fase porosa e do clínquer, ao passo que aumentou o conteúdo da fase C-S-H em comparação com o concreto de referência. Além disso, o concreto contendo lodo de ETA não apenas exibiu um comportamento seguro em relação à lixiviação de metais pesados, mas também resultou em custos e emissões de carbono mais baixos.

Amornpunyapat, Panyakapo e Panyakapo (2021) avaliaram a utilização do lodo de ETA na produção de painéis de blocos intertravados de concreto leve. O lodo de ETA passou por um processo de secagem ao sol, trituração e moagem, sendo então incorporado como substituto do agregado miúdo em proporções de 0 a 60% em massa, com incrementos de 10%. O estudo determinou que a proporção ótima de substituição do lodo de ETA em relação ao agregado miúdo foi de 30% em massa. Essa composição proporcionou uma resistência à compressão de 12,98 MPa, uma densidade de 1,63 ton/m³ e uma absorção de água de 15,92%, atendendo aos padrões normativos da Tailândia.

Krasinikova, Stepanov e Makarov (2020) exploraram o potencial de aproveitamento do lodo de ETA para aprimorar a composição do concreto. A adição do lodo de ETA ao cimento foi realizada em conjunto com superplastificantes, empregando duas abordagens distintas: na primeira, o lodo moído e o superplastificante foram introduzidos separadamente, enquanto na segunda, o lodo seco foi moído em conjunto com o superplastificante. Os resultados indicaram que o lodo de ETA demonstrou eficácia quando adicionado separadamente com o superplastificante, ao passo que a adição conjunta resultou em aumento na demanda por água. Além disso, a incorporação do lodo de ETA com superplastificante levou a uma redução no consumo de ligante em 7,5%, sem comprometer as propriedades mecânicas e proporcionou uma diminuição de 7% na porosidade do concreto.

Krasinikova, Stepanov e Makarov (2020) investigaram o potencial aproveitamento de resíduos industriais em larga escala, destacando o lodo de ETA proveniente de usinas de calor e energia, na composição do concreto. A introdução do lodo de ETA no cimento foi realizada em conjunto com superplastificantes, utilizando duas abordagens distintas: a primeira consistiu na introdução separada do lodo moído e do superplastificante, enquanto a segunda envolveu a moagem conjunta do lodo seco com o plastificante. Os resultados indicaram que o lodo de ETA apresenta eficácia quando introduzido separadamente com o plastificante, uma

vez que a introdução mista resultou em um aumento na demanda por água. Adicionalmente, a incorporação do lodo de ETA com plastificantes demonstrou reduzir o consumo de ligante em 7,5%, sem comprometer as propriedades mecânicas e proporcionou uma diminuição de 7% na porosidade do concreto.

No estudo conduzido por Liu *et al.* (2020), investigou-se a inclusão de lodo de ETA em blocos de concreto, empregando-o como substituto da areia, com proporções variando de 0% a 30% em massa, com incrementos de 10%. Os resultados revelaram que a adição de lodo de ETA teve um impacto negativo nas resistências à compressão e tração das misturas. No entanto, é importante ressaltar que a cura por carbonatação melhorou essas resistências, especialmente para os blocos contendo 30% de lodo de ETA, tornando-os adequados para aplicações de suporte de carga.

No estudo conduzido por Sales, Souza e Almeida (2011), foi produzido um concreto utilizando lodo de ETA e serragem como agregados graúdos, substituindo completamente o agregado gráúdo natural. Observou-se que a condutividade térmica do concreto contendo lodo de ETA e serragem (1,89 W/m.K) foi inferior à do concreto de referência (2,46 W/m.K). Apesar da boa aderência entre a matriz da argamassa, a mistura demandou quantidades significativas de água devido à sua alta porosidade de absorção. O concreto apresentou uma resistência à tração diametral de 1,2 MPa, absorção de água de 8,8%, massa específica de 1,847 kg/m³ e resistência à compressão de 11,1 MPa, classificando-o como um concreto leve não estrutural, o que indica sua aplicabilidade na fabricação de blocos e no enchimento de lajes.

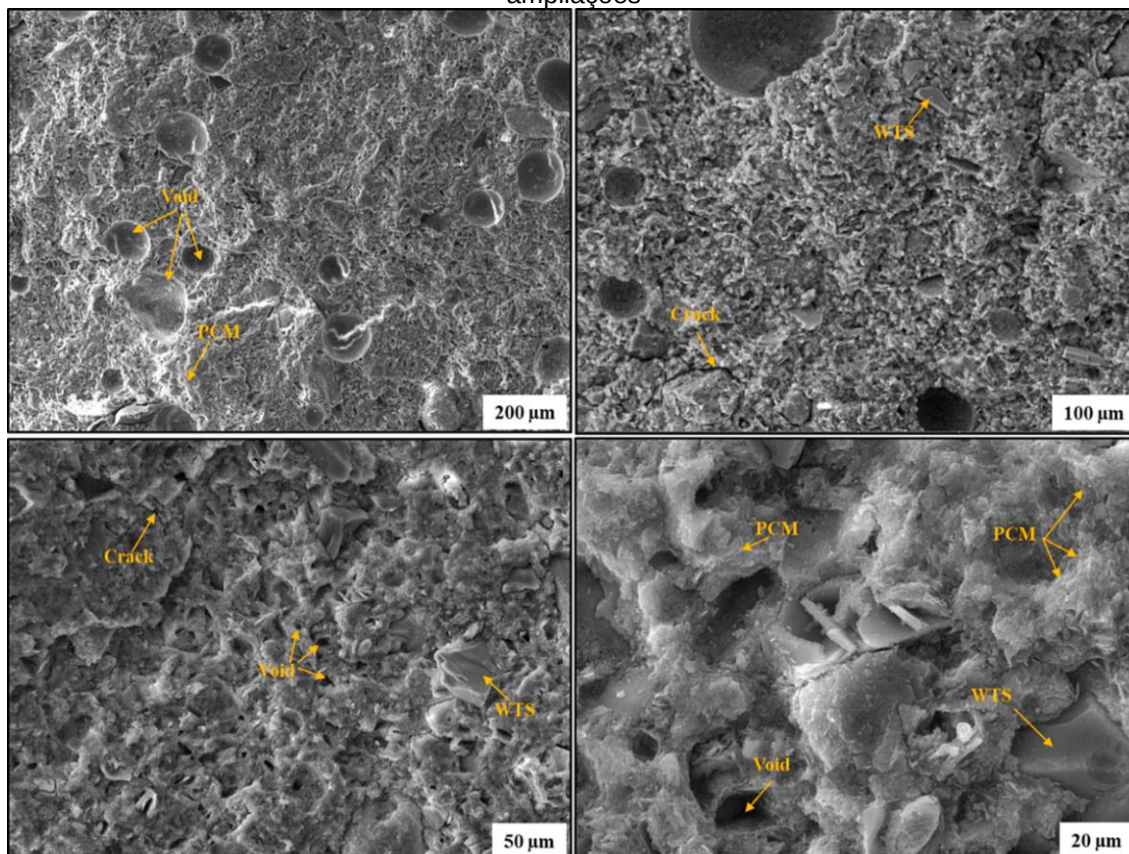
Em outro estudo, Sales *et al.* (2010) investigaram a viabilidade de um concreto utilizando um agregado gráúdo leve composto por lodo de ETA e serragem, substituindo completamente o agregado natural. Os resultados revelaram que o concreto produzido apresentou um calor específico de 839 J/kg.K, uma redução em relação ao concreto de referência (851 J/kg.K). Além disso, houve uma redução significativa na condutividade térmica do concreto, sendo 23% inferior ao concreto de referência, o que sugere sua adequação para elementos não estruturais.

Os resultados de microestrutura apresentados nos estudos de Erdogmus *et al.* (2023), He *et al.* (2023) e Liu *et al.* (2020) estão associados à análise de concretos que incorporam diferentes resíduos ou são submetidos a processos específicos, dentre os quais se detalha a seguir:

1. Erdogmus *et al.* (2023):

- Imagens de MEV revelaram a presença de vazios devido ao agente espumante utilizado na produção de concreto. Além dos vazios, foram observadas partículas de LETA revestidas com MMF (Figura 31).

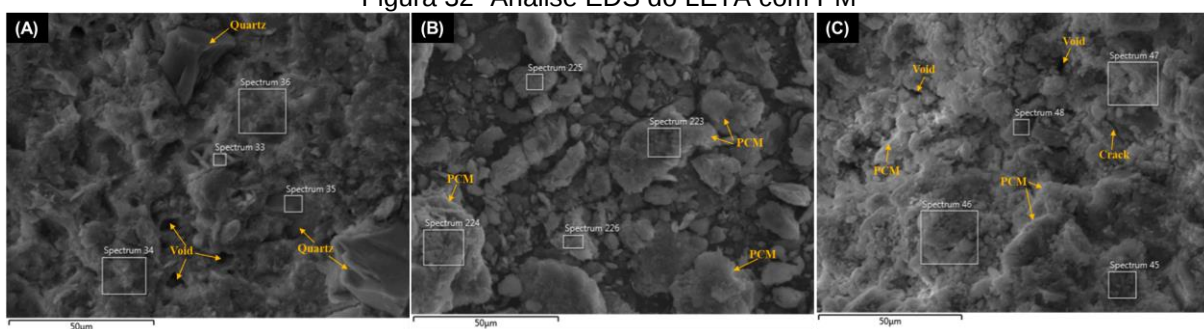
Figura 31- Imagens de MEV de concretos de espuma reforçada com LETA/MP em diferentes ampliações



Fonte: Erdogmus *et al.* (2023)

- EDS revelou a presença de elementos como Ca, Si, Al e C, sendo este último associado ao MMF. Os resultados sugerem a incorporação eficaz do compósito LETA/MP no concreto, com evidência de microfissuras e partículas de MMF nas imagens (Figura 32).

Figura 32- Análise EDS do LETA com PM

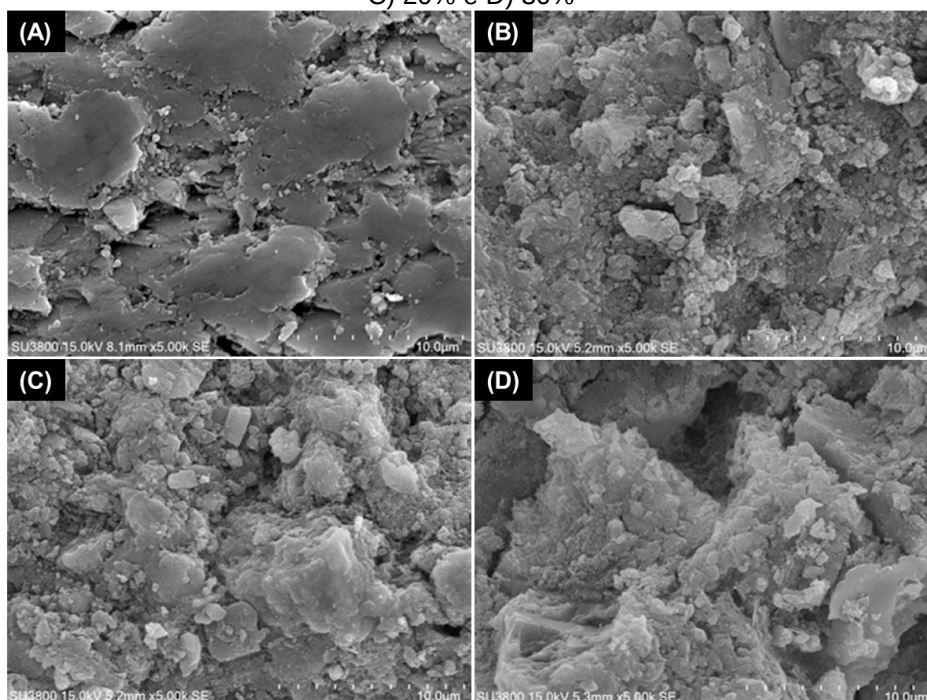


Fonte: Erdogmus *et al.* (2023)

2. He *et al.* (2023):

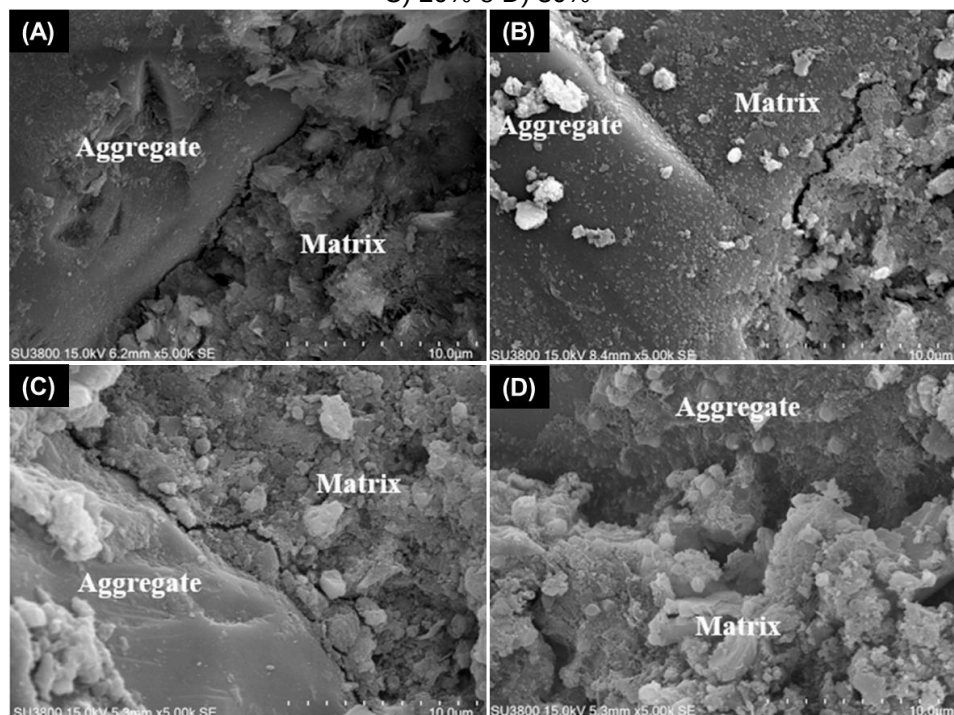
- A incorporação de uma pequena quantidade de LETA (cerca de 10%) melhora a compacidade da matriz de concreto. Entretanto, à medida que o conteúdo de LETA aumenta, a matriz torna-se mais solta e poros de grande porte podem ser encontrados na amostra, como observado no teor de 30% de substituição do lodo de ETA (Figura 33).
- Observa-se na Figura 34 o efeito do teor de LETA na ZTI. A incorporação de uma pequena quantidade de LETA melhora significativamente a compactação da ZTI, enquanto o aumento adicional do conteúdo de LETA degrada a ZTI.
- A análise de EDS revelou a presença de elementos como Ca, Si e Al.

Figura 33- Imagens de MEV de concreto com LETA aos 28 dias, nas proporções de A) 0%; B) 10%; C) 20% e D) 30%



Fonte: He *et al.* (2023)

Figura 34- Imagens de MEV de concreto com LETA aos 28 dias, nas proporções de A) 0%; B) 10%; C) 20% e D) 30%

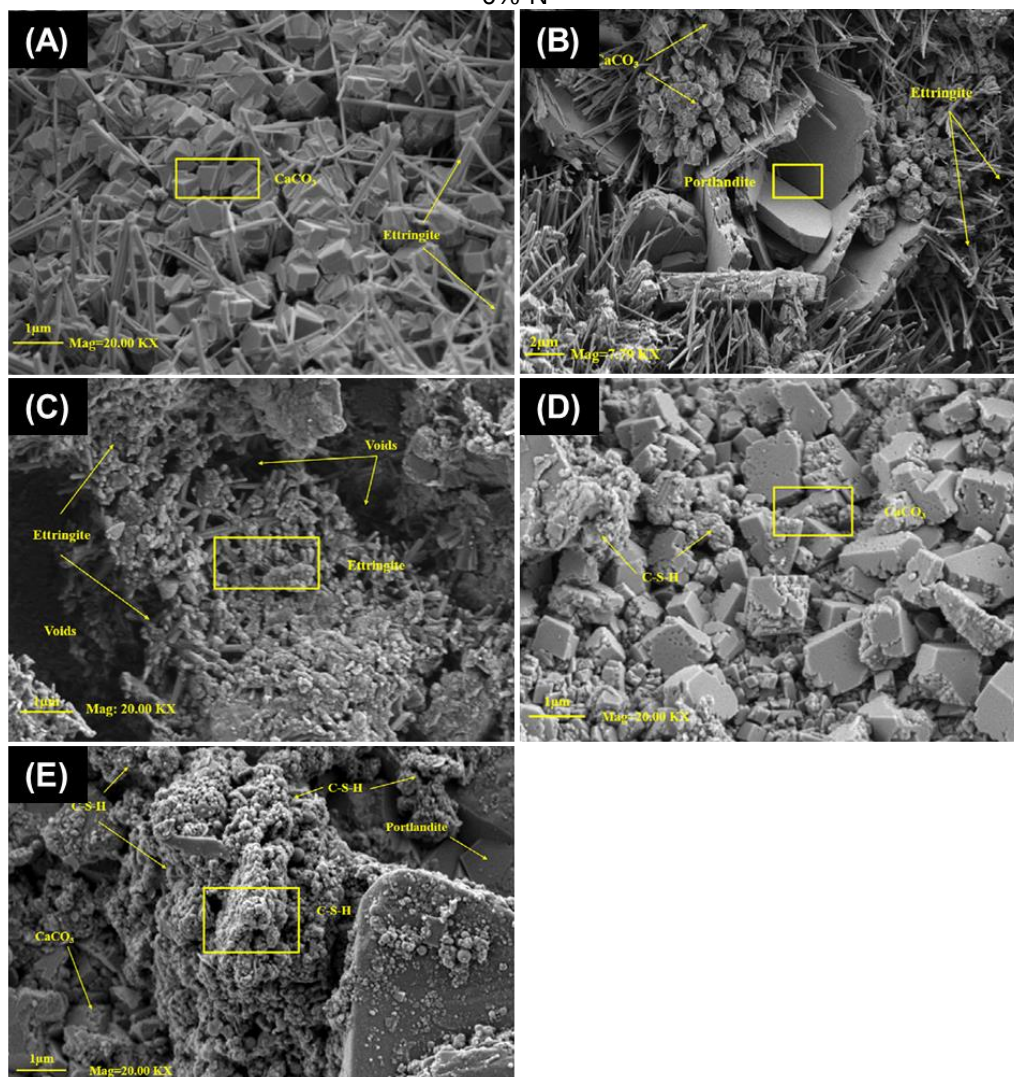


Fonte: He *et al.* (2023)

3. Liu *et al.* (2020):

- Imagens de MEV revelaram a presença de CaCO_3 na superfície fraturada do concreto carbonatado com lodo de ETA. Etringita e portlandita também foram observadas, sugerindo reações de hidratação do cimento (Figura 35).
- O CB-30-N normalmente curado apresentou etringita distribuída sobre sua superfície, enquanto o CB-30-C carbonatado mostrou menos etringita e uma pasta de cimento mais densa.
- Os resultados indicam mudanças na microestrutura do concreto devido à carbonatação e ao uso do lodo de ETA, evidenciando a influência do LETA na qualidade da matriz do concreto e na ZTI.

Figura 35- Imagens de MEV de amostras de blocos de concreto curado normalmente (N) ou por carbonatação precoce (C) com 0% e 30% de teor de LETA, A e B) 30%-C, C) 30%-N, D) 0%-C, e E) 0%-N

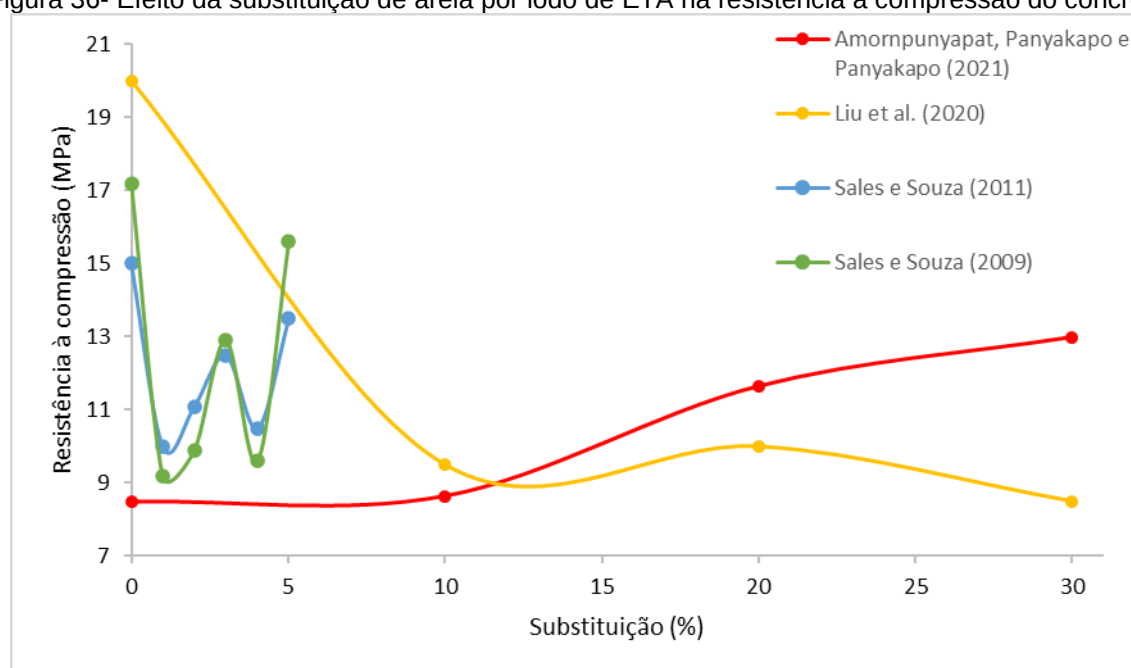


Fonte: Liu *et al.* (2020)

A análise microestrutural desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de concretos com lodo de ETA em sua composição, revelando como as adições afetam a matriz, a compacidade e as propriedades mecânicas. Essa compreensão é importante para aplicações específicas, como isolamento térmico e resistência à carbonatação. Além disso, a análise microestrutural permite avaliar a durabilidade do concreto diante de agentes agressivos, contribuindo para a otimização da formulação do concreto e ajustes precisos nas proporções e condições de cura para atingir as características desejadas.

A Figura 36 mostra os efeitos da substituição da areia por lodo de ETA na resistência à compressão de concretos, conforme bibliografias citadas.

Figura 36- Efeito da substituição de areia por lodo de ETA na resistência à compressão do concreto



Fonte: O Autor (2024).

Uma tendência consistente de aumento na resistência à compressão é observada à medida que o nível de substituição de areia por lodo de ETA aumenta em vários estudos, exceto no trabalho de Liu *et al.* (2020), que registrou uma redução significativa. Essas discrepâncias nos resultados podem ser atribuídas a diversas variáveis, incluindo metodologias experimentais distintas, composições variadas dos materiais, particularidades do lodo de ETA empregado, diferentes condições de cura do concreto e, sobretudo, ao tipo de aplicação específica para a qual o concreto foi destinado. Esse último fator é especialmente evidenciado nos estudos de Liu *et al.* (2020) e de Amornpunyapat, Panyakapo e Panyakapo (2021), que exploraram aplicações em blocos de concreto e na produção de painéis de blocos intertravados, respectivamente.

Os estudos conduzidos por Sales e Souza (2011) e Sales e Souza (2009) apresentam uma resposta mais consistente, mostrando um aumento gradual na resistência à compressão conforme o nível de substituição aumenta até um certo ponto, após o qual a resistência à compressão pode estabilizar ou diminuir. Isso sugere que o efeito do lodo de ETA na resistência à compressão é influenciado por diversos fatores, incluindo não apenas a quantidade adicionada, mas também a composição do lodo de ETA e sua interação com os outros componentes do concreto.

Diante dessas variações, destaca-se a importância de realizar estudos específicos para determinar a proporção ideal de substituição de areia por lodo de ETA, levando em consideração as características intrínsecas dos materiais utilizados e as exigências específicas para projetos de construção.

4.1.5 Cerâmicas

De acordo com Callister e Rethwisch (2016), as cerâmicas são compostos formados entre elementos metálicos e não metálicos, predominantemente óxidos, nitretos e carbetos, como o óxido de alumínio e o dióxido de silício. Alguns compostos desse tipo são denominados de cerâmicas tradicionais, ou seja, esses materiais são compostos por minerais argilosos, assim como o cimento e o vidro.

Mecanicamente, os materiais cerâmicos são rígidos e resistentes, embora historicamente a fragilidade tenha sido uma característica proeminente. Possuem baixa condutividade elétrica, são isolantes térmicos e suportam temperaturas elevadas. Em termos ópticos, podem ser transparentes, translúcidos ou opacos, além disso alguns dos óxidos cerâmicos (por exemplo, Fe_3O_4) exibem propriedades magnéticas (Callister e Rethwisch, 2016).

Alguns materiais cerâmicos têm sido desenvolvidos substituindo componentes minerais por resíduos, visando aprimorar a resistência à fratura. Utilizados em utensílios de cozinha, cutelaria, peças automotivas e na construção civil, esses materiais buscam aliar desempenho e sustentabilidade.

A similaridade química entre a argila e o lodo de ETA sugere uma alternativa à tradicional formulação de materiais de construção, promovendo a redução do impacto ambiental associado à extração de argila. A conformidade com padrões ambientais, a redução de custos associados à disposição de resíduos e a possibilidade de economia na aquisição de matérias-primas convencionais são aspectos adicionais que destacam a viabilidade ambiental dessa abordagem na indústria cerâmica.

Contudo, é fundamental garantir a qualidade e segurança do lodo de ETA para assegurar a adequação dos produtos cerâmicos finais aos padrões regulatórios locais estabelecidos. A seguir serão apresentas os trabalhos listados no Quadro 2 que estudaram o emprego do lodo de ETA em materiais cerâmicos, sendo divididos em três categorias:

- **Mix de argila e lodo de ETA**

Bandieira *et al.* (2021) realizaram uma avaliação sobre a utilização do lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) como substituto da argila, em proporções de 0%, 2%, 5%, 10% e 20% em massa. Os tijolos produzidos em escala laboratorial com LETA apresentaram resistência à compressão semelhante à dos tijolos de referência, com valores entre 14 e 16 MPa. No entanto, mesmo com desempenho mecânico semelhante, a presença do lodo de ETA aumentou a porosidade, resultando em uma maior absorção de água. É relevante destacar que, apesar da absorção de água ter sido significativamente maior com 20% de LETA, o valor estava dentro dos limites padrão estabelecidos pelas normativas vigentes.

Sverguzova, Sapronova e Fomina (2020) conduziram uma pesquisa sobre a utilização do lodo de ETA como adição na fabricação de tijolos cerâmicos. O LETA foi incorporado à argila em proporções variando de 0% a 100%, com incrementos de 10%. Observou-se que a inclusão do lodo resultou no aumento da resistência à compressão das amostras experimentais, elevando de 1,8 para 2,5 MPa.

Kizinievič e Kizinievič (2017) exploraram a utilização do lodo de ETA como matéria-prima na fabricação de tijolos cerâmicos. O lodo de ETA foi introduzido na argila em proporções variando de 5%, 10%, 20%, 40% e 60% em massa, sendo em seguida submetido à queima a uma temperatura de 1000 °C. Com a substituição de 5% de lodo de ETA à mistura de argila, o corpo cerâmico resultante exibiu uma densidade de 1807 kg/m³, resistência à compressão de 48,5 MPa, contração linear de 11,5% (após queima), absorção de água de 11,0% e porosidade total aberta de 27,6%. Por outro lado, ao incorporar 60% de lodo de ETA à mistura de argila, o corpo cerâmico apresentou uma densidade de 1140 kg/m³, resistência à compressão de 2,5 MPa, contração linear de 15,2% (após queima), absorção de água de 28% e porosidade total aberta de 62%. Além disso, o lodo de ETA atuou no corpo cerâmico como um pigmento que colore o tijolo cerâmico em um tom de vermelho mais escuro.

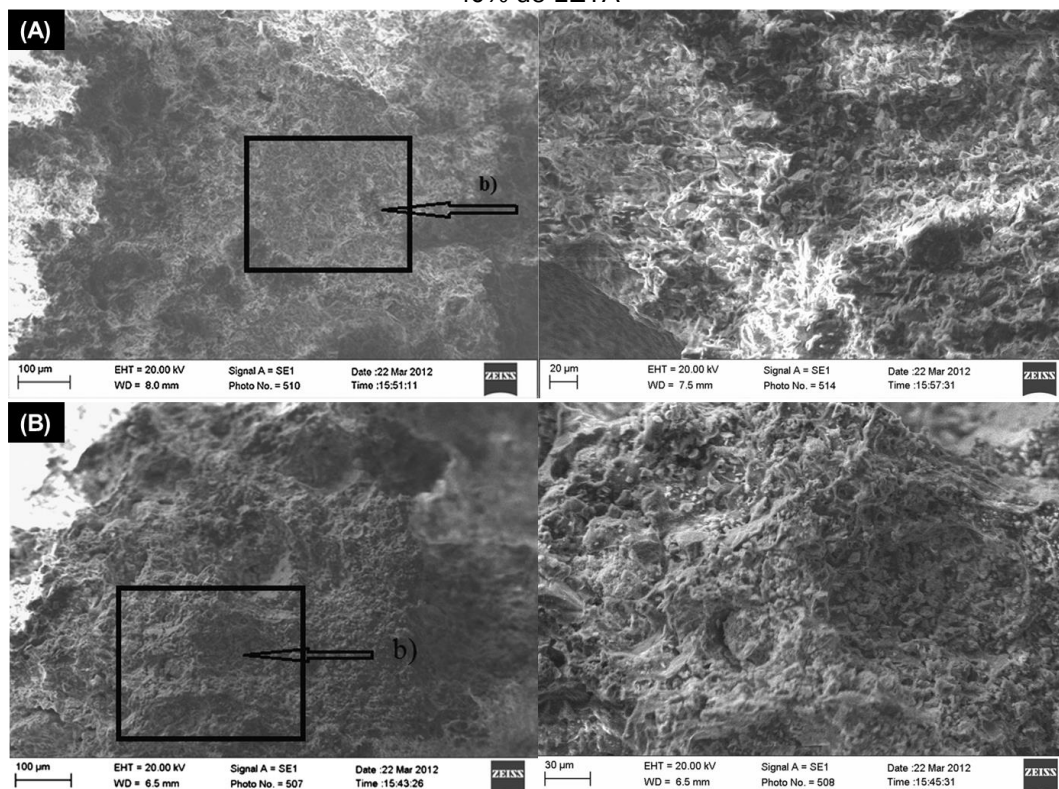
O estudo conduzido por Katte, Wouatong e Kamgang (2017) analisou os efeitos da substituição parcial do lodo ETA nas propriedades de tijolos cerâmicos. Foram criadas composições de argila-lodo, introduzindo de 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% em massa de lodo na argila. As amostras foram então calcinadas a 1050 °C por 2 horas. Os resultados apontaram que a adição de lodo de ETA causou eflorescência e que até 15% de lodo podem ser incorporados aos

tijolos, atingindo uma resistência à compressão de 11,6 MPa, superando as prescrições das normas francesas NF P13-304. Além disso, os lixiviados obtidos dos tijolos triturados mostraram baixos níveis de metais pesados, indicando que esses foram imobilizados na matriz cerâmica durante o processo de calcinação.

Nor *et al.* (2015) investigaram o uso do lodo de ETA como material na fabricação de tijolos. O lodo de ETA foi incorporado à argila em proporções que variaram de 0% a 100%, com incrementos de 20% em massa. As peças cerâmicas resultantes foram submetidas a um processo de calcinação a 600 °C por 2 horas e a 1000 °C por 3 horas. Os resultados indicaram que o tijolo contendo 100% de lodo alcançou a maior resistência à compressão, atingindo 17,123 N/mm². De acordo com a Norma Malasiana MS7.6:1972, os tijolos com teores de lodo entre 20% e 100% atendem aos requisitos gerais para utilização de tijolos na construção de paredes.

Kizinievič *et al.* (2013) realizaram uma avaliação da incorporação do lodo de ETA em produtos cerâmicos, misturando-o com argila em proporções de 0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40% em massa. As peças resultantes foram submetidas à calcinação a temperaturas entre 1000 °C e 1050 °C. Com 5% de lodo, a queima a 1000 °C ou 1050 °C resultou em um corpo cerâmico com densidade aumentada de 5% a 14%, resistência à compressão incrementada de 36% a 50%, redução da impregnação de água de 33% a 60%, e aumento da porosidade efetiva de 19% a 45%. A substituição de 40% de lodo gerou um corpo cerâmico com densidade diminuída de 10% a 22%, resistência à compressão reduzida de 43% a 49%, aumento da impregnação de água de 70% a 100%, e incremento na porosidade efetiva em cerca de 55%. Foi constatado também que o aditivo, composto principalmente por Fe₂O₃ colorífico, pode ser utilizado como um pigmento natural que colore o corpo cerâmico em um tom de vermelho mais escuro e intenso. A adição de LETA resultou em uma microestrutura mais porosa e em maior densidade de poros nos tijolos, afetando as propriedades físicas como a porosidade (Figura 37).

Figura 37- Imagens de MEV dos tijolos cerâmicos calcinados a 1050 °C com A) 5% de LETA e B) 40% de LETA



Fonte: Kizinievič *et al.* (2013)

- **Mix de argila, lodo de ETA e outros resíduos**

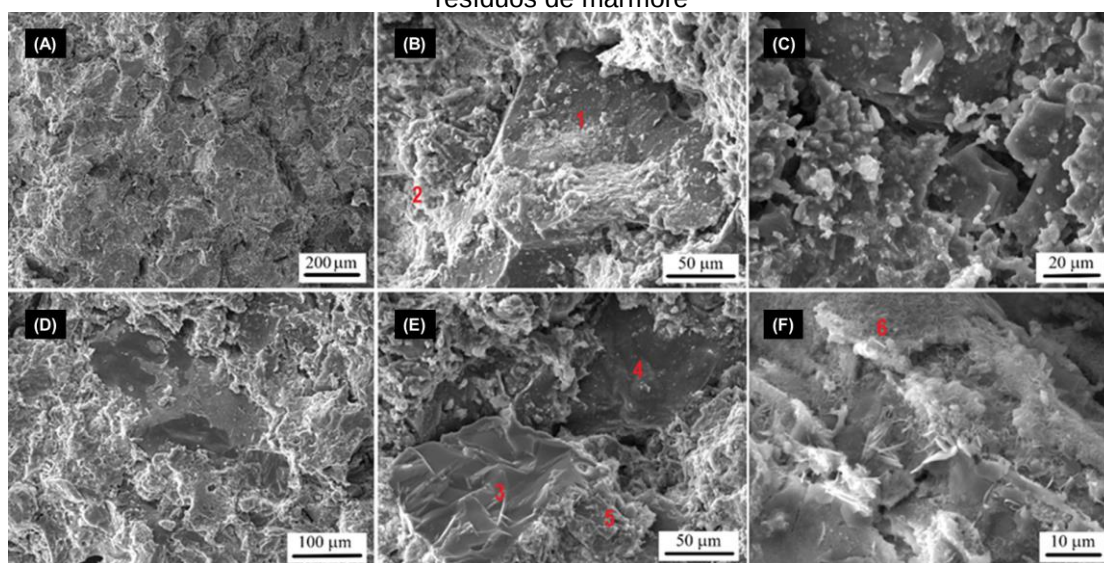
Estudos recentes, como o de Seddik *et al.* (2022), apresentam uma análise do desempenho térmico de tijolos fabricados a partir da mistura de argila, lodo de ETA em diferentes proporções (35%, 40%, 45% e 50%), e cinza de bagaço de cana. Destacam-se melhorias significativas na condutividade térmica em comparação com os tijolos convencionais fabricados no Egito. Os resultados experimentais revelam que a condutividade térmica dos tijolos variou de 0,11 a 0,26 W/m.K, enquanto os tradicionais variaram de 0,33 a 1,6 W/m.K. Esses resultados sugerem que os tijolos produzidos a partir dessa mistura têm potencial para contribuir para a sustentabilidade na construção, reduzindo o consumo de energia, conforme demonstrado em simulações utilizando o software EnergyPlus.

Em uma pesquisa conduzida por Gencel *et al.* (2021), foram analisadas as propriedades físicas, mecânicas e térmicas de tijolos, que foram confeccionados com lodo de ETA, vidro e mármore. Diferentes composições foram testadas, variando a quantidade do lodo de ETA de 70% a 100%, com adições de vidro variando de 3% a 15% e mármore em 15%. Os resultados indicaram que todos os tijolos fabricados apresentaram uma absorção de água situada na faixa de 5,3% a

12,6%, classificando-os como tijolos de primeira classe e resistentes a condições climáticas severas, de acordo com as normas ASTM C373-18 e ASTM C62-17, respectivamente. A condutividade térmica e porosidade dos tijolos foram observadas em 1,014 W/mK e 11%, respectivamente. Além disso, a resistência à compressão e a densidade aparente de todas as amostras de tijolos atendem às obrigações do código internacional de construção.

A microestrutura dos tijolos variou de acordo com as diferentes composições, exercendo influência direta sobre a porosidade e densidade dos materiais. A análise por EDS revelou a presença de quartzo e anortita desempenhando um papel determinante na configuração microestrutural e nas propriedades dos tijolos. Na Figura 38, é possível observar uma amostra de tijolo composta por 70% de lodo de ETA, 15% de vidro e 15% de resíduos de mármore, apresentando uma microestrutura homogênea e densa. Por outro lado, são evidenciados vazios irregulares e interligados.

Figura 38- Imagens de MEV de tijolo incorporando 70% do lodo de ETA, 15% de vidro e 15% de resíduos de mármore



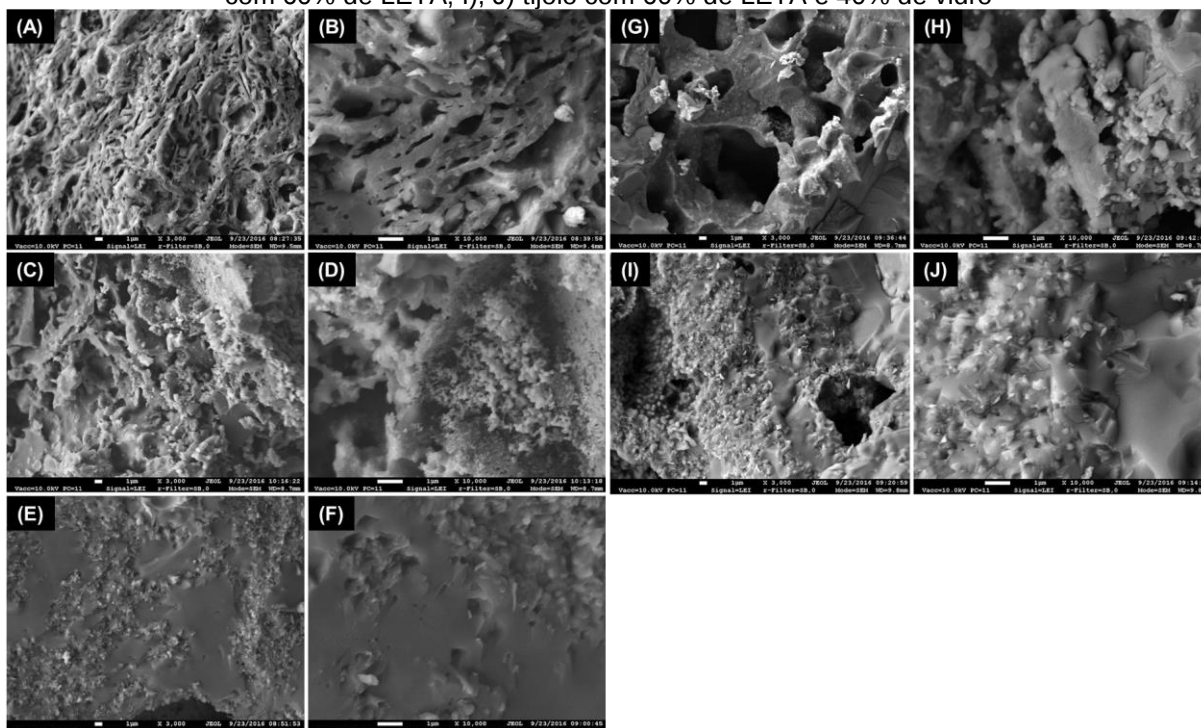
Fonte: Gencel *et al.* (2021)

Starostina, Shevtsova e Starostina (2019) investigaram a produção de cerâmicas de parede, obtidas a partir da incorporação do lodo de ETA com substituições de 1%, 3%, 5%, 7%, 10%, 15% e 20% em massa e derivados de óleo emulsionado. Durante a queima de amostras cerâmicas com lodo de ETA a 950 °C observou-se a oxidação dos produtos de óleo emulsionado, resultando na formação de produtos gasosos como CO, H₂O e CO₂, tornando a estrutura dos materiais

cerâmicos porosa. Os produtos cerâmicos obtidos com o uso de LETA apresentam potencial de utilização como material de construção e isolante térmico em estruturas de fechamento, bem como na instalação de divisórias internas.

O estudo realizado por Kizinievič *et al.* (2018) abordou a utilização combinada de lodo de ETA e resíduos de vidro na fabricação de tijolos cerâmicos. O lodo de ETA foi integrado à argila em proporções variando de 40% a 60%, enquanto o vidro foi adicionado em uma faixa de 10% a 40% em massa. A queima dessas peças cerâmicas ocorreu em temperaturas de 900 e 1000 °C. Os resultados obtidos indicam que a inclusão do lodo de ETA e vidro como aditivos proporciona melhorias nas propriedades físico-mecânicas dos produtos cerâmicos, resultando em um aumento na densidade (de 1035 a 1470 kg/m³) e na resistência à compressão (de 6 a 14,4 MPa). A adição do lodo de ETA resultou em uma microestrutura mais porosa e em maior densidade de poros nos tijolos, afetando as propriedades físicas, como a densidade aparente e a resistência à compressão (Figura 39).

Figura 39- Microestrutura dos corpos cerâmicos após queima à temperatura de 1000 °C: A), B) tijolo de referência; C), D) tijolo com 40% LETA; E), F) tijolo com 40% de LETA e 40% de vidro; G), H) tijolo com 60% de LETA; I), J) tijolo com 60% de LETA e 40% de vidro



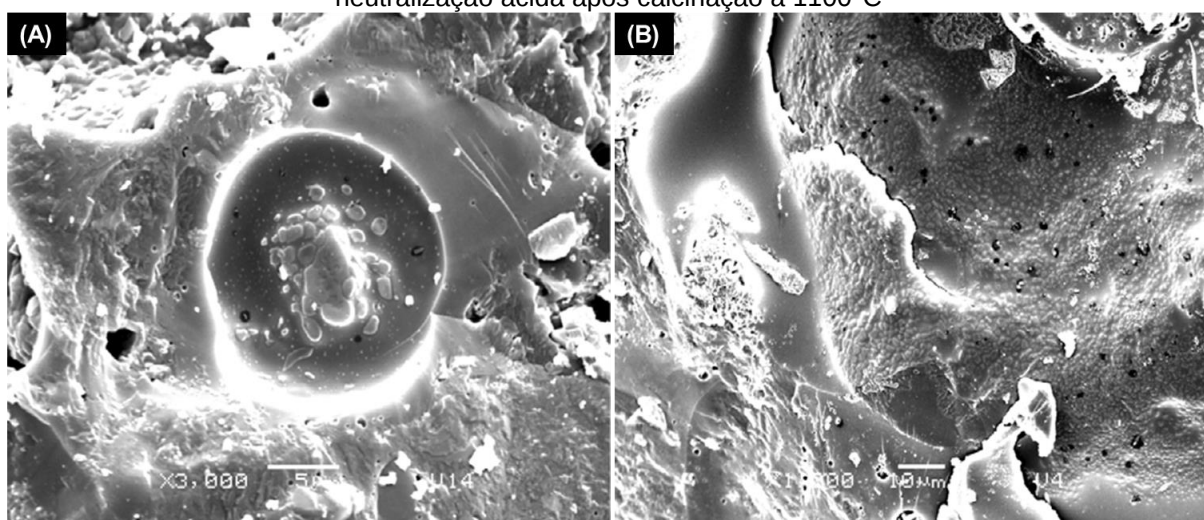
Fonte: Kizinievič *et al.* (2018)

Mymrin *et al.* (2017) desenvolveram cerâmicas a partir da substituição de até 60% em massa do lodo de ETA em conjunto com sais de neutralização ácida,

resíduos de vidro e uma mistura de argila e areia. O teor dos componentes nas misturas varia dentro das seguintes faixas: lodo de ETA entre 30% e 50% em massa, vidro entre 15% e 25%, sais de neutralização ácida entre 15% e 25% e a mistura de argila-areia entre 15% e 30%. As amostras foram calcinadas a temperaturas de 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C e 1100 °C por 6 horas. As cerâmicas desenvolvidas apresentaram resistência à flexão 2,5 vezes superior à das cerâmicas de referência. Além disso, os ensaios de espectroscopia de absorção atômica mostraram um baixo nível de contaminação das soluções lixiviadas em comparação aos requisitos estabelecidos pelas normas ambientais brasileiras.

A microestrutura das amostras de tijolos de argila com adição de LETA foi investigada, mostrando um aumento na porosidade dos tijolos, resultando em maior absorção de água e melhor isolamento térmico, conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 40- Imagens de MEV das amostras com 50% de LETA, 25% de vidro e 25% de sais de neutralização ácida após calcinação a 1100°C



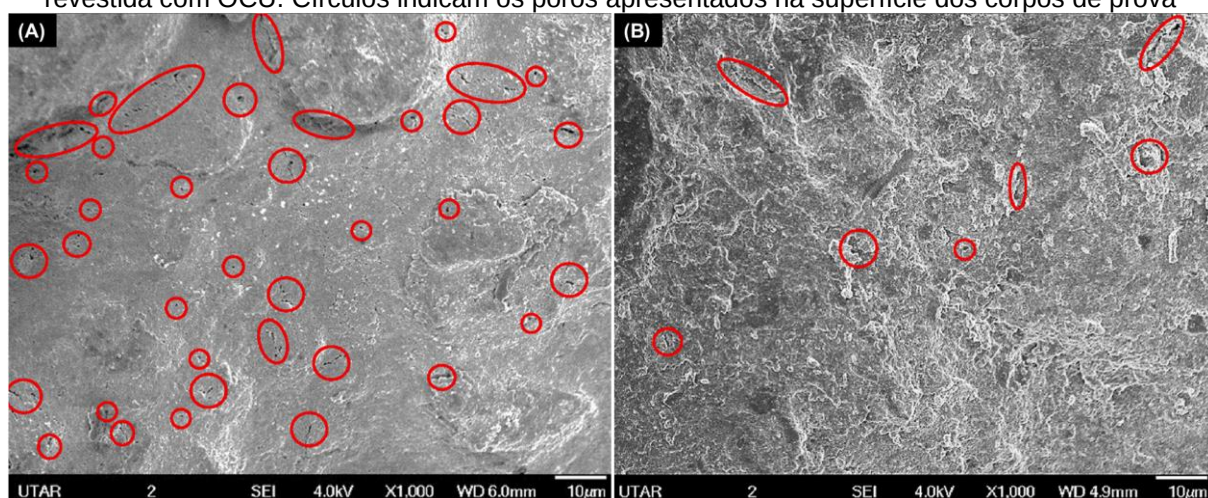
Fonte: Mymrin *et al.* (2017)

- **Mix do lodo de ETA e outros resíduos**

O estudo de Teoh *et al.* (2022) aborda a produção de telhas a partir da reciclagem do lodo de ETA e de um subproduto oleoquímico, conhecido como alcatrão de glicerina. O lodo de ETA foi calcinado a 300 °C por 2 horas e utilizado nas proporções de 15%, 20%, 25% e 30% na mistura. As telhas apresentaram densidade aparente na faixa de 320-1920 kg/m³, atenderam aos requisitos mínimos de resistência mecânica para telhas de alto e médio perfil e tiveram uma baixa absorção de água de 4,32%.

O estudo também investigou a microestrutura de materiais não revestidos e revestidos com uma camada de óleo de cozinha usado (OCU) coletado em restaurantes. O material não revestido mostrou fissuras e poros na superfície, aumentando a taxa de penetração de água. A camada de OCU criou uma superfície enrugada, minimizando a adesão da água. Isso demonstra como a microestrutura pode influenciar a resistência à penetração de água e a eficácia de revestimentos protetores (Figura 41).

Figura 41- Imagens de MEV da morfologia da superfície da amostra A) não revestida com OCU e B) revestida com OCU. Círculos indicam os poros apresentados na superfície dos corpos de prova

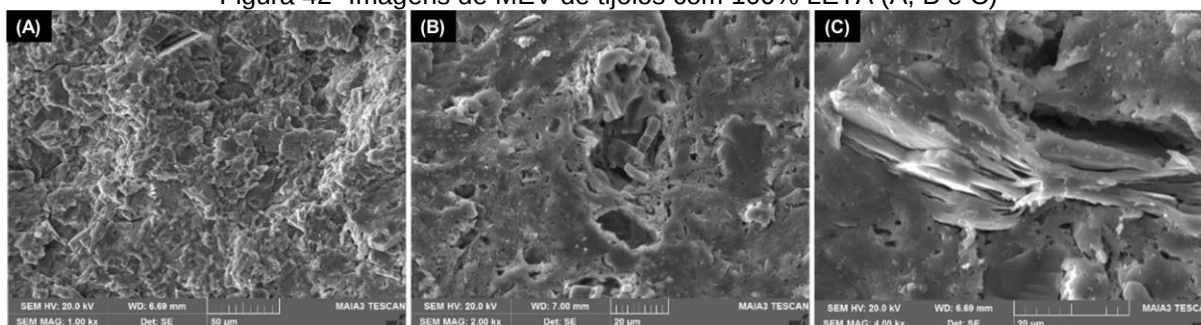


Fonte: Teoh *et al.* (2022)

Gencel *et al.* (2022) investigaram a utilização do lodo de ETA e resíduos de concretos na fabricação de tijolos. O lodo de ETA foi empregado nas proporções de 80% a 100% com incrementos de 5%, e os resíduos de concretos variaram de 0% a 20%. A densidade aparente dos tijolos queimados com 5% a 20% de conteúdo de concretos variou de 1,72 a 2,10 g/cm³, a resistência à compressão variou de 8,9 a 20,2 MPa, a absorção de água de 7,9 a 17,5%, e a condutividade térmica de 0,889 a 0,659 W/m K. Adicionalmente, a interação entre os resíduos de concreto e o lodo de ETA durante o processo de queima conduziu à formação de novas fases cristalinas, evidenciando a complexa inter-relação entre os materiais.

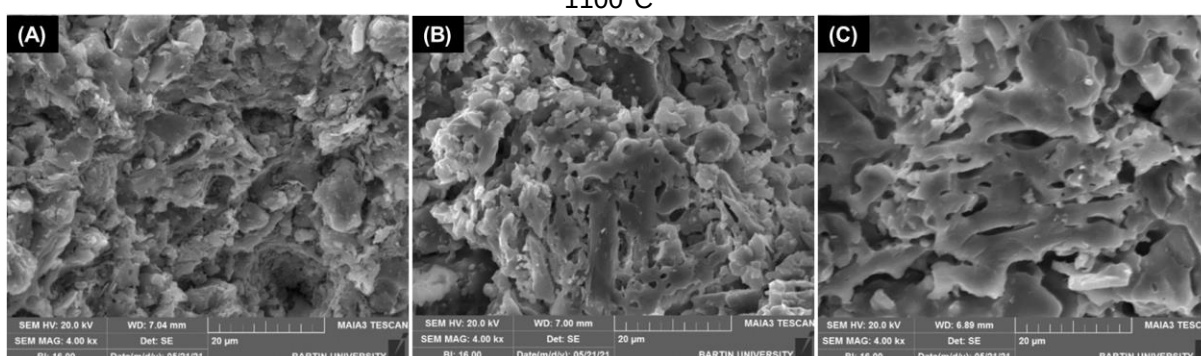
Por exemplo, a Figura 42 ilustra imagens MEV de tijolos com 100% do lodo de ETA, revelando uma estrutura homogênea e densa. Essa uniformidade ressalta o potencial de produção de tijolos com propriedades aprimoradas mediante a incorporação do lodo de ETA, constituindo uma valiosa contribuição para a evolução de práticas construtivas mais ecológicas.

Figura 42- Imagens de MEV de tijolos com 100% LETA (A, B e C)

Fonte: Gencel *et al.* (2022)

O estudo de Sutcu *et al.* (2022) abordou os efeitos da combinação de lodo de ETA nas proporções de 60%, 70%, 80%, 90%, 95% e 100% e cinza de resíduos sólidos urbanos (0% a 40%) para a fabricação de tijolos. A incorporação de 10% em massa das cinzas de resíduos sólidos resultou em tijolos queimados com menor porosidade aparente e absorção de água. No entanto, a densidade aparente e a resistência à compressão diminuíram em comparação com tijolos com 100% de lodo de ETA queimados de 900 a 1100 °C. Além disso, os tijolos demonstraram uma distribuição uniforme de poros, uma microestrutura densa (Figura 43), baixa condutividade térmica em comparação com os tijolos convencionais, resistência à ação do gelo-degelo e baixa taxa de lixiviação de metais pesados, tornando-os adequados para construção.

Figura 43- Imagens de MEV (4000x) de tijolo com 100% do lodo de ETA: a) 900 °C; B) 1000 °C; C) 1100°C

Fonte: Sutcu *et al.* (2022)

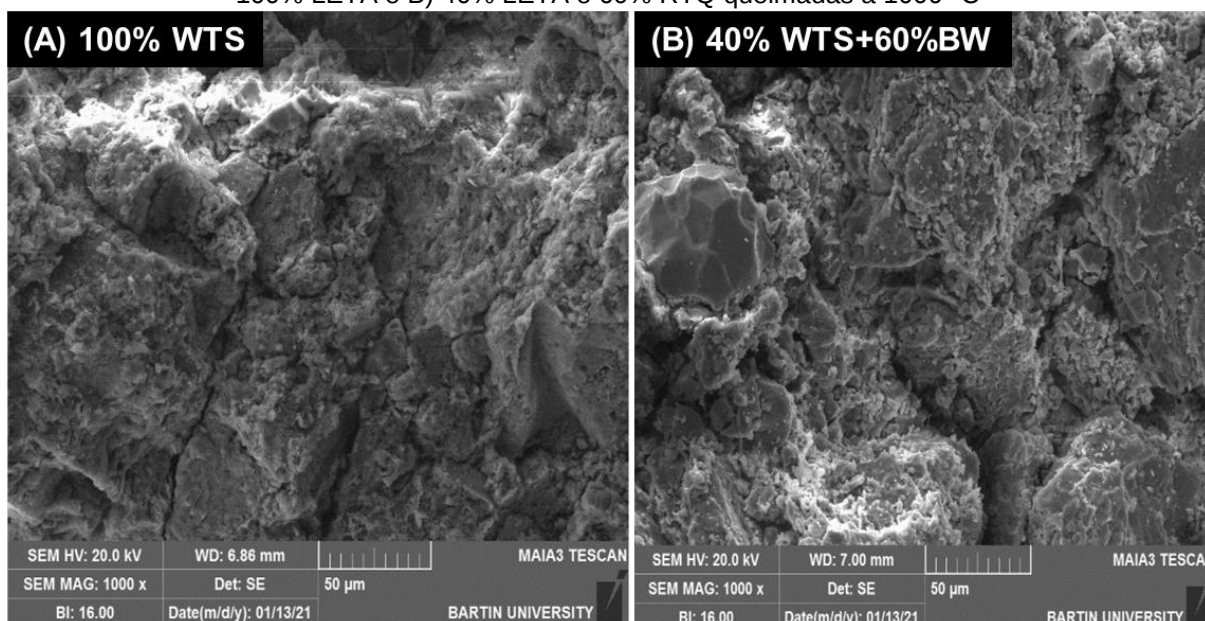
A pesquisa de Harja *et al.* (2022) abordou a produção e caracterização de tijolos sem argila, utilizando lodo de ETA nas proporções de 70%, 75%, 80%, 85%, 90% e 100% e cinza de madeira de carvalho (CMC) com substituições de 0% a 30% como matérias-primas. Os tijolos contendo 80% em massa de lodo de ETA e 20% em massa de CMC atenderam aos requisitos padrão para materiais de alvenaria de

argila. No entanto, os tijolos com maior teor de CMC (30%) mostraram uma estrutura mais porosa e presença de microfissuras devido a diferenças na expansão térmica, contribuindo assim para a diminuição da resistência à compressão.

Erdogmus *et al.* (2021) produziram tijolos com lodo de ETA e resíduos de tijolos queimados (RTQ). As proporções de lodo de ETA foram de 25%, 40%, 55%, 70%, 85% e 100% em massa da mistura. Observou-se que os tijolos obtidos com mais de 75% e 60% de RTQ, respectivamente, tinham menor resistência à compressão em comparação com os tijolos obtidos apenas a partir do lodo de ETA. Os tijolos contendo 70% a 85% do lodo de ETA têm características adequadas e podem ser efetivamente utilizados como materiais de construção.

A Figura 44 apresenta as características morfológicas das amostras, sendo A) 100% de LETA e B) 40% de LETA e 60% de RTQ. A microestrutura do tijolo com 40% de LETA difere daquela com 100% de LETA, evidenciando variações na estrutura porosa.

Figura 44- Imagens de MEV em diferentes ampliações de superfícies de fratura das amostras A) 100% LETA e B) 40% LETA e 60% RTQ queimadas a 1000 °C



Fonte: Erdogmus *et al.* (2021)

4.1.6 Geopolímeros

Os geopolímeros são usualmente constituídos por um sólido reativo que contém óxidos de silício e alumínio, combinado a uma solução básica de ativação formada por hidróxidos ou silicatos alcalinos.

Na construção civil, esses materiais emergem como uma alternativa ao cimento Portland, destacando-se por sua menor emissão de CO₂, maior durabilidade e resistência. Além disso, encontram aplicação em materiais refratários, isolamento térmico, revestimentos protetores e estabilização de solo, proporcionando soluções diversas para a engenharia civil. Sua capacidade de reciclar subprodutos industriais também desempenha um papel importante na redução de resíduos e na promoção da sustentabilidade.

O lodo de ETA é composto por óxidos de silício e alumínio, logo, mostra a capacidade de ser utilizado na produção de geopolímeros. Essa incorporação do lodo de ETA em geopolímeros emerge como uma solução estratégica para impulsionar a sustentabilidade ambiental no setor da construção civil. Ao gerenciar de forma eficiente os resíduos, essa prática não apenas contribui para a redução do impacto ambiental, mas também oferece a vantagem de diminuir custos por meio da reutilização de subprodutos já disponíveis na ETA. A seguir são apresentados os trabalhos encontrados na revisão com o lodo de ETA incorporado no geopolímero, dividido em dois grupos, o primeiro referente ao lodo de ETA calcinado em diferentes temperaturas e o segundo com o lodo de ETA utilizado com outros resíduos, com destaque para a cinza volante, conforme apresentado a seguir:

- **Calcinado em diferentes temperaturas:**

Santos *et al.* (2021) desenvolveram uma argamassa geopolimérica utilizando lodo de ETA calcinado a 750 °C por 6 horas e fibra de sisal. As amostras de referência da argamassa (0 ciclos) demonstraram uma resistência à flexão máxima de 15 MPa, enquanto as amostras envelhecidas (10 ciclos) alcançaram 11 MPa. Observou-se, portanto, uma diminuição de 26,7% na resistência à flexão das amostras envelhecidas, indicando uma durabilidade satisfatória da argamassa quando exposta a ciclos de umedecimento e secagem.

Por sua vez, Iamchaturapatr e Piriyaikul (2020) investigaram a utilização do lodo de ETA como matéria-prima na produção de geopolímeros. O lodo de ETA foi calcinado em diferentes temperaturas (105 °C, 500 °C, 650 °C e 850 °C) por 1 hora. O lodo de ETA calcinado a 850 °C por 1 hora demonstrou a maior resistência em todos os períodos de cura. Além disso, ao fabricar um geopolímero de lodo de ETA em forma de placa sólida, foi realizado um teste de redução de ruído em diversas frequências sonoras (1000 a 10000 Hz), no qual o geopolímero apresentou uma

eficiência média de redução de ruído de aproximadamente 63,5%, equivalente ao desempenho de um tijolo comercial.

O estudo conduzido por Geraldo, Fernandes e Camarini (2017) abordou a produção de argamassas geopoliméricas utilizando lodo de ETA não calcinado em substituição parcial ao metacaulim, nas proporções de 0%, 15%, 30% e 60% em massa. Os resultados indicaram que o lodo de ETA reduziu a fluidez, a resistência à compressão e à flexão, além de aumentar a porosidade e a permeabilidade da argamassa. No entanto, a substituição de 15% do metacaulim pelo lodo de ETA resultou em uma resistência à compressão de 25 MPa aos 28 dias

Nimwinya *et al.* (2016) avaliaram a produção de um ligante geopolimérico utilizando lodo de ETA calcinado a 600 °C por 2 horas e cinza da casca de arroz, com um ativador alcalino composto por uma mistura de Na_2SiO_3 e NaOH . Os resultados mostraram que a densidade dos geopolímeros foi consistentemente três vezes menor que a do CPC. A proporção ideal da razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ para a maior resistência situou-se entre 4,9 e 5,9 para condições de cura a temperatura ambiente (27-30 °C) e a 60 °C. Nessas condições ótimas, os compósitos geopoliméricos atingiram 19 MPa de resistência à compressão.

O estudo de Poowancum, Nimwinya e Horpibulsuk (2015) concentrou-se no desenvolvimento de um geopolímero utilizando lodo de ETA calcinado a 600 °C por 2 horas e cinza de casca de arroz como materiais principais. Os resultados indicaram que a adição de cinza de casca de arroz contribuiu positivamente para a resistência do geopolímero derivado do lodo de ETA. Com a inclusão de 30% em massa de cinza de casca de arroz, a resistência do geopolímero aproximou-se da resistência mínima exigida pelo CPC. Além disso, ressaltou-se que a densidade do geopolímero desenvolvido foi três vezes menor do que a do cimento Portland.

- **Mix do lodo de ETA com outros resíduos:**

Ho, Orbecido e Promentilla (2018) realizaram uma investigação sobre um sistema geopolimérico utilizando lodo de ETA e cinzas volantes. Os resultados revelaram que um teor elevado de álcalis resultou na diminuição da resistência à compressão do ligante. Adicionalmente, a pesquisa buscou otimizar a formulação para a produção do geopolímero, identificando a combinação ideal de 18,9% de lodo de ETA, 76,1% de cinzas volantes e 5,0% de NaOH . Essa combinação demonstrou maximizar a resistência à compressão e reduzir a massa unitária das amostras,

alcançando valores de 8,98 MPa para resistência à compressão e 1877,7 kg/m³ para massa unitária na condição ótima.

Por outro lado, Orbecido *et al.* (2018) concentraram-se no desenvolvimento de um geopolímero utilizando lodo de ETA e cinzas volantes. As propriedades desse novo material foram comparadas com as amostras de referência que foram curadas em água. Os resultados do teste de resistência a ácidos confirmaram a notável durabilidade do ligante contra ataques de ácido sulfúrico, com a massa das amostras praticamente inalterada mesmo após 28 dias de imersão em solução ácida. Além disso, a resistência à compressão não apenas permaneceu constante, mas também mostrou um aumento significativo com o tempo de cura.

Suksiripattanapong *et al.* (2017) realizaram a produção de geopolímeros utilizando lodo de ETA e resíduos de carbetto de cálcio (RCC), com variação de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em massa em relação ao peso seco do lodo de ETA, para avaliação como unidades de alvenaria não estrutural. Os resultados obtidos indicaram que as proporções ideais de ativador alcalino líquido/RCC proporcionaram a máxima redução na massa unitária para diferentes teores de RCC, com valores ótimos de 16, 8, 5,33, 4, 3,2 e 2,67 para RCC variando de 5% a 30%, respectivamente. Além disso, a razão de Na₂SiO₃:NaOH de 70:30 resultou na maior massa unitária e resistência à compressão entre as razões testadas para a combinação de lodo de ETA e RCC.

O estudo conduzido por Horpibulsuk *et al.* (2016) concentrou-se na produção de um geopolímero utilizando lodo de ETA e cinzas volantes, com o objetivo de desenvolver unidades de alvenaria. O ativador alcalino líquido foi uma combinação de Na₂SiO₃ e NaOH. Os resultados do teste cíclico de umedecimento e secagem indicam que o geopolímero, fabricado com uma composição ótima (ativador alcalino:cinza volante= 1,6, Na₂SiO₃:NaOH= 90:10) e sob condições térmicas ideais, de 85 °C por 72 horas, pode ser empregado como uma unidade de alvenaria durável, apresentando resistência à compressão superior a 12 MPa após 12 ciclos de umedecimento e secagem.

Suksiripattanapong *et al.* (2015) investigaram um geopolímero composto por lodo de ETA e cinzas volantes, utilizando uma mistura de solução de Na₂SiO₃ e NaOH como ativador alcalino líquido. Os resultados ressaltaram a importância da proporção ideal entre o ativador alcalino e as cinzas volantes para alcançar a máxima resistência e massa unitária do material. Além disso, foi observada uma

influência significativa da temperatura e duração do aquecimento no desenvolvimento da resistência. A formulação ideal, que proporciona a máxima massa unitária e resistência, consiste em uma proporção de $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ de 80:20 e uma relação entre o ativador alcalino e as cinzas volantes de 1,3, independentemente das condições térmicas e do tempo de cura. Os resultados indicaram que a temperatura de 75 °C e o período de 72 horas de aquecimento foram identificados como as condições ideais para o desenvolvimento da resistência do material.

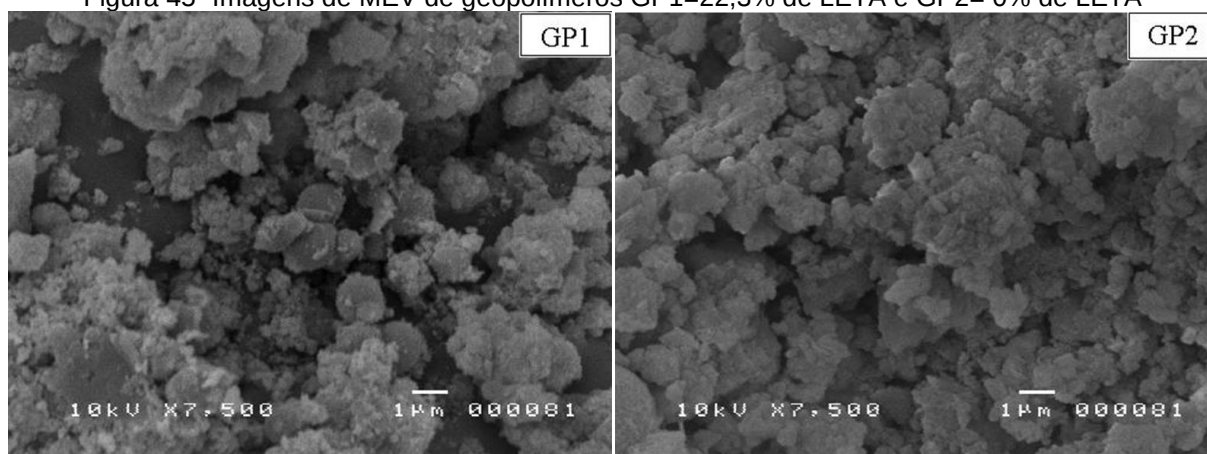
Em outra pesquisa desenvolvida por Suksiripattanapong *et al.* (2015), o foco foi o desenvolvimento da resistência em unidades de alvenaria geopolimérica feitas a partir de lodo de ETA e cinzas volantes. A resistência das unidades de alvenaria geopolimérica variou entre 12 e 20 MPa, dependendo da duração do aquecimento, sendo que o desenvolvimento da resistência se mostrou insignificante após 72 horas.

A realização de ensaios microestruturais em geopolímeros com lodo de ETA é essencial para obter informações detalhadas sobre a composição e interação dos materiais em nível microscópico. Esses ensaios proporcionam uma visualização direta da microestrutura, permitindo a identificação de fases, avaliação da homogeneidade, detecção de defeitos e estudo da interface entre os componentes. Além de contribuir para a otimização da formulação do geopolímero, a análise microestrutural valida modelos teóricos, impulsiona a busca por soluções sustentáveis e promove o reaproveitamento de resíduos industriais em materiais de construção. Os resultados dos estudos dos autores analisados fornecem uma visão abrangente das microestruturas de geopolímeros que incorporam lodo de ETA em sua constituição, destacando como vários parâmetros influenciam essas microestruturas, como apresentados a seguir:

1. **Orbecido *et al.* (2018)** - Mix com outros resíduos

- Observaram que a cinza volante e o lodo de ETA apresentavam microestruturas distintas.
- A transformação do geopolímero resultou na redução das microesferas típicas da cinza volante (Figura 45), sugerindo que o NaOH atacou as microesferas, enfraquecendo ou destruindo-as.

Figura 45- Imagens de MEV de geopolímeros GP1=22,3% de LETA e GP2= 0% de LETA

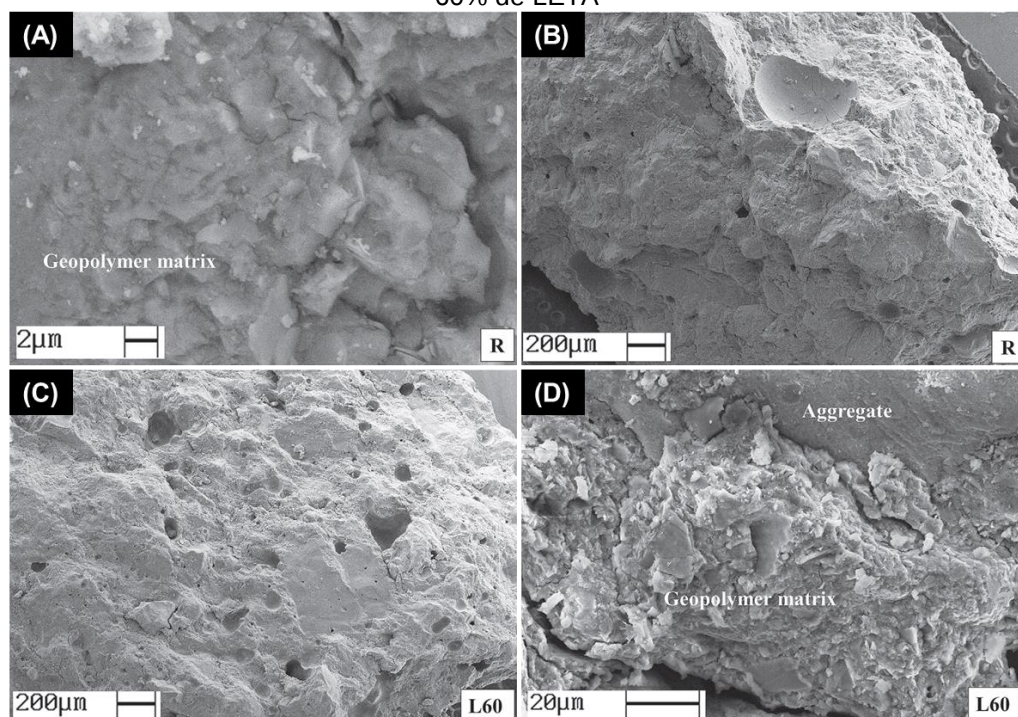


Fonte: Orbecido *et al.* (2018)

2. **Geraldo, Fernandes e Camarini (2017)** - Calcinado em diferentes temperaturas

- Notaram que o uso de LETA resultou em maior porosidade e cavidades maiores na matriz de geopolímero quando comparado à matriz de referência (Figura 46).

Figura 46- Imagens de MEV aos 28 dias de argamassas geopoliméricas de A e B) referência e C e D) 60% de LETA

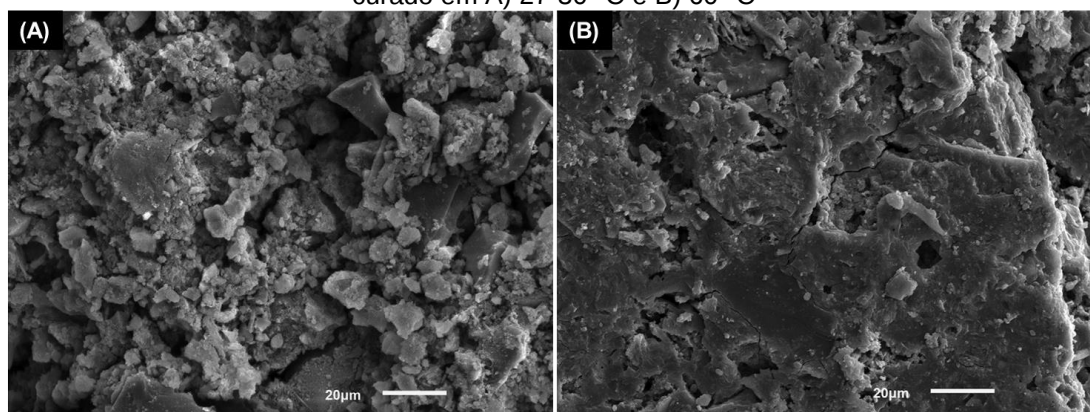


Fonte: Geraldo; Fernandes; Camarini (2017)

3. **Nimwinya *et al.* (2016)** - Calcinado em diferentes temperaturas

- Mostraram que amostras curadas a temperaturas mais elevadas resultaram em matrizes mais densas, com menor porosidade (Figura 47). A maior porosidade observada em amostras curadas à temperatura ambiente está associada à menor densidade e à presença de partículas não reagidas de LETA.

Figura 47- Imagens de MEV do geopolímero nas proporções LETA/cinza da casca de arroz= 50:50 curado em A) 27-30 °C e B) 60 °C

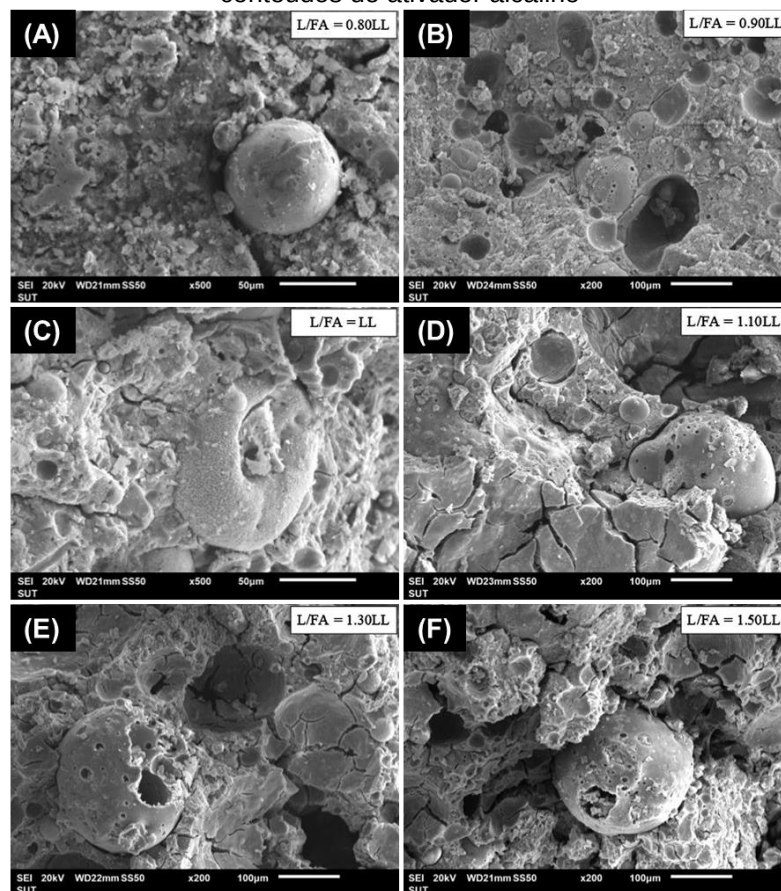


Fonte: Nimwinya *et al.* (2016)

4. **Suksiripattanapong *et al.* (2015)** - Mix com outros resíduos

- Investigaram a influência de diferentes razões ativador alcalino/cinza volante e a proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ nas microestruturas e na resistência dos geopolímeros. Suas observações sobre a influência de diferentes valores de ativador alcalino na reação de geopolimerização e na resistência são relevantes para a discussão dos resultados microestruturais (Figura 48);
- Destacaram a importância de atingir a proporção ideal $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, que foi de 80:20;
- Também mencionaram que altos valores de ativador alcalino podem resultar em menor resistência devido a microfissuras e maior distância entre as partículas, o que está relacionado com as observações sobre a influência da razão ativador alcalino/cinza volante nas microestruturas dos geopolímeros.

Figura 48- Imagens de MEV de amostras do geopolímero curadas por 7 dias com diferentes conteúdos de ativador alcalino

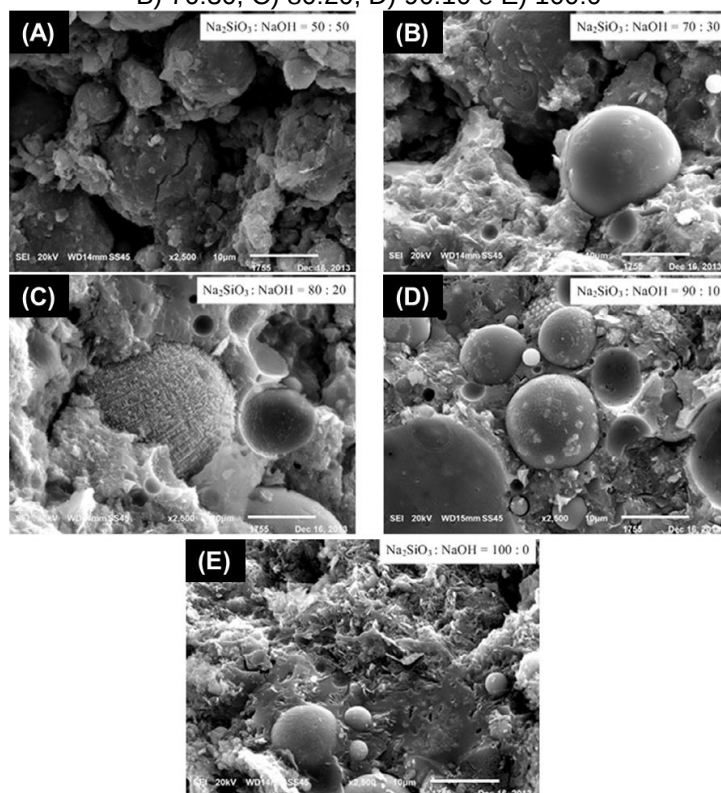


Fonte: Suksiripattanapong *et al.* (2015)

5. Suksiripattanapong *et al.* (2015) - Mix com outros resíduos

- Este estudo complementa o anterior, considerando a influência da razão ativador alcalino/cinza volante, da proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ e da temperatura de cura nas microestruturas e na resistência (Figura 49);
- Demonstraram que a razão ativador alcalino/cinza volante ideal de 1,3 resultou em produtos cimentícios ligando partículas de cinza volante e lodo de ETA, formando uma matriz densa;
- Também destacaram a importância da proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ideal, que foi de 80:20;
- Observaram que razões ativador alcalino/cinza volante muito altas ou baixas podem afetar negativamente a resistência, relacionando-se com a importância da razão ideal ativador alcalino/cinza volante e da proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$.

Figura 49- Imagens de MEV do geopolímero na razão ativador alcalino/cinza volante de 1,2, calcinado a 85 °C por 3 dias e curado por 7 dias, para diferentes razões $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de A) 50:50, B) 70:30, C) 80:20, D) 90:10 e E) 100:0



Fonte: Suksiripattanapong *et al.* (2015)

Esses estudos analisaram como diversos fatores, incluindo a temperatura de cura, a proporção entre materiais e as proporções ideais, podem influenciar as microestruturas dos geopolímeros com lodo de ETA em sua composição, assim como sua resistência. As observações de um estudo frequentemente se relacionam e corroboram com os achados de outros, contribuindo para o entendimento da otimização desses materiais para aplicações específicas.

4.1.7 Geotecnia

O lodo de ETA é constituído majoritariamente por frações inorgânicas como argila, silte e areia fina, pode conter microrganismos, material húmico e produtos do processo de coagulação. Estudos destinados ao aproveitamento do lodo de ETA em obras geotécnicas são necessárias, não apenas devido ao potencial de substituição da argila natural, resultando em economia de custos e redução da degradação ambiental causada pela exploração natural, mas também para evitar a disposição

em aterros de um material altamente compressível e com baixa resistência ao cisalhamento.

Nesse contexto, a utilização do lodo de ETA em camadas de impermeabilização de fundo, cobertura diária e cobertura final de aterros sanitários, bem como empregado para melhoramento dos solos emerge como uma alternativa viável. Contudo, é imperativo respeitar os critérios geotécnicos de impermeabilização de aterros sanitários, como baixa permeabilidade e distribuição adequada das frações granulométricas.

O emprego do lodo de ETA na geotecnia oferece algumas vantagens, tais como aprimoramento das propriedades do solo, redução da compressibilidade e aumento da capacidade de suporte. Essa prática não só contribui para a reciclagem de resíduos, minimizando os custos de disposição, mas também reduz a extração de recursos naturais, alinhando-se a padrões mais sustentáveis. A seguir, serão apresentados os trabalhos encontrados na revisão que exploraram a aplicação do lodo de ETA em obras geotécnicas. Essas pesquisas destacam a viabilidade e os benefícios associados ao uso estratégico desse material na engenharia geotécnica, abordando aspectos como o seu emprego em aterros, melhoria dos solos, sua aplicação em estradas, bem como análises de caracterização das propriedades geotécnicas do lodo incorporado nos solos, como apresentados a seguir:

- **Aterros:**

O estudo conduzido por Aziz *et al.* (2016) investigou a viabilidade do uso de diferentes materiais como cobertura de aterros, incluindo o silte da barragem de Ulu Kinta, na Malásia, lodo de ETA e lodo de esgoto. Os materiais foram combinados em diferentes proporções, variando de 0% a 100% de lodo com incrementos de 20%, e avaliados quanto às suas propriedades. Os resultados indicaram que o silte apresentou uma condutividade hidráulica moderada, com um valor de k de $4,81 \times 10^{-4}$ cm/s, além de uma baixa resistência à coesão, $7,64 \text{ kN/m}^2$, e bom ângulo de atrito, $36,2^\circ$. Por outro lado, o lodo de ETA demonstrou uma condutividade hidráulica de $2,9 \times 10^{-6}$ cm/s, que, embora adequada, foi acompanhada por uma resistência à coesão e um ângulo de atrito baixos, avaliados em $6,16 \text{ kN/m}^2$ e $6,1^\circ$, respectivamente. O lodo de esgoto destacou-se como o material com as melhores propriedades entre os três avaliados, exibindo uma condutividade hidráulica favorável, com k medindo $2,07 \times 10^{-6}$ cm/s, uma resistência à coesão moderada,

aferida em 8,95 kN/m² e um ângulo de atrito alto de 45,7°. Além disso, a mistura dos três materiais foi investigada para determinar se a combinação poderia melhorar as propriedades do produto final. Surpreendentemente, os resultados indicaram que o uso exclusivo de lodo de esgoto produziu os melhores resultados em comparação com outras combinações testadas.

- **Melhoramento dos solos:**

O estudo conduzido por Güner (2022) investigou a viabilidade do reuso do lodo de ETA como material de reforço em solo arenoso. As dosagens de substituição do lodo de ETA no solo foram de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%, 18%, 20% e 22% com base na massa seca. Os resultados indicaram que a adição de 18% do lodo de ETA aumentou significativamente as curvas de capacidade de carga-assenamento, tornando-o adequado para melhorar o solo arenoso até uma profundidade de 2,5 vezes o diâmetro da fundação. Além disso, a análise de MEV revelou que o lodo de ETA preencheu os vazios no solo arenoso, resultando em uma estrutura mais rígida, o que sugere seu potencial como material aditivo para melhoria do solo.

Marchiori *et al.* (2021) realizaram uma caracterização do lodo de ETA para avaliar sua adequação como revestimento em obras de terra ou para o fortalecimento de solo argiloso. As seguintes proporções de lodo de ETA:solo foram utilizadas: 5%:95%, 10%:90%, 15%:85% e 20%:80%. Os resultados destacaram a contribuição do lodo de ETA devido à sua granulometria fina e características de compactação, indicando seu potencial como material de revestimento e como adição a solos moles para produção de revestimento, além de sua aplicabilidade para reforço do solo argiloso.

Bağrıaçık e Güner (2020) investigaram o uso do lodo de ETA como aditivo alternativo em projeto para melhoria de solo argiloso. O lodo de ETA foi substituído nas misturas a 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12% em massa do solo. A proporção ótima de mistura com lodo de ETA foi encontrada como 10%. A capacidade de suporte do solo argiloso aumentou 1,69 vezes com o uso do lodo de ETA. A espessura ideal de reforço foi determinada como sendo igual a 2,25. Além disso, observou-se que os assentamentos de consolidação diminuíram em até 62%.

Nawagamuwa e Wijesooriya (2018) examinaram o uso combinado de lodo de ETA e cinza volante para melhoria de solos moles. O lodo foi utilizado nas proporções de 0%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% em massa, enquanto que os

teores de cinza volante variaram em 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 100%. Os resultados indicaram que a proporção ideal de cinza volante a ser adicionada ao lodo para obter melhorias significativas em suas propriedades é em torno de 30% de sua massa seca, resultando em um Índice de Suporte Califórnia (CBR) aceitável após 7 dias de cura.

- **Estradas:**

O estudo realizado por Nguyen *et al.* (2023) investigou o potencial do lodo de ETA como substituto do solo na construção de estradas. Uma proporção de mistura de 50/50 de lodo de ETA e argila foi selecionada para avaliar seu potencial de reutilização. Os resultados demonstraram que a combinação do lodo de ETA com argila aumentou o teor de umidade ótimo e reduziu a densidade seca do solo. A resistência à compressão não confinada das amostras melhorou significativamente com a adição de lodo de ETA, passando de 74 kPa para 126 kPa, enquanto a resistência ao cisalhamento aumentou em 50%. No ensaio triaxial cíclico, a mistura de lodo de ETA e argila apresentou menos deformação cumulativa e melhorou os resultados do CBR de 0,95% para 1,92%.

Fiore *et al.* (2022) realizaram um estudo sobre a incorporação de lodo de ETA em solos argilosos e arenosos para infraestrutura de pavimentação rodoviária. Diferentes proporções de lodo de ETA foram testadas (25% e 50%), e os resultados indicaram que todas as porcentagens do lodo de ETA incorporadas em solos argilosos e arenosos atenderam aos padrões mecânicos para uso em aterros. O lodo de ETA incorporado em solos arenosos mostrou-se adequado para uso na sub-base de pavimentos, contribuindo assim para a construção de estradas mais sustentáveis.

Iqbal *et al.* (2020) analisaram as características de compactação e CBR do lodo de ETA misturado com agregados de tijolos de argila para aplicação em subleito rodoviário. Os agregados de tijolos de argila foram preparados em três frações (grosso 10–30 mm, graduado 2–30 mm e fino 2–10 mm) e resíduos finos de tijolos de argila (< 2 mm) foram misturados com lodo de ETA (< 2 mm) com base na massa seca, variando de 0% a 100% na proporção de mistura com incrementos de 20%. Os testes demonstraram melhorias significativas no CBR quando o lodo de ETA foi misturado com as frações grosseiras e graduadas dos agregados de tijolos de argila.

Bastidas-Martínez *et al.* (2020) exploraram o uso do lodo de ETA e lodo de esgoto incorporados como carga em misturas asfálticas. Tanto o lodo de ETA, quanto o lodo de esgoto foram calcinados à temperaturas de 200 °C, 300 °C, 500 °C e 800 °C durante 45 minutos. Ambos os materiais mostraram aumento de resistência sob carga monotônica e maior rigidez sob carga cíclica quando incorporados à mistura, apesar de alguns problemas relacionados à resistência à umidade e ao desgaste por atrito terem sido observados.

- **Caracterização geotécnica:**

O estudo realizado por Ho *et al.* (2022) abordou o desenvolvimento de um material controlado de baixa resistência (MCBR) utilizando uma mistura ternária de cimento Portland, cinza volante e lodo de ETA. As misturas de CLSM foram preparadas utilizando diversas razões de água/ligante (0,5, 0,65 e 0,8) e razões em massa de lodo de ETA nas proporções de 0%, 20%, 40% e 80%. Uma solução de NaOH foi utilizada como acelerador da mistura. Os resultados experimentais evidenciaram que a incorporação de lodo de ETA no MCBR resultou em mudanças significativas na densidade fresca e na trabalhabilidade da mistura. As propriedades do MCBR foram influenciadas tanto pela razão água/aglomerante quanto pela dosagem do acelerador. Além disso, a análise de lixiviação de toxicidade confirmou que o lodo de ETA pode ser utilizado como subproduto seguro, uma vez que os níveis lixiviados de metais pesados foram inferiores aos limites permitidos. A combinação otimizada, com uma razão água/ligante de 0,65, 5% de acelerador e 40% de lodo de ETA, alcançou o melhor desempenho, atendendo às regulamentações para aterros escaváveis em Taiwan.

Por outro lado, o estudo de Marchiori *et al.* (2022) caracterizou e analisou os parâmetros físicos, químicos e mecânicos do lodo de ETA, de um solo argiloso e de quatro misturas lodo de ETA:solo com as proporções de 5%:95%, 10%:90%, 15%:85% e 20%:80%. Os resultados indicaram que o lodo de ETA de grão fino preencheu os vazios do solo, resultando em uma redução na massa unitária seca compactada. A condutividade hidráulica aumentou com a adição de lodo de ETA até 10%, diminuiu para 15% e continuou a diminuir para 20%, alcançando a permeabilidade ótima em 15%.

Montalvan e Boscov (2016) abordaram a caracterização geotécnica de uma mistura do lodo de ETA e solo. O solo investigado era uma areia argilosa laterítica. Os resultados indicaram que as características geotécnicas da mistura são

ligeiramente diferentes das do solo e a secagem ao ar prévia afeta os parâmetros de compactação da mistura. A densidade máxima seca aumentou e o teor de água ótimo diminuiu para menores teores iniciais de água nos ensaios de compactação.

O'Kelly (2008) focou nas propriedades geotécnicas de um lodo de ETA proveniente de uma bacia montanhosa. O lodo era composto principalmente por flocos de quartzo, calcita e sólidos orgânicos. A adição de coagulante auxiliou na floculação das partículas sólidas, resultando em uma classificação como argila orgânica de alta plasticidade. Durante o processo de compactação, que variou entre teores de água de 160% a 780%, observou-se uma baixa densidade aparente e densidade seca. Além disso, o material demonstrou alta compressibilidade, com índices de compressão primária variando entre 2,5 e 3,7. A compressão secundária foi mínima, com um valor médio de índice de compressão secundária de 0,15.

Já o estudo de Roque e Carvalho (2006) abordou as características geotécnicas do lodo de ETA para sua aplicação em obras geotécnicas. Apesar de ser um resíduo, o lodo de ETA mostrou-se comparável a um solo natural. Adicionalmente, o lodo de ETA compactado apresentou alta resistência ao cisalhamento e baixa compressibilidade, indicando que, sob condições adequadas de projeto, problemas geotécnicos como falhas ou assentamentos excessivos não são esperados. A massa específica seca reduzida do lodo sugere vantagens em sua aplicação em aterros sobre solos moles e na modelagem de coberturas finais de aterros sanitários e depósitos, onde seu uso pode ser vantajoso em comparação com solos naturais.

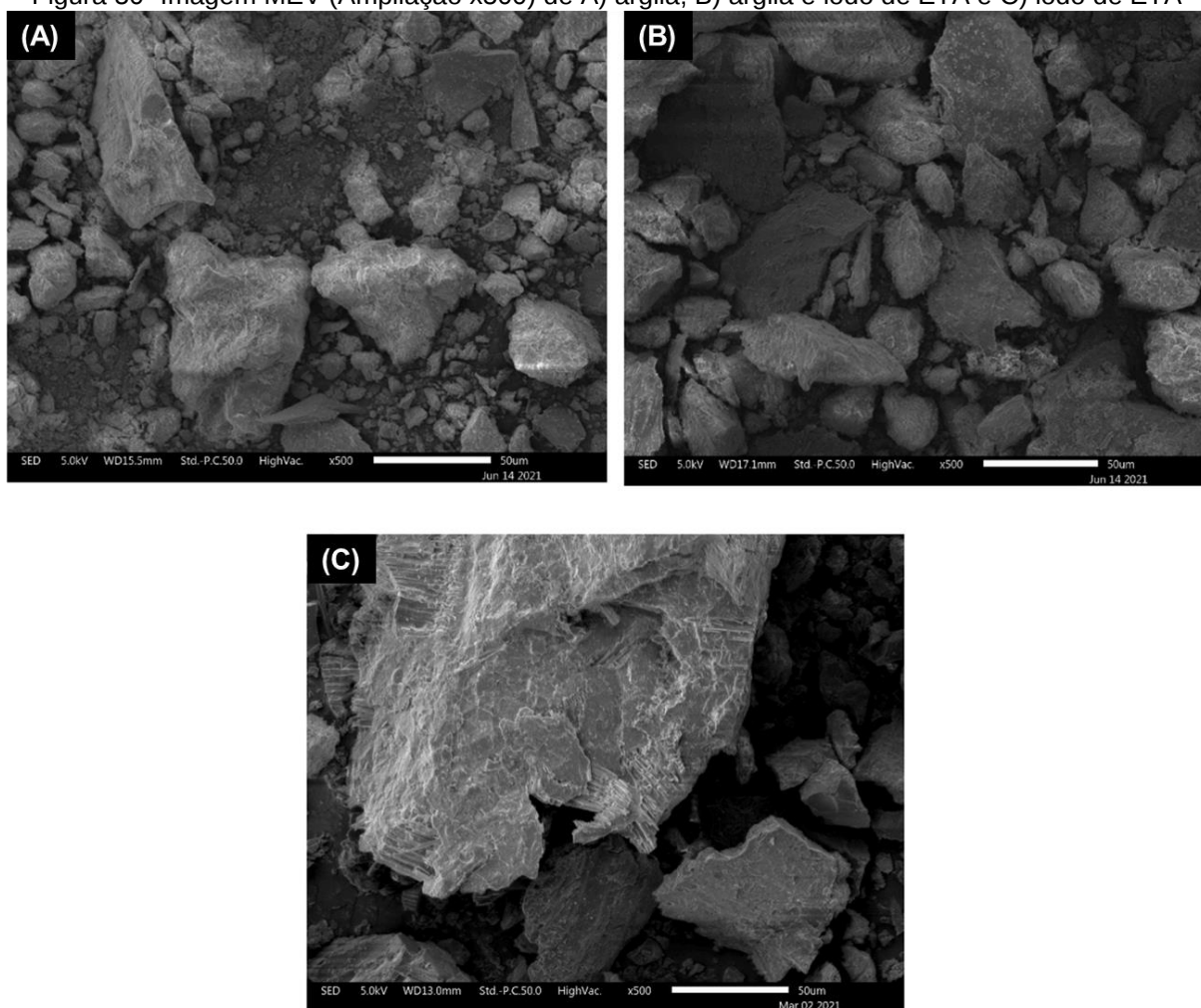
Wang *et al.* (1992) investigaram o comportamento geotécnico do lodo de ETA obtido a partir de coagulantes de ferro e à base de alumínio. Os resultados dos testes revelaram que os lodos são extremamente plásticos e altamente compressíveis. A resistência ao cisalhamento drenado foi alta, porém a resistência não drenada foi consideravelmente baixa. Além disso, os lodos foram identificados como altamente sensíveis e tixotrópicos. Comparativamente, os lodos de alumínio mostraram-se mais plásticos e compressíveis que os de ferro, além de apresentarem maior resistência ao cisalhamento não drenado no mesmo teor de sólidos. A análise do aterro indicou que o teor mínimo de sólidos necessário para manter uma inclinação desejada foi maior para o lodo de ferro em comparação com o de alumínio.

A realização de ensaios microestruturais ao incorporar lodo de ETA em obras geotécnicas, como estradas e melhoramento de solo, é importante para compreender as alterações nas propriedades microscópicas e macroscópicas do material. Esses ensaios permitem uma identificação detalhada das fases, textura e estrutura do lodo, contribuindo para a compreensão de sua compactação, resistência e deformabilidade, além de analisar a interação entre as partículas, avaliar a durabilidade ao longo do tempo e otimizar a mistura, validando modelos teóricos. Abaixo, estão as principais contribuições microestruturais para estudos geotécnicos analisados na revisão:

1. **Nguyen *et al.* (2023)** - Estradas

- Este estudo investigou amostras de solo com argila pura, com lodo de ETA e com uma combinação de ambos (Figura 50);
- As microestruturas revelaram que as amostras de lodo de ETA apresentavam tamanhos de grãos maiores e granulação mais uniforme, resultando em menos vazios em comparação com as amostras de argila pura e com a combinação de argila e lodo de ETA;
- A microestrutura das amostras está intimamente relacionada à capacidade de carga e ao assentamento do solo. Estudos anteriores, como o de Güner (2022), também consideraram a influência do lodo de ETA nas propriedades geotécnicas do solo, indicando que a microestrutura pode ser alterada para melhorar essas propriedades.

Figura 50- Imagem MEV (Ampliação x500) de A) argila; B) argila e lodo de ETA e C) lodo de ETA

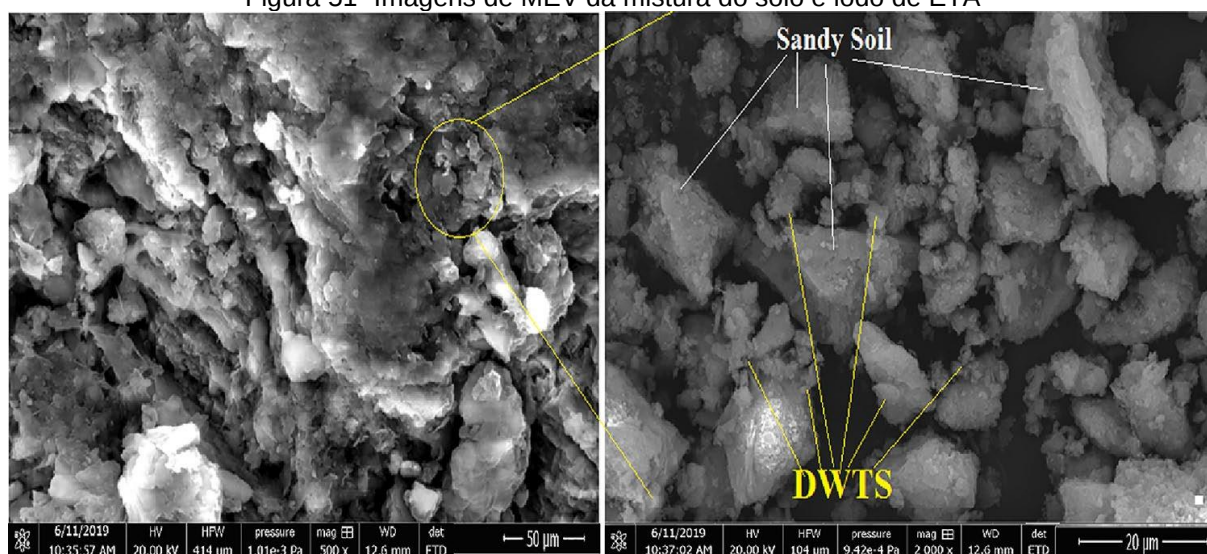


Fonte: Nguyen *et al.* (2023)

2. Güner (2022) - Melhoramento dos solos

- O estudo examinou a microestrutura da mistura do lodo de ETA e solo (Figura 51);
- As imagens de MEV mostraram que a mistura intermediária tinha menos poros e uma camada contínua, indicando uma microestrutura mais densa e com menos porosidade. Isso foi atribuído à finura do lodo de ETA e à interação química entre os componentes, contribuindo para a melhoria das propriedades geotécnicas do solo;
- Assim, a microestrutura influenciou positivamente a resistência à compressão e a capacidade de carga do solo.

Figura 51- Imagens de MEV da mistura do solo e lodo de ETA

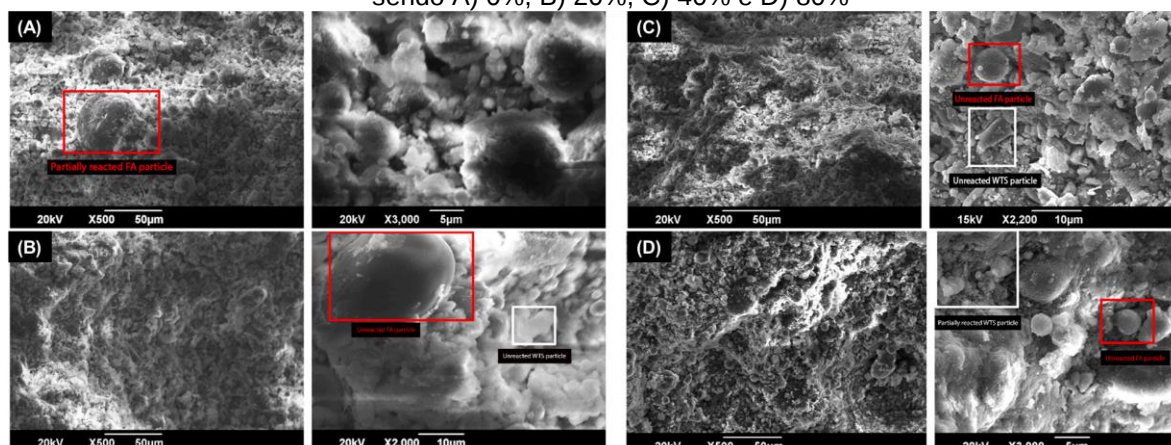


Fonte: Güner (2022)

3. Ho *et al.* (2022) - Caracterização geotécnica

- Este estudo analisou amostras de um MCBR, usando uma mistura ternária de cimento Portland, cinza volante e lodo de ETA sob diferentes condições (Figura 52);
- A microestrutura mostrou que a reação química ocorreu principalmente na superfície e nas bordas das partículas, indicando a ativação dos materiais de base. O aumento da porcentagem de lodo resultou em microestruturas mais densas, com mais materiais cimentícios, como C-S-H e C-A-S-H;
- A microestrutura mais densa explicou a maior resistência à compressão nas amostras com maior porcentagem de lodo, estabelecendo uma relação direta entre a microestrutura e a resistência geotécnica do solo.

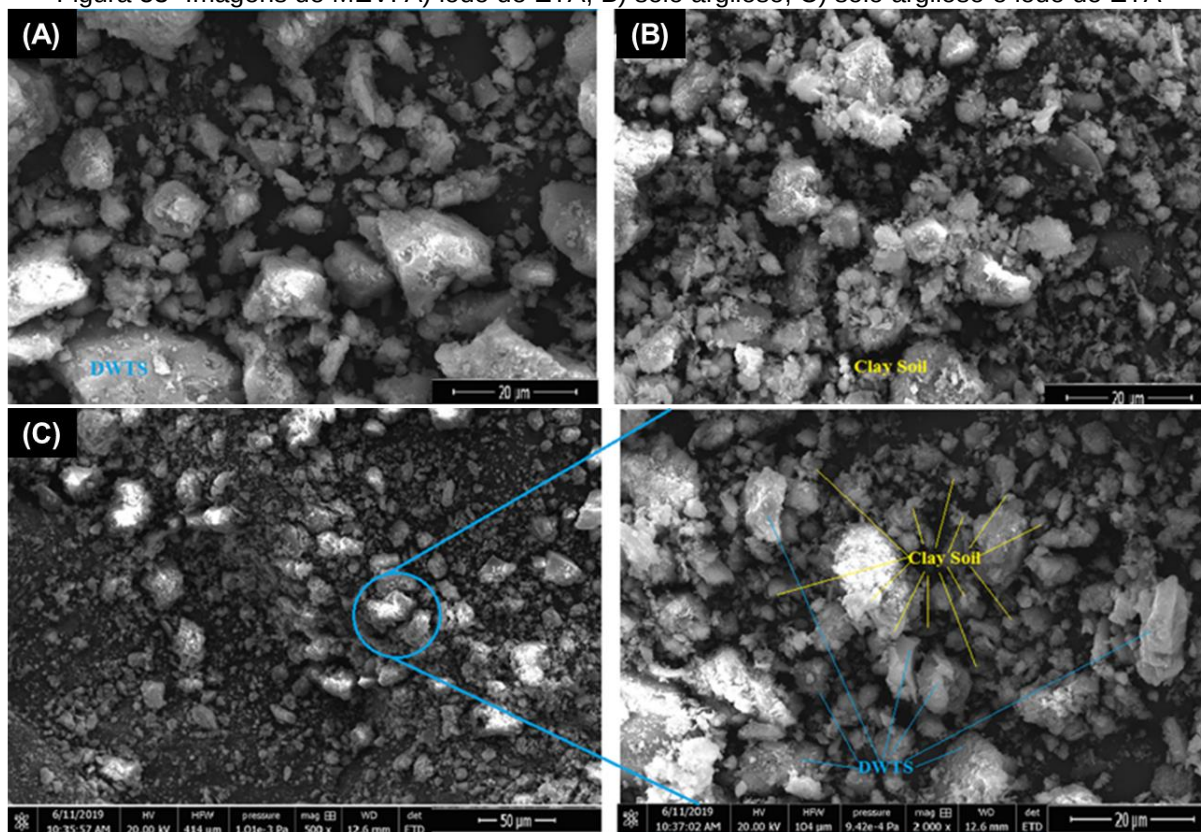
Figura 52- Imagens de MEV para as misturas MCBR com a/c de 0,65 e níveis variados de LETA, sendo A) 0%, B) 20%, C) 40% e D) 80%

Fonte: Ho *et al.* (2022)

4. Bağrıaçık e Güner (2020) - Melhoramento dos solos

- O estudo monitorou o mecanismo de reforço em uma mistura de solo argiloso e lodo de ETA (Figura 53);
- A análise de MEV mostrou que o lodo de ETA tinha superfícies ásperas e texturas altamente porosas, enquanto a microestrutura da mistura de solo argiloso e lodo de ETA revelou uma distribuição homogênea e multiaxial de aglomerados;
- A textura de distribuição multiaxial na microestrutura da mistura pode ter sido um parâmetro essencial para melhorar a capacidade de carga do solo argiloso substituído por lodo de ETA.

Figura 53- Imagens de MEV: A) lodo de ETA; B) solo argiloso; C) solo argiloso e lodo de ETA



Fonte: Bağrıaçık; Güner (2020)

Esses estudos destacam a relevância da microestrutura nas propriedades geotécnicas dos solos que incorporam o lodo de ETA. A análise microestrutural permitiu estabelecer correlações entre a composição dos materiais e suas propriedades, evidenciando a influência das características das partículas e da porosidade na resistência, compactação e capacidade de carga do solo. Assim, a

compreensão da microestrutura é fundamental para a otimização do uso do lodo de ETA na engenharia geotécnica.

A relevância do uso do lodo de ETA foi constatada em todos os seus modos de utilização na indústria da construção civil, conforme evidenciado nas Seções 4.1.1 até o 4.1.7, por meio dos dados apresentados e análises comparativas por área de aplicação. Diante das variações adversas, destacam-se os principais achados sobre o lodo de ETAs encontrados nos trabalhos e compilados na revisão.

4.2 IMPORTÂNCIA DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E MINERALÓGICAS DO LODO DE ETA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

As características químicas e mineralógicas do lodo de ETA são fundamentais para determinar sua viabilidade na construção civil. Esses atributos influenciam a resistência mecânica, durabilidade, interações com outros materiais, reação com componentes químicos do solo e conformidade com normas ambientais. A compreensão dessas características é essencial para otimizar o uso do lodo de ETA na construção, assegurando a eficiência dos materiais, a sustentabilidade e a conformidade com padrões da indústria.

Uma variedade de trabalhos foi encontrada com análises de composições químicas e mineralógicas dos LETAs apresentados nos artigos e compilados na revisão sistemática de literatura. Foram avaliados nos trabalhos do Quadro 2, aqueles que apresentavam composição química em óxidos. Dentre os 75 trabalhos encontrados, 40 trouxeram esse tipo de caracterização e são apresentados na Tabela 2. Os valores sublinhados representam o óxido de maior concentração de todos os trabalhos, e os que estão em negrito indicam os três maiores componentes em óxidos de cada estudo.

A partir dos dados apresentados, tem-se uma enorme variabilidade da composição química de LETAs. Enquanto os trabalhos desenvolvidos no Brasil apresentam lodos com elevadas quantidades de óxido de silício, assim como no Egito, na Austrália é mais marcante a presença de óxido de alumínio, ao passo que na Lituânia observa-se uma maior quantidade de óxido de ferro. É possível notar que até mesmo em regiões diferentes de um mesmo país ocorrem variações significativas na composição química do lodo de ETA. No Brasil, na região sul, por exemplo, existe uma maior concentração de silício e ferro para diferentes

localidades, já no sudeste brasileiro tem-se localidades com altas concentrações de silício e outras de alumínio. Na China existem trabalhos nos quais se destaca a quantidade de óxidos de silício, enquanto outros é marcante a presença de óxido de alumínio. De um modo geral, percebeu-se que com a revisão de literatura que essa variação na composição química ocorre em virtude das diversas épocas de coleta, dos diferentes tipos de processos de beneficiamento e tratamento do efluente residual adotado, que variam de uma região para outra, principalmente em países diferentes com variadas culturas.

Contudo embora seja difícil uma generalização da composição química dos LETAs, observa-se a presença marcante de silício, provavelmente da sílica presente na água subterrânea devido à interação da água com formações geológicas que contêm minerais ricos em silício ou devido a desintegração de minerais nas bacias hidrográficas podendo contribuir para a presença de sílica na água, o alumínio e o ferro, que se dá principalmente devido ao tipo de coagulante utilizado no processo do tratamento da água, na etapa de coagulação. Enquanto que a presença do óxido de cálcio em geral está atribuída a presença da aplicação da cal para a correção do pH da água nas ETAs ou até mesmo como coagulantes auxiliares que contenham cálcio em sua composição, no tratamento de efluentes.

Na maior parte dos estudos examinados, são trazidos os dados referentes a perda de massa ao fogo. Por meio desses trabalhos, percebeu-se que esse parâmetro se refere a perda de massa ocorrida durante o processo de queima, que ocorre em virtude da volatilização dos compostos, com destaque para os carbonatos e matéria orgânica. Nesse contexto, as amostras de LETAs geralmente possuem uma elevada taxa de matéria orgânica, que provavelmente está associada a presença de matéria orgânica no lodo, como algas, bactérias, detritos vegetais e outros materiais orgânicos, além de alguns polímeros utilizados como auxiliares de coagulação e floculação que podem conter grupos orgânicos que se decompõem durante o ensaio de perda ao fogo (PF), bem como subprodutos orgânicos resultantes dos processos de tratamento, especialmente se houver a adição de produtos químicos orgânicos.

Tabela 2- Composição química em óxidos de várias amostras de LETA

Áreas	Autores	Localidade	País	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Outros	PF
Agregados	Lee et al. (2021)	Suwon	Coreia do Sul	44,91	42,31	6,82	0,97	2	1,41	0,57	0,92	0,57	-	29,99
	Mañosa et al. (2021)	Cardedeu	Espanha	13,74	29,38	2,12	2,04	0,86	0,58	0,2	1,55	0,16	0,16	49,19
	Ying; Awang (2019)	Seberang Perai	Malásia	43,26	28,5	6,98	0,14	1,7	0,44	-	0,22	0,61	0,03	-
	Huang, Wang (2013); Kwek; Awang (2018)	-	Taiwan	65,6	22,4	4,91	1,72	1,03	4,15	0,15	-	-	0,1	13
Ligantes	Yang et al. (2023)	Shaanxi	China	35,58	32,26	6,25	1,59	1,59	1,36	1	0,28	0,42	0,47	19,04
	Duan et al. (2022)	Sul	Austrália	33,07	48,21	6,74	2,94	1,21	1,48	-	0,39	0,51	2,02	3,15
	Qin et al. (2022)	Zhejiang	China	36,57	43,75	6	1	2	0,6	-	-	-	2,04	8,04
	Duan et al. (2022)	Sul	Austrália	31,11	47,68	4,94	4,32	0,97	0,96	0,19	-	-	3,68	6,15
	He et al. (2021)	Zhejiang	China	36,57	43,75	6	1	2	0,6	-	0,62	0,36	2,04	7,06
	Shamaki et al. (2021)	York	Reino Unido	10,28	44,24	2,51	2,5	0,43	0,34	0,15	0,44	0,16	1,39	36,4
	Duan et al. (2020)	Sul	Austrália	26,43	28,27	7,66	5,36	1,23	1,11	0,06	-	-	1,19	29,5
	Godoy et al. (2019)	Sul	Brasil	52,2	26,7	12,4	0,5	4,2	1,5	-	-	2,2	0,3	-
	Zdeb; Tracz; Adamczyk (2019)	-	Polônia	41,8	33,1	7,8	4,1	-	1,4	1,9	0,8	-	1,02	7
	Tantawy (2015)	-	Egito	44,21	16,47	4,12	4,62	0,31	0,74	0,61	-	-	2,038	26,68
	El-Didamony; Amer; Mohammed (2014)	Sharkia	Egito	53,6	28,34	9,42	3,1	0,75	0,37	0,3	-	1,28	0,58	1,51
	Al-Rawashdeh et al. (2022)	Balqa	Jordânia	21,3	15,2	16,4	27,8	1	2	-	1	-	5	10,3
Argamassa	Li et al. (2021)	Adelaide	Austrália	17,1	30,1	3,1	4,1	0,5	0,6	0,2	-	-	0,2	44,1
	de Oliveira Andrade et al. (2018)	Sul	Brasil	40,5	28,5	9,5	0,3	-	0,4	0,1	-	1	0,8	18,23
Concreto	Erdogmus et al. (2023)	-	Turquia	44,9	21,1	8,2	5,8	-	1,9	0,8	-	-	0,7	16,6
	Pham et al. (2021); Liu et al. (2020)	Adelaide	Austrália	26,43	28,27	7,66	5,36	1,23	1,11	-	-	-	1,19	29,5
	Seddik et al. (2022)	Beni-Suef	Egito	64,48	16,5	3,43	2,81	0,69	3,15	2,04	0,38	0,82	0,85	4,85
Cerâmicas	Teoh et al. (2022)	Pulau Indah	Malásia	36,38	19,74	2,34	2,83	0,43	0,24	0,14	0,35	0,18	1,52	62,93
	Gencel et al. (2022); Sutcu et al. (2022); Harja et al. (2022); Marchiori et al. (2022); Batista dos Santos et al. (2021); Erdogmus et al. (2021); Gencel et al. (2021)	Bartin	Turquia	45,47	20,41	7,94	5,19	1,2	1,58	0,93	0,18	0,18	0,36	16,5
	Bandieira et al. (2021)	-	Brasil	42,36	22,7	10,64	0,57	1,4	0,36	-	0,29	1,07	0,92	19,69
	Kizinievič et al. (2018)	-	Lituânia	10,9	1,34	68,65	8,23	-	0,61	-	9,39	-	0,88	-
	Mymrin et al. (2017)	Paraná	Brasil	17,01	24,46	13	0,3	0,18	0,15	0,02	0,44	0,4	3,81	39,77
	Katte et al. (2017)	Etoa-Meki	Camarões	54,94	23,41	4,79	0,49	0,47	0,9	0,24	0,16	1,85	0,17	10,52
	Batista dos Santos et al. (2021)	Manaus	Brasil	40,73	42,39	10,94	0,56	2,18	0,95	-	0,63	1,26	0,36	-
Geopolímeros	Batista dos Santos et al. (2021)	Manaus	Brasil	55,78	27,16	9,54	-	3,32	1,69	-	0,55	0,95	0,36	-
	Iamchaturapatr; Piriyaikul (2020)	Bangkok	Tailândia	66,43	20,46	6,71	0,85	2,2	1,07	-	-	-	0,41	1,87
	Orbecido et al. (2018)	Manila	Filipinas	42	30	19,3	2,46	0,784	1,45	0,196	-	1,38	2,43	-
	Suksiripattanapong et al. (2017)	Bangkok	Tailândia	61,84	24,8	9,52	0,6	1,9	-	-	-	-	0,59	0,75
	Geraldo; Fernandes; Camarini (2017)	Campinas	Brasil	55,77	32,48	1,88	-	2,7	0,76	-	-	1,42	0,23	4,76
	Nimwinya et al. (2016)	Bangkok	Tailândia	58,99	24,64	6,63	0,69	1,54	1,14	4,08	-	0,88	1,41	-
	Horpibulsuk et al. (2016)	Bangkok	Tailândia	67,33	22,47	6,15	0,68	1,26	-	-	-	-	1,04	0,78
	Guner (2022)	Adana	Turquia	16,02	2,62	48,23	8,1	0,31	1,15	-	0,13	0,53	1,8	-
Geotecnia	Ho et al. (2022)	Taiapé	Taiwan	60,4	23,3	8,78	0,25	3,53	2,06	-	-	0,96	0,24	-
	Marchiori et al. (2022)	Guarda	Portugal	29,9	60,4	5	2,88	1,15	0,59	-	-	-	-	-
	Iqbal et al. (2020)	Saitama	Japão	36,2	22,7	5,53	1,81	0,96	-	0,49	-	-	0,62	31
	Bastidas-Martínez et al. (2020)	Brasília	Brasil	52,8	14,4	8,1	4,4	-	-	-	-	-	22,3	-
	Montalvan; Boscov (2016)	Santos	Brasil	18,3	8,89	46	1,59	1	0,438	0,1	0,249	0,417	1,033	22

Fonte: O Autor (2024).

Em relação a composição mineralógica, foram encontrados difratogramas de caracterização do lodo de ETA em 29 trabalhos (excluindo os repetidos) dos 75 apresentados no Quadro 2. A fase mineralógica mais predominante na maioria dos artigos sobre o LETA é o quartzo. No Quadro 3, temos a lista das principais fases encontradas nos trabalhos mencionados:

Quadro 3- Principais fases dos materiais formados com lodo de ETAs em sua constituição

Autores	Fases
Lee et al. (2021)	Quartzo (SiO ₂), Sulfato de alumínio hidratado ((Al ₂ SO ₄) ₃) e Coríndon (Al ₂ O ₃)
Mañosa et al. (2021)	Quartzo (SiO ₂), Ilita ((K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ , (H ₂ O)]), Halosita (Al ₂ O ₃ 2SiO ₂ 2H ₂ O), Microclina (K(AlSi ₃ O ₈)) e Anortita ((CaAl ₂ Si ₂ O ₈))
Kwek, Awang (2018); Ying, Awang (2019)	Quartzo (SiO ₂), Caulinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄), Rutilo (TiO ₂)
Huang; Wang (2013)	Quartzo (SiO ₂), Ilita ((K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ , (H ₂ O)] e Clorita ((Mg,Al,Fe) ₁₂ [(Si,Al) ₈ O ₂₀](OH) ₁₆)
Al-Rawashdeh et al. (2022)	Quartzo (SiO ₂) e Calcita (CaCO ₃)
Liu et al. (2020); Pham et al. (2021)	Caulinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄), Quartzo (SiO ₂), Dolomita (CaMg(CO ₃) ₂), Calcita (CaCO ₃) e Gipsita (CaSO ₄ .2H ₂ O)
Li et al. (2021)	Muscovita (KAl ₂ [Si ₃ AlO ₁₀](OH,F) ₂), Clorita ((Mg,Al,Fe) ₁₂ [(Si,Al) ₈ O ₂₀](OH) ₁₆), Quartzo (SiO ₂), Coríndon (Al ₂ O ₃) (padrão interno), Albite (NaAlSi ₃ O ₈) e Calcita (CaCO ₃)
de Oliveira Andrade et al. (2018)	Quartzo (SiO ₂), Calcita (CaCO ₃) e Muscovita (KAl ₂ [Si ₃ AlO ₁₀](OH,F) ₂)
Seddik et al. (2022)	Montmorilonita (M _x (Al _{4-x} Mg _x)Si ₈ O ₂₀ (OH) ₄), Quartzo (SiO ₂), Calcita (CaCO ₃) e Albite (NaAlSi ₃ O ₈)
Gencel et al. (2022); Sutcu et al. (2022); Harja et al. (2022); Marchiori et al. (2022); Batista dos Santos et al. (2021); Erdogmus et al. (2021); Gencel et al. (2021)	Quartzo (SiO ₂), Muscovita (KAl ₂ [Si ₃ AlO ₁₀](OH,F) ₂), Ilita ((K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ , (H ₂ O)] e Calcita (CaCO ₃)
Bandieira et al. (2021)	Quartzo (SiO ₂), Caulinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄), Olivina ((Mg,Fe) ₂ SiO ₄) e Anatásio (TiO ₂)
Mymrin et al. (2017)	Ilita ((K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ , (H ₂ O)]), Caulinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄) e Quartzo (SiO ₂)
Katte et al. (2017)	Caulinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄), Quartzo (SiO ₂), Goethita (α-Fe ³⁺ O(OH)), Rutilo (TiO ₂), Anatásio (TiO ₂) e Halosita (Al ₂ O ₃ 2SiO ₂ 2H ₂ O)
Nor et al. (2015)	Quartzo (SiO ₂) e Caulinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)
Kizinievič et al. (2013); Kizinievič; Kizinievič (2017); Kizinievič et al. (2018)	Hematita (α-Fe ₂ O ₃), Quartzo (SiO ₂) e Talco (Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂)
He et al. (2023)	Quartzo (SiO ₂), Leucita (KAlSi ₂ O ₆) e Gehlenita (Ca ₂ Al ₂ SiO ₇)
Suksiripattanapong et al. (2015); Horpibulsuk et al. (2016)	Sulfato de cálcio (CaSO ₄), Ilita ((K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ , (H ₂ O)]), Quartzo (SiO ₂), Calcita (CaCO ₃), Mulita (Al _{4+2x} Si _{2-2x} O _{10-x}) e Hematita (α-Fe ₂ O ₃)
Hwang et al. (2017); Ho et al. (2022)	Clorita ((Mg,Al,Fe) ₁₂ [(Si,Al) ₈ O ₂₀](OH) ₁₆) e Quartzo (SiO ₂)
Marchiori et al. (2022)	Quartzo (SiO ₂), Muscovita (KAl ₂ [Si ₃ AlO ₁₀](OH,F) ₂) e Caulinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)

Autores	Fases
Montalvan; Boscov (2016)	Quartzo (SiO_2), Goethita ($\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$), Muscovita ($\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$) e Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)
Roque; Carvalho (2006)	Aluminato de cálcio hidratado (Al_2O_3), Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Quartzo (SiO_2), Sulfato de alumínio hidratado ($(\text{Al}_2\text{SO}_4)_3$), Magnesita e Gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
Yang et al. (2023)	Mulita, Muscovita ($\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$), Quartzo (SiO_2) e Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)
Duan et al. (2022)	Quartzo (SiO_2), Sulfato de cálcio (CaSO_4), Sulfato de alumínio hidratado ($(\text{Al}_2\text{SO}_4)_3$) e Microclina ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$)
Qin et al. (2022)	Quartzo (SiO_2), Al_2SiO_5 e Al_2O_3
He et al. (2021)	Quartzo (SiO_2), Al_2SiO_5 e Al_2O_3
Shamaki et al. (2021)	Quartzo (SiO_2) e Montmorilonita ($\text{M}_x(\text{Al}_{4-x}\text{Mg}_x)\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$)
Godoy et al. (2019)	Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Quartzo (SiO_2) e Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)
Tantawy (2015)	Quartzo (SiO_2), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e Calcita (CaCO_3)
El-Didamony; Amer; Mohammed (2014)	Quartzo (SiO_2), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e Hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

Fonte: O Autor (2024).

O quartzo (SiO_2) é encontrado em quase todos os estudos. O quartzo é uma fase cristalina comum em solos e rochas e, portanto, frequentemente presente nos lodos de ETAs. O sulfato de alumínio hidratado ($(\text{Al}_2\text{SO}_4)_3$) é mencionado no estudo de Lee et al. (2021). Este composto está relacionado ao processo de coagulação/floculação usado em ETAs. O coríndon é mencionado nos estudos de Lee et al. (2021). O coríndon é uma forma cristalina do óxido de alumínio (Al_2O_3). Ilita, haloisita, microclina e muscovita também são encontrados em vários estudos, como Mañosa et al. (2021), Huang; Wang (2013), Li et al. (2021), Montalvan; Boscov (2016), Godoy et al. (2019), e Yang et al. (2023). Esses minerais são argilominerais comuns e podem estar presentes nos lodos como parte da fração sólida. A caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) é identificada em vários estudos, como Kwek, Awang (2018); Ying, Awang (2019); Liu et al. (2020); Marchiori et al. (2022); Nor et al. (2015); Katte et al. (2017); Godoy et al. (2019). A caulinita é outra argila comum, frequentemente encontrada em solos e lodos. A calcita (CaCO_3) está presente em vários estudos, como Al-Rawashdeh et al. (2022), Liu et al. (2020), Seddik et al. (2022), Gencel et al. (2022), Tantawy (2015), e El-Didamony; Amer; Mohammed (2014). A calcita é um mineral de carbonato de cálcio. Rutilo (TiO_2) e anatásio (TiO_2) são encontrados em alguns estudos, como Kwek, Awang (2018), Katte et al. (2017), e Duan et al. (2022). São formas cristalinas de dióxido de titânio. Gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e sulfato de cálcio (CaSO_4) são mencionados em vários estudos, como Suksiripattanapong et al. (2015), Duan et al. (2022), e Godoy et al. (2019). A gipsita é uma forma de sulfato de

cálcio. A albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) está presente em diversos estudos, como Li *et al.* (2021), Seddik *et al.* (2022), Tantawy (2015), e El-Didamony; Amer; Mohammed (2014). Albita é um feldspato rico em sódio. A mulita é identificada em alguns estudos, como Suksiripattanapong *et al.* (2015) e Yang *et al.* (2023). A mulita é um mineral com propriedades refratárias. Hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) é uma forma de óxido de ferro, sendo mencionada em estudos como Kizinievič *et al.* (2013), Kizinievič; Kizinievič (2017), Kizinievič *et al.* (2018), e El-Didamony; Amer; Mohammed (2014). Leucita (KAlSi_2O_6) e gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) são identificadas no estudo de He *et al.* (2023). São minerais ricos em potássio e cálcio, respectivamente. A olivina ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) é mencionada no estudo de Bandeira *et al.* (2021). A olivina é um mineral de silicato que contém magnésio e ferro. Aluminato de cálcio hidratado (Al_2O_3), hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), magnesita, e sulfato de alumínio hidratado ($(\text{Al}_2\text{SO}_4)_3$) estão relacionados ao estudo de Roque e Carvalho (2006) e estão ligados ao processo de coagulação e floculação. Por fim, temos a montmorilonita que é um tipo de argilomineral, sendo encontrada no estudo de Seddik *et al.* (2022) e Shamaki *et al.* (2021).

Os LETAs podem conter uma variedade de fases cristalinas, incluindo minerais comuns como quartzo, argilominerais, carbonatos, óxidos e outros minerais específicos relacionados aos processos de tratamento e à composição da água tratada. A presença dessas fases cristalinas pode variar dependendo das condições locais do manancial e dos métodos de tratamento utilizados.

4.3 CONCLUSÃO ACERCA DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Ao revisar a literatura existente, torna-se evidente a diversidade de aplicações do lodo de ETA na indústria da construção civil, englobando em particular sete áreas distintas: agregados, ligantes, argamassas, concretos, cerâmicas, geopolímeros e obras geotécnicas. As análises e discussões realizadas ao longo desta revisão revelaram informações valiosas sobre os benefícios e desafios associados a cada modalidade de aplicação do lodo de ETA. Essas descobertas proporcionam uma visão abrangente e embasada sobre os potenciais impactos dessa alternativa em vários materiais de construção.

Da análise das discussões das Seções 4.1 e 4.2, percebe-se que a aplicação do lodo de ETA mantém seu enfoque na caracterização física, química e

mineralógica, bem como aspectos microestruturais dos compósitos formados com a incorporação do lodo de ETA. Considerando o potencial da integração do lodo de ETA em aplicações da construção civil, percebe-se uma falta de estudos dedicados a uma análise dos impactos ambientais desses materiais por meio da ACV dos produtos resultantes.

A busca por práticas mais sustentáveis na construção civil tem impulsionado a adoção de materiais alternativos, promovendo uma abordagem inovadora e consciente em relação aos impactos ambientais. Nesse cenário, a ACV emerge como uma ferramenta relevante para compreender de maneira vasta os impactos ambientais desses materiais ao longo de todas as fases do seu ciclo de vida.

A aplicação da ACV em materiais alternativos na construção civil, destacando casos específicos como a incorporação do lodo têxtil (Aguiar *et al.*, 2023) e lodo de esgoto em produtos da construção civil, bem como concreto de baixo carbono, argamassas e ligantes alternativos (Passuello *et al.*, 2014), tem emergido como alternativas promissoras, despertando o interesse da indústria e dos pesquisadores.

As inovações inerentes à incorporação do lodo de ETA em materiais de construção introduzem desafios consideráveis na ACV. Ao explorar a aplicação da ACV nessa condição particular, a Seção subsequente visa preencher essa lacuna na compreensão dos desafios e benefícios associados ao uso do lodo de ETA em materiais de construção, estabelecendo assim um alicerce para futuras pesquisas na gestão de resíduos e no desenvolvimento de materiais mais ecológicos para a construção civil.

Nesse contexto, na próxima Seção deste trabalho aplicou-se a ACV em uma das alternativas resultantes da incorporação do lodo de ETA em materiais de construção (blocos cerâmicos), com o intuito de contribuir com a vasta literatura sobre os seus usos e aplicações.

5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A ACV é uma metodologia abrangente usada para avaliar o impacto ambiental de um produto, processo ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima até o descarte final (Coltro, 2007). Essa abordagem considera todos os estágios do ciclo de vida, incluindo produção, transporte, uso e fim de vida, e avalia uma ampla gama de impactos ambientais, como: emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais, poluição do ar e da água, entre outros (Seo e Kulay, 2006; Coltro, 2007; Horne, Grant e Verghese, 2009).

A ACV envolve várias etapas, inicialmente, define-se o objetivo e o escopo, identificando o sistema e as categorias de impacto. Depois, coleta-se dados detalhados sobre todas as etapas do ciclo de vida. Os dados são usados para calcular os impactos ambientais, como emissões de CO₂. Os resultados são interpretados à luz dos objetivos e podem revelar áreas de preocupação e oportunidades de melhoria. Por fim, os resultados são comunicados por meio de relatórios e certificações ambientais para informar as partes interessadas e apoiar decisões sustentáveis (ISO 14040, 2009; Curran, 2012).

Sendo uma ferramenta para apoiar a tomada de decisões sustentáveis em empresas, governos e organizações a ACV pode ser usada para comparar diferentes alternativas e identificar maneiras de reduzir o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida de um produto ou serviço. Além disso, a ACV também pode ser aplicada a nível de políticas públicas para orientar regulamentações e incentivos que promovam a sustentabilidade ambiental (Langston, 2001; Saade, Silva e Gomes, 2014).

A ACV desempenha um papel importante na indústria da construção civil, pois ajuda a avaliar e gerenciar o impacto ambiental de edifícios e infraestruturas ao longo de seu ciclo de vida completo, desde a extração de matérias-primas até a demolição e reciclagem.

A aplicação da ACV na construção civil envolve várias fases. O ciclo de vida de edifícios e infraestruturas é dividido em etapas que vão desde a extração da matéria-prima até a demolição e disposição de resíduos, sendo todas essas fases consideradas para avaliar o impacto ambiental total (Kibert, 2013; Sabnis, 2015). A escolha de materiais desempenha um papel fundamental, considerando as

emissões de gases de efeito estufa e o consumo de recursos. A eficiência energética e o desempenho operacional também são avaliados, buscando reduzir o consumo de recursos ao longo do tempo, além do gerenciamento do fim de vida dos edifícios, incluindo a demolição e o tratamento dos resíduos. Sendo assim, a ACV na construção civil oferece vantagens como suporte à tomada de decisões, redução de custos operacionais, conformidade com regulamentos vigentes e melhorias na imagem corporativa (Santos *et al.*, 2011; Kibert, 2013; Sabnis, 2015; Medeiros, Durante e Callejas, 2018).

A ACV desempenha um papel fundamental na construção civil ao avaliar e orientar a escolha de materiais, métodos de construção e práticas operacionais mais sustentáveis. Isso contribui para a redução do impacto ambiental e para a promoção de edifícios mais ecológicos e eficientes em termos de recursos (Santos *et al.*, 2011). Além disso, também existem outras ferramentas para realizar a ACV de forma mais simplificada, como é o caso do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac).

O Sidac representa uma ferramenta inovadora para calcular os indicadores de desempenho ambiental de materiais de construção no Brasil. Este sistema utiliza dados locais por meio de uma forma simplificada da Análise do Ciclo de Vida (ACV), denominada Avaliação do Desempenho Ambiental da Construção (ADAC). O objetivo é determinar o gasto energético e as emissões de CO₂ associadas a cada unidade de produto, desde a extração dos recursos naturais até a chegada à fábrica (Belizario-Silva, 2022). O acesso ao Sidac é gratuito e está disponível no endereço eletrônico <https://sidac.org.br>.

Criado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) como parte do programa Strategic Partnerships for the Implementation of the Paris Agreement (SPIPA), o desenvolvimento do Sidac foi liderado pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) e envolveu uma colaboração entre universidades, institutos de pesquisa e uma empresa de software, com uma equipe composta por 25 profissionais. Durante o processo, um Comitê Científico revisou a metodologia do Sidac, enquanto um Comitê Consultivo, representando partes interessadas como a indústria da construção, ofereceu valiosas contribuições. Adicionalmente, um Comitê Executivo composto por instituições governamentais e apoiadores também participou ativamente do projeto (Belizario-Silva; Silva, 2022).

O Sidac simplifica a ACV ao calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos de maneira distinta. Enquanto a ACV utiliza modelos de caracterização para calcular indicadores de potencial de impacto ambiental, o Sidac adota uma abordagem mais simples, calculando indicadores de inventário por meio da consolidação de informações básicas. Essa simplificação facilita a coleta de dados primários, reduzindo a quantidade de informações necessárias dos processos de produção. Ademais, os indicadores no Sidac abrangem os principais aspectos ambientais da construção e estão diretamente relacionados aos impactos ambientais avaliados na ACV (Silva, 2023). Essa abordagem torna o Sidac uma ferramenta valiosa, promovendo a acessibilidade e eficiência na avaliação do desempenho ambiental na indústria da construção.

A partir dos resultados apresentados na Seção 4 verificou-se que há uma diversidade de estudos deste tema de aproveitamento do lodo de ETA nos anos de 1990 a setembro de 2023, com buscas a trabalhar com aplicações diversas na construção civil, entretanto nos artigos não se verificou uma proposta de ACV. Assim, a seguir apresenta-se a metodologia empregada para o ACV de um exemplo de uso e aplicação do lodo de ETA, bloco cerâmico, produzido com várias proporções de lodo e argila, bem como os principais resultados e discussões pertinentes aos dados de emissão de CO₂ e demanda de energia primária calculados. Uma análise estatística também foi aplicada aos dados de emissão de CO₂ e demanda de energia primária para o lodo de ETA obtido por centrífuga e filtro prensa, a fim de verificar as diferenças significativas entre os grupos analisados.

5.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO LODO DE ETA PELO SIDAC

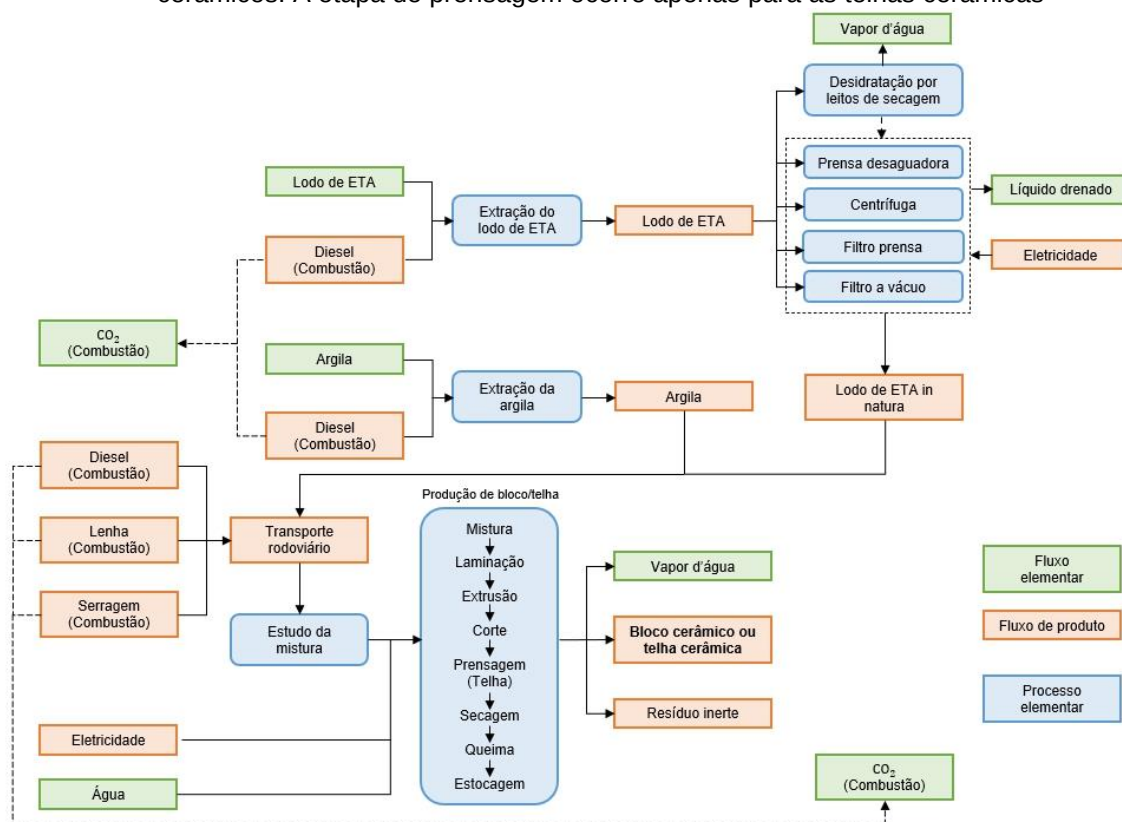
O Sidac utiliza uma abordagem simplificada na ACV, que vão do berço ao portão de fábrica, calculando apenas dois indicadores de inventário, emissões de CO₂ e energia incorporada, em vez de vários outros indicadores ambientais. Isso reduz a demanda por dados e custos de coleta. O sistema preserva os princípios da ACV, com exceção da etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), que não é realizada no Sidac.

O propósito do sistema é avaliar o desempenho ambiental de produtos de construção, considerando processos e cadeias de valor existentes, por meio de uma abordagem atributiva. Quando os processos desempenham múltiplas funções, são

subdivididos para que cada um produza um único produto. Nos casos em que a divisão se torna necessária com base nas características físicas dos processos, a alocação econômica é aplicada, conforme preconizado pelas diretrizes da ISO 14044 e EC-JRC IES, 2010.

No sistema, os produtos são analisados como sistemas compostos por processos elementares que realizam funções específicas ao longo do ciclo de vida do produto. A quantificação no inventário se concentra apenas nos fluxos de massa e energia necessários para calcular a energia incorporada e as emissões de CO₂. Os sistemas de produtos compreendem processos elementares com fluxos elementares e de produtos que desempenham pelo menos uma função e definem o ciclo de vida do produto. O inventário do ciclo de vida de um produto quantifica os fluxos de massa e energia nos processos elementares dentro do limite do sistema em relação à unidade funcional ou declarada do produto. De acordo com uma abordagem simplificada, apenas os fluxos necessários para estimar a energia incorporada e as emissões de CO₂ devem ser quantificados. A Figura 54 ilustra como essa abordagem simplificada é aplicada, usando a produção de blocos/telhas cerâmicas, como exemplo.

Figura 54- Processos elementares de extração de argila e lodo e de produção de telhas e blocos cerâmicos. A etapa de prensagem ocorre apenas para as telhas cerâmicas



Fonte: Adaptado de Cleto, Von Mühlen e Belizario-Silva (2022)

O processo de produção do bloco cerâmico envolve várias etapas. Começa com a extração de argila, que é a matéria-prima principal. A argila é deixada para descansar para decompor materiais orgânicos e sais solúveis. Em seguida, a argila é preparada e misturada com água e resíduos para criar uma massa homogênea. A massa passa por laminação e extrusão para dar forma aos blocos e telhas. Após a extrusão, as peças são cortadas e inspecionadas para garantir a qualidade. As telhas passam por uma etapa adicional de prensagem. Após isso, as peças são secas, podendo ser secadas naturalmente ou de forma artificial. A etapa mais crítica é a queima no forno, que dá às peças suas propriedades finais, mas também consome energia e emite poluentes. Existem diferentes tipos de fornos, como intermitentes, semicontínuos e contínuos, com diferentes fontes de calor, como: biomassa e combustíveis fósseis. O transporte das peças é feito manualmente ou com equipamentos, como empilhadeiras, e a energia é fornecida por geradores a diesel, quando necessário (Berni, 2010; Nicolau, 2012; FIEMG e FEAM, 2013; MME et al., 2018; Rossi, 2017).

Para simplificação, foi considerado que a extração da argila acarreta um impacto ambiental semelhante ao da extração de lodo, devido as limitações do projeto e ao longo período necessário para reunir dados de todas as regiões do Brasil para alimentar o Sidac, que não dispunha dessa informação. Foi assumido que o lodo está predominantemente na fase líquida, composto por 95% de água e 5% de sólidos (Montalvan, 2016). Além disso, foi estimado que o lodo extraído seria transportado por um caminhão de 2 eixos por uma distância de 30 km até o local de produção dos blocos cerâmicos.

A escolha pelo transporte rodoviário decorre das inúmeras vantagens que este apresenta no contexto brasileiro em comparação com os modos ferroviário e aquaviário. No Brasil, a malha rodoviária se estende por aproximadamente 1.720.990,00 km (ABCR, 2022), uma extensão cerca de 55 vezes maior que a malha ferroviária, que totaliza cerca de 31.000,00 km, e aproximadamente 41 vezes maior que as vias fluviais, que somam 42.000,00 km (CNT, 2022). Destaca-se a flexibilidade do transporte rodoviário, que possibilita alcançar regiões remotas e de difícil acesso, onde a infraestrutura ferroviária ou aquaviária é limitada. Além disso, o transporte por rodovias é notoriamente mais rápido e ágil, atendendo às demandas de entregas rápidas em um ambiente econômico dinâmico.

Para mercadorias que requerem entregas fracionadas, o transporte rodoviário se mostra mais adequado, facilitando a distribuição em pequenas quantidades para diversos destinos. A facilidade de integração com outros modos de transporte, a menor necessidade de investimento inicial em infraestrutura e a capacidade de proporcionar maior controle sobre o ambiente de armazenamento são fatores adicionais que conferem versatilidade à escolha do transporte rodoviário.

Os dados para o consumo de energia elétrica na etapa de desidratação por centrífuga e filtro prensa foram obtidos a partir das Tabelas 3 e 4, extraídos do estudo de Vieira (2021).

Tabela 3- Resumo dos dados do consumo de energia, relativos ao ano de 2020

Ano	Trimestre	Volume lama alimentado / m ³		Tempo de funcionamento / h		Tempo de funcionamento por dia* / h		Consumo de energia / (kWh)	
		Cent.	F.P.	Cent.	F.P.	Cent.	F.P.	Cent.	F.P.
2020	1°	1759	1759	452	1026	4,96	11,28	8047	565
	2°	1025	1025	245	598	2,69	6,57	4367	329
	3°	1625	1625	479	948	5,21	10,30	8537	522
	4°	3395	3395	709	1980	7,70	21,53	12627	1091
Anual		7804	7804	1885	4552	5,14	12,44	33578	2507

***Assumindo que os equipamentos desidratam 365 dias por ano**

Fonte: Adaptado de Vieira (2021)

Tabela 4- Resumo do estudo de energia

Estudo de energia			
	Tempo total / h	Energia total / kWh	Potência média / kW
Centrífuga	210	3736,89	17,82
Filtro prensa	81,58	44,76	0,55

Fonte: Adaptado de Vieira (2021)

É necessário em média cerca de 2,4 kg de argila para a produção de um bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm (Cleto, Von Mühlen e Belizario-Silva, 2022). Logo, calculou-se a quantidade de emissão de CO₂ e demanda de energia primária para a produção de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm das misturas (argila e lodo) com lodo oriundo dos processos de desidratação mecânica de centrífuga e filtro prensa, tendo em vista que, conforme o Sidac (2022), a produção de um bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila produz um mínimo de 0,1377 kg e 5,35 MJ e um máximo de 0,32 kg e 5,35 kg e 9,30 MJ, de emissão de CO₂ e demanda de energia primária, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5- Dados de energia primária e emissão de CO₂ de um bloco cerâmico de argila *in natura*
Produção de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila

Entrada						
Material	Quantidade	Unidade	Emissão de CO ₂ mínimo (kg)	Emissão de CO ₂ máximo (kg)	Demanda de energia primária mínima (MJ)	Demanda de energia primária máxima (MJ)
Bloco de argila	2,4	kg	0,1377	0,32	5,35	9,30

Fonte: O Autor (2024).

5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA AOS DADOS DO LODO DE ETA RESULTANTES DA CENTRÍFUGA E FILTRO PRENSA

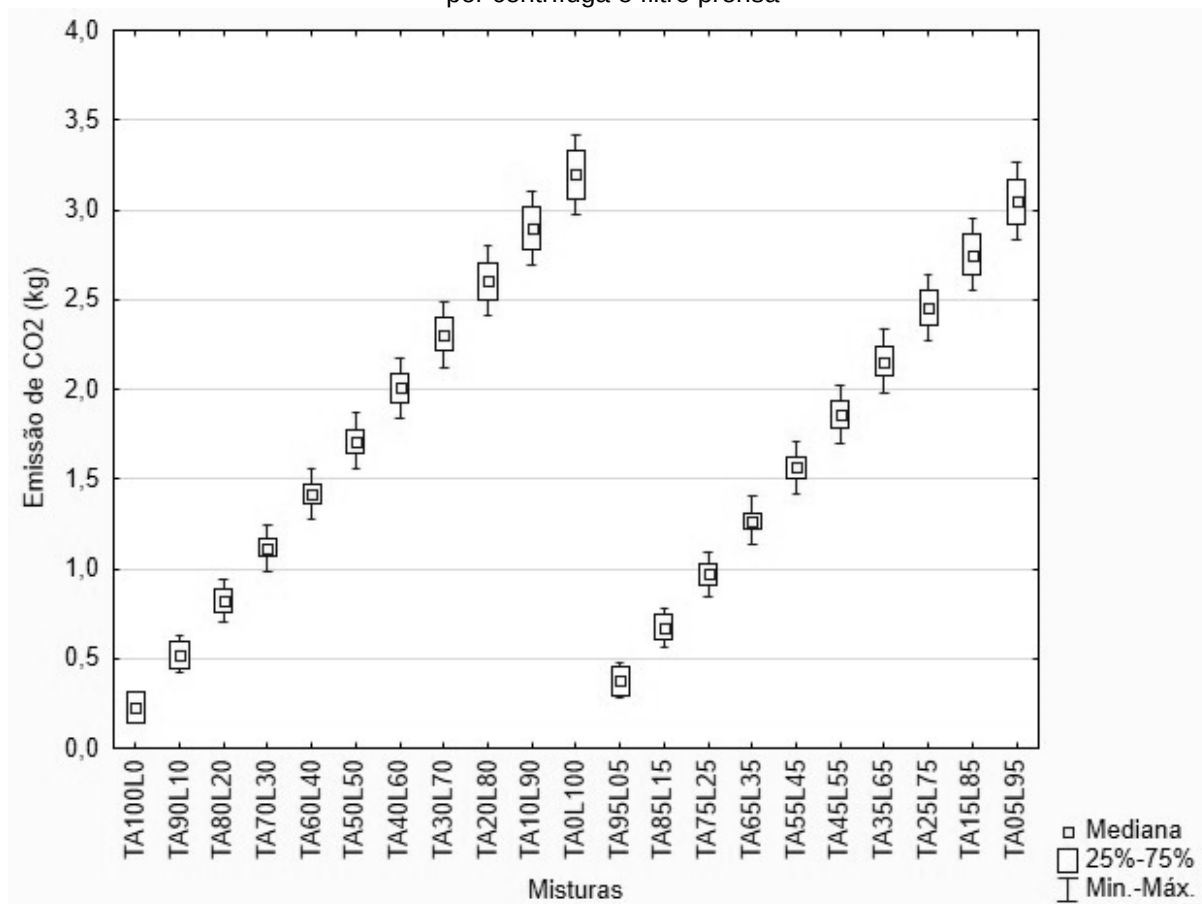
Foi realizado um teste paramétrico de análise de variância (ANOVA) para investigar as relações estabelecidas a partir dos resultados da ACV dos tijolos cerâmicos incorporados com lodo de ETA. Posteriormente, foram examinadas as condições de normalidade e homogeneidade. Caso o valor de valor-p encontrado seja $> 0,05$ segue-se com o pós-teste de Tukey, a fim de realizar as comparações múltiplas entre as médias dos grupos em questão, caso contrário foi realizado a análise não paramétrica empregando o teste de Kruskal-Wallis como uma alternativa à ANOVA seguida do pós-teste de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner, a fim de avaliar as diferenças significativas entre os grupos em questão (Pinheiro, 2009; Morettin, 2010; Zar, 2014; Fávero e Belfiore, 2017).

Para todos os testes realizados, a rejeição da hipótese nula foi determinada pela obtenção de um valor-p inferior ao nível de significância estabelecido em 0,05. Neste estudo, é importante destacar que o método estatístico paramétrico empregado foi o Mancova, que representa uma análise de covariância multivariada que leva em consideração a presença de uma variável que exerce influência sobre os dados, ou seja, o processo de secagem. Isso ocorre porque o processo de secagem, seja ele por centrifuga ou filtro prensa, constitui um parâmetro que interfere diretamente nos resultados de cada um dos pontos avaliados.

Para a realização dos procedimentos estatísticos, foram utilizados os softwares Jamovi 2.3.21 e Statistica 10.

Os valores-p fornecidos na análise estatística de comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner permitem correlacionar e discutir as diferenças entre os grupos que representam diferentes misturas de argila e lodo de ETA na produção de blocos cerâmicos em relação à emissão de dióxido de carbono, conforme mostra a Figura 55 (para mais informações verificar Apêndice B).

Figura 55- Comparações múltiplas entre as misturas para emissão de CO₂ (kg) do lodo de ETA obtido por centrífuga e filtro prensa



Fonte: O Autor (2024).

Observando as correlações mais relevantes, temos:

a) Grupo TA100L0 (100% de argila e 0% de lodo):

Este grupo tem valores-p muito baixos em comparação com quase todos os outros grupos, o que significa que a emissão de CO₂ é significativamente diferente desse grupo em relação a outros grupos (TA30L70, TA20L80, TA10L90, TA0L100, TA25L75). Isso sugere que a utilização de 100% de argila na produção de blocos cerâmicos resulta em baixas emissões de CO₂.

b) Grupos com LETA:

Vários grupos que contêm lodo em diferentes proporções têm valores-p significativamente baixos em comparação com o grupo TA100L0. Isso indica que a adição do lodo de ETA tem um impacto significativo nas emissões de CO₂, independentemente da proporção específica de lodo na mistura.

c) Grupos com alta concentração de lodo (TA0L100 e TA05L95):

Os grupos que consistem em 100% de lodo ou com uma alta proporção de lodo (como, 95%, 90% e 85%) têm valores-p relativamente baixos quando comparados com alguns grupos que contêm argila em maiores proporções. Isso sugere que a produção de CO₂ é afetada significativamente pela adição de lodo.

d) Grupos intermediários (TA20L80, TA10L90, TA15L85, TA25L75, TA30L70):

Esses grupos têm valores-p significativamente baixos em comparação com o grupo TA100L0, o que indica que a presença de argila em diferentes proporções ainda resulta em emissões de CO₂ significativamente diferentes. No entanto, os valores-p variam entre esses grupos, indicando que cada composição específica da mistura de argila e lodo tem um impacto diferente nas emissões de CO₂.

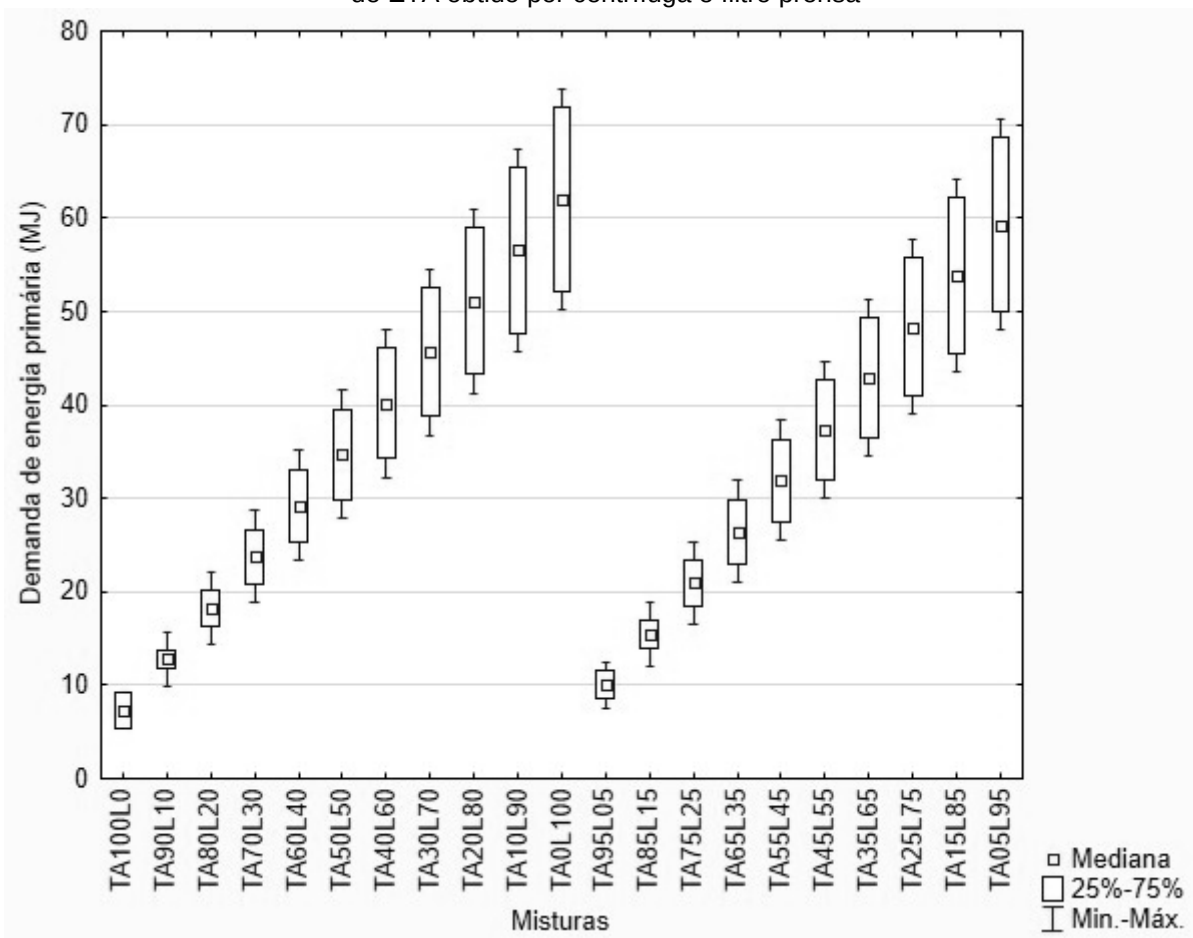
e) Comparações entre grupos com diferentes proporções de argila e lodo:

Vários valores-p indicam diferenças significativas nas emissões de CO₂ entre grupos com diferentes proporções de argila e lodo. Isso sugere que a escolha da mistura de matéria-prima é um fator importante na determinação das emissões de CO₂ na produção de blocos cerâmicos.

Os valores-p fornecidos demonstraram que a composição da mistura de argila e lodo de ETA tem um impacto significativo nas emissões de CO₂ na produção de blocos cerâmicos.

Na Figura 56 temos os valores-p fornecidos na análise estatística de comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner das misturas de argila e lodo de ETA na produção de blocos cerâmicos em relação à demanda de energia primária (para mais detalhes verificar Apêndice B).

Figura 56- Comparações múltiplas entre as misturas para demanda de energia primária (MJ) do lodo de ETA obtido por centrífuga e filtro prensa



Fonte: O Autor (2024).

Agrupando as comparações que mostram diferenças significativas (valores- $p < 0,05$) e aquelas em que as diferenças não são estatisticamente significativas (valores- $p > 0,05$), temos:

Valores de p baixos (indicando diferenças significativas):

- Grupo TA30L70 em relação a TA100L0 ($p=0,009495$): O grupo com 30% de lodo (TA30L70) apresenta uma diferença significativa na demanda de energia primária em comparação com o grupo de referência com 100% de argila (TA100L0).
- Grupos intermediários (TA20L80, TA10L90, TA25L75, TA15L85) em relação a TA100L0 (valores- p baixos, por exemplo, $p=0,000226$): Esses grupos intermediários têm diferenças significativas em relação ao grupo de referência com 100% de argila (TA100L0). As proporções específicas de argila e lodo

nessas misturas influenciam a demanda de energia primária de forma estatisticamente significativa.

- c) Grupos com lodo em altas proporções (TA0L100, TA05L95) em relação a TA100L0 (valores-p mais altos, por exemplo, $p=8,13E-05$): Grupos com lodo em altas proporções têm diferenças significativas na demanda de energia primária em relação ao grupo de referência com 100% de argila (TA100L0).

Valores de p altos (indicando que as diferenças não são estatisticamente significativas):

- a) Grupos com lodo de ETA em relação a TA100L0 (valores-p mais altos, por exemplo, $p=0,096972$): A maioria dos grupos com lodo em diferentes proporções não apresenta diferenças significativas na demanda de energia primária em relação ao grupo de referência com 100% de argila (TA100L0). Isso sugere que a adição de lodo em algumas proporções não afeta substancialmente a demanda de energia primária.
- b) Comparações entre grupos com diferentes proporções de argila e lodo: As diferenças na demanda de energia primária entre grupos com proporções específicas de argila e lodo variam, e nem todas essas diferenças são estatisticamente significativas. Portanto, o impacto da composição da mistura de argila e lodo varia dependendo das proporções.

Com base na análise estatística realizada, constatou-se a existência de diferenças significativas entre os grupos analisados, assim como para o método de secagem empregado, tanto para os dados de emissão de CO₂ quanto para a demanda de energia primária. A partir dessa análise estatística, nas próximas Seções, serão apresentados os dados obtidos e conduzidas as discussões relevantes para cada critério avaliado. Essa abordagem permitirá uma compreensão mais aprofundada das variações observadas nos resultados, contribuindo para uma análise mais integral e conclusiva.

5.3 LODO DE ETA OBTIDO POR CENTRÍFUGA

A Tabela 6 apresenta as informações de entrada e saída implementados na calculadora de produtos do Sidac para obter os dados de emissão de dióxido de

carbono e demanda de energia primária para o LETA em centrífuga. Na entrada, foram considerados a extração de 1 t de lodo até um raio de cerca de 30 quilômetros, sendo a centrífuga o método de desidratação mecânica empregado, com um gasto energético de 4,235 kW.h. Na saída, foram obtidos os dados de emissão de dióxido de carbono e demanda de energia primária, com 64,6 kg e 1344 MJ, respectivamente.

Tabela 6- Produção de LETA *in natura* por centrífuga

Entrada		
Material/Processo	Quantidade	Unidade
Extração do lodo (Argila)	1	t
Transporte do lodo até local de desidratação	30	t.km
Desidratação por centrífuga	4,235	KW.h
Saída		
Lodo seco <i>in natura</i>	0,05	t
Efluente	0,95	m³
Impacto ambiental		
Emissão de CO₂	64,6 Kg	
Demanda de energia primária	1344 MJ	

Fonte: O Autor (2024).

A Tabela 7 exibe os valores de mínimos e máximos de emissão de dióxido de carbono e demanda de energia primária para a confecção de um bloco cerâmico (9x19x19) cm de lodo *in natura* por centrífuga. Quanto a emissão de dióxido de carbono temos um valor mínimo registrado de 3,24 kg e máximo de 3,42 kg, já com relação a demanda de energia primária tem-se 69,86 e 73,82, de mínimo e máximo, respectivamente.

Os dados apresentam um aumento de aproximadamente 1079% para a emissão de dióxido de carbono e cerca de 794% para demanda de energia primária, quando comparados ao bloco cerâmico de mesmas dimensões confeccionado com argila e levando em consideração os valores máximos para o cálculo. Isso se deve ao fato do transporte do LETA, bem como devido a processos mais intensivos em energia, como a secagem, necessários para tratar e incorporar o lodo de ETA no material.

Tabela 7- Dados de energia primária e emissão de CO₂ para um bloco cerâmico de lodo *in natura* por centrífuga

Produção de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm do lodo de ETA por centrífuga						
Entrada						
Material	Quantidade	Unidade	Emissão de CO ₂ mínimo (kg)	Emissão de CO ₂ máximo (kg)	Demanda de energia primária mínima (MJ)	Demanda de energia primária máxima (MJ)
Bloco de lodo	2,4	kg	3,24	3,42	69,86	73,82

Fonte: O Autor (2024).

Os dados apresentados na Tabela 8 relacionam a composição de misturas de argila e LETA seco em centrífuga com a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e a demanda de energia primária na produção de blocos cerâmicos (9x19x19) cm. Os valores são expressos em termos de emissão de CO₂ (em kg CO₂ por t de produto) e demanda de energia primária (em MJ por t de produto).

Ao passo que a quantidade de lodo na mistura aumenta, tanto a emissão de CO₂ quanto a demanda de energia primária aumentam. Isso indica que misturas com mais lodo têm um impacto ambiental maior e requerem mais energia na produção dos blocos cerâmicos.

Portanto, a escolha da composição da mistura de argila e lodo na produção de blocos cerâmicos deve ser feita considerando esses dados, com o objetivo de minimizar o impacto ambiental e o consumo de energia.

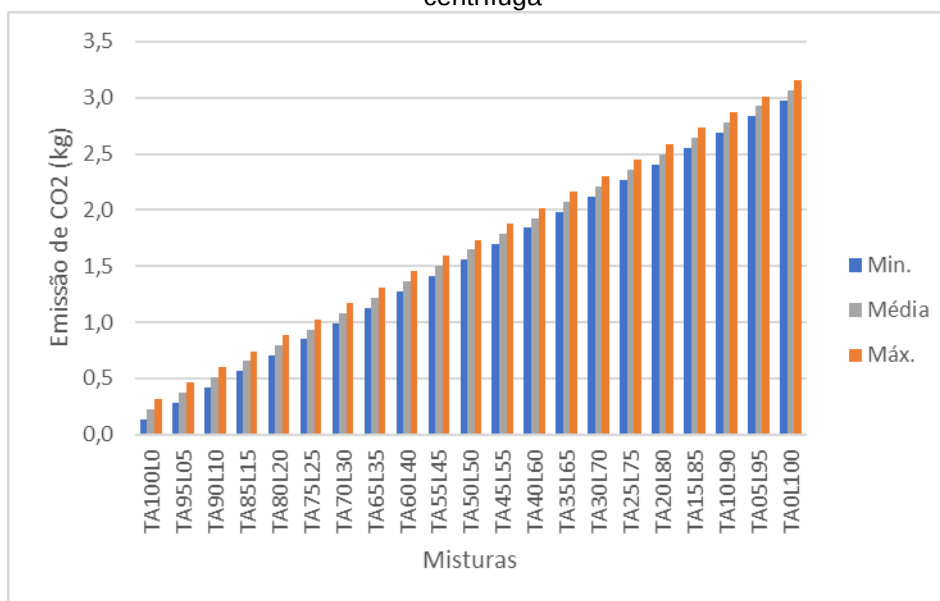
Tabela 8- Emissão de CO₂ (kg) e demanda de energia primária (MJ) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm das misturas (argila e LETA por centrífuga)

Centrífuga								
Proporções (%)		Nome	Emissão de CO₂ (kg)			Demanda de energia primária (MJ)		
Argila	Lodo		Min.	Máx.	Média	Min.	Máx.	Média
100	0	TA100L0	0,138	0,317	0,228	5,352	9,303	7,328
95	5	TA95L05	0,293	0,472	0,383	8,578	12,529	10,554
90	10	TA90L10	0,448	0,627	0,538	11,803	15,754	13,779
85	15	TA85L15	0,603	0,783	0,693	15,029	18,980	17,005
80	20	TA80L20	0,758	0,938	0,848	18,254	22,205	20,230
75	25	TA75L25	0,913	1,093	1,003	21,480	25,431	23,456
70	30	TA70L30	1,068	1,248	1,158	24,706	28,657	26,681
65	35	TA65L35	1,223	1,403	1,313	27,931	31,882	29,907
60	40	TA60L40	1,378	1,558	1,468	31,157	35,108	33,132
55	45	TA55L45	1,533	1,713	1,623	34,382	38,333	36,358
50	50	TA50L50	1,688	1,868	1,778	37,608	41,559	39,584
45	55	TA45L55	1,842	2,020	1,931	40,780	44,692	42,736
40	60	TA40L60	1,998	2,178	2,088	44,059	48,010	46,035
35	65	TA35L65	2,153	2,333	2,243	47,285	51,236	49,261
30	70	TA30L70	2,308	2,488	2,398	50,510	54,461	52,486
25	75	TA25L75	2,463	2,643	2,553	53,736	57,687	55,712
20	80	TA20L80	2,618	2,798	2,708	56,962	60,913	58,938
15	85	TA15L85	2,773	2,953	2,863	60,187	64,138	62,163
10	90	TA10L90	2,928	3,108	3,018	63,413	67,364	65,389
5	95	TA05L95	3,083	3,263	3,173	66,638	70,589	68,614
0	100	TA0L100	3,239	3,418	3,328	69,864	73,815	71,840

Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 57, podemos observar que a emissão de CO₂ aumenta à medida que a proporção de lodo seco em centrífuga na mistura aumenta. A relação entre a proporção de lodo e a emissão de CO₂ é direta, o que significa que quanto mais lodo for utilizado, maior será a emissão de CO₂ na produção de blocos cerâmicos.

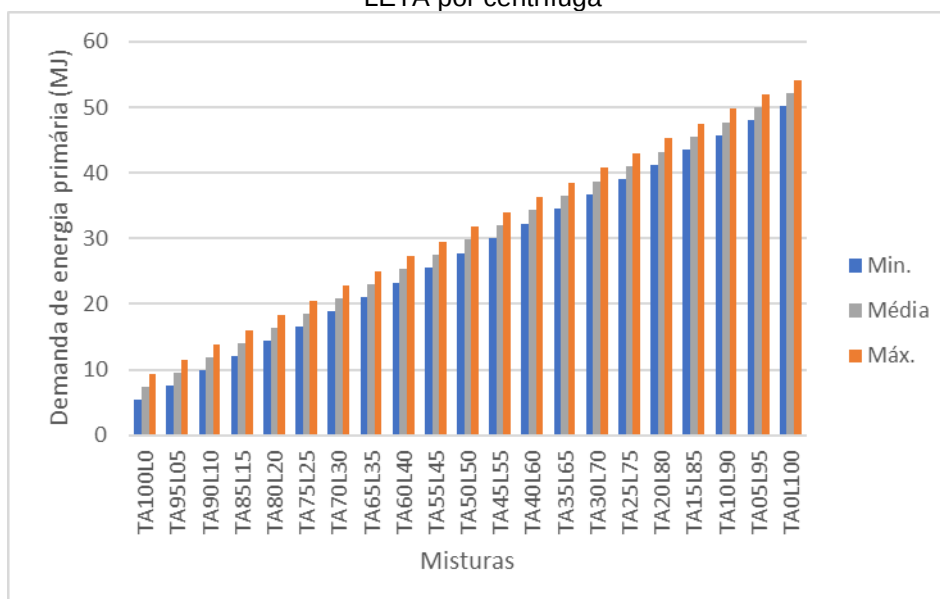
Figura 57- Emissão de CO₂ (kg) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e LETA por centrífuga



Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 58, podemos notar uma tendência semelhante. A demanda de energia primária também aumenta à medida que a proporção de lodo seco em centrífuga na mistura aumenta. Temos uma relação direta entre a proporção de lodo e a demanda de energia primária, indicando que misturas com maior teor de lodo requerem mais energia na produção.

Figura 58- Demanda de energia primária (MJ) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e LETA por centrífuga



Fonte: O Autor (2024).

Existe uma forte correlação entre a proporção de lodo presente na mistura de argila e a emissão de CO₂, assim como a demanda de energia primária. Isso significa que à medida que a quantidade de lodo aumenta, tanto as emissões de CO₂ quanto a demanda de energia aumentam significativamente. Esses resultados indicam que o uso crescente de lodo pode resultar em uma produção mais poluente e menos eficiente em comparação com a argila, especialmente no contexto da fabricação de blocos cerâmicos.

É importante observar que a diferença nas emissões de CO₂ e na demanda de energia entre misturas com 5% e 10% de lodo é menos significativa do que entre misturas com 85% e 90% de lodo. Logo, a adição de lodo tem um impacto mais significativo nas emissões e no consumo de energia em níveis de substituições mais altos.

A correlação entre a emissão de CO₂ e a demanda de energia primária no processo de centrífuga é alta, com um coeficiente de correlação igual a 0,998. Isso indica uma forte correlação entre as duas variáveis, independentemente da composição da mistura de argila e lodo. Em outras palavras, à medida que a emissão de CO₂ aumenta em uma das composições, a demanda de energia primária também aumenta na mesma proporção. Essa correlação sugere que, em termos de emissões de CO₂ e demanda de energia primária, as duas variáveis estão fortemente alinhadas ao processo de secagem, centrífuga. No entanto, é importante lembrar que outras considerações, como eficiência operacional e custos, devem ser levadas em conta ao tomar decisões sobre a produção de blocos cerâmicos.

5.4 LODO DE ETA OBTIDO POR FILTRO PRENSA

A Tabela 9 apresenta as informações de entrada e saída implementados na calculadora de produtos do Sidac para obter os dados de emissão de dióxido de carbono e demanda de energia primária para o LETA em filtro prensa. Na entrada, foram considerados a extração de 1 t de lodo até um raio de cerca de 30 quilômetros, sendo o filtro prensa o método de desidratação mecânica empregado, com um gasto energético de 0,32 kW.h. Na saída, foram obtidos os dados de emissão de dióxido de carbono e demanda de energia primária, com 59,12 kg e 935,5 MJ, respectivamente.

Tabela 9- Produção de LETA *in natura* por filtro prensa

Entrada		
Material/Processo	Quantidade	Unidade
Extração do lodo (Argila)	1	t
Transporte do lodo até local de desidratação	30	t.km
Desidratação por filtro prensa	0,32	KW.h
Saída		
Lodo seco <i>in natura</i>	0,05	t
Efluente	0,95	m³
Impacto ambiental		
Emissão de CO ₂	59,12 kg	
Demanda de energia primária	935,5 MJ	

Fonte: O Autor (2024).

A Tabela 10 exibe os valores de mínimos e máximos de emissão de dióxido de carbono e demanda de energia primária para a confecção de um bloco cerâmico (9x19x19) cm de lodo *in natura* por filtro prensa. Quanto a emissão de dióxido de carbono temos um valor mínimo registrado de 2,98 kg e máximo de 3,16 kg, já com relação a demanda de energia primária tem-se 50,26 e 54,21, de mínimo e máximo, respectivamente.

Os dados apresentam um aumento de aproximadamente 997% para a emissão de dióxido de carbono e cerca de 582% para demanda de energia primária, quando comparados ao bloco cerâmico de mesmas dimensões confeccionado com argila e levando em consideração os valores máximos para o cálculo. Isso se deve ao fato do transporte do LETA, bem como devido a processos mais intensivos em energia necessários para tratar e incorporar o lodo no material.

Tabela 10- Dados de energia primária e emissão de CO₂ para um bloco cerâmico de lodo *in natura* por filtro prensa

Produção de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm do lodo de ETA por filtro prensa						
Entrada						
Material	Quantidade	Unidade	Emissão de CO ₂ mínimo (kg)	Emissão de CO ₂ máximo (kg)	Demanda de energia primária mínima (MJ)	Demanda de energia primária máxima (MJ)
Bloco de lodo	2,4	kg	2,98	3,16	50,26	54,21

Fonte: O Autor (2024).

Os dados da

Tabela 11 relacionam a composição de misturas de argila e LETA seco em filtro prensa com a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e a demanda de energia primária na produção de blocos cerâmicos (9x19x19) cm.

Tabela 11- Emissão de CO₂ (kg) e demanda de energia primária (MJ) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm das misturas (argila e LETA por filtro prensa)

Filtro Prensa								
Proporções (%)		Nome	Emissão de CO ₂ (kg)			Demanda de energia primária (MJ)		
Argila	Lodo		Min.	Máx.	Média	Min.	Máx.	Média
100	0	TA100L0	0,138	0,317	0,228	5,352	9,303	7,328
95	5	TA95L05	0,280	0,459	0,370	7,597	11,548	9,573
90	10	TA90L10	0,421	0,601	0,511	9,842	13,793	11,818
85	15	TA85L15	0,563	0,743	0,653	12,088	16,039	14,064
80	20	TA80L20	0,705	0,885	0,795	14,333	18,284	16,308
75	25	TA75L25	0,847	1,027	0,937	16,578	20,529	18,554
70	30	TA70L30	0,989	1,169	1,079	18,823	22,774	20,799
65	35	TA65L35	1,131	1,311	1,221	21,068	25,019	23,044
60	40	TA60L40	1,273	1,453	1,363	23,314	27,265	25,289
55	45	TA55L45	1,415	1,594	1,505	25,559	29,510	27,535
50	50	TA50L50	1,557	1,736	1,646	27,804	31,755	29,780
45	55	TA45L55	1,698	1,878	1,788	30,049	34,000	32,025
40	60	TA40L60	1,840	2,020	1,930	32,294	36,245	34,270
35	65	TA35L65	1,982	2,162	2,072	34,540	38,491	36,516
30	70	TA30L70	2,124	2,304	2,214	36,785	40,736	38,761
25	75	TA25L75	2,266	2,446	2,356	39,030	42,981	41,006
20	80	TA20L80	2,408	2,588	2,498	41,275	45,226	43,251
15	85	TA15L85	2,550	2,729	2,640	43,520	47,471	45,496
10	90	TA10L90	2,692	2,871	2,782	45,766	49,717	47,742
5	95	TA05L95	2,834	3,013	2,924	48,011	51,962	49,987
0	100	TA0L100	2,975	3,155	3,065	50,256	54,207	52,232

Fonte: O Autor (2024).

A emissão de CO₂ aumenta à medida que a proporção de lodo na mistura de argila aumenta. A relação entre a proporção de lodo e a emissão de CO₂ é positiva, e podemos observar um aumento gradual e linear na emissão de CO₂ à medida que o lodo se torna mais predominante na mistura.

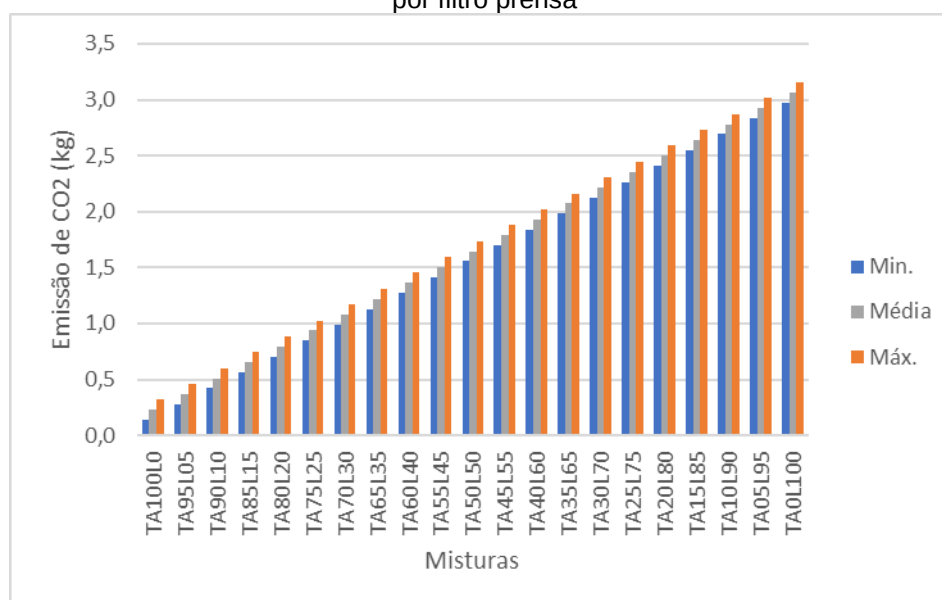
A demanda de energia primária aumenta à medida que a proporção de lodo na mistura de argila aumenta. A relação entre a proporção de lodo e a demanda de energia primária também é positiva e o aumento na demanda de energia segue um padrão linear, acompanhando o aumento na proporção de lodo.

Assim como o lodo resultante da centrífuga, os dados indicam que misturas com maior teor de argila são menos poluentes e mais econômicas energeticamente em termos de emissões de CO₂ e consumo de energia na produção de blocos cerâmicos. Nesse contexto, a preferência deve ser dada às misturas com uma maior proporção de argila em comparação ao lodo.

A adição do LETA tem um impacto mais significativo nas emissões de CO₂ e na demanda de energia em níveis mais altos de lodo. A diferença nas emissões e na demanda de energia entre misturas com 5% e 10% de lodo é menor em comparação com a diferença entre 90% e 95% de lodo, por exemplo.

Na Figura 59, observa-se que existe uma correlação direta clara entre a emissão de CO₂ e a composição da mistura de argila e lodo seco em filtro prensa na produção de blocos cerâmicos. Conforme a proporção de lodo na mistura aumenta, nota-se um aumento linear nas emissões de CO₂.

Figura 59- Emissão de CO₂ (kg) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e lodo de ETA por filtro prensa

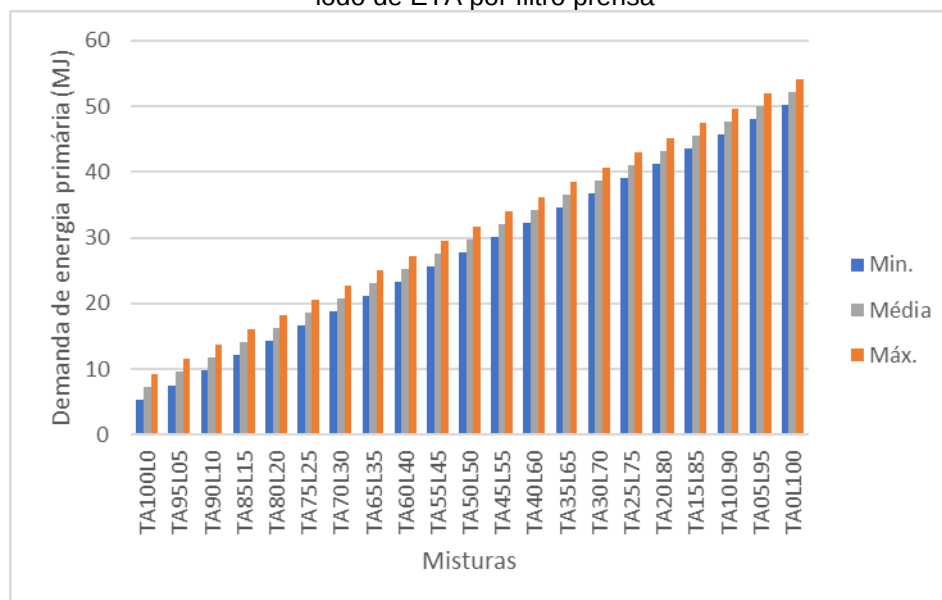


Fonte: O Autor (2024).

Da mesma maneira, na Figura 60, é possível notar uma correlação direta entre a demanda de energia primária e a composição da mistura de argila e lodo

seco em filtro prensa. À medida que a proporção de lodo na mistura aumenta, observa-se um aumento linear na demanda de energia primária.

Figura 60- Demanda de energia primária (MJ) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e lodo de ETA por filtro prensa



Fonte: O Autor (2024).

Com base na correlação dos dados, a recomendação é priorizar a utilização de misturas com menor proporção de lodo na produção de blocos cerâmicos, sempre que possível, tendo em vista a necessidade de mais energia para processar o lodo ou a maior energia necessária para alcançar as propriedades desejadas no material. Isso resultará em emissões de CO₂ mais baixas e em uma demanda de energia primária reduzida, contribuindo para um processo de produção de blocos mais eficiente. Além disso, ao considerar a transição para misturas com mais lodo, é importante avaliar cuidadosamente o impacto nas emissões e no consumo de energia para garantir que os requisitos e normativas ambientais sejam atendidos.

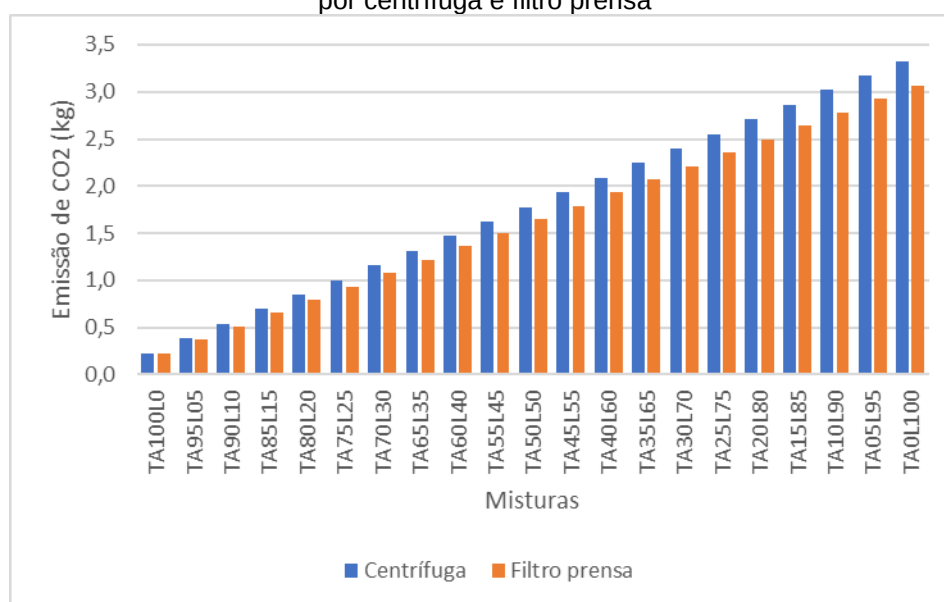
A correlação entre a emissão de CO₂ e a demanda de energia primária no processo de filtro prensa é alta, com um coeficiente de correlação igual a 0,998. Isso indica uma forte correlação entre as duas variáveis, independentemente da composição da mistura de argila e lodo. Em outras palavras, à medida que a emissão de CO₂ aumenta em uma das composições, a demanda de energia primária também aumenta na mesma proporção. Essa alta correlação sugere que, em termos de emissões de CO₂ e demanda de energia primária, as duas variáveis estão fortemente alinhadas no processo de filtro prensa. No entanto, é importante lembrar

que outras considerações, como eficiência operacional e custos, devem ser levadas em conta ao tomar decisões sobre a produção de blocos cerâmicos.

5.5 CORRELAÇÕES DO LODO DE ETA OBTIDO POR CENTRÍFUGA E FILTRO PRENSA

Na Figura 61 temos os dados relativos à emissão de dióxido de carbono (CO_2) na produção de blocos cerâmicos com misturas de argila e lodo de ETA seco em centrífuga e filtro prensa.

Figura 61- Emissão de CO_2 (kg) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e lodo de ETA por centrífuga e filtro prensa



Fonte: O Autor (2024).

Observa-se que, em geral, a emissão de CO_2 no processo de centrífuga é maior do que no processo de filtro prensa, independentemente da composição da mistura de argila e lodo. Isso sugere que, em termos de emissões de CO_2 , a centrífuga é uma opção menos sustentável em comparação com o filtro prensa para a produção de blocos cerâmicos.

A análise da composição das misturas revela que a emissão de CO_2 aumenta à medida que a proporção de lodo na mistura aumenta, tanto para a centrífuga quanto para o filtro prensa. Entretanto, a diferença entre os dois processos permanece consistente.

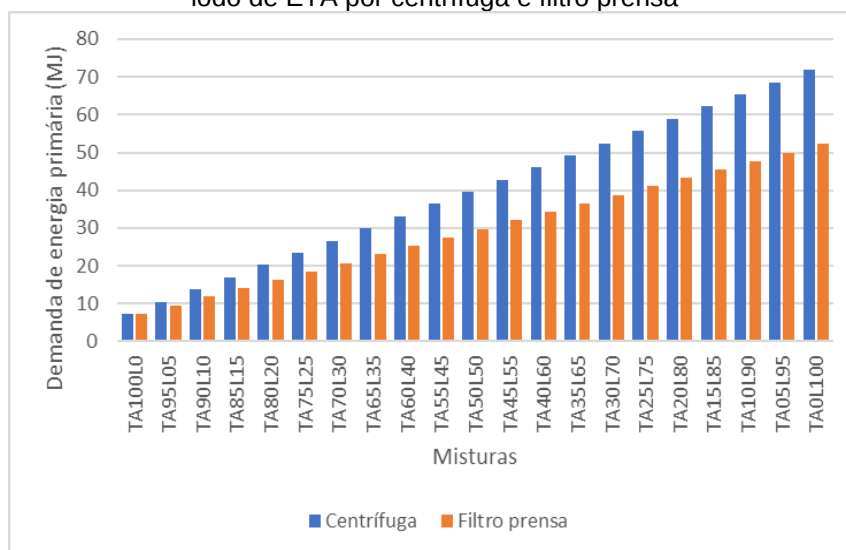
As emissões de CO₂ na produção de blocos cerâmicos são influenciadas não apenas pela composição da mistura, mas também pelo método de processamento. A escolha do processo, neste caso, do filtro prensa em vez da centrífuga, pode ser uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de CO₂.

Portanto, a escolha do processo de secagem e misturas com menor teor de lodo são medidas eficazes para reduzir as emissões de CO₂ na produção de blocos cerâmicos.

A correlação entre as emissões de CO₂ na centrífuga e no filtro prensa é evidenciada por um coeficiente de correlação de 0,991. Tal coeficiente indica uma correlação positiva entre as emissões de CO₂ nessas duas abordagens, independentemente da composição da mistura de argila e lodo. Em termos mais diretos, à medida que as emissões de CO₂ aumentam em uma das abordagens, observa-se um aumento proporcional na outra. Esta forte correlação sugere que, no que tange às emissões de CO₂, as duas abordagens (centrífuga e filtro prensa) estão fortemente alinhadas. Portanto, a escolha entre esses dois métodos de processamento terá um impacto significativo nas emissões de CO₂, independentemente da composição da mistura.

Os dados fornecidos na Figura 62 apresentam a demanda de energia primária na produção de blocos cerâmicos com misturas de argila e lodo de ETA seco em centrífuga e filtro prensa.

Figura 62- Demanda de energia primária (MJ) de bloco cerâmico VED15 (09 x 19 x 19) cm de argila e lodo de ETA por centrífuga e filtro prensa



Fonte: O Autor (2024).

Nota-se que, em geral, a demanda de energia primária no processo de centrífuga é maior do que no processo de filtro prensa, independentemente da composição da mistura de argila e lodo. Isso sugere que, em termos de demanda de energia primária, o filtro prensa é uma opção mais eficiente em comparação com a centrífuga para a produção de blocos cerâmicos.

A análise da composição da mistura revela que a demanda de energia primária aumenta à medida que a proporção de lodo na mistura aumenta, tanto para a centrífuga quanto para o filtro prensa. Isso demonstra que misturas com maior teor de lodo tendem a resultar em maior demanda de energia primária em ambos os processos de produção.

A demanda de energia primária na produção de blocos cerâmicos é influenciada não apenas pela composição da mistura, mas também pelo método de secagem. A escolha do processo, neste caso, a centrífuga em vez do filtro prensa, pode ser uma estratégia não eficaz para reduzir a demanda de energia primária.

Portanto, a escolha do processo de secagem, preferencialmente o filtro prensa em vez da centrífuga e a utilização misturas com menor teor de LETA são medidas eficazes para reduzir a demanda de energia primária na produção de blocos cerâmicos.

A correlação entre a demanda de energia primária na centrífuga e no filtro prensa é alta, com um coeficiente de correlação de 0,998. Isso indica uma correlação positiva entre as duas abordagens, independentemente da composição da mistura de argila e lodo. Em outras palavras, à medida que a demanda de energia primária aumenta em uma das abordagens, ela também aumenta na outra. Essa alta correlação sugere que, em termos de demanda de energia primária, as duas abordagens (centrífuga e filtro prensa) estão fortemente alinhadas. Portanto, a escolha entre esses dois métodos de processamento terá um impacto significativo na demanda de energia primária, independentemente da composição da mistura.

5.6 ANÁLISE COMPARATIVA

Ao construir ou reformar um imóvel, é sempre importante estabelecer a quantidade de materiais que serão necessários. O cálculo de tijolos, fabricados com argila e lodo, que serão necessários para construir 1 m² de alvenaria segue o mesmo princípio de tijolos convencionais, com as mesmas dimensões (9x19x19) cm.

O tijolo de 8 furos, também conhecido como tijolo baiano (Leroy Merlin, 2023) tem por padrão: 9 x 19 x 19 cm (medidas de espessura, altura e comprimento em centímetros). Como será usado em pé na obra, vamos ao cálculo dos lados $0,19 \times 0,19 = 0,0361 \text{ m}^2$. Ou seja, 1 tijolo tem $0,0361 \text{ m}^2$. Logo, para 1 m^2 de alvenaria temos, $1 \text{ m}^2 / 0,0361 \text{ m}^2 = 27,70$. Ou seja, é preciso aproximadamente **28 tijolos** com dimensões 9x19x19 cm para cobrir uma área de 1 m^2 , sendo os resultados também condizentes com VivaDecora (2022).

Uma forma de calcular o consumo total de tijolos para uma edificação é através da soma de toda a extensão do seu perímetro, ou seja, somam-se os comprimentos de todos os cômodos da casa. Lembrando que, para uma construção mais simples, devem-se incluir no cálculo todas as paredes, de acordo com a altura do pé-direito, não se esquecendo do oitão, que sustentará o telhado. Indica-se também, por questão de economia, a subtração da área referente aos vãos de janelas e portas. Depois, basta dividir essa área total pela área de cada tijolo.

De acordo com Biomassa do Brasil (2017) e para fins de simplificação vamos considerar uma construção de apenas um pavimento, planta baixa quadrada e telhado de duas águas, tendo os seguintes valores:

- Duas paredes de 4 m e duas paredes de 2 m;
- Pé-direito de 2,7 m;
- Oitão de 80 cm;
- 1 janela de 120x120 cm;
- 1 porta de 90x210 cm.

Somando o perímetro das paredes temos 12 m. Multiplicando esse valor pelo pé-direito tem-se $32,4 \text{ m}^2$. Somando esse valor à área dos oitões, de $3,2 \text{ m}^2$, chega-se a $35,6 \text{ m}^2$. Subtraindo a área das aberturas, a área total de paredes da casa é de $32,27 \text{ m}^2$.

Com a utilização de um tijolo com dimensões (9x19x19) cm, de rendimento de 28 tijolos por m^2 , pode-se estimar o consumo de aproximadamente 904 peças para se erguer a construção. Acrescentando mais 10%, referente as perdas no processo construtivo, chega-se ao número final de cerca de **995** tijolos.

Na Tabela 12, observa-se as diferentes misturas de argila e lodo com dois métodos de secagem distintos, centrífuga e filtro prensa, para a produção de blocos cerâmicos. Os valores dos dados referem-se à emissão de dióxido de carbono por unidade de tijolo, por metro quadrado e para uma construção simples utilizando misturas de lodo em menores proporções (5% e 10 de lodo), em proporções intermediárias dos materiais (50 de argila e 50% de lodo) e com um tijolo de referência (100% argila).

Tabela 12- Emissão de CO₂ por unidade de tijolo, por metro quadrado e para uma construção simples

Proporções (%)		Nome	Centrífuga			Filtro Prensa		
			Emissão de CO ₂ (kg)			Emissão de CO ₂ (kg)		
Argila	Lodo		Unid.	/m ²	Construção	Unid.	/m ²	Construção
100	0	TA100L0	0,228	6,371	226,412	0,228	6,371	226,412
95	5	TA95L05	0,383	10,710	380,588	0,370	10,346	367,653
50	50	TA50L50	1,778	49,783	1769,060	1,646	46,100	1638,198
0	100	TA0L100	3,328	93,194	3311,708	3,065	85,829	3049,983

Fonte: O Autor (2024).

A partir dos dados, observa-se que a presença de lodo nas misturas está associada a emissões mais altas de dióxido de carbono em todas as categorias de avaliação (unidade de tijolo, metro quadrado e construção simples). Embora as emissões variem entre a centrífuga e o filtro prensa, a tendência de aumento da emissão de CO₂ com o aumento do lodo é consistente entre os dois métodos de secagem (centrífuga e filtro prensa).

Na Tabela 13, temos a demanda de energia primária na produção de blocos cerâmicos, considerando diferentes misturas de argila e lodo seco em centrífuga e filtro prensa. Os valores representam a demanda de energia primária por unidade de tijolo, por metro quadrado e para uma construção simples.

Tabela 13- Demanda de energia primária por unidade de tijolo, por metro quadrado e para uma construção simples

Proporções (%)		Nome	Centrífuga			Filtro Prensa		
			Demanda de energia primária (MJ)			Demanda de energia primária (MJ)		
Argila	Lodo		Unid.	/m ²	Construção	Unid.	/m ²	Construção
100	0	TA100L0	7,328	205,170	7290,863	7,328	205,170	7290,863
95	5	TA95L05	10,554	295,498	10500,733	9,573	268,030	9524,638
50	50	TA50L50	39,584	1108,338	39385,583	29,780	833,826	29630,603
0	100	TA0L100	71,840	2011,506	71480,303	52,232	1462,482	51970,343

Fonte: O Autor (2024).

A partir dos dados apresentados, nota-se que a demanda de energia primária aumenta significativamente com o aumento do lodo nas misturas, independentemente do método de secagem (centrífuga ou filtro prensa). Em todas as métricas (unidade de tijolo, metro quadrado e construção simples), as misturas com 0% de argila e 100% de lodo manifestam as maiores demandas de energia primária. Além disso, ambos os métodos de secagem (centrífuga e filtro prensa) demonstram tendências semelhantes em relação à demanda de energia primária para diferentes misturas.

No âmbito da produção de blocos cerâmicos, os dados mostraram revelou que o bloco TA90L10, contendo 10% de substituição à argila por LETA, foi identificado como a proporção ideal. Isso se justifica pela consideração de uma maior quantidade de lodo em sua composição. Notavelmente, ao comparar esse bloco com a opção que apresenta 5% de substituição, onde não foram identificadas diferenças estatísticas significativas. Essa constatação é importante não apenas no contexto da produção, mas também quando consideramos os dados relacionados às emissões de CO₂ e a demanda de energia primária. Assim, o bloco TA90L10 se destaca como uma escolha eficiente, equilibrando a incorporação de lodo, desempenho estatístico e impactos ambientais, consolidando sua posição como uma opção viável na fabricação de blocos cerâmicos.

6 CONCLUSÃO

Após realizar a revisão sistemática da literatura que aborda as aplicações do lodo de ETAs como matéria-prima para a indústria da construção civil, bem como a aplicação da ACV na produção de blocos cerâmicos utilizando lodo de ETA e análise estatística aplicada aos dados provenientes do lodo obtido por centrífuga e filtro prensa para a emissão de CO₂ e demanda de energia primária, as seguintes conclusões puderam ser estabelecidas:

- 1) Na análise das características físicas do lodo de ETAs, especialmente nas 6 localizadas na RMR, é fornecida uma visão abrangente das particularidades do lodo em diversos contextos. Os resultados indicam que a média de umidade do lodo é elevada, atingindo aproximadamente 93%, sendo a ETA Gurjaú notável pela densidade do lodo. Há uma relevante variação na concentração de sólidos, com a ETA Gurjaú sendo classificada como resíduo sólido devido aos sólidos totais estarem acima de 6.000 mg/L. A relação DQO/DBO sugere uma baixa biodegradabilidade do lodo. Na água de lavagem dos filtros, os índices de cloreto permanecem abaixo de 110 mg/L, mesmo em ETAs com lodos dos decantadores que excedem 250 mg/L. Tanto a relação DQO/DBO quanto a composição dos sólidos totais indicam a predominância de compostos orgânicos não biodegradáveis;
- 2) Quanto a caracterização química, a fluorescência de raios-X mostrou que todas as amostras do LETA são constituídas majoritariamente por óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de cálcio (CaO) que apresentam variações influenciadas pela época de coleta, processos de beneficiamento e tratamento do efluente residual adotados, bem como das peculiaridades geológicas e culturais de cada local. Além disso, a análise da perda de massa ao fogo revelou uma elevada taxa de matéria orgânica nas amostras;
- 3) A análise mineralógica por difração de raios-X revelou que o lodo de ETA pode conter diversas fases cristalinas, entre as quais se destacam minerais comuns, como o quartzo, consistentemente identificado em praticamente todos os estudos. Além disso, observam-se argilominerais,

carbonatos, óxidos e outros minerais específicos relacionados aos processos de tratamento e à composição da água tratada;

- 4) Estudos como os de Lee *et al.* (2021), Mañosa *et al.* (2021), Ying e Awang (2019), Kwek e Awang (2018) e Huang e Wang (2013), indicam que a substituição de até 50% dos agregados naturais por lodo de ETA não apenas atende a padrões de uso, mas também resulta em propriedades físicas e mecânicas comparáveis ou até mesmo superiores as amostras de referência. Ying e Awang, ao analisarem a microestrutura, destacam a influência da composição dos materiais e a formação de géis Na–S–H e C–S–H nos agregados leves. Lee *et al.* revelam que a expansão desses agregados está relacionada à presença de microporos gerados pela queima da matéria orgânica. Huang e Wang complementam essas conclusões ao mencionar que o processo de transformação do lodo em agregados leves resulta em uma fase vítrea com poros irregulares;
- 5) O lodo de ETA calcinado pode ser utilizado como MCS, apresentando reatividade e atividade pozolânica em diferentes faixas de temperatura. Shamaki *et al.* (2021) destacam que a temperatura mais eficaz para a calcinação é de 825 °C, resultando em formação de alumina pouco cristalina. Godoy *et al.* (2019) identificaram que a calcinação a 600 °C é a condição mais promissora para o seu estudo, enquanto Tantawy (2015) indicou que 800 °C é suficiente para aprimorar as propriedades pozolânicas. Quanto aos aspectos microestruturais, Yang *et al.* (2023) e Shamaki *et al.* (2021), revelaram variações na morfologia das partículas e na compacidade da matriz, indicando a sensibilidade do comportamento microestrutural a diferentes condições térmicas;
- 6) Quanto a aplicação do LETA em argamassas, Al-Rawashdeh *et al.* (2022) observaram que até 10% de lodo calcinado aumentou a resistência. Pham *et al.* (2021) encontraram estabilidade na resistência à compressão com 5% de lodo de ETA, seja ele calcinado ou não, mas teores de 10% resultaram em redução. Oliveira Andrade *et al.* (2018) indicaram que 5% de lodo de ETA são adequados para propriedades mecânicas satisfatórias em argamassas. Chen (2013) mostrou que 20% de lodo de ETA conferiram resistência à carbonatação. Na microestrutura, o trabalho de Pham *et al.* (2021) destaca que o tratamento térmico do lodo de ETA,

como a calcinação a 900 °C, melhora a ligação com a matriz de cimento, resultando em uma superfície mais homogênea. Por outro lado, Oliveira Andrade *et al.* (2018) observam microfissuras no LETA não calcinado, relacionadas à redução de resistência e destacam que o aumento na substituição de LETA está associado ao aumento do comprimento da ZTI;

- 7) O estudo de He *et al.* (2023) destacou benefícios ao adicionar 10% de LETA calcinado ao concreto, resultando em melhorias na resistência à compressão. Entretanto, Liu *et al.* (2020) e Sales *et al.* (2010) indicaram que altas proporções de LETA podem afetar negativamente resistências mecânicas, mas a cura por carbonatação pode mitigar esse efeito. Quanto a microestrutura, em He *et al.* (2023), a adição de 10% de LETA melhorou a compacidade da matriz, enquanto maiores proporções levaram a uma matriz mais solta e poros de grande porte, influenciando a ZTI, enquanto que no estudo de Liu *et al.* (2020), as imagens de MEV mostraram CaCO_3 na superfície fraturada do concreto carbonatado com LETA, indicando reações de hidratação do cimento;
- 8) Em trabalhos que avaliaram a substituição da argila pelo LETA em tijolos, como os realizados por Bandeira *et al.* (2021) e Kizinievič e Kizinievič (2017), observou-se que mesmo com desempenho mecânico semelhante, a presença do lodo de ETA aumentou a porosidade e a absorção de água dos tijolos. Resultados diferentes foram encontrados por Sverguzova, Sapronova e Fomina (2020), que notaram um aumento na resistência à compressão com a inclusão do lodo. Ademais, Nor *et al.* (2015) destacaram que tijolos contendo 100% de lodo de ETA atenderam a requisitos normativos em relação à resistência à compressão. Nos ensaios microestruturais, Kizinievič *et al.* (2013) evidenciaram que a adição de LETA resultou em uma microestrutura mais porosa, afetando propriedades como a porosidade. Entretanto, Sutcu *et al.*, 2022 observaram que a incorporação de LETA e cinzas de resíduos sólidos resultou em tijolos com menor porosidade e absorção de água;
- 9) Iamchaturapatr e Piriyaikul (2020) destacaram que o LETA calcinado a 850 °C resulta em maior resistência em geopolímeros. Substituições parciais de metacaulim por LETA mostraram manutenção da resistência à compressão, enquanto adições de cinza de casca de arroz e combinações

com outros resíduos, como cinzas volantes, contribuíram para melhorias na resistência como apresentados pelos estudos de Geraldo, Fernandes e Camarini (2017); Nimwinya *et al.* (2016); Poowancum; Nimwinya; Horpibulsuk (2015); Ho, Orbecido e Promentilla (2018). Geraldo, Fernandes e Camarini (2017) notaram que a incorporação de LETA na matriz de geopolímero resultou em maior porosidade e cavidades. Essa porosidade está relacionada à influência da temperatura de cura, conforme destacado por Nimwinya *et al.* (2016), onde amostras curadas em temperaturas mais elevadas apresentaram matrizes mais densas, enquanto amostras curadas à temperatura ambiente exibiram maior porosidade e presença de partículas não reagidas de LETA. Suksiripattanapong *et al.* (2015) complementaram essas observações ao investigar a influência das razões de ativador alcalino/cinza volante e $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ nas microestruturas e resistência dos geopolímeros, destacando a importância de proporções ideais para evitar microfissuras e garantir uma matriz densa;

- 10) Para o melhoramento dos solos, o lodo de ETA demonstra eficiência, especialmente em solo arenoso, contribuindo para melhorar a capacidade de carga-assentamento e preenchendo vazios. Na caracterização geotécnica, o lodo de ETA mostra potencial como aditivo para revestimento de obras de terra e reforço de solo argiloso. Na construção de estradas, o lodo de ETA é eficaz como substituto de solo, melhorando propriedades como teor de umidade ótimo, resistência à compressão e resistência ao cisalhamento. As análises microestruturais revelaram que as amostras de solo com lodo de ETA apresentaram tamanhos de grãos maiores e granulação mais uniforme, resultando em menor porosidade quando comparadas com amostras de solo puro ou com uma combinação de argila e lodo de ETA. Essa condição de menor porosidade está relacionada diretamente à resistência do solo, indicando que o uso de lodo de ETA pode resultar em solos mais resistentes;
- 11) Os valores-p fornecidos com a análise estatística aplicada aos dados resultantes da ACV demonstraram que a composição da mistura de argila e lodo de ETA tem um impacto significativo, tanto nas emissões de CO_2 quanto no processo de secagem na produção de blocos cerâmicos;

- 12) A partir dos dados coletados na ACV, tem-se que à medida que a quantidade de lodo de ETA aumenta na mistura, tanto a emissão de CO₂ quanto a demanda de energia primária aumentam, independentemente do processo de secagem, seja ele por centrífuga ou filtro prensa. Entretanto, a diferença entre os dois processos permanece consistente;
- 13) A diferença nas emissões de CO₂ e na demanda de energia entre misturas com 5% e 10% de lodo é menos significativa do que entre misturas com 90% e 95% de lodo, independente do processo de secagem (centrífuga ou filtro prensa);
- 14) As emissões de CO₂ e a demanda de energia na produção de blocos cerâmicos são influenciadas não apenas pela composição da mistura, mas também pelo método de secagem. Portanto, a escolha do processo de secagem e misturas com menor teor de lodo são medidas eficazes para reduzir tanto as emissões de CO₂ quanto o gasto energético na produção de blocos cerâmicos;
- 15) A secagem mecânica por filtro prensa apresentou menores valores tanto para a emissão de CO₂ quanto para a demanda de energia primária, mostrando-se mais eficiente e sustentável, quando comparada a secagem mecânica do lodo por centrifuga;
- 16) O bloco cerâmico com 10% de substituição à argila (TA90L10) revela-se como a proporção ideal para a produção de blocos cerâmicos, uma vez que incorpora uma maior quantidade de lodo em sua constituição. É interessante notar que não foram observadas diferenças estatísticas significativas quando comparado ao bloco com 5% de substituição. Essa constatação se estende à análise dos dados de emissões de CO₂ e gastos energéticos, consolidando a viabilidade da proporção de 10% de substituição.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Consultar outros bancos de dados, visando obter trabalhos relacionados à adição de lodo de ETA em materiais de construção, bem como utilizar outros termos durante a busca, a fim de abranger uma ampla gama de estudos,

servindo como base sólida para a elaboração da revisão sistemática da literatura;

- Caracterização química, física e mineralógica do lodo de ETA, em particular das principais estações de tratamento da RMR, em diferentes períodos do ano, como forma de avaliar a variabilidade desse resíduo com a sazonalidade e o processo de tratamento;
- Estudo da melhor rota a ser adotada moagem-calцинаção ou calcinação-moagem do lodo de ETA, para a sua aplicação nos materiais de construção, em particular para os ligantes, devido a tal fator ser preponderante para o desempenho da atividade pozolânica;
- Mais estudos sobre a avaliação da reação álcali-agregado em compósitos cimentícios com a utilização de lodo de ETA como adição;
- Aplicar a ACV em outros materiais de construção que tenha o lodo de ETA em sua constituição;
- Utilizar outras alternativas de secagem mecânica, bem como não mecânica para a ACV, visando um melhor aproveitamento do gasto energético. Além disso, aplicar outras alternativas de transportes, sendo esse último, um fator preponderante para a taxa de emissões de CO₂;
- Realizar a ACV “do berço ao túmulo” dos produtos cerâmicos analisados, a fim de verificar quesitos como: manutenção periódica, vida útil e descarte do material;
- Verificar se existe viabilidade econômica para produção dos blocos cerâmicos com lodo de ETA em escala comercial.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. São Paulo, 2009.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15577-6:2018**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 13281-2**: Argamassas inorgânicas - Requisitos e métodos de ensaios. Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro, 2023.
- ABCR. **Melhores Rodovias do Brasil**, 2022. Disponível em: <https://melhoresrodovias.org.br/indice-abcr/>. Acesso em: 08 de janeiro de 2024.
- ABOY, Nuria. **Secagem natural e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- ACHON, Cali Laguna; CORDEIRO, João Sérgio. Destinação e disposição final de lodo gerado em ETA-Lei 12.305/2010. **Anais do XIX Exposição de Experiências Municipais em Saneamento**, 2015.
- ACKAH L A, GURU R, PEIRAVI M, ET AL., 2018. Characterization of southern illinois water treatment residues for sustainable applications. **Sustainability**. 10, 1374-1387. <https://doi.org/10.3390/su10051374>.
- AGUIAR, G.J.A., ALMEIDA, L.R., FERNANDES, B.S. *et al.* Use of life cycle assessment as a tool to evaluate the environmental impacts of textile effluents: a systematic review. **Environ. Sci. Pollut. Res.** 30, 76455–76470, 2023.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 1–13, 2016.
- ALQAM, M.; JAMRAH, A.; DAGHLAS, H. Utilization of cement incorporated with water treatment sludge. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 5, n. 2, p. 268-277, 2011.
- AL-RAWASHDEH, M. *et al.* Performance of Mortar Incorporating Heat-Treated Drinking Water Treatment Sludge as a Silica-Sand Replacement. **Civil Engineering Journal (Iran)**, v. 8, n. 8, p. 1639–1652, 2022.
- AMORNPUNYAPAT, R.; PANYAKAPO, P.; PANYAKAPO, M. Development of lightweight concrete interlocking block panel with water treatment sludge and expanded metal ferrocement. **Engineering Journal**, v. 25, n. 1, p. 81–97, 2021.

ANDRADE, Cynthia Franco; SILVA, Cristina Mendes; OLIVEIRA, F. C. Gestão ambiental em saneamento: Uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de ETA e seus impactos na qualidade das águas. In: **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, 2014.

ARAÚJO F C, SCALIZE P S, ALBUQUERQUE A, ANGELIM R R, 2015. Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. **Cerâmica** 61:450–456. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613601931>.

ARAÚJO, Ana Paula Maria de. **Avaliação operacional e características do lodo gerado na indústria da água do litoral sul de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

AZIZ, H.A. *et al.* Investigations on the hydraulic conductivity and physical properties of silt and sludge as potential landfill capping material. **International Journal of GEOMATE**, v. 10, n. 4, p. 1989–1993, 2016.

BAĞRIAÇIK, B.; GÜNER, E.D. An Experimental Investigation of Reinforcement Thickness of Improved Clay Soil with Drinking Water Treatment Sludge as an Additive. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 24, n. 12, p. 3619–3627, 2020.

BAILY, Richard E. **Sludge types, treatment processes and disposal**. New York: Nova Science Publishers, 2009.

BANDIEIRA, M. *et al.* Water treatment sludge in the production of red-ceramic bricks: effects on the physico-mechanical properties. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 54, n. 4, 2021.

BASTIDAS-MARTÍNEZ, J.G. *et al.* Preliminary study of hot mix asphalt containing water treatment and sewage sludge. **Archives of Civil Engineering**, v. 66, n. 1, p. 225–240, 2020.

BATISTA DOS SANTOS, G.Z. *et al.* Sustainable geopolymer composite reinforced with sisal fiber: Durability to wetting and drying cycles. **Journal of Building Engineering**, v. 43, 2021.

BELIZARIO-SILVA, F. *et al.* Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: Uma ferramenta para incorporar indicadores ambientais na construção civil brasileira. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Porto Alegre: ANTAC, 2022.

BELIZARIO-SILVA, F. *et al.* **Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Metodologia**. 1ª edição. São Paulo: SIDAC, 2022.

BENLALLA, ELMOUSSAOUITI M, DAHHOU M, ASSAFI M, 2015. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Appl. Clay Sci.** 118, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>.

BERNI, M. D. **Oportunidades de eficiência energética para a Indústria - Relatório setorial - Setor cerâmico**. Brasília: CNI, 2010.

BIOMASSA DO BRASIL. **Com quantos tijolos (por m²) se faz uma casa?**

Aprenda a calcular. Biomassa do Brasil, 2017. Disponível em:

<<https://biomassadobrasil.com.br/com-quantos-tijolos-por-m%C2%B2-se-faz-uma-casa-aprenda-a-calcular/>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

BUSSAB, Wilton O.; MORETTIN, Pedro. A. **Estatística básica**. Saraiva, 2017.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. 9. Ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARVALHO, Alina Silva de *et al.* Avaliação do inventário do ciclo de vida de bloco cerâmico produzido no sul da Bahia. In: **VI Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida**. Brasília, 2018.

CHEN, Y. Effect of activated water treatment sludge on carbonation of mortar. **Key Engineering Materials**, [s.l.:s.n.], v. 539, p. 120-123, 2013.

CLARK, Edward Elbert. **Water treatment sludge drying and drainage on sand beds**. University of Massachusetts. Ph.D. Engineering, sanitary and municipal, 1970.

CLETO, F. R.; VON MÜHLEN, J. F.; BELIZARIO-SILVA, F. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: blocos e telhas cerâmicos**. São Paulo: SIDAC, 2022.

CNT. **Anuário CNT do Transporte - Estatísticas consolidadas**, 2022. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2024.

COLTRO, Leda. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Leda Coltro. Campinas: CETEA/ITAL, 2007.

CURRAN, M. A. **Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products**. John Wiley & Sons, 2012.

DE OLIVEIRA ANDRADE, J.J.; WENZEL, M.C.; DA ROCHA, G.H.; DA SILVA, S.R. Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 192, p. 159–168, 2018.

DUAN, W. *et al.* A ternary blended binder incorporating alum sludge to efficiently resist alkali-silica reaction of recycled glass aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 349, 2022.

DUAN, W. *et al.* Mechanical performance and phase analysis of an eco-friendly alkali-activated binder made with sludge waste and blast-furnace slag. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 374, 2022.

DUAN, W.; ZHUGE, Y.; PHAM, P.N.; CHOW, C.W.K.; KEEGAN, A.; LIU, Y. Utilization of drinking water treatment sludge as cement replacement to mitigate alkali-silica reaction in cement composites. **Journal of Composites Science**, [s.l.], v. 4, n. 4, 2020.

EL-DIDAMONY, H.; AMER, A.A.; MOHAMMED, M.S. Hydration and mechanical properties of cement/sludge/ anhydrite gypsum system. **Advances in Cement Research**, [s.l.], v. 26, n. 5, p. 248–255, 2014.

ERDOGMUS, E. *et al.* New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 42, 2021.

ERDOGMUS, Ertugrul; YARAS, Ali; USTAOGU, Abid; HEKIMOĞLU, Gökhan; SARI, Ahmet; GENÇEL, Osman. Thermal performance analysis of novel foam concrete composites with PCM for energy storage and environmental benefits in buildings, **Energy and Buildings**, v. 296, 113413, 2023.

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia. **Manual de análise de dados: Estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®**. Elsevier, 2017.

FIEMG; FEAM. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha**. Belo Horizonte: FIEMG, 2013.

FIORE, F.A. *et al.* Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study. **Cleaner Engineering and Technology**, [s.l.], v. 9, 2022.

FONTANA, A.O. **Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume do lodo de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros** - estudo de caso - ETA Cardoso. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de São Carlos, UFSCAR, São Carlos, 2004.

GENÇEL, O. *et al.* Manufacturing of fired bricks derived from wastes: utilization of water treatment sludge and concrete demolition waste. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, [s.l.], v. 22, n. 2, 2022.

GENÇEL, O.; KAZMI, S.M.S.; MUNIR, M.J.; SUTCU, M.; ERDOGMUS, E.; YARAS, A. Feasibility of using clay-free bricks manufactured from water treatment sludge, glass, and marble wastes: An exploratory study. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 298, 2021.

GERALDO, R.H.; FERNANDES, L.F.R.; CAMARINI, G. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymers production. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 149, p. 146–155, 2017.

GIORDANO, Gandhi *et al.* Tratamento e controle de efluentes industriais. **Revista ABES**. V. 4, N. 76, P. 1-84, 2004.

GODOY, LUIS GABRIEL GRAUPNER DE; ROHDEN, ABRAHÃO BERNARDO; GARCEZ, MÔNICA REGINA; COSTA, EUGÊNIO BASTOS DA; DA DALTE, SILVANA; ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 223, p. 939–950, 2019.

GOMES NETO, D.P. **Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura – estudo de caso.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

GOMES, S.; ZHOU, J.L.; LI, W.; LONG, G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, p. 148–159, 2019.

GONÇALVES, R.F. *et al.* Desidratação do lodo de esgotos. ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: RiMa, ABES. cap. 3. p. 57-86, 2001.

GONÇALVES, R.F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Sludge thickening and dewatering. ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.). **Sludge Treatment and Disposal.** Londres: IWA Publishing. cap. 5. p. 76-119, 2007.

GÜNER, E.D. Experimental investigation of the feasibility of using drinking water treatment plant sludge in the improvement of sandy soils. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [s.l.], v. 24, n. 5, p. 1923–1933, 2022.

HARJA, M. *et al.* Production and characterization of natural clay-free green building brick materials using water treatment sludge and oak wood ash. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, [s.l.], v. 22, n. 2, 2022.

HE, Z.-H. *et al.* Recycling hazardous water treatment sludge in cement-based construction materials: Mechanical properties, drying shrinkage, and nano-scale characteristics. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 290, 2021.

HE, Z.-H. *et al.* Utilization of manganese-rich sludge in concrete: Mechanical, nanoscale characteristics and leaching behavior. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 70, 2023.

HENDGES, Letiane *et al.* Disposição final do lodo de estação de tratamento de água e de esgoto: Uma revisão. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 2, 2017.

HO, L.S. *et al.* Development and characterization of a controlled low-strength material produced using a ternary mixture of Portland cement, fly ash, and waste water treatment sludge. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 356, 2022.

HO, V.; ORBECIDO, A.; PROMENTILLA, M.A. Investigation on mixture design of one-part geopolymer from fly ash and water treatment sludge. **MATEC Web of Conferences**, 2018.

HORNE, Ralph; GRANT, Tim; VERGHESE, Karli. **Life cycle assessment: principles, practice, and prospects.** Csiro Publishing, 2009.

HORPIBULSUK, S. *et al.* Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 1, 2016.

HUANG, C.-H.; WANG, S.-Y. Application of water treatment sludge in the

manufacturing of lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 174–183, 2013.

HWANG, CHAO LUNG; CHIANG, CHI HUNG; HUYNH, TRONG PHUOC; VO, DUY HAI; JHANG, BO JYUN; NGO, Si Huy. Properties of alkali-activated controlled low-strength material produced with waste water treatment sludge, fly ash, and slag. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 135, p. 459–471, 2017.

IAMCHATURAPATR, J.; PIRIYAKUL, K. **Strength and noise reduction of geopolymetric material produced from waste sludge**, [s.l.:s.n.], v. 856 KEM, 2020.

IBGE, 2010. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Relatório, Brasília, Brasil. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pnsb/default.asp?o=23&i=P>>.

IQBAL, M.R.; KAWAMOTO, K.; UCHIMURA, T.; DUNG, N.T.; TON, T.K.; TUAN, N.V.; GIANG, N.H. COMPACTION CHARACTERISTICS AND CBR OF SLUDGE BLENDED WITH RECYCLED CLAY BRICKS FOR ROAD SUBGRADE APPLICATION. **International Journal of GEOMATE**, [s.l.], v. 19, n. 75, p. 133–143, 2020.

JANUÁRIO, Gladys Fernandes; FERREIRA FILHO, Sidney Seckler. Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da Região Metropolitana de São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, V. 12, P. 117-126, 2007.

KATTE, V.Y. *et al.* The effect of partial replacement of waste water treatment sludge on the properties of burnt clay brick. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, [s.l.], v. 8, n. 6, p. 567–584, 2017.

KIBERT, Charles J. **Sustainable construction: Green building design and delivery**. John Wiley & Sons, 2013.

KIZINIEVIČ, O. *et al.* Eco-efficient recycling of drinking water treatment sludge and glass waste: development of ceramic bricks. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [s.l.], v. 20, n. 2, p. 1228–1238, 2018.

KIZINIEVIČ, O.; KIZINIEVIČ, V. Utilisation of drinking water treatment sludge for the manufacturing of ceramic products. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.:s.n.], 2017.

KIZINIEVIČ, O.; ŽURAUSKIENE, R.; KIZINIEVIČ, V.; ŽURAUSKAS, R. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 41, p. 464–473, 2013.

KRASINIKOVA, N.; STEPANOV, S.; MAKAROV, D. Cement stone, modified by chemical water treatment sludge. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.:s.n.], 2020.

KWEK, S.Y.; AWANG, H. Artificial lightweight aggregate from palm oil fuel ash (POFA) and water treatment waste. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.:s.n.], 2018.

KYNCL, M. Opportunities for Water Treatment Sludge Reuse. **GeoScience Engineering**. LIV, pp. 11–22, 2008.

LANGSTON, C. A.; DING, G. K.C. **Sustainable Practices in the Built Environment**. Elsevier, 2001.

LEE, K.H.; LEE, K.G.; LEE, Y.S.; WIE, Y.M. Manufacturing and application of artificial lightweight aggregate from water treatment sludge. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 307, 2021.

LENZI, E.; NOGAMI, E. M.; GALLI, D.; MORALES M. M. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Joinville, 2003.

LEROY MERLIN. **Quantidade de tijolos por metro quadrado: Saiba como calcular**. Leroy Merlin, 2023. Disponível em: <<https://www.leroymerlin.com>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

LI, D.; ZHUGE, Y.; LIU, Y.; PHAM, P.N.; ZHANG, C.; DUAN, W.; MA, X. Reuse of drinking water treatment sludge in mortar as substitutions of both fly ash and sand based on two treatment methods. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 277, 2021.

LISBOA, Alana Pessutto. **Avaliação da adaptação de macrófitas em wetland construído para tratamento de lodo, alimentado com lodo de esgoto sanitário de reatores em bateladas sequenciais (RBS), em escala real**. Alana Pessutto Lisboa. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador, Maria Elisa Magri, Coorientador, Camila Haimi, 2018.

LIU, Y.; ZHUGE, Y.; CHOW, C.W.K.; KEEGAN, A.; LI, D.; PHAM, P.N.; HUANG, J.; SIDDIQUE, R. Properties and microstructure of concrete blocks incorporating drinking water treatment sludge exposed to early-age carbonation curing. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 261, 2020.

MAÑOSA, J.; FORMOSA, J.; GIRO PALOMA, J.; MALDONADO ALAMEDA, A.; QUINA, M.J.; CHIMENOS, J.M. Valorisation of water treatment sludge for lightweight aggregate production. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 269, 2021.

MARCHIORI, L. *et al.* Geotechnical characterization of water treatment sludge for liner material production and soft soil reinforcement. **Materials Science Forum**, 1046:83-88, 2021.

MARCHIORI, L. *et al.* Mechanical and Chemical Behaviour of Water Treatment Sludge and Soft Soil Mixtures for Liner Production. **Open Civil Engineering Journal**, [s.l.], v. 16, n. 1, 2022.

MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, V. 18, N. 2, P. 365–385, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 674 p, 2008.

MIKI, Marcelo Kenji. **Utilização de polímeros para condicionamento do lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 1998.

MME; EPE; BANCO MUNDIAL; APPLUS; QUALITEC. **Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados: Cerâmica**. Brasília, 2018.

MOHER D, LIBERATI A, TETZLAFF J, ALTMAN DG. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **Int J Surg**, 8(5):336–341, 2010.

MONTALVAN, E. L. T. Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da Estação de Tratamento de Água Cubatão. In: **Encontro Técnico AESABESP. 30º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente**, p. 133, 2016.

MONTALVAN, E.L.T.; BOSCOV, M.E.G. Geotechnical Characterization of a Soil-Water Treatment Sludge Mixture. **Geotechnical Special Publication**, [s.l.:s.n.]. p. 418–427, 2016.

MONTALVAN, Edy Lenin Tejeda. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MONTEIRO S N, ALEXANDRE J, MARGEM J I, 2008. Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. **Constr. Build. Mater.** 22, 1281–1287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.013>.

MORETTIN, Luiz Gonzaga. **Estatística básica: probabilidade e inferência**. Pearson, 2010.

MYMRIN, V.; ALEKSEEV, K.; FORTINI, O.M.; CATAI, R.E.; NAGALLI, A.; RISSARDI, J.L.; MOLINETTI, A.; PEDROSO, D.E.; IZZO, R.L.S. Water cleaning sludge as principal component of composites to enhance mechanical properties of ecologically clean red ceramics. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 145, p. 367–373, 2017.

NAJMI A, RASHIDI TH, ABBASI A, TRAVIS Waller S. Reviewing the transport domain: an evolutionary bibliometrics and network analysis. **Scientometrics**, 110(2):843–865, 2017.

NAWAGAMUWA, U.P.; WIJESOORIYA, N. Use of flyash to improve soil properties of drinking water treatment sludge. **International Journal of Geo-Engineering**, [s.l.], v. 9, n. 1, 2018.

NETO, Benício Barros; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Bookman Editora, 2010.

NGUYEN, M.D. *et al.* Investigation on the suitability of aluminium-based water treatment sludge as a sustainable soil replacement for road construction. **Transportation Engineering**, [s.l.], v. 12, 2023.

NICOLAU, V. P. A importância da curva de queima em fornos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**. vol. 17, n. 2, mar./abr., 2012.

NIMWINYA, E.; ARJHARN, W.; HORPIBULSUK, S.; PHOO-NGERNKHAM, T.; POOWANCUM, A. A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 119, p. 128–134, 2016.

NOR, M.A.M. *et al.* Properties and performance of water treatment sludge (LETA)-clay bricks. **Jurnal Teknologi**, [s.l.], v. 77, n. 32, p. 83–93, 2015.

O'KELLY, B.C. Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporating a coagulant. **Canadian Geotechnical Journal**, [s.l.], v. 45, n. 5, p. 715–725, 2008.

OLIVEIRA, Nicole Santos. **Estudo da secagem do lodo de Estação de Tratamento de Água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

ORBECIDO, A. *et al.* Characterization and acid resistance test of one-part geopolymer from fly ash and water treatment sludge. **MATEC Web of Conferences**, [s.l.:s.n.], 2018.

PASSUELLO, A. C. B.; OLIVEIRA, A. F. de; COSTA, E. B. da; KIRCHHEIM, A. P. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínques alternativos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7-20, out./dez, 2014.

PEREIRA, Caio. **Cálculo da quantidade de tijolos**. Escola Engenharia, 2017. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/calculo-da-quantidade-de-tijolos/>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

PHAM, P.N.; DUAN, W.; ZHUGE, Y.; LIU, Y.; TORMO, I.E.S. Properties of mortar incorporating untreated and treated drinking water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 280, 2021.

PINHEIRO, João Ismael O. *et al.* **Estatística básica: A arte de trabalhar com dados**. Elsevier, 2009.

PLUYE P, HONG QN. Combining the power of stories and the power of numbers: mixed methods research and mixed studies reviews. **Annu Rev Public Heal**, 35(1):29–45, 2014.

POOWANCUM, A.; NIMWINYA, E.; HORPIBULSUK, S. **Development of room temperature curing geopolymer from calcined water-treatment-sludge and rice husk ash**, [s.l.:s.n.], v. 10, 2015.

PROSAB. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Marco Antonio Penalva Reali (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 1999.

PROSAB. **Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Cleverson Vítório Andreoli (Coordenador). Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001.

QIN, J. *et al.* Recycling of water treatment sludge into magnesium potassium phosphate cement component by a combination of silica fume. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 51, 2022.

RAMADAN. M.O.; FOUAD, H.A.; HASSANAIN A.M., Reuse of water treatment plant sludge in brick manufacturing. **J. Appl. Sci. Res**, 4 (2008) 1223–1229.

RICHTER, Carlos A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Blucher, 2001.

ROQUE, A.J.; CARVALHO, M. Possibility of using the drinking water sludge as geotechnical material. *In*: **5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics - Proceedings of the ISSMGE 5th Int. Congress**, [s.l.:s.n.], 2006. p. 1535–1542, 2006.

ROSSI, C. T. **Análise técnica dos tijolos maciços e blocos cerâmicos de vedação produzidos na região da Grande Santa Rosa - RS**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Santa Rosa, 2017.

SAADE, M.RM.; SILVA, M.G, GOMES, V. A Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: Considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais. Marcella RM Saade, Maristela G Silva, Vanessa Gomes. **Natureza On Line**. v. 12, p.109-116, 2014.

SABESP. **Relatório Ambiental Preliminar (RAP) do aterro exclusivo para disposição de lodo da ETA Taiaçupeba**. Estudo Técnico. São Paulo, 2002.

SABNIS, Gajanan M. **Green building with concrete: Sustainable design and construction**. CRC Press, 2015.

SALES, A. *et al.* Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 12, p. 2446–2453, 2010.

SALES, A.; DE SOUZA, F.R. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 6, p. 2362–2370, 2009.

SALES, A.; DE SOUZA, F.R.; ALMEIDA, F.D.C.R. Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 6, p. 2793–2798, 2011.

SAMUDIO, Edgar Manuel. **Critério racional para dimensionamento de leitos de secagem de lodo de ete's convencionais e do reator uasb**. 1994. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

SANTOS, Luís Carlos. **Análise da variabilidade do processo de filtração em filtros de tambor rotativo contínuo a vácuo para lodo de caldo de cana de**

açúcar. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2009.

SANTOS, Maria Fernanda; BATTISTELLE, Rosane; HORI, Clara; JULIOTI, Plínio. (2010). Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**. v. 6, n. 2, p. 57-73, 2011.

SEDDIK HASSAN, A.M. *et al.* Thermal performance analysis of clay brick mixed with sludge and agriculture waste. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 344, 2022.

SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. **Avaliação do ciclo de vida: Ferramenta gerencial para tomada de decisão**. Emilia Satoshi Miyamaru Seo, Luiz Alexandre Kulay, 2006.

SHAMAKI, M.; ADU-AMANKWAH, S.; BLACK, L. Reuse of UK alum water treatment sludge in cement-based materials. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 275, 2021.

SILVA, Fernanda Belizario *et al.* The Sidac system: streamlining the assessment of the embodied energy and CO₂ of Brazilian construction products. **Journal of Cleaner Production**, p. 01-35, 2023.

SILVA, Fernanda Belizário; REIS, Daniel C.; CALDAS, Lucas R.; DEGANI, Clarice R.M.; JOHN, Vanderley M.; PUNHAGUI, Katia R.G.; PACCA, Sérgio A.; OLIVEIRA, Lidiane Santana. Sidac: Uma ferramenta simples para gestão do desempenho ambiental da construção brasileira. **Concreto & Construções**, Ed. 105, p. 71-74, 2022.

STAROSTINA, I.V.; SHEVTSOVA, R.G.; STAROSTINA, Y.L. Application of oil-products-containing water treatment sludge in wall ceramics production. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.:s.n.], 2019.

SUKSIRIPATTANAPONG, C. *et al.* Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 82, p. 20–30, 2015.

SUKSIRIPATTANAPONG, C. *et al.* Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge-fly ash lightweight cellular geopolymer. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 94, p. 807–816, 2015.

SUKSIRIPATTANAPONG, C. *et al.* Water treatment sludge–calcium carbide residue geopolymers as nonbearing masonry units. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], v. 29, n. 9, 2017.

SUKSIRIPATTANAPONG, C.; SRIJUMPA, T.; HORPIBULSUK, S.; SUKMAK, P.; ARULRAJAH, A.; DU, Y.J. Compressive strengths of water treatment Sludge-fly ash geopolymer at various compression energies. **Lowland Technology International**, [s.l.], v. 17, n. 3, p. 147–156, 2015.

SUTCU, M. *et al.* Low cost and eco-friendly building materials derived from wastes:

Combined effects of bottom ash and water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 324, 2022.

TANTAWY M A, MOHAMED R S, 2017. Middle Eocene clay from goset Abu Khashier: geological assessment and utilization with drinking water treatment sludge in brick manufacture. **Appl. Clay Sci.** 138, 114–124.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.005>.

TANTAWY, M.A. Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. **Materials Research Bulletin**, [s.l.], v. 61, p. 415–421, 2015.

TARTARI R, MÓDENES A N, PIANARO S A, DÍAZ-MORA N, 2011. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: Incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha. **Cerâmica** 57, 387–394.
<https://doi.org/10.1590/s0366-69132011000400003>.

TAVARES, Rosangela Gomes. **Problemas operacionais na indústria da água: consumo excessivo de cloro na linha tronco de distribuição do sistema Gurjaú e lodos gerados pelas 6 maiores estações de tratamento de água da região metropolitana do Recife**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

TEIXEIRA ,S. R.; DE SOUZA , S. A.; DE SOUZA, N. R.; JOB, A. E.; GOMES, H. M.; HEITZMANN NETO, J. F.. **Anais do XXVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária Y Ambiental**, Cancún, México, 2002.

TEIXEIRA S R, ALÉSSIO P, SANTOS G T A, DIAS F C, 2004. Influência da data da coleta do lodo de ETA incorporado em massas cerâmicas, nas suas propriedades tecnológicas. In: **48th Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society**. Curitiba, pp 1-12.

TEIXEIRA, S.R., G.T.A. Santos, A.E. Souza, P. Alessio, S.A. Souza, N.R. Souza, The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Appl. Clay Sci**, 53, 561–565, 2011.

TEOH, W.P. *et al.* Recycling of treated alum sludge and glycerine pitch in the production of eco-friendly roofing tiles: Physical properties, durability, and leachability. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 52, 2022.

TURNER T, WHEELER R, STONE A, OLIVER I, 2019. Potential alternative reuse pathways for water treatment residuals: Remaining barriers and questions. A review. **Water Air Soil Pollut.** 230. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4272-0>.

VIEIRA, Ana Paula Ferreira. **Avaliação de desempenho dos equipamentos de secagem de lama instalados na linha sólida da ETA: centrífuga vs filtro prensa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Minho, 2021.

VIVA DECORA. **Tijolos por metro quadrado: Veja como calcular do jeito certo**. Viva Decora, 2022. Disponível em: <<https://www.vivadecora.com.br/pro/tijolos-por-metro-quadrado/>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

WANG, M.C. *et al.* Engineering behavior of water treatment sludge. **Journal of Environmental Engineering**, [s.l.], v. 118, n. 6, p. 848–864, 1992.

YANG, J. *et al.* Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 365, 2023.

YING, K.S.; AWANG, H. Performance of Aggregate Incorporating Palm Oil Fuel Ash (Pofa) and Silt. **Int. J. Eng. Adv. Technol.** 2019, 9, 1218–1223.

ZAR, Jerrold. H. **Biostatistical Analysis**. Pearson, 2014.

ZDEB, T.; TRACZ, T.; ADAMCZYK, M. Characterisation of Basic Properties of Mineral Binders with Calcined Water Treatment Sludge. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.:s.n.], 2019.

APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A.1 Emissão de CO₂ (kg)

Tabela A.1- Estatística descritiva aplicada aos dados de emissão de CO₂ do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa

Misturas	TA100L0	TA95L05	TA90L10	TA85L15	TA80L20	TA75L25	TA70L30	TA65L35	TA60L40	TA55L45	TA50L50	TA45L55	TA40L60	TA35L65	TA30L70	TA25L75	TA20L80	TA15L85	TA10L90	TA05L95	TA0L100
Número de amostras	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Média	0.228	0.376	0.524	0.673	0.822	0.970	1.12	1.27	1.42	1.56	1.71	1.86	2.01	2.16	2.31	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
Desvio padrão	0.0801	0.0804	0.0816	0.0834	0.0856	0.0882	0.0914	0.0950	0.0989	0.103	0.108	0.112	0.118	0.124	0.129	0.135	0.140	0.146	0.152	0.158	0.165
Variância	0.00641	0.00646	0.00666	0.00696	0.00732	0.00779	0.00835	0.00902	0.00979	0.0106	0.0116	0.0125	0.0140	0.0153	0.0166	0.0181	0.0197	0.0214	0.0232	0.0251	0.0272
Amplitude	0.179	0.192	0.206	0.220	0.233	0.246	0.259	0.272	0.285	0.298	0.311	0.322	0.338	0.351	0.364	0.377	0.390	0.403	0.416	0.429	0.443
Mínimo	0.138	0.280	0.421	0.563	0.705	0.847	0.989	1.13	1.27	1.42	1.56	1.70	1.84	1.98	2.12	2.27	2.41	2.55	2.69	2.83	2.98
Máximo	0.317	0.472	0.627	0.783	0.938	1.09	1.25	1.40	1.56	1.71	1.87	2.02	2.18	2.33	2.49	2.64	2.80	2.95	3.11	3.26	3.42

Fonte: O Autor (2024).

A.2 Demanda de energia primária (MJ)

Tabela A.2- Estatística descritiva aplicada aos dados de demanda de energia primária do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa

Misturas	TA100L0	TA95L05	TA90L10	TA85L15	TA80L20	TA75L25	TA70L30	TA65L35	TA60L40	TA55L45	TA50L50	TA45L55	TA40L60	TA35L65	TA30L70	TA25L75	TA20L80	TA15L85	TA10L90	TA05L95	TA0L100
Número de amostras	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Média	7.33	10.1	12.8	15.5	18.3	21.0	23.7	26.5	29.2	31.9	34.7	37.4	40.2	42.9	45.6	48.4	51.1	53.8	56.6	59.3	62.0
Desvio padrão	1.77	1.85	2.07	2.39	2.78	3.21	3.67	4.15	4.64	5.15	5.65	6.12	6.68	7.20	7.72	8.25	8.77	9.30	9.83	10.4	10.9
Variância	3.12	3.41	4.28	5.72	7.74	10.3	13.5	17.3	21.6	26.5	32.0	37.5	44.6	51.9	59.6	68.0	76.9	86.5	96.5	107	118
Amplitude	3.95	4.93	5.91	6.89	7.87	8.85	9.83	10.8	11.8	12.8	13.8	14.6	15.7	16.7	17.7	18.7	19.6	20.6	21.6	22.6	23.6
Mínimo	5.35	7.60	9.84	12.1	14.3	16.6	18.8	21.1	23.3	25.6	27.8	30.0	32.3	34.5	36.8	39.0	41.3	43.5	45.8	48.0	50.3
Máximo	9.30	12.5	15.8	19.0	22.2	25.4	28.7	31.9	35.1	38.3	41.6	44.7	48.0	51.2	54.5	57.7	60.9	64.1	67.4	70.6	73.8

Fonte: O Autor (2024).

APÊNDICE B - TESTES ESTATÍSTICOS

B.1 Mancova

Tabela B.1- Testes multivariados aplicados aos dados de emissão de CO₂ e demanda de energia primária do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa

Testes multivariados						
		valor	F	gl1	gl2	p
Misturas	Traço de Pillai	0.994	5.14	40	208	< .001
	Lambda de Wilks	0.00573	62.9	40	206	< .001
	Traço de Hotelling	173.43	442	40	204	< .001
	Maior raiz de Roy	173.43	902	20	104	< .001
Processo de secagem	Traço de Pillai	0.731	140.19	2	103	< .001
	Lambda de Wilks	0.26867	140.2	2	103	< .001
	Traço de Hotelling	2.72	140	2	103	< .001
	Maior raiz de Roy	2.72	140	2	103	< .001

Fonte: O Autor (2024).

Tabela B.2- Testes univariados aplicados aos dados de emissão de CO₂ e demanda de energia primária do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa

Testes univariados						
	Variável dependente	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Misturas	Emissão de CO ₂ (kg)	101.815	20	5.09073	603.7	< .001
	Demanda de energia primária (MJ)	34567.624	20	1728.38120	125.0	< .001
Processo de secagem	Emissão de CO ₂ (kg)	0.544	1	0.54411	64.5	< .001
	Demanda de energia primária (MJ)	3025.564	1	3025.56381	218.9	< .001
Resíduos	Emissão de CO ₂ (kg)	0.877	104	0.00843		
	Demanda de energia primária (MJ)	1437.598	104	13.82306		

Fonte: O Autor (2024).

B.2 Verificação de pressupostos

Tabela B.3- Teste de homogeneidade aplicado aos dados de emissão de CO₂ e demanda de energia primária do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa

Teste de Box à Homogeneidade da Matriz de Covariância		
χ^2	gl	p
115	60	< .001 (Critério não atendido)

Fonte: O Autor (2024).

Tabela B.4- Teste de normalidade aplicado aos dados de emissão de CO₂ e demanda de energia primária do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa

Teste de Shapiro-Wilk à Normalidade Multivariada

W	p
0.882	< .001 (Critério não atendido)

Fonte: O Autor (2024).

B.3 Anova a um fator (não-paramétrica)

Tabela B.5- Teste não-paramétrico aplicado aos dados de emissão de CO₂ e demanda de energia primária do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa

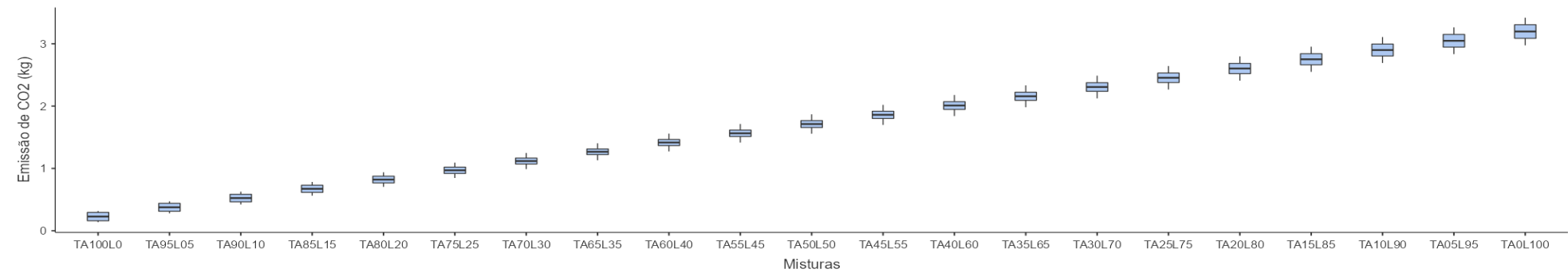
Kruskal-Wallis			
	χ^2	gl	p
Emissão de CO₂ (kg)	123	20	< .001
Demanda de energia primária (MJ)	114	20	< .001

Fonte: O Autor (2024).

B.4 Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

B.4.1 Emissão de CO₂ (kg)

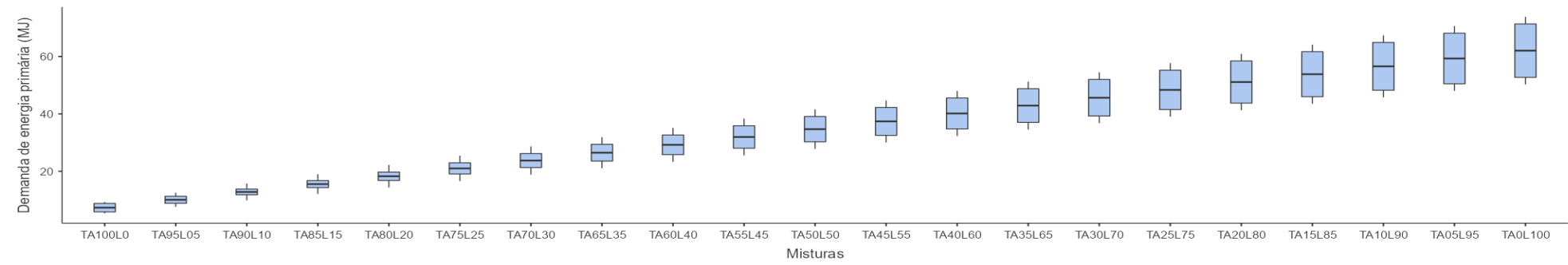
Figura B.1- Teste de comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner aplicada aos dados de emissão de CO₂ do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa



Fonte: O Autor (2024).

B.4.2 Demanda de energia primária (MJ)

Figura B.2- Teste de comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner aplicada aos dados de demanda de energia primária do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa



Fonte: O Autor (2024).

B.5 Valores de p de comparações múltiplas (Bicaudal); Emissão de CO₂ (kg); Variável independente (Agrupamento): Misturas; Kruskal-Wallis test: H (20, N= 126) =114,1795 p =,0000.

Tabela B.6- Valores de p de comparações múltiplas entre as misturas para emissão de CO₂ do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa

	TA100L0	TA90L10	TA80L20	TA70L30	TA60L40	TA50L50	TA40L60	TA30L70	TA20L80	TA10L90	TA0L100	TA95L05	TA85L15	TA75L25	TA65L35	TA55L45	TA45L55	TA35L75	TA25L75	TA15L85	TA05L95
TA100L0		1	1	1	1	1	0,148184	0,016234	0,001195	6,88E-05	5,75E-06	1	1	1	1	1	0,381594	0,051333	0,004429	0,000323	1,83E-05
TA90L10	1		1	1	1	1	0,896035	0,130085	0,012863	0,00099	0,000104	1	1	1	1	1	1	0,356776	0,041285	0,003983	0,000298
TA80L20	1	1		1	1	1	1	0,97732	0,133919	0,014217	0,001935	1	1	1	1	1	1	1	0,36652	0,04825	0,004923
TA70L30	1	1	1		1	1	1	0,884938	0,126352	0,021805	1	1	1	1	1	1	1	1	0,36652	0,049769	
TA60L40	1	1	1	1		1	1	1	0,907259	0,199897	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,40799	
TA50L50	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TA40L60	0,148184	0,896035	1	1	1	1		1	1	1	1	0,361618	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TA30L70	0,016234	0,130085	0,97732	1	1	1	1		1	1	1	0,045341	0,36652	1	1	1	1	1	1	1	1
TA20L80	0,001195	0,012863	0,133919	0,884938	1	1	1	1		1	1	0,003844	0,042598	0,347272	1	1	1	1	1	1	1
TA10L90	6,88E-05	0,00099	0,014217	0,126352	0,907259	1	1	1	1		1	0,000254	0,003844	0,042598	0,347272	1	1	1	1	1	1
TA0L100	5,75E-06	0,000104	0,001935	0,021805	0,199897	1	1	1	1	1		2,37E-05	0,00046	0,006509	0,067636	0,531201	1	1	1	1	1
TA95L05	1	1	1	1	1	1	0,361618	0,045341	0,003844	0,000254	2,37E-05		1	1	1	1	0,873965	0,133919	0,0133	0,001109	7,18E-05
TA85L15	1	1	1	1	1	1	0,36652	0,042598	0,003844	0,00046	1	1		1	1	1	1	0,93009	0,126352	0,014217	0,001241
TA75L25	1	1	1	1	1	1	1	1	0,347272	0,042598	0,006509	1	1		1	1	1	1	0,884938	0,133919	0,015706
TA65L35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,347272	0,067636	1	1	1		1	1	1	1	0,93009	0,146064
TA55L45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,531201	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1
TA45L55	0,381594	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,873965	1	1	1	1		1	1	1	1
TA35L75	0,051333	0,356776	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,133919	0,93009	1	1	1	1		1	1	1
TA25L75	0,004429	0,041285	0,36652	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0133	0,126352	0,884938	1	1	1	1		1	1
TA15L85	0,000323	0,003983	0,04825	0,36652	1	1	1	1	1	1	1	0,001109	0,014217	0,133919	0,93009	1	1	1	1		1
TA05L95	1,83E-05	0,000298	0,004923	0,049769	0,40799	1	1	1	1	1	1	7,18E-05	0,001241	0,015706	0,146064	1	1	1	1	1	1

Fonte: O Autor (2024).

B.6 Valores de p de comparações múltiplas (Bicaudal); Demanda de energia primária (MJ); Variável independente (Agrupamento): Misturas; Kruskal-Wallis test: H (20, N= 126) =114,1795 p =,0000.

Tabela B.7- Valores de p de comparações múltiplas entre as misturas para demanda de energia primária do lodo de ETA obtido em centrífuga e filtro prensa

	TA100L0	TA90L10	TA80L20	TA70L30	TA60L40	TA50L50	TA40L60	TA30L70	TA20L80	TA10L90	TA0L100	TA95L05	TA85L15	TA75L25	TA65L35	TA55L45	TA45L55	TA35L75	TA25L75	TA15L85	TA05L95
TA100L0		1	1	1	1	0,761156	0,096972	0,009495	0,00144	0,000226	3,35E-05	1	1	1	1	1	0,294969	0,032073	0,00358	0,00058	8,13E-05
TA90L10	1		1	1	1	1	0,653325	0,08608	0,016234	0,003102	0,000558	1	1	1	1	1	1	0,250018	0,036406	0,00722	0,001241
TA80L20	1	1		1	1	1	1	0,670269	0,159225	0,037572	0,008284	1	1	1	1	1	1	1	0,320138	0,078672	0,016779
TA70L30	1	1	1		1	1	1	1	1	0,338001	0,091375	1	1	1	1	1	1	1	1	0,636771	0,168602
TA60L40	1	1	1	1		1	1	1	1	1	0,723535	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TA50L50	0,761156	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TA40L60	0,096972	0,653325	1	1	1	1		1	1	1	1	0,257041	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TA30L70	0,009495	0,08608	0,670269	1	1	1	1		1	1	1	0,029147	0,279218	1	1	1	1	1	1	1	1
TA20L80	0,00144	0,016234	0,159225	1	1	1	1	1		1	1	0,004923	0,059868	0,491068	1	1	1	1	1	1	1
TA10L90	0,000226	0,003102	0,037572	0,338001	1	1	1	1	1		1	0,000851	0,012863	0,130085	0,93009	1	1	1	1	1	1
TA0L100	3,35E-05	0,000558	0,008284	0,091375	0,723535	1	1	1	1	1		0,000139	0,00259	0,032073	0,279218	1	1	1	1	1	1
TA95L05	1	1	1	1	1	1	0,257041	0,029147	0,004923	0,000851	0,000139		1	1	1	1	0,723535	0,091375	0,011631	0,002082	0,000323
TA85L15	1	1	1	1	1	1	1	0,279218	0,059868	0,012863	0,00259	1		1	1	1	1	0,742128	0,126352	0,028229	0,005469
TA75L25	1	1	1	1	1	1	1	1	0,491068	0,130085	0,032073	1	1		1	1	1	1	0,93009	0,257041	0,061728
TA65L35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,93009	0,279218	1	1	1		1	1	1	1	1	0,491068
TA55L45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1
TA45L55	0,294969	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,723535	1	1	1	1		1	1	1	1
TA35L75	0,032073	0,250018	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,091375	0,742128	1	1	1	1		1	1	1
TA25L75	0,00358	0,036406	0,320138	1	1	1	1	1	1	1	1	0,011631	0,126352	0,93009	1	1	1	1		1	1
TA15L85	0,00058	0,00722	0,078672	0,636771	1	1	1	1	1	1	1	0,002082	0,028229	0,257041	1	1	1	1	1		1
TA05L95	8,13E-05	0,001241	0,016779	0,168602	1	1	1	1	1	1	1	0,000323	0,005469	0,061728	0,491068	1	1	1	1	1	1

Fonte: O Autor (2024).