

APROVEITAMENTO DO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO MATERIAL ALTERNATIVO NA GEOTECNIA - ESTADO DA ARTE

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.XII-011>

Marcos David dos Santos (*), Igor Vieira Fernandes, Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

* Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, marcos.david@ufpe.br

RESUMO

A urbanização crescente levou ao aumento da geração de lodo proveniente das estações de tratamento de água (LETA), o qual possui uma composição complexa e enfrenta desafios na disposição final. A escassez de áreas para aterros e os custos associados à disposição desse resíduo motivam a busca por alternativas sustentáveis para seu reaproveitamento em aplicações geotécnicas. O trabalho visa discutir o estado da arte sobre o uso do LETA na geotecnia, reunindo e analisando os principais avanços científicos, lacunas de conhecimento e perspectivas futuras para esse reaproveitamento. A abordagem do estudo é descritiva e qualitativa, com uma revisão da literatura sobre o uso do LETA. Foram realizadas buscas em publicações científicas, restringindo-se a trabalhos relevantes de 1990 a setembro de 2023. As pesquisas analisadas mostram que o LETA pode ser utilizado em diversas aplicações, incluindo: aterros, estradas e melhoramento dos solos. O uso do lodo de ETA em obras geotécnicas é viável e benéfico. Ele apresenta características que variam com o tipo e a combinação de materiais, com resultados positivos nas propriedades mecânicas e colaborando com a sustentabilidade da construção civil. Assim, o lodo incorpora-se como uma alternativa promissora para problemas de descarte e no fornecimento de materiais para a engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Estado da arte, Lodo, Estação de tratamento de água, Geotecnia.

ABSTRACT

The increasing pace of urbanization has led to a rise in the generation of sludge from water treatment plants (WTS), which has a complex composition and presents significant challenges regarding its final disposal. The shortage of available landfill space and the high costs associated with disposing of this waste have driven the search for sustainable alternatives for its reuse in geotechnical applications. This study aims to discuss the state of the art regarding the use of WTS in geotechnics, bringing together and analyzing the main scientific advancements, existing knowledge gaps, and future perspectives for its reuse. The research adopts a descriptive and qualitative approach, conducting a literature review focused on the use of WTS. Scientific publications were searched, limited to relevant studies published between 1990 and September 2023. The reviewed studies show that WTS can be employed in various applications, including landfills, road construction, and soil improvement. The use of WTS in geotechnical works is both feasible and beneficial. Its properties vary depending on the type and combination of materials, yet results generally show improvements in mechanical behavior and contributions to the sustainability of civil construction. Therefore, WTS emerges as a promising alternative for addressing disposal issues and supplying materials for engineering purposes.

KEYWORDS: State of the art, Sludge, Water treatment sludge, Geotechnics.

1. INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e a consequente intensificação do consumo de água têm levado a um aumento substancial na geração de resíduos sólidos em estações de tratamento de água (ETAs), especialmente o lodo de estação de tratamento de água (LETA). Esse resíduo, resultante dos processos de coagulação, floculação, sedimentação e filtração, apresenta uma composição complexa, contendo óxidos de alumínio, ferro, silício e cálcio, além de matéria orgânica e metais traço (He et al., 2021; Swierczek et al., 2018). Globalmente, a produção de LETA é expressiva, com destaque para regiões como Europa, Japão, China e Taiwan, onde são geradas milhões de toneladas anualmente (Mininni et al., 2015; Hong et al., 2009; Huang e Wang, 2013). A disposição final desse resíduo em aterros sanitários enfrenta restrições crescentes devido à escassez de áreas disponíveis, aos custos envolvidos e ao risco de lixiviação de contaminantes, o que torna urgente a busca por alternativas ambientalmente sustentáveis para seu reaproveitamento (Lin et al., 2012; Swierczek et al., 2018).

Neste contexto, o uso de LETA como material de engenharia em obras geotécnicas desponta como uma solução promissora, alinhada aos princípios da economia circular e da sustentabilidade ambiental. A literatura indica que o

LETA apresenta propriedades físicas e químicas compatíveis com diversas aplicações na engenharia civil, tais como materiais de preenchimento, melhoramento de solos e construção de barreiras hidráulicas (Gomes et al., 2019; Rahman et al., 2017). Em especial, seu potencial uso como substituto parcial de materiais naturais em obras de infraestrutura geotécnica, como base de estradas, liners de aterros, estruturas de contenção e materiais de baixa resistência controlada, tem sido objeto de estudos recentes (Hwang et al., 2017; Fang et al., 2019).

Materiais utilizados em obras geotécnicas e de saneamento, como liners de aterros sanitários, lagoas de estabilização de efluentes, canais e bacias de contenção, exigem características específicas como baixa condutividade hidráulica, resistência mecânica adequada e boa compactação (Santos et al., 2020; Oliveira et al., 2019). Em muitos casos, são utilizadas argilas ou geossintéticos, os quais, apesar de eficientes, apresentam limitações como alto custo, impactos ambientais na extração, ou inviabilidade logística (Santos et al., 2020). Nesse sentido, resíduos como o LETA podem ser considerados substitutos viáveis, principalmente em regiões onde materiais naturais são escassos ou a disposição do resíduo representa um desafio logístico e ambiental.

Estudos experimentais têm demonstrado que a adição de LETA a solos argilosos pode alterar propriedades geotécnicas relevantes, como plasticidade, ângulo de atrito interno e deformabilidade, favorecendo o uso em aplicações como barreiras impermeáveis ou solos estabilizados (Lima et al., 2022; Ferreira et al., 2021). Além disso, o LETA apresenta elevada capacidade de troca iônica e boa interação com soluções salinas, características desejáveis na construção de liners com diferentes composições químicas (Oliveira et al., 2019). Para avaliar o desempenho hidráulico dessas misturas, recomenda-se a realização de ensaios de permeabilidade com soluções representativas de percolado, como água da torneira ou soluções de CaSO_4 (Cunha et al., 2018).

Apesar do potencial já identificado, ainda há lacunas significativas na literatura sobre o comportamento do LETA em diferentes contextos geotécnicos, especialmente em larga escala e sob condições de campo. A maioria dos estudos concentra-se em propriedades mecânicas e químicas de curto prazo, enquanto aspectos como durabilidade, impacto ambiental de longo prazo e desempenho sob diferentes condições de carregamento permanecem pouco explorados (Chen e Poon, 2017; Chang et al., 2020). Diante disso, este artigo tem como objetivo discutir o estado da arte do uso do LETA em aplicações geotécnicas, reunindo e analisando criticamente os principais avanços científicos, lacunas de conhecimento e perspectivas futuras para o reaproveitamento desse resíduo em obras geotécnicas.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada no artigo possui caráter descritivo e qualitativo, com foco na análise da produção acadêmica e científica relacionada aos usos e aplicações do lodo de estação de tratamento de água (ETA) em obras geotécnicas. O artigo constitui um recorte de Santos (2024), na qual foi realizada uma revisão sistemática da literatura com maior amplitude, abrangendo inclusive meta-análise e avaliação do ciclo de vida. Neste artigo, busca-se apresentar e discutir o estado da arte especificamente voltado à aplicação do lodo de ETA na geotecnia, com destaque para usos em obras como aterros, melhoramento do solo, aterros, entre outros.

Para a elaboração do artigo, foram levantadas publicações recentes que abordam a temática, com foco nos principais estudos desenvolvidos sobre o assunto, a partir de trabalhos publicados em periódicos científicos, anais de congressos e afins. A abordagem adotada é de natureza bibliográfica, com o intuito de discutir, sistematizar e sintetizar os principais aspectos da produção científica sobre o tema, considerando diferentes contextos, abordagens e enfoques ao longo do tempo.

A busca bibliográfica foi conduzida na base de dados Scopus, acessada por meio do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A pesquisa abrangeu o período compreendido entre 1990 e setembro de 2023, tendo como ponto de partida o uso da palavra-chave “water treatment sludge”. Para refinar os resultados e assegurar a relevância dos estudos selecionados, aplicaram-se filtros específicos nos campos Article Title, Abstract e Keywords, o que permitiu concentrar a análise nos trabalhos mais diretamente relacionados ao tema. Os demais critérios de inclusão, exclusão e os filtros adicionais utilizados podem ser consultados em Santos (2024), onde se encontram detalhados de forma mais abrangente.

O Quadro 1 apresenta um resumo dos 15 documentos selecionados para compor este estado da arte, contendo informações relevantes sobre os autores, países de origem e fontes de publicação de cada estudo. Em conjunto, esses trabalhos convergem para um objetivo comum: investigar a viabilidade do uso do lodo de ETA como material alternativo na engenharia geotécnica. As pesquisas analisadas abordam diferentes aspectos dessa aplicação, desde propriedades mecânicas e desempenho técnico até impactos ambientais, evidenciando os potenciais benefícios associados ao reaproveitamento sustentável desse resíduo sólido.

Quadro 1. Resumo dos documentos selecionados para a revisão.

Fonte: Autores do Trabalho.

Número	Autores	País	Fonte	Aplicação
1	Nguyen et al. (2023)	Austrália	Transportation Engineering	Geotecnia
2	Guner (2022)	Turquia	Journal of Material Cycles and Waste Management	
3	Fiore et al. (2022)	Brasil	Cleaner Engineering and Technology	
4	Ho et al. (2022)	Vietnã	Journal of Cleaner Production	
5	Marchiori et al. (2022)	Portugal	Open Civil Engineering Journal	
6	Marchiori et al. (2021)	Portugal	Materials Science Forum	
7	Bağrıaçık; Güner (2020)	Turquia	KSCE Journal of Civil Engineering	
8	Iqbal et al. (2020)	Paquistão	International Journal of GEOMATE	
9	Bastidas-Martínez et al. (2020)	Colômbia	Archives of Civil Engineering	
10	Nawagamuwa; Wijesooriya (2018)	Sri Lanka	International Journal of Geo-Engineering	
11	Montalvan; Boscov (2016)	Brasil	Geotechnical Special Publication	
12	Aziz et al. (2016)	Malásia	International Journal of GEOMATE	
13	O'Kelly (2008)	Irlanda	Canadian Geotechnical Journal	
14	Roque; Carvalho (2006)	Portugal	5th ICEG Environmental Geotechnics	
15	Wang et al. (1992)	Estados Unidos	Journal of Environmental Engineering	

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Aplicações

3.1.1 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 kN/m², e bom ângulo de atrito, 36,2°. 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 kN/m² e 6,1°, 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.

3.1.2 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-afundamento, 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.

3.1.3 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 a 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.

3.1.4 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.

3.2 Caracterização química

As características químicas do lodo de estação de tratamento de água (LETA) são fundamentais para avaliar sua viabilidade como material de engenharia na construção civil, especialmente em aplicações geotécnicas. Esses atributos influenciam diretamente propriedades como resistência mecânica, durabilidade, interações com outros materiais, reatividade com os componentes químicos do solo e conformidade com normas ambientais. Assim, a compreensão aprofundada da composição química do LETA é essencial para otimizar seu uso, garantindo eficiência, sustentabilidade e aderência aos padrões da indústria.

Diversos estudos foram identificados na revisão bibliográfica com foco na caracterização química do LETA, especialmente por meio da análise de sua composição em óxidos. Entre os 15 trabalhos selecionados no Quadro 1, seis apresentaram esse tipo de caracterização e estão organizados na Tabela 1. Nessa tabela, os valores sublinhados correspondem aos óxidos de maior concentração absoluta entre todos os estudos analisados, enquanto os destacados em negrito representam os três principais óxidos presentes em cada estudo individual.

Tabela 1. Composição química em óxidos de lodos de ETAs utilizados na geotecnia

Fonte: Autores do Trabalho.

Área	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
Geotecnia	Guner (2022)	Adana	Turquia	16,02	2,62	48,23	8,10	0,31	1,15	-	0,13	0,53	1,80	-
	Ho et al. (2022)	Taipei	Taiwan	60,40	23,30	8,78	0,25	3,53	2,06	-	-	0,96	0,24	-
	Marchiori et al. (2022)	Guarda	Portugal	29,90	60,40	5,00	2,88	1,15	0,59	-	-	-	-	-
	Iqbal et al. (2020)	Saitama	Japão	36,20	22,70	5,53	1,81	0,96	-	0,49	-	-	0,62	31,00
	Bastidas-Martínez et al. (2020)	Brasília	Brasil	52,80	14,40	8,10	4,40	-	-	-	-	-	22,30	-
	Montalvan; Boscov (2016)	Santos	Brasil	18,30	8,89	46,00	1,59	1,00	0,44	0,10	0,25	0,42	1,03	22,00

Os óxidos mais recorrentes e predominantes nos trabalhos avaliados foram o dióxido de silício (SiO₂), o óxido de alumínio (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃). O SiO₂ aparece com teores elevados, como nos estudos de Ho et al. (2022) e Marchiori et al. (2022), ambos com 60,40%, e em Montalvan e Boscov (2016), com 46,00%. Já o Al₂O₃ é frequentemente reportado, com destaque para Guner (2022), que identificou 48,23%, e novamente Montalvan e Boscov (2016), com 8,89%. O Fe₂O₃ também é expressivo em vários trabalhos, com destaque para Guner (2022) e Bastidas-Martínez et al. (2020), ambos com 8,10%, e Iqbal et al. (2020), com 5,53%. Essa composição se assemelha à de solos argilosos e lateríticos, materiais já consolidados em aplicações geotécnicas, o que favorece o uso do LETA como adição ou substituição parcial nesses contextos.

Outros óxidos aparecem em menores proporções. O óxido de cálcio (CaO), por exemplo, está presente em baixos teores na maioria dos estudos, com exceção do trabalho de Ho et al. (2022), que identificou 3,53%, o que pode indicar resíduos de cal utilizada nos processos de tratamento da água. Óxidos como MgO, Na₂O e K₂O também surgem em pequenas concentrações, sendo notáveis os valores encontrados por Montalvan e Boscov (2016), com 1,00% de MgO e 1,03% de K₂O. Esses valores podem estar relacionados à presença de argilominerais ou de compostos residuais oriundos da etapa de coagulação. Outros componentes, como MnO, TiO₂ e P₂O₅, são geralmente encontrados em concentrações inferiores a 1%, o que sugere baixa interferência na estabilidade química geral do material.

Estudos realizados no Brasil, especificamente em Brasília e Santos, evidenciam variações regionais significativas na composição do LETA. Em Santos, os teores de SiO_2 (46,00%) e K_2O (1,03%) são mais elevados, enquanto o lodo de Brasília apresenta maiores concentrações de Al_2O_3 (14,40%) e Fe_2O_3 (8,10%). Por outro lado, lodos oriundos de Taiwan (Ho et al.) e de Portugal (Marchiori et al.) apresentam teores expressivos de sílica, o que pode indicar boa estabilidade para aplicações como camadas de base ou sub-base em pavimentos.

Apesar da variabilidade observada, é possível identificar padrões característicos. A presença marcante de silício pode estar associada à sílica dissolvida na água subterrânea, proveniente da interação com formações geológicas ricas em minerais silicatados ou da decomposição de minerais nas bacias hidrográficas. Já o alumínio e o ferro, amplamente detectados, refletem a influência dos coagulantes utilizados no processo de tratamento da água, especialmente na etapa de coagulação. O cálcio, por sua vez, geralmente está ligado à adição de cal para correção de pH ou à presença de coagulantes auxiliares que contenham esse elemento em sua formulação.

Alguns estudos também apresentaram dados sobre a perda ao fogo (PF), um parâmetro que indica a volatilização de compostos durante a queima da amostra. Esse processo está fortemente associado à decomposição de carbonatos e à presença de matéria orgânica, como algas, bactérias, detritos vegetais e outros resíduos biológicos. Além disso, podem contribuir para esse resultado a presença de polímeros orgânicos utilizados como auxiliares de coagulação e floculação, que se decompõem termicamente, bem como subprodutos orgânicos do próprio processo de tratamento. A elevada perda ao fogo observada em algumas amostras reforça a necessidade de considerar o teor de matéria orgânica como fator relevante na avaliação do LETA para uso geotécnico.

3.3 Ensaios microestruturais

A realização de ensaios microestruturais ao incorporar lodo de ETA em obras geotécnicas, como estradas, melhoramento de solo e caracterização geotécnica, 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 1);
- 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.

2. Güner (2022) - Melhoramento dos solos

- O estudo examinou a microestrutura da mistura do lodo de ETA e solo (Figura 2);
- 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.

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 3);
- 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.

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 4);

- 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.

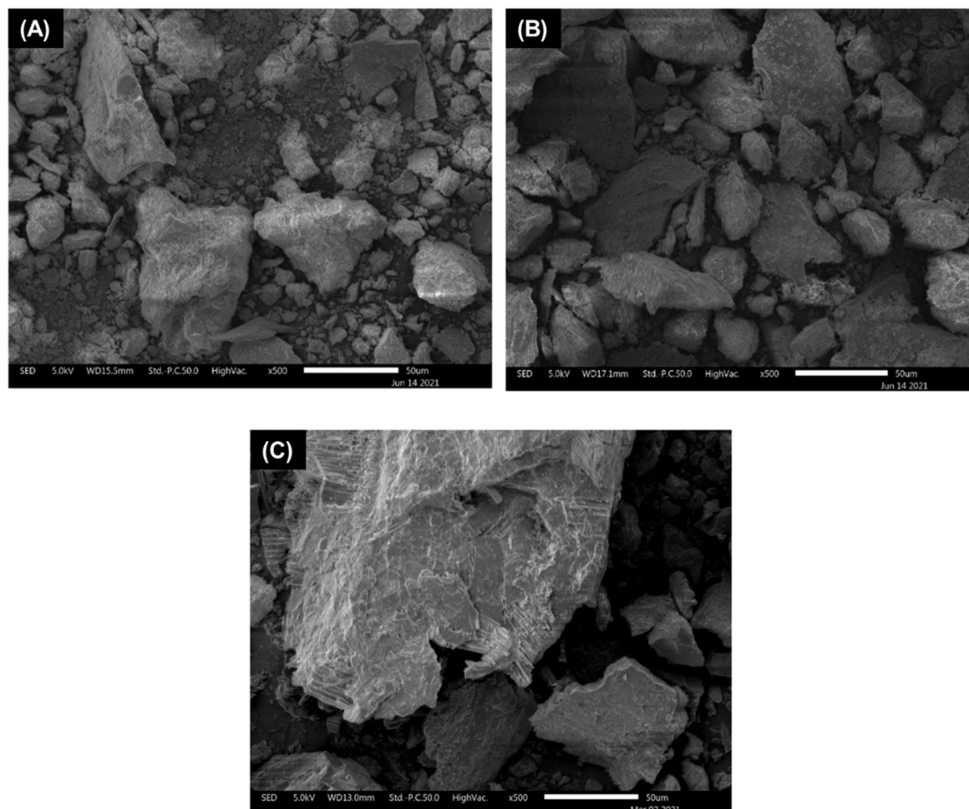


Figura 1: Imagem MEV (Ampliação x500) de A) argila; B) argila e lodo de ETA e C) lodo de ETA. Fonte: Nguyen et al. (2023).

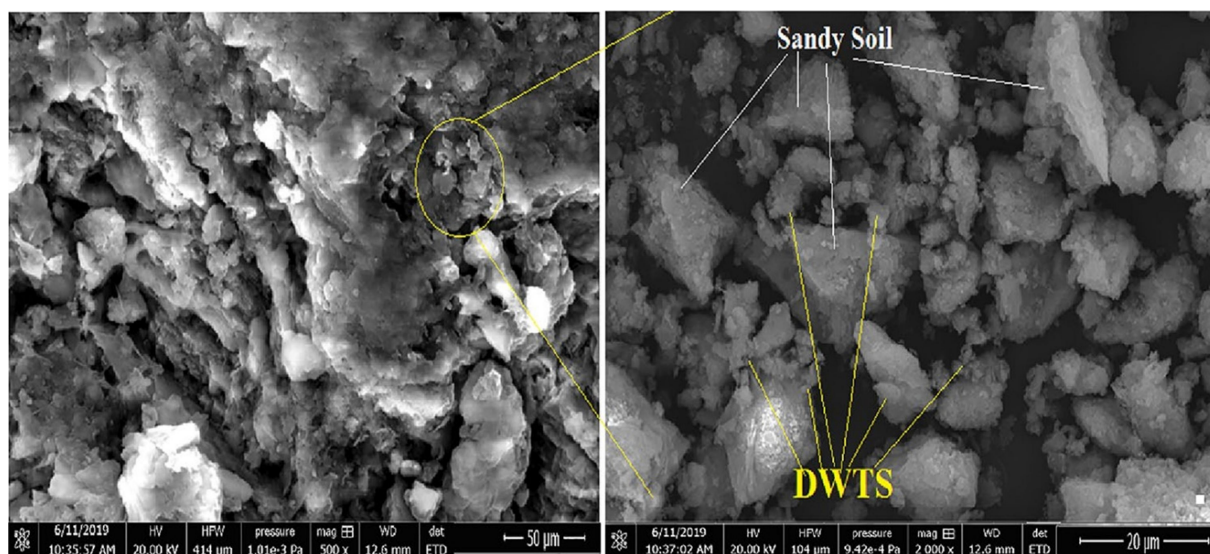


Figura 2: Imagens de MEV da mistura do solo e lodo de ETA. Fonte: Güner (2022).

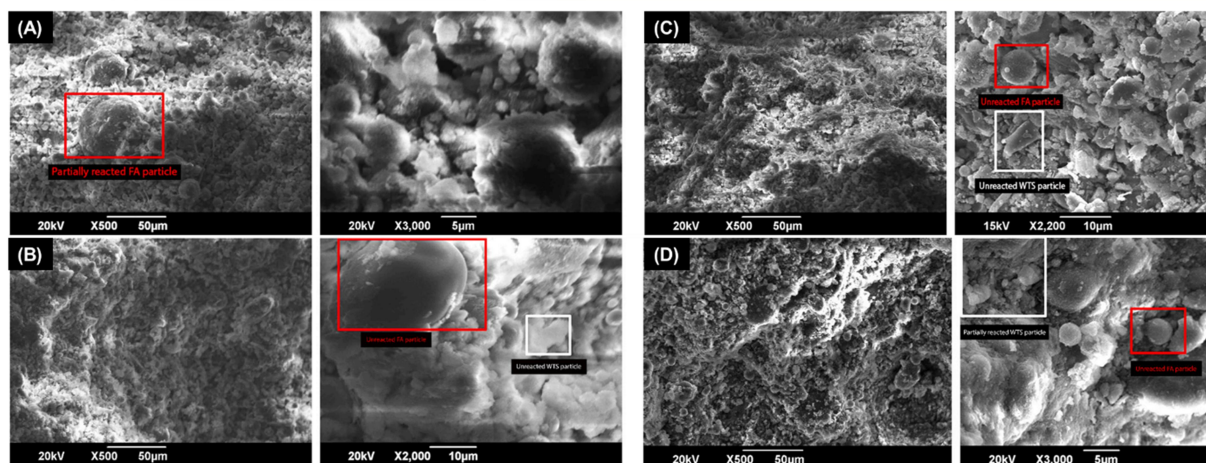


Figura 3: Imagens de MEV para as misturas MCBR com a/c de 0,65 e níveis variados de LETA, sendo A) 0%, B) 20%, C) 40% e D) 80%. Fonte: Ho et al. (2022).

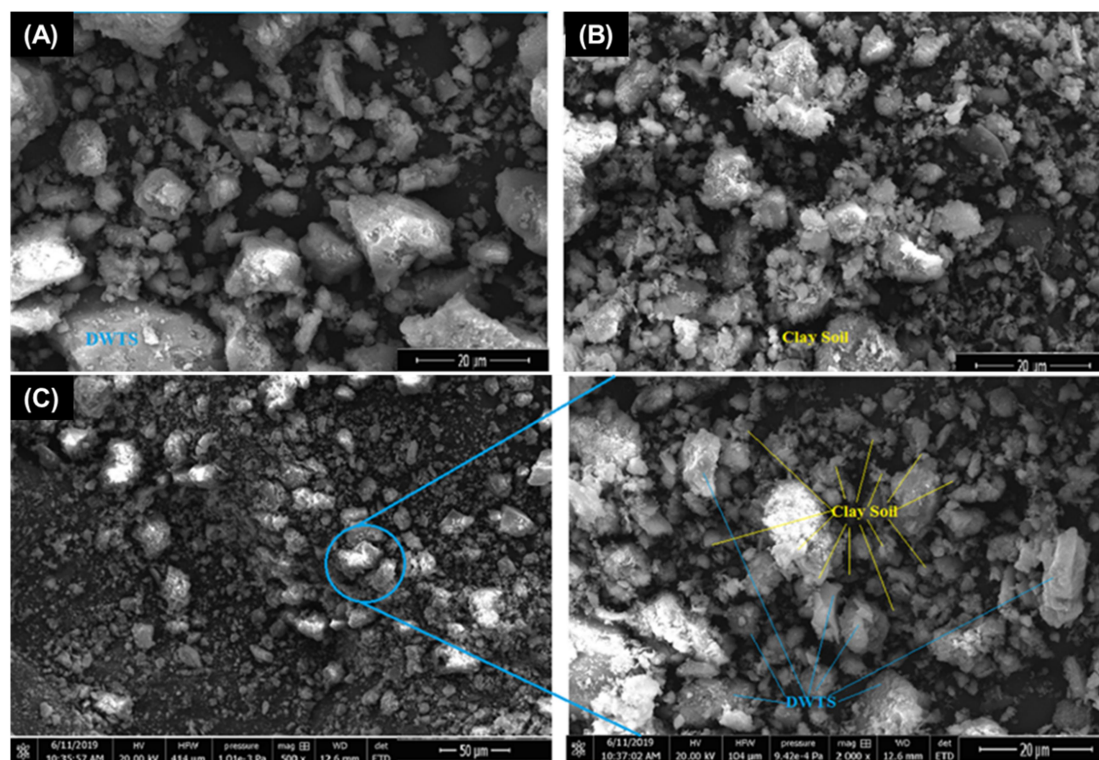


Figura 4: Imagens de MEV: A) lodo de ETA; B) solo argiloso; C) solo argiloso e lodo de ETA. Fonte: Bağrıaçık; Güner (2020).

4. CONCLUSÃO

- Nos aterros, o lodo de ETA destacou-se por apresentar melhores propriedades, como condutividade hidráulica favorável, resistência à coesão moderada e um ângulo de atrito elevado.
- Nas estradas, o lodo de ETA mostrou-se eficaz quando misturado a argila e outros materiais, como agregados de tijolos de argila, contribuindo para o aumento da resistência à compressão, ao cisalhamento e à melhoria dos índices de CBR, além de atender aos padrões mecânicos para uso em sub-bases e pavimentação.
- Na caracterização geotécnica, o lodo de ETA se comportou de forma variada dependendo das proporções de mistura e das condições de projeto. Ele demonstrou potencial em misturas com solo argiloso, apresentando boas propriedades de compactação e condutividade hidráulica, especialmente quando adicionado em proporções de até 20%.

- Com relação as características químicas, os lodos de ETA possuem uma composição química compatível com materiais argilosos e silico-aluminosos, frequentemente utilizados em obras geotécnicas. A alta concentração de SiO_2 e Al_2O_3 é particularmente vantajosa para aplicações como estabilização de solos. No entanto, a variabilidade entre os lodos reforça a necessidade de caracterização específica para cada amostra, considerando tanto os aspectos químicos quanto físicos e mecânicos.

Com base nos resultados apresentados, podemos concluir que o uso de materiais alternativos, como o lodo de ETA, em obras geotécnicas demonstrou potencial viável, com características que variam conforme o tipo de material e sua combinação. Logo, a utilização de lodo de ETA e outros resíduos em aterros, estradas e aplicações geotécnicas pode trazer benefícios tanto ambientais quanto técnicos, contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil. No entanto, a escolha do material e sua proporção de uso devem ser cuidadosamente avaliadas conforme as condições específicas de cada projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. CHANG, T. P.; CHEN, C. L.; CHEN, Y. H. Effects of wastewater sludge on the strength development and setting time of cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 246, 2020.
5. CHEN, Z.; POON, C. S. Properties of cementitious materials prepared with water treatment sludge incorporating nano-silica. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 240–248, 2017.
6. CUNHA, M. F. et al. Influence of leachate composition on hydraulic conductivity of compacted soils for liner systems. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 36, p. 421–432, 2018.
7. FANG, C. Y. et al. Utilization of water treatment sludge as fine aggregate and binder in controlled low strength material. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 281–290, 2019.
8. FERREIRA, M. L. et al. Estudo experimental do uso de lodo de ETA em misturas solo-resíduo para aplicação como barreira de engenharia. **Revista Brasileira de Geotecnia**, v. 149, p. 23–35, 2021.
9. FIORE, F.A. et al. Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 9, 2022.
10. GOMES, M. P. et al. Reuse of water treatment sludge in cementitious materials: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 476–488, 2019.
11. 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**, v. 24, n. 5, p. 1923–1933, 2022.
12. HE, R. et al. Environmental impact of water treatment plant sludge and its utilization. **Science of the Total Environment**, v. 753, p. 142028, 2021.
13. 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**, v. 356, 2022.
14. HONG, J. H. et al. Assessment of WTS management in Japan: quantities and environmental concerns. **Water Research**, v. 43, n. 15, p. 3767–3775, 2009.
15. HUANG, Y. H.; WANG, H. W. Treatment and disposal of drinking water treatment plant sludge in Taiwan. **Desalination and Water Treatment**, v. 51, p. 6227–6233, 2013.
16. HWANG, C. L. et al. Development of controlled low-strength materials using water treatment sludge. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3101–3108, 2017.
17. 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**, v. 19, n. 75, p. 133–143, 2020.
18. LIMA, J. S. et al. Estudo de propriedades geotécnicas de misturas solo-lodo de ETA para aplicação como barreiras impermeáveis. **Geotecnia Brasileira**, v. 43, n. 2, p. 59–71, 2022.
19. LIN, Y. C.; LIN, C. L. Reuse of water treatment plant sludge in ceramic products. **Ceramics International**, v. 31, p. 229–233, 2005.

20. MARCHIORI, L. et al. **Geotechnical characterization of water treatment sludge for liner material production and soft soil reinforcement.** [S.l: s.n.], 2021. v. 1046 MSF.
21. MARCHIORI, L. et al. Mechanical and Chemical Behaviour of Water Treatment Sludge and Soft Soil Mixtures for Liner Production. **Open Civil Engineering Journal**, v. 16, n. 1, 2022.
22. MININNI, G. et al. Current status of sewage sludge management in EU member states: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 113, p. 1–9, 2015.
23. MONTALVAN, E.L.T.; BOSCOV, M.E.G. **Geotechnical Characterization of a Soil-Water Treatment Sludge Mixture.** 2016, [S.l: s.n.], 2016. p. 418–427.
24. NAWAGAMUWA, U.P.; WIJESOORIYA, N. Use of flyash to improve soil properties of drinking water treatment sludge. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 9, n. 1, 2018.
25. 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**, v. 12, 2023.
26. O'KELLY, B.C. Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporating a coagulant. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 45, n. 5, p. 715–725, 2008.
27. OLIVEIRA, C. A. B. et al. Influência do lodo de ETA nas propriedades hidráulicas e mecânicas de solos argilosos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 679–688, 2019.
28. RAHMAN, M. M. et al. Utilization of water treatment plant sludge in bricks. **Construction and Building Materials**, v. 130, p. 508–517, 2017.
29. ROQUE, A.J.; CARVALHO, M. **Possibility of using the drinking water sludge as geotechnical material.** 2006, [S.l: s.n.], 2006. p. 1535–1542.
30. SANTOS, A. F. et al. Utilização de resíduos em barreiras de engenharia: revisão de literatura. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 7, n. 1, p. 57–72, 2020.
31. 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.** 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.
32. SWIERCZEK, M. et al. Review of the application of water treatment sludge in construction materials. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 2, p. 2555–2564, 2018.
33. WANG, M.C.; HULL, J.Q.; JAO, M.; DEMPSEY, B.A.; CORNWELL, D.A. Engineering behavior of water treatment sludge. **Journal of Environmental Engineering** (United States), v. 118, n. 6, p. 848–864, 1992.