

Universidade Federal de Uberlândia
Instituto de Ciências Agrárias
Campus Glória

Faculdade de Engenharia Ambiental

Larissa dos Reis Monteiro

**ANÁLISE DE MISTURAS DE SOLO COM LODO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA PARA FINS DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso 2
apresentado à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências de
Graduação em Engenharia Ambiental,
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

UBERLÂNDIA

2023

ANÁLISE DE MISTURAS COM LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA FINS DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Larissa dos Reis Monteiro¹

Jean Rodrigo Garcia²

Resumo

O aproveitamento de lodo proveniente do Sistema de Captação e Tratamento de Água Capim Branco em Uberlândia, é investigado para uso geotécnico de misturas constituídas de solo, cal e lodo em obras de construção civil. Desse modo, o lodo das estações de tratamento de água pode ser utilizado como matéria prima e mitigar os impactos vinculados a esse resíduo no meio ambiente. A partir de ensaios de caracterização física e mecânica das misturas determinou-se a viabilidade de utilizar frações de lodo para fins geotécnicos, como na construção de estradas. Os resultados obtidos demonstraram que misturas com adição de 2% de cal e 10% de lodo apresentaram características mecânicas semelhantes à do solo sem adição de outros componentes, além de apresentar maior resistência quando comparada com as misturas de 25% e 40% de lodo que também foram avaliadas neste artigo.

Palavras-chave: Solo. Aproveitamento de resíduos. Lodo de ETA. Tratamento de água. Destinação sustentável.

Abstract

The use of sludge from the Capim Branco Water Collection and Treatment System in Uberlândia is investigated for the geotechnical use of mixtures consisting of soil, lime and sludge in civil construction works. In this way, sludge from water treatment plants can be used as raw material and mitigate the impacts linked to this waste on the environment. Based on physical and mechanical characterization tests of the mixtures, the feasibility of using sludge fractions for geotechnical purposes, such as in road construction, was determined. The results obtained demonstrated that mixtures with the addition of 2% lime and 10% sludge presented mechanical characteristics similar to those of soil without the addition of other components, in addition to presenting greater resistance when compared to mixtures with 25% and 40% sludge that were also evaluated in this article.

Keywords: Waste utilization. Water Treatment Plant Sludge. Water treatment. Sustainable disposal.

¹ Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: larirmonteiroambiental@gmail.com

² Professor da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: jean.garcia@ufu.br

Introdução

O tratamento de água é constituído por a uma série de processos físico-químicos até que a água seja clarificada, e a remoção da sua carga poluidora produz o lodo de ETA (Estação de Tratamento de Água). Estudos apontam, que no Brasil este resíduo é frequentemente lançado nos cursos d'água sem passar por nenhum tratamento, e muitas vezes sendo caracterizado como crime ambiental, de acordo com a Lei 9.605/98, que dispõe de sanções penais de atividades que prejudicam ao meio ambiente, como o prejuízo da fauna e da flora. Outra possível destinação é a disposição em aterros sanitários, fato que também gera impactos negativos ao meio ambiente, vinculados a supressão de vegetação para obtenção da área, e a poluição do ar com gases do efeito estufa. Sabe-se que o crescimento populacional está atrelado com o aumento da necessidade de consumo de água e conseqüentemente com o aumento da geração do lodo de ETA.

O destino do lodo é um dos grandes desafios enfrentados pelas concessionárias responsáveis pelo tratamento de água e o seu reaproveitamento é considerado como uma alternativa capaz de reduzir os custos operacionais com o seu descarte em aterro sanitário e, principalmente, os impactos ambientais (HELPE, 2021). Por outro lado, os desafios para o uso do lodo como matéria-prima incluem a instabilidade de suas características, aceitação no mercado dos resíduos sólidos, demanda sazonal ou inexistente por parte de empreendimentos, capazes de incorporá-lo em seu processo produtivo, desconfiança da ausência de patógenos para uso agrícola e custo de armazenamento e transporte (VILLANOVA, 2022).

O aumento da geração de resíduos constitui um grande problema no desenvolvimento sustentável e uma alternativa de minimizá-lo é a possível capacidade de incorporar esse resíduo como matéria prima na geração de novos produtos, diminuindo o impacto e/ou passivo ambiental provocado pela destinação final no meio ambiente.

Deste modo, sua disposição para uso em pavimentação ou obras de terra mostra-se como uma possibilidade com potencial econômico, ambiental e social. No entanto, para que sua aplicação no solo seja fundamentada, critérios geotécnicos devem ser conhecidos. As propriedades físicas de um material são indicativos do seu comportamento mecânico e estão relacionados às suas características químicas, por isso, caracterizar e classificar os solos são etapas fundamentais em estudos geotécnicos.

Dessa forma, o artigo tem por objetivo o aproveitamento do lodo de ETAs para fins geotécnicos como uso em pavimentação e obras de construção civil. A caracterização

foi realizada com base em ensaios de laboratório que analisam o comportamento mecânico do solo, sendo, ensaio de granulometria conjunta, limites de Atterberg, massa específica dos grãos, compactação (proctor normal) e ensaios de resistência ao cisalhamento. Foram caracterizados separadamente, o solo de Uberlândia, o lodo proveniente da Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR), misturas de solo e cal e, finalmente, solo com cal e lodo, variando-se em diferentes porcentagens. Avaliou-se então, se estas misturas formam uma estrutura resistente e qual seria a classificação dessa mistura de acordo com o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS) e da Transportation Research Board (TRB).

Metodologia

A caracterização física e mecânica do solo, lodo e misturas em diferentes proporções foram realizadas para analisar os parâmetros estabelecidos pelos Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS) e a classificação rodoviária dos solos, Transportation Research Board (TRB) da Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte (AASHTO).

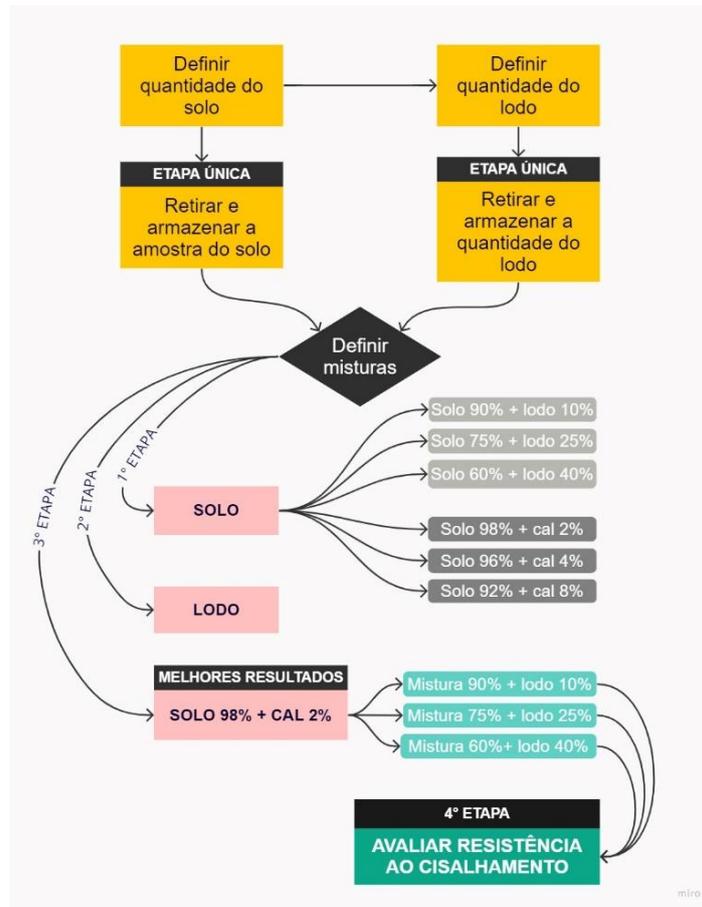
O material utilizado na pesquisa consistiu no Solo de Uberlândia, coletado no Campus Santa Mônica – UFU, ao lado do laboratório LabGeo, além disso, foram feitas várias coletas de Lodo da Estação de Tratamento de Água Capim Branco de Uberlândia, com amostras provenientes das caçambas da UTR (Unidade de Tratamento de Resíduos), onde foram secos ao ar e secos na estufa, de acordo com os experimentos. Ademais, utilizou-se Cal hidratado em diversas proporções nas misturas.

Sendo assim, a pesquisa foi dividida em quatro etapas:

- 1º Etapa: caracterização do solo do município, em seguida, do solo com adição de cal e posteriormente com adição de lodo;
- 2º Etapa: caracterização do lodo desidratado proveniente da Unidade de Tratamento de Resíduos;
- 3º Etapa: escolha da melhor mistura da 1º fase (solo e cal), em seguida, à caracterização da mistura escolhida com adição de diferentes porcentagens de lodo;
- 4º Etapa: avaliação da resistência ao cisalhamento com as misturas de solo da 3º etapa;

A Figura 1 a seguir ilustra a divisão das etapas para o reaproveitamento de lodo:

Figura 1– Fluxograma das etapas da pesquisa com uso de lodo de ETA.



Fonte: autora (2023).

Sendo assim, para realizar as devidas caracterizações foram realizados 7 ensaios no laboratório: (a) Determinação de Umidade (NBR 6457), (b) Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por meio do Frasco Chapman (NBR 9776), (c) Limite de Liquidez (NBR 6459), (d) Limite de Plasticidade (NBR 7180), (e) Compactação (NBR 7182), (f) Granulometria Conjunta (NBR 7181) e (g) Compressão Simples (NBR 12770).

Foram determinados os parâmetros que abrangem Diâmetro efetivo (D_{10} , D_{30} , D_{60} e D_{90}), Coeficiente de uniformidade (C_u), Coeficiente de curvatura (C_c), Porcentagem passantes das peneiras 10mm, 40mm e 200mm, Índice de Grupo (IG), Coeficiente da permeabilidade (k), e Resistência à Compressão. As Porcentagens passantes podem ser nomeadas de P_{10} , P_{40} e P_{200} e são importantes para classificação nos sistemas de classificação dos solos SUCS e TRB.

O Índice de grupo (IG), é um importante parâmetro responsável por definir a capacidade suporte de um terreno de fundação de um pavimento, variando de 0 à 20. Sendo o valor 0 um solo ótimo e 20 um solo ruim para compactação ou inadequado. O IG pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$IG = (0,2 \times a) + (0,005 \times a \times c) + (0,01 \times b \times d)$$

Onde:

p: teor de silte + argila do solo, ou seja, a porcentagem que passa na peneira nº 200.

a = $p - 35$, se $p > 75\%$, adota-se 75 e se $p < 35\%$, adota-se 0); **a** varia de 0 a 40 e $a \times 0,2$ varia de 0 a 8.

b = $p - 15$, se $p > 55\%$, adota-se 55 e se $p < 15\%$, adota-se 0); **b** varia de 0 a 40 e $0,01 \times b \times d$ varia de 0 a 8.

c = $LL - 40$, se $LL > 60\%$, adota-se 60 e se $LL < 40\%$, adota-se 0); **d** varia de 0 a 20 e $0,005 \times a \times c$ varia de 0 a 4.

d = $IP - 10$, se $IP > 30$, adota-se 30 e se $IP < 10$, adota-se 0) **d** varia de 0 a 20 e $0,01 \times b \times d$ varia de 0 a 8.

O Diâmetro efetivo (D_{10}) é considerado como o ponto característico da curva que mede a finura do solo. Ele corresponde ao ponto onde 10% das partículas do solo possuem diâmetros inferiores a ele. E é obtido a partir das interpolações dentro do gráfico de granulometria e cada tipo de solo possui um valor específico de D_{10} . Por fim, é possível obter da mesma forma o D_{30} , D_{60} e D_{90} .

O Coeficiente de uniformidade (C_u) é uma aproximação da distribuição do tamanho das partículas do solo. Valores próximos de 1 pode-se afirmar que a curva granulométrica possui diâmetros em que os intervalos possuem pequenas variações e se aproxima de uma curva vertical, por outro lado, quando o coeficiente apresenta valores maiores que 1 a curva apresenta grandes intervalos entre os diâmetros.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Nesse sentido os solos seguem as classificações:

$C_u < 5$ são denominados uniformes;

$5 < C_u < 15$ são denominados de medianamente uniformes;

$C_u > 15$ são denominados desuniformes;

D_{10} é o diâmetro corresponde a 10% do material passante;

D_{60} é o diâmetro corresponde a 60% do material passante.

O Coeficiente de Curvatura (C_c) indica a forma e a simetria da curva, e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

O C_c classifica o solo em bem graduado, mal graduado e descontínuo. Valores entre 1 e 3 define o solo como bem graduado, que significa uma distribuição proporcional do tamanho das partículas, na qual, os espaços vazios presente entre as partículas grandes são preenchidos pelas partículas menores.

Segundo Caputo (1981), a permeabilidade é influenciada principalmente pela temperatura do fluido e pelo índice de vazios presentes na amostra e demonstra ainda que a permeabilidade varia para os diferentes tipos de solo.

Dessa forma, condições como quantidade, continuidade e tamanho dos poros são responsáveis pelas variações do coeficiente de permeabilidade.

$$k = CH \times (D_{10})^2$$

Em que:

k é o Coeficiente de Permeabilidade;

CH é o Coeficiente que varia de 0 a 1000 (adotado 100);

D_{10} é o Diâmetro efetivo do solo ou amostra.

A compressão simples exige inicialmente a obtenção de corpos de prova (CPs) para que gradualmente sejam feitos os rompimentos com intuito de determinar a resistência à compressão. Sendo assim, foram realizados 15 CPs para cada mistura e, em seguida, o rompimento de 3 CPs a cada sete dias, totalizando um ensaio de cerca de 28 dias para cada mistura, sendo 12 CPs que tiveram a medição vertical e apenas 3 com a medição diametral. A compressão simples foi avaliada na 4^o etapa da pesquisa e incluíram apenas as quatro misturas:

Mistura 1: Solo + 10% lodo

Mistura 2: Solo + 2% cal + 10% lodo

Mistura 3: Solo + 2% cal + 25% lodo

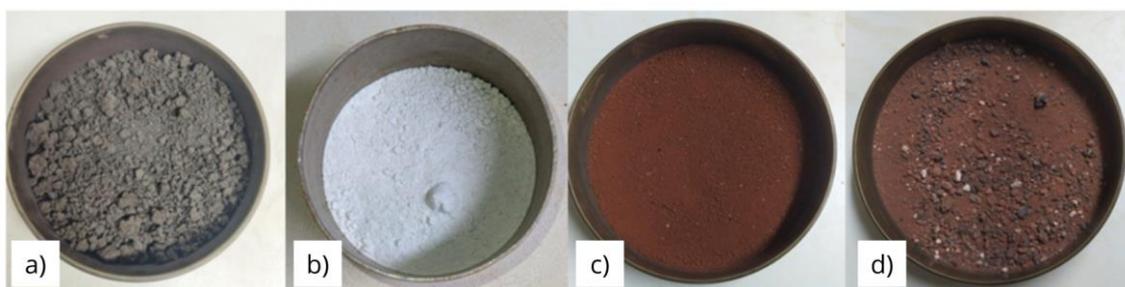
Mistura 4: Solo + 2% cal + 40% lodo

Para realizar a mistura do material foram feitos cálculo das proporções para obter as porcentagens corretas, considerando, por exemplo as misturas com 10% de Lodo e 2% de Cal. Inicialmente faz-se uma mistura base com cerca de 9kg, sendo 8.100g de solo e 900g de Lodo, posteriormente, para adição de 2% de cal na mistura base é retirado 8.820g da mistura Solo+10% Lodo e adiciona-se 180g de cal, tendo então, uma mistura Solo +

2% Cal + 10% Lodo. Da mesma maneira, estes cálculos foram feitos para todas as outras misturas.

Ademais, o lodo utilizado na pesquisa é proveniente da Estação de Tratamento de Água Capim Branco de Uberlândia e encaminhado ao Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, situado no campus Santa Mônica. As coletas foram realizadas após a etapa das centrífugas que acontece na Unidade de Tratamento de Resíduos da ETA. As amostras de lodo, cal, solo e mistura foram transferidas para a bandeja e secas ao ar para chegar à umidade higroscópica conforme apresentado nas figuras 2a, 2b, 2c e 2d, respectivamente Figura 2, exceto no ensaio de Compressão Simples sendo necessário secar na estufa, devido ao alto volume de lodo necessário.

Figura 2 – Amostras de **a)** lodo, **b)** cal, **c)** solo e **d)** mistura lodo+cal+solo, utilizadas no experimento.



Fonte: autora (2023).

O tratamento do solo é importante para aprimorar a resistência, controlar a permeabilidade e reduzir a deformabilidade até que atenda aos padrões exigidos pelo projeto que está sendo executado (suporte para construção, pavimentação, entre outros). Em obras de pavimentação, por exemplo, utiliza-se a estabilização mecânica do solo com a aplicação de ligantes para melhorar a impermeabilização ou coesão, resultando em melhor resistência do solo em relação a água e seus efeitos. A adição de cal em certos tipos de solos argilosos tem melhorado a qualidade deste, em comparação ao uso de cimento (CAPUTO; CAPUTO, 2022). Desta forma, nessa pesquisa adotou-se a cal como elemento aglutinante para o tratamento da coesão.

Para avaliar o efeito da adição de cal nas misturas de solo e lodo, diferentes proporções de misturas foram realizadas de acordo com a literatura, sendo 2%, 4% e 8%. Em seguida, para afunilar os resultados da pesquisa as misturas com as menores quantidades de cal foram escolhidas, visto que, apresentam vantagem econômica.

Posteriormente, as misturas foram feitas com diferentes proporções de lodo, 10%, 25% e 40% de adição de lodo em uma amostra de solo. As proporções de lodo permitiram a maximização do aproveitamento de lodo para uso em obras de engenharia. Dessa forma, os ensaios possibilitaram determinar as melhores porcentagens de lodo e de cal para serem adicionados ao solo.

Resultados e discussão

Referente ao lodo suas características variam em função da água bruta, dos processos realizados na ETA e dos produtos químicos aplicados. O lodo é composto pelos resíduos sólidos que são removidos da água bruta, a partir dos reagentes químicos que proporcionam o adensamento dos sólidos para facilitar sua remoção, e pela água que realiza o transporte do composto. Sendo assim, comumente, as maiores quantidades de resíduos gerados na ETA são provenientes dos decantadores e filtros.

No município de Uberlândia o tratamento de água é de Ciclo Completo e contempla a coagulação química a partir do Policloreto de Alumínio (PAC), a mistura rápida que acontece na Calha-Parshal por processos químicos e físicos, e inclui a adição da Cal como alcalinizante, em seguida, ocorre os processos de floculação, decantação, filtração, desinfecção, e por último o processo de fluoretação.

Os ensaios de caracterização foram feitos para o solo, o lodo, e para as misturas, porém, alguns ensaios não se aplicaram ao lodo como os Limites de Atterberg e o Proctor Normal. O solo selecionado como melhor mistura da 3^o etapa é composto por Solo + 2% Cal + 10% Lodo.

Mediante os ensaios de compactação à energia normal, foi possível selecionar a amostra que mais se aproximou da amostra referência (solo *in situ* compactado), levando em consideração a umidade ótima e a massa específica aparente máxima (Tabela 1 e

Gráfico 1).

Observa-se que a curva do Solo + 2% Cal e Solo +10% Lodo se aproximaram mais da curva do solo original, pois não apresentaram alterações significativas na estrutura física do solo nem no seu potencial de compactação. Desse modo, as etapas posteriores foram realizadas com o solo escolhido, com 2% cal, uma vez que requer o menor custo. Contudo, é relevante mencionar a viabilidade de utilizar outras porcentagens para a mistura.

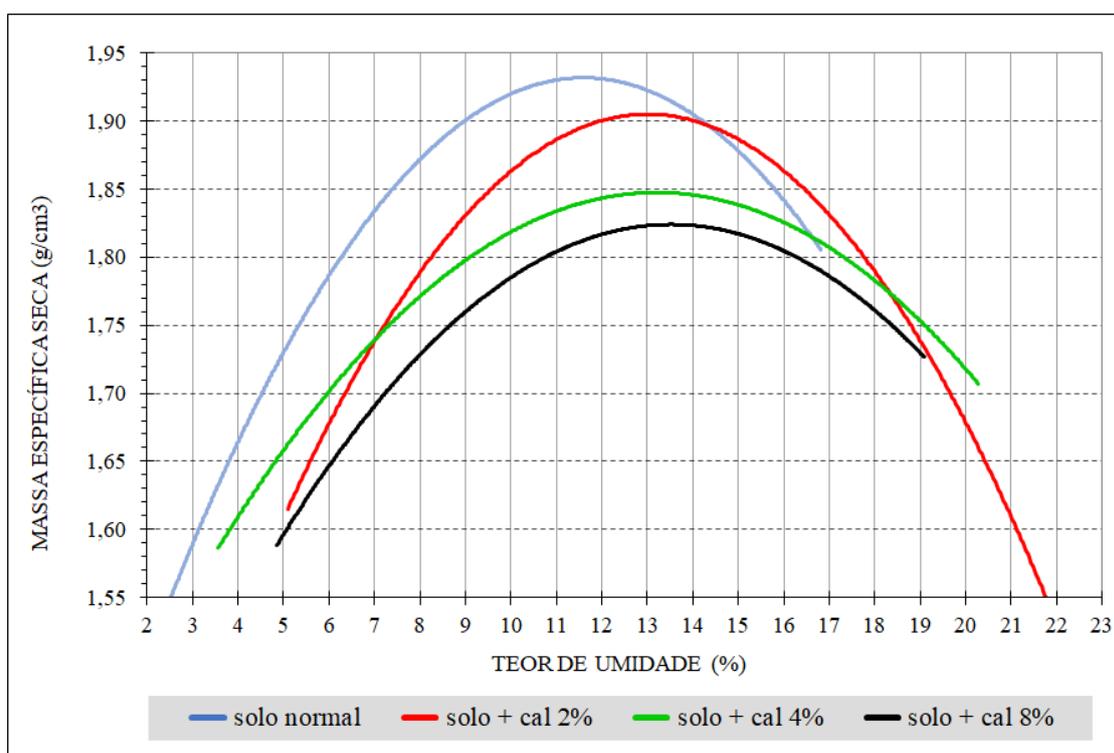
Tabela 1 – Comparação do ensaio de Proctor com variações da cal e de lodo.

Material e Misturas	Umidade Ótima (%)	Massa Específica Máxima (g/cm ³)
Solo	11,500	1,932
Lodo	NA	NA
Solo + 2% cal	13,000	1,905
Solo + 4% cal	13,250	1,847
Solo + 8% cal	13,500	1,825
Solo + 10% lodo	14,700	1,876
Solo + 25% lodo	17,800	1,704
Solo + 40% lodo	19,800	1,662

Legenda: NA - Não Aplicável;

Fonte: autores (2023).

Gráfico 1 – Curvas de compactação das amostras de solo com adição de cal.



Fonte: autora (2023).

De acordo com os resultados disponibilizados na Tabela 1 e

Gráfico 1, é evidente que maiores quantidades de cal na amostra de solo não geram grandes variações nos valores de umidade da amostra. No entanto, quando é adicionado lodo a amostra de solo a umidade da mistura tende a aumentar significativamente, vinculado à capacidade de reter água, mas também a quantidade superior de lodo que foi adicionada.

Outra análise muito importante é a granulometria conjunta, que possui papel fundamental nas áreas de engenharia civil e geotecnia, pois permite caracterizar o material a partir da sua distribuição granulométrica. Dessa forma, o Gráfico 2 apresenta visualmente os dados sobre a granulometria do Lodo, Solo, mistura Solo + 2% Cal e mistura Solo + 2% Cal + 10% Lodo.

Lodo: composto pelas frações com 8,7% de silte, 85,5% de areia e 5,8% de pedregulho, dessa forma, podemos concluir que ele não apresenta coesão entre os agregados, principalmente, por se tratar de um resíduo de tratamento de água.

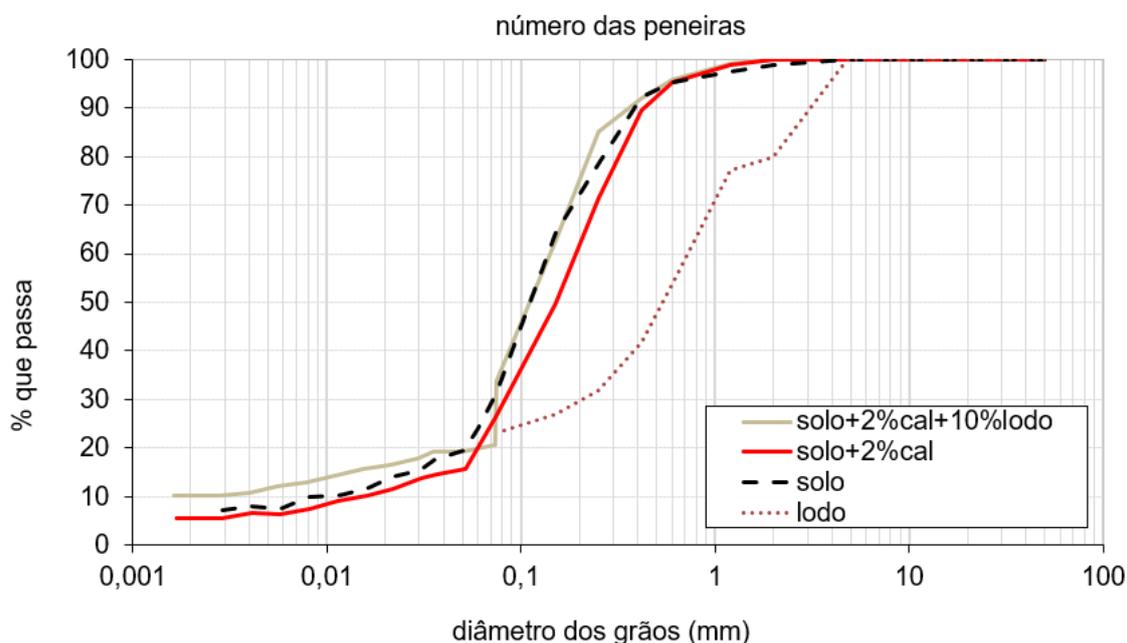
Solo: consiste em 8,0% de argila, 16,0% de silte, 76,0% de areia e 0% de pedregulho, sendo classificado como solo areia silto-argilosa, e consiste em solo bem graduado com partículas de vários diâmetros.

Solo + 2% Cal: consiste em 6,8% de argila, 9,0% de silte, 84,3% de areia e 0% de pedregulho, sendo assim, é classificado como solo areia silto-argilosa, denominado solo bem graduado com partículas de vários diâmetros. Ao comparar ao solo *in situ*, observa-se redução das partículas de menor diâmetro, como argila e silte, e aumento na porcentagem de areia. O cálcio presente na cal evita a penetração da água nos vazios dos argilominerais neutralizando suas cargas negativas e favorecendo a floculação e a troca catiônica (FERREIRA et al., 2018). O aumento na quantidade de partículas de areia pode atribuído ao processo de floculação do material.

Solo + 2% Cal + 10% Lodo: Consiste em 9,9% de argila, 5,8% de silte, 76,3% de areia e 8% de pedregulho, sendo assim, também é classificado como solo areia silto-argilosa, e consiste em solo bem graduado com partículas de vários diâmetros. A granulometria encontrada é semelhante a amostra de solo sem adição de cal ou solo, no entanto, destaca-se que, neste caso, foi identificada a presença de uma porcentagem de pedregulho que não foi encontrada nas amostras anteriores. Esse aumento na presença de pedregulhos pode estar associado à influência de cal e à presença do coagulante, sal de alumínio, no lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA).

A composição do lodo depende das propriedades do manancial utilizado para captação e o tipo de tratamento (NGUYEN, 2022). De maneira geral, lodos de estações de tratamento de água são compostos principalmente por partículas de solo (menores que 0,2 mm), matéria orgânica e óxidos metálicos de alumínio ou ferro (NAYERI, 2022).

Gráfico 2 – Curvas granulométrica dos materiais empregados nas análises.



Fonte: autora (2023).

Com base nos ensaios realizados, tornou-se possível definir parâmetros importantes para caracterização de acordo com os sistemas internacionais, SUCS e TRB, apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Resultados de caracterização básica dos materiais analisados.

Amostra	Un.	Solo	Lodo	Solo + 2% Cal	Solo + 2% Cal + 10% Lodo	
Granulometria	D ₁₀	mm	0,009	0,156	0,015	0,003
	D ₃₀	mm	0,073	1,038	0,086	0,075
	D ₆₀	mm	0,140	2,418	0,197	0,143
C _c		4,229	2,856	2,503	13,112	
(Coeficiente de Curvatura)	-	mal graduado	bem graduado	bem graduada	mal graduado	
C _u		15,556	15,500	13,133	47,667	
(Coeficiente de não-uniformidade)	-	levemente desuniforme	levemente desuniforme	uniformidade média	desuniforme	
Peneira #10	%	99,000	54,000	100,000	100,000	
Peneira #40	%	92,200	14,500	89,600	92,100	
Peneira #200	%	31,200	8,700	26,600	33,900	
a		0,000	0,000	0,000	0,000	
b	-	16,200	8,200	11,600	18,900	

c		0,000	NA	0,000	0,000
d		0,000	NA	0,000	0,000
IG (Índice de Grupo)	Faixa entre 0 à 20	0,000	NA	0,000	0,000
SUCS (Sistema Unificado de Classificação do Solo)	-	ML silte de baixa compressibilidade	-	ML - silte de baixa compressibilidade	ML - silte de baixa compressibilidade
TRB (<i>Transportation Research Board</i>)	-	A-2-4 pedregulhos e areias siltosas ou argilosas	-	A-2-4 pedregulhos e areias siltosas ou argilosas	A-4 Solo siltoso
Coefficiente de Permeabilidade (k) via Hazen	cm/s	8,10E-05	2,43E-02	2,25E-04	9,00E-06
	-	típico de areias muito finas e siltes, mistura de ambos e argila	típico de areais	típico de areias muito finas e siltes	típico de areias muito finas e siltes, mistura de ambos e argila

Legenda: NA - Não Aplicável.

Fonte: autora (2023).

Quanto à permeabilidade avaliada com base no diâmetro efetivo da Tabela 2, é notável uma melhora, uma vez que o coeficiente de permeabilidade da mistura final, Solo + 2% Cal + 10% Lodo, diminuiu em comparação a amostra de solo. Além disso, a mistura final apresentou curva de granulometria não uniforme, com graduação irregular, semelhante ao solo *in situ*, porém, com valores maiores para os coeficientes de C_u e C_c , fato que evidencia a ocorrência de instabilidade mecânica.

É perceptível que em comparação ao solo *in situ*, a adição de cal resultou em diminuição de 2,4% nos limites de liquidez, enquanto a introdução de lodo à mistura de solo e cal causou um aumento de 3,1%. Os limites de plasticidade aumentaram em 3,04% e 5,39% quando cal e lodo foram adicionados à mistura de solo e cal, respectivamente.

Além disso, os dados mostram que a umidade ótima do ensaio de compactação aumentou consideravelmente para mistura Solo + 2% Cal, e posteriormente, para a mistura Solo + 2% Cal + 10% Lodo, enquanto a massa específica aparente máxima apresentou uma queda sutil. A partir deste ponto de vista, os resultados indicam que os materiais adicionados ao solo provocaram alterações nas propriedades de compactação do solo, embora, não tenham causado mudanças significativas na sua densidade, conforme demonstrado na (Tabela 3).

Tabela 3 – Análise geral dos ensaios de caracterização com solo, 2% de cal e 10% de lodo.

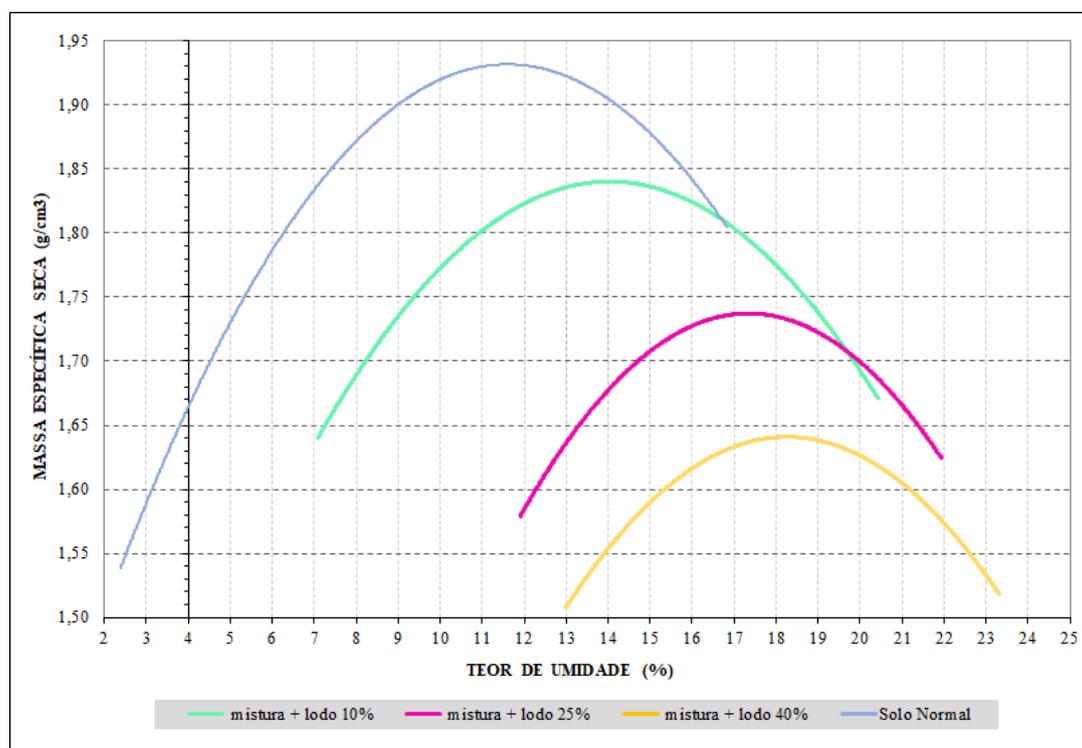
Ensaio		Solo	Lodo	Solo + 2% cal	Solo + 2% cal + 10% lodo
Umidade (%)		1,742	25,096	0,822	5,543
Massa específica (g/cm³)		2,835	2,421	2,874	2,735
Limite de Plasticidade		15,000	-	18,040	20,390
Limite de Liquidez (g/cm³)		21,743	-	19,304	24,840
Índice de Plasticidade		6,740	-	1,260	4,450
Proctor Normal	Umidade ótima (%)	11,500	-	13,000	14,000
	Massa específica máx. (g/cm ³)	1,932	-	1,905	1,841

Fonte: autora (2023)

De acordo com os dados apresentados no Gráfico 3 e na

Tabela 4, dentre as amostras contendo 2% de cal e diferentes proporções de lodo nota-se que a mistura com 10% de lodo se aproximou mais das características do solo normal. Porém, é importante afirmar que as misturas com 25% e 40% de lodo adicionados ao solo com 2% de cal resultaram em valores menores de massa específica aparente máxima em relação ao solo *in situ*.

Gráfico 3 - Curvas de compactação das amostras de solo, 2% cal e lodo.



Fonte: autora (2023)

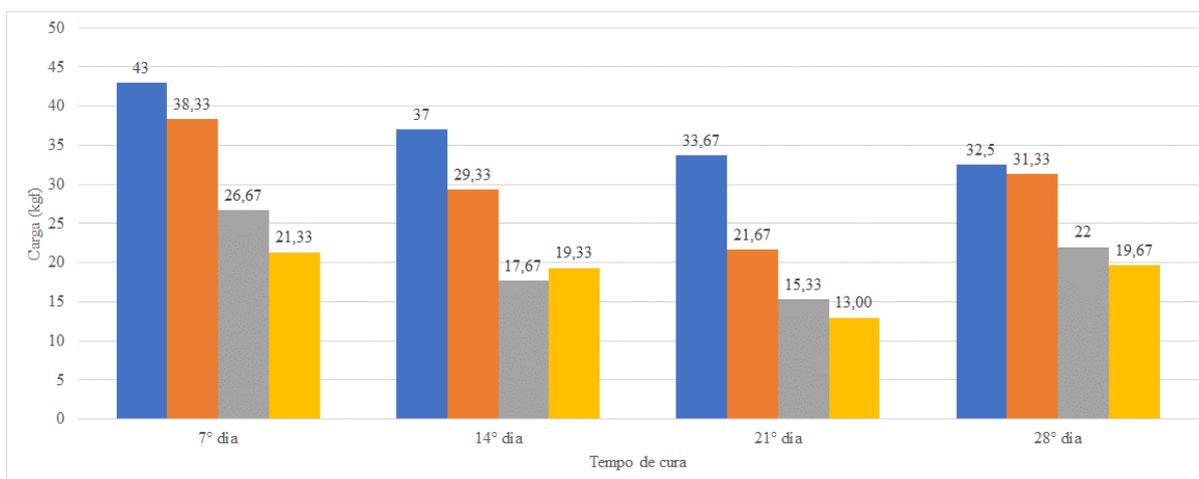
Tabela 4 – Ensaio de compactação com mistura de solo, cal e lodo.

AMOSTRA	Umidade Ótima (%)	Massa específica aparente máxima (g/cm ³)
SOLO	11,500	1,932
MISTURA (SOLO +2% CAL) + 10% LODO	14,000	1,840
MISTURA (SOLO +2% CAL) + 25% LODO	17,300	1,738
MISTURA (SOLO +2% CAL) + 40% LODO	18,500	1,640

Fonte: autora (2023).

Referente ao ensaio de Compressão Simples, o Gráfico 4 apresenta a carga máxima (kgf) aplicada nos corpos de prova ao longo de 28 dias, para as quatro amostras. É possível observar que, no 7º, 14º e 21º dia de ensaio, a carga de rompimento diminuiu progressivamente ao longo do tempo, indicando redução na resistência das amostras. No entanto, no 28º dia, a carga aplicada nas amostras volta a aumentar, com exceção da amostra de Solo + 10% Lodo, que apresenta uma variação mínima em comparação com as demais. Esse comportamento indica uma estabilização, que pode estar relacionada à ausência de cal presente nas outras amostras.

Gráfico 4 – Ensaio de compressão simples.



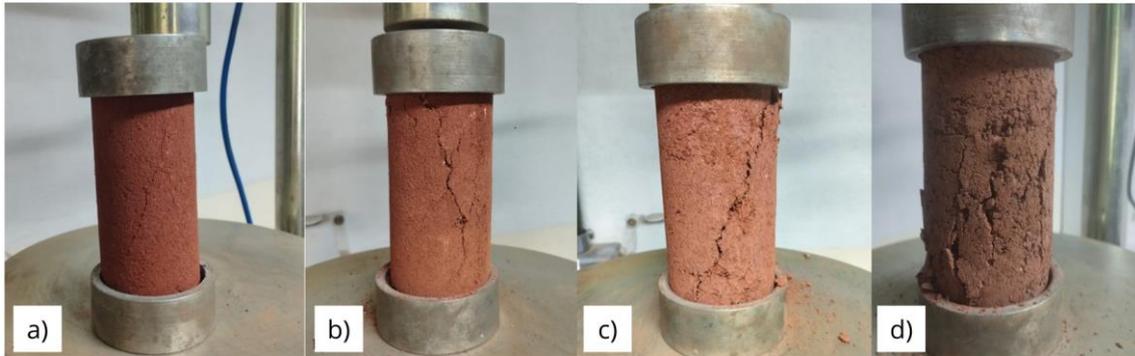
Fonte: autora (2023).

Para cada valor apresentado no gráfico de compressão simples há uma média de três corpos de prova que foram rompidos, e as misturas seguem com o seguinte desvio padrão:

Misturas	Desvio Padrão
1. Solo + 10% lodo	4,92
2. Solo + 2% cal + 10% lodo	2,41
3. Solo + 2% cal + 25% lodo	2,90
4. Solo + 2% cal + 40% lodo	4,43

A Figura 3 apresenta a característica do rompimento dos CPs, sendo as amostras a), b) e c) com corte transversal, enquanto a amostra d) mistura com 40% de lodo, a que mais se diferenciou por evidenciar um rompimento com estufamento do material como demonstra a imagem.

Figura 3 – Amostras do rompimento dos CPs **a)** Solo + 10% lodo, **b)** Solo + 2% cal + 10% lodo, **c)** Solo + 2% cal + 25% lodo, **d)** Solo + 2% cal + 40% lodo.

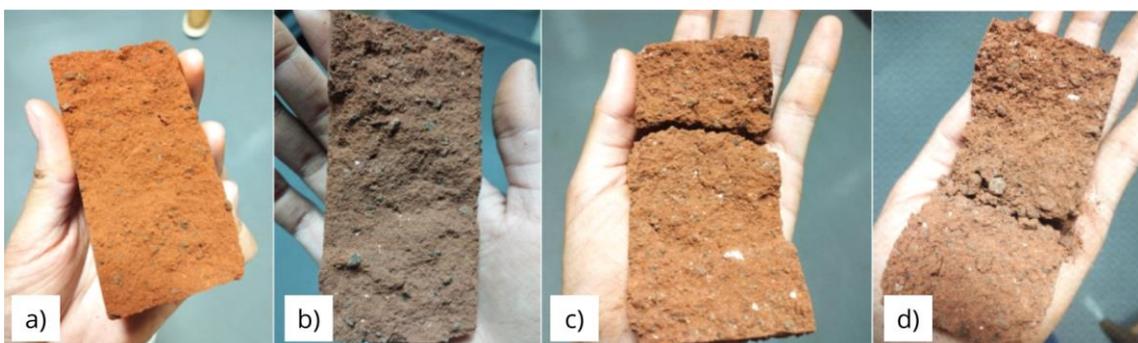


Fonte: autora (2023)

Com base na Figura 4 e no ensaio de compressão simples, foi possível observar alteração na coesão dos grãos ao adicionar o lodo. O corpo de prova apresentou maior porosidade visível, devido aos grãos de lodo serem maiores em comparação com os do solo, assim como, demonstra a granulometria do lodo quando comparado ao do solo *in situ*.

Vale ressaltar, que a amostra de lodo retém muita umidade por ser um material muito poroso, fato que influenciou no tempo de cura e na resistência das amostras que foram elaboradas. Dessa forma, é notável que quanto maior a quantidade de lodo adicionado, maior é a capacidade do material de reter umidade.

Figura 4 – Corte diametral dos CPs **a)** Solo + 10% lodo, **b)** Solo + 2% cal + 10% lodo, **c)** Solo + 2% cal + 25% lodo, **d)** Solo + 2% cal + 40% lodo.



Fonte: autora (2023).

Considerações finais

Neste artigo avaliou-se a utilização do lodo proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETA) com o objetivo de uso em fins geotécnicos. Isso foi realizado por meio de misturas com solo e cal, visando reduzir o impacto desse resíduo no meio e identificar uma nova alternativa de destinação, tanto no quesito ambiental quanto econômico.

Na primeira etapa, a mistura composta por 98% Solo + 2% Cal teve resultados promissores em relação aos parâmetros de umidade ideal e massa específica máxima aparente, se aproximando com as características do solo *in situ* em comparação as misturas com 4% e 8% de cal. Ademais, a escolha por menores porcentagens de cal resulta em custos mais baixos para o tratamento do solo com lodo.

Da mesma forma, os resultados da mistura composta por 90% Solo + 10% Lodo apresentou melhores resultados, com poucas variações nas características de compactação, o que é fundamental para seu uso geotécnico em projetos de engenharia.

Referente a mistura final, composta por Solo + 2% Cal + 10% Lodo, observa-se que os coeficientes de curvatura e o diâmetro de não conformidade são maiores que os do solo *in situ*. Porém, apesar disso, os resultados do ensaio de compactação mostram que a mistura possui características ideais de compactação, semelhantes às do solo na condição original.

Com base no índice de grupo calculado, tanto o solo quanto a mistura final apresentaram valor igual a zero, indicando qualidade ideal de compactação. Sendo assim, a mistura composta por adição de cal e lodo torna-se uma utilização viável em projetos de infraestrutura, evitando o descarte de lodo de ETA nos aterros sanitários.

Os resultados da compressão simples apresentaram uma análise estatística entre a adição de cal e o aumento da resistência a partir do 28º dia. Sendo possível concluir que a amostra de Solo + 2% Cal + 10% Lodo demonstra resistência suficiente para fins geotécnicos, uso em estradas e suporte para construções civis. Em contra partida, ao se adicionar maiores quantidades de lodo, nota-se a perda da carga aplicada.

Portanto, conclui-se ser possível realizar o aproveitamento do lodo de ETA, com adição de cal para o devido tratamento, e uso da mistura (Solo, Cal e Lodo) para fins geotécnicos como uso em pavimentação e material de construção civil, uma vez que, a mistura Solo + 2% Cal + 10% Lodo apresentou boa compactação e boa resistência para este fim.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Uberlândia, ao CNPQ que fomentaram parte da presente pesquisa por meio dos editais de bolsas de iniciação científica de 2021, ao DMAE Uberlândia pelo fornecimento de amostras de lodo.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

BRASIL. Lei nº 9605, de 12 de fevereiro de 1998. Lei de Crimes Ambientais: Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília. 1998.

BRUNI, J. C.. A água e a vida. **Tempo Social**, v. 5, n. 1-2, p. 53–65, jan. 1993.

CAPUTO, Armando Negreiros; CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos: Teoria e Aplicações**. 8. ed. Minha Biblioteca: Grupo Gen, 2022. 267 p. Atualizadores: Paulo Rocha de Albuquerque e Jean Rodrigo Garcia.

CHALHOUB, Ayda Samih et al. Incorporação do lodo de ETA na fabricação de tijolos. In: **CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE**. 2019. p. 1-6.

FERREIRA, Silvio Romero de Melo et al. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 22, 2018.

GOMES, Samuel De Carvalho et al. 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, Flávia et al. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Rev. DAE**, v. 65, n. 205, p. 5–14, 2017. ISSN 0101-6040. DOI: 10.4322/dae.2016.018.

HELPE, Juliana. **Tijolos ecológicos fabricado do lodo ETA da Agreste - TEM Sustentável**. [S.l.: s.n.], 2021.

HIGASHI, RODRIGO JA et al. **Características químicas do lodo da ETA de Cubatão**, São Paulo. 2022. DOI: 10.28927/2021.leta-1

NAYERI, D.; MOUSAVI, S. A. A comprehensive review on the coagulant recovery and reuse from drinking water treatment sludge. **Journal of Environmental Management**, v. 319, p. 115649, out. 2022.

NGUYEN, Minh Duc et al. Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. **Environmental Technology & Innovation**, p. 102651, 2022.

PORTELLA, Kleber Franke et al. Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna–Curitiba–PR. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental**. 2003.

SANTIS, Bruno Carlos de et al. Caracterização de massas cerâmicas do estado de S. Paulo para produção de agregados leves para concreto. **Cerâmica**, v. 59, p. 198-205, 2013.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS -SUCS
TABELA III -Classificação Unificada dos Solos, [s.l.]: , [s.d.].

VILLANOVA, Daniela Lupinacci; MACHADO, Viviane Feijó. Lodo de Estação de Tratamento de Água: destinação e reciclagem. **Revista Liberato**, v. 23, n. 40, p. 139-148, 2022.