1177 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO

Fabiana Alves Fiore (1)
Professora do Departamento de Engenharia Ambiental (ICT/UNESP). Livre-Docente em Gerenciamento de Resíduos Sólidos (UNESP). Doutora em Saneamento e Meio Ambiente (FEC/UNICAMP). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG). Engenheira Civil (UFMG).
Amanda Maria Dantas de Jesus (2)
Pós-doutoranda pela Universidade Estadual Paulista Departamento de Engenharia Ambiental (ICT/UNESP). Doutora em Química Analítica pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Mestrado e Licenciatura em Química pela Universidade Federal de Sergipe (UFS).
Gabriela Ramos Hurtado (3)
Professora do Departamento de Engenharia Ambiental (ICT/UNESP). Doutora em Química Orgânica (USP). Bacharel em Química (USP).
Carolina Massucci M. da Silva (4)
Auxiliar de suporte acadêmico do laboratório de solos, geologia e resíduos sólidos do Departamento de Engenharia Ambiental (ICT/UNESP). Graduada em Zootecnia pela Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia de Botucatu (FMVZ/UNESP).
Vivian Silveira dos Santos Bardini (5)
Professora da Faculdade de Tecnologia (UNICAMP). Livre-docência em Engenharia de Transportes (UNICAMP). Doutora em Engenharia de Transportes (USP). Mestre em Transportes (USP). Engenheira Civil (USP).

Endereço (1): Av. Doutor Altino Bondesan, 500 - Distrito de Eugênio de Melo - São José dos Campos – São Paulo - CEP 12247-016 - Brasil - Tel: +55 (12) 3947-9723 e-mail: fabiana.fiore@unesp.br

RESUMO

A redução da matéria orgânica presente em lodos de estação de tratamento de águas (LETAs) é requisito primordial para o aproveitamento do material em cadeias produtivas específicas. A despeito de já serem realizados tratamentos térmicos em LETAs antes de suas aplicações, poucas análises mostram seus efeitos sobre o material. Com a finalidade de contribuir com o desenvolvimento científico e tecnológico dos processos de reintrodução dos LETAs na cadeia produtiva, este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar a influência da temperatura e do tempo de aplicação na remoção da matéria orgânica em lodos de estações de tratamento de águas. O estudo experimental propiciou a caracterização físico-química das amostras de LETAs de alumínio e de ferro, a partir de análises de teor de umidade, granulometria, termogravimetria, microscopia eletrônica de varredura e carbono orgânico total. Para avaliar o efeito do tratamento térmico em LETAs foram aplicadas temperaturas de 200 a 500 ºC em tempos de aplicações de 1 e 2 horas. Dentre os principais resultados verificados destaca-se que: independentemente do coagulante utilizado na ETA e do manancial de origem, na composição dos LETAs os elementos ferro, alumínio e sílica são predominantes; os diferentes métodos de avaliação da matéria orgânica resultam em leitura de diferentes percentuais do parâmetro nas amostras de LETAs; O TGA pode ser utilizado como indicador de faixa de tratamento térmico de matéria orgânica em LETAs. A redução de massa obtida com o tratamento de LETAs a 440 ºC é maior do que o carbono orgânico total avaliado nas amostras; O tratamento térmico de LETAs em temperaturas de 300 graus durante 2 horas se mostrou efetivo para a redução da matéria orgânica presente no material.

PALAVRAS-CHAVE: lodos de ETA, tratamento térmico, matéria orgânica, teor de umidade.

INTRODUÇÃO

A geração de lodos é inerente ao processo de potabilização de águas para consumo humano. Esses resíduos, formados pelos sólidos removidos das águas brutas e pelos insumos do processo (Kuldeyev *et al*., 2023), são removidos dos decantadores com elevados teores de umidade (Minatel *et al*., 2024) e, em geral, são lançados inadequadamente *in natura* em cursos d'água (Fiore *et al*., 2020) ou, quando encaminhados para destinações adequadas, são previamente desaguados (Ackah *et al*., 2018).

Dentre os processos de desaguamento de lodos de estações de tratamento de águas (LETAs) está a centrifugação que demanda o acréscimo de polímeros para garantir a eficiência operacional. A secagem complementar dos LETAs centrifugados em processos térmicos (Silva *et al*., 2021), lagoas e pátios de secagem (Fiore, Jesus e Carvalho, 2024) também é utilizada para garantir os teores de umidades determinados pelos aterros receptores, para minimizar os custos de transporte e disposição e também para as aplicações em usos benéficos (Yang *et al*., 2023).

Dentre os usos benéficos de LETAs já reportados como tecnicamente viáveis, destacam-se aplicações químicas como a recuperação de seus elementos (Krishnan *et al*., 2020), o uso do material para o tratamento de poluentes (Almeida *et al*., 2024) ou ainda a substituição de material natural por LETA em diversas aplicações na indústria da construção civil (Fiore *et al*., 2022). No setor da construção civil, o teor de matéria orgânica dos materiais empregados deve ser controlado em algumas aplicações, tais como: obras geotécnicas (Takao *et al*., 2024), argamassas e concretos (Almeida, Jesus e Fiore, 2024).

Os LETAs são compostos majoritariamente por elementos inorgânicos, mas diferentes concentrações de materiais orgânicos também foram reportadas em sua composição (Messa, Jesus e Fiore, 2025). Grande parte dos métodos de determinação de material orgânico presente em resíduos e materiais para a construção civil envolve o aquecimento do material para a promoção da queima do material orgânico. Para solos e agregados finos usualmente empregados na construção civil a temperatura adotada como referência para a queima da matéria orgânica é de 440 graus (ABNT, 2022). No entanto, estudos preliminares de LETAs demonstram que há remoção da matéria orgânica desses resíduos em temperaturas superiores (Nguyen *et al*., 2023).

As pesquisas associadas ao uso benéfico de LETAs em geral adotam o material após tratamento térmico (Messa, Jesus e Fiore, 2025). O uso de fonte de calor para a secagem desses resíduos altera não apenas os teores de umidade desses resíduos, mas a concentração dos elementos de sua constituição e promove o tratamento biológico do material (Silva *et al*., 2025), mas poucos são os estudos que abordam a temperatura e o tempo de aplicação demandados para a remoção da matéria orgânica nos LETAs. Nesse contexto, o presente foi conduzido com a finalidade de contribuir com o desenvolvimento científico e tecnológico dos processos de reintrodução dos LETAs na cadeia produtiva, especialmente daquelas que determinam limites para o teor de matéria orgânica nos materiais empregados, como a construção civil.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Avaliar a influência da temperatura e do tempo de aplicação na remoção da matéria orgânica em lodos de estações de tratamento de águas.

Objetivos Específicos

- Reconhecer as melhores técnicas para caracterização da matéria orgânica presente em LETAs;
- Caracterizar amostras de LETAs de alumínio e ferro;
- Determinar o comportamento do LETA em diferentes tratamentos térmicos.

METODOLOGIA UTILIZADA

O estudo experimental foi desenvolvido para evidenciar a relação de causa efeito entre as variáveis investigadas na pesquisa (Lakatos e Marconi, 2021).

Coleta das Amostras

As amostras de LETAs utilizadas nessa pesquisa provieram de duas Estações de Tratamento de Água (ETAs) localizadas em São Paulo, Brasil. As instalações coletam águas superficiais e processam cerca de 20 metros cúbicos por segundo de água, para atender aos padrões brasileiros de fornecimento de água

potável. As ETAs operam sistemas convencionais de tratamento de águas, compostos pelas operações unitárias de remoção de sólidos grosseiros, coagulação (empregando coagulantes distintos em base de alumínio na ETA 1 e de ferro na ETA 2), floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e ajuste de pH. Os LETAs removidos dos decantadores são desaguados por meio de centrifugação, com o auxílio de polímeros (catiônico na ETA 1 e aniônico na ETA 2).

Foi determinado por especialistas um plano de amostragem dos LETAs, em atendimento às diretrizes da NBR 10007 (ABNT, 2004). O plano foi validado pelos gestores e operadores das ETAs e, para esse estudo, as amostras compostas foram coletadas no período chuvoso, no qual se verificam os maiores valores de turbidez das águas brutas. Para a composição das amostras porções de 5kg de LETAs centrifugados foram diariamente coletadas em cada uma das unidades e acumulados em recipiente estanque ao abrigo das intempéries durante 60 dias. Após acumuladas as amostras diárias foram homogeneizadas mecanicamente e encaminhadas em recipientes de polipropileno para posterior análise.

Caracterização físico-química das amostras

O teor de umidade das amostras de LETA foi determinado em observância aos procedimentos especificados pela NBR 6457 (ABNT, 2016), que orienta a avaliação de umidade em solos. Para a determinação da granulometria fez-se necessária a preparação prévia dos LETAs centrifugados e adaptações do método de análise granulométrica em solos, descrito na NBR 7181 (ABNT, 1984).

As análises termogravimétricas dos LETAs foram feitas no intervalo de temperatura entre 25 °C a 1400 °C, no equipamento TGA/DSC TA *Instruments*, em cadinho aberto de porcelana, sob atmosfera de N2 com fluxo de 100 mL/min e taxa de aquecimento do forno de 10 °C/min.

A caracterização morfológica foi obtida no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo Quanta 250 (FEI) acoplado EDS EDAX, com aumento de 100 vezes. Os lodos utilizados nessas análises passaram por uma etapa de metalização com ouro.

A determinação do carbono orgânico total foi realizada em analisador de Carbono Orgânico Total – TOC (Shimadzu) através de análise físico-química do elemento químico carbono presente na amostra. A análise de TOC considerou as parcelas biodegradáveis e não biodegradáveis da matéria orgânica, não sofrendo interferência de outros átomos que estejam ligados à estrutura orgânica, quantificando apenas o carbono presente na amostra.

Determinação do efeito da temperatura em LETAs

Para a determinação das temperaturas a serem adotadas no planejamento experimental para o tratamento térmico das amostras de LETAs, foram avaliados previamente os resultados das análises termogravimétricas. Para a determinação dos tempos de aplicação considerou-se as normas técnicas vigentes e os trabalhos científicos sobre a temática, em especial Godoy *et al*. (2019). Em vista disso, foram utilizados nessa pesquisa os tempos e temperaturas mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Temperatura e tempos de aplicação avaliados.

Temperatura (^{0} C)	Tempo
In natura (centrifugado)	NA
110	24 horas
200	1 e 2 horas
300	
400	
500	

Para a realização das análises utilizou-se forno do tipo mufla com exaustão de gases, e observou-se os procedimentos estabelecidos por Teixeira *et al*. (2017) para a pesagem prévia e pós secagem das amostras, em balança analítica de precisão.

Análise dos resultados

Os resultados da caracterização inicial dos LETAs, realizados nas amostras secas em temperatura ambiente foram equiparados a demais achados da literatura relacionados a lodos de ferro e alumínio. Para a avaliação dos efeitos da secagem térmica considerou-se os resultados obtidos a partir das diferentes metodologias de

determinação da matéria orgânica avaliados pela pesquisa. Também se considerou que a secagem em estufa por 24 horas em temperatura de 110 ºC é capaz de remover a água livre do material.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

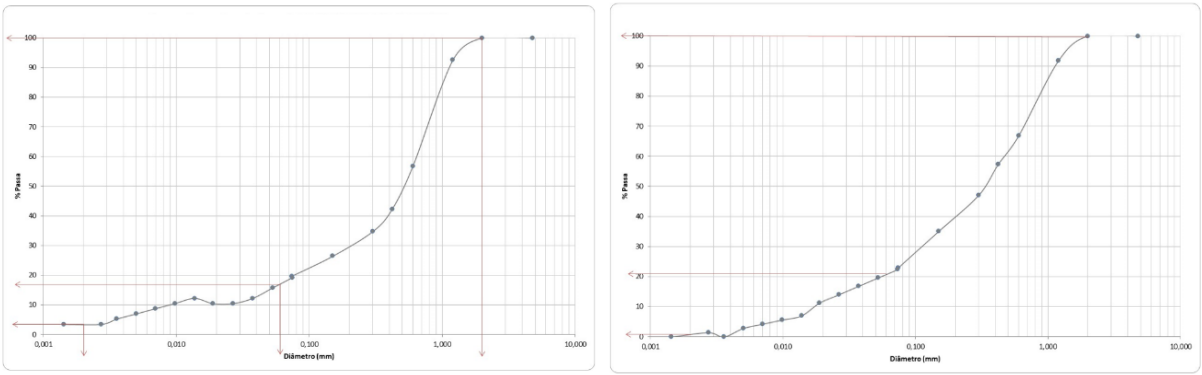
A Tabela 2 apresenta os resultados dos teores de umidade e de matéria orgânica verificados nas amostras de LETAs avaliadas, com o uso de normas associadas a solos.

Tabela 2: Umidade e matéria orgânica dos LETAs.

ETA	Umidade	Matéria Orgânica
	(%)	
1	594,11	6,05
2	314,85	3,82

Os resultados evidenciam que os LETAs de alumínio (ETA-1) possuem maiores teores de umidade e de matéria orgânica do que os LETAs de ferro (ETA-2). Cabe destacar que ambas ETAs centrifugam os LETAs e que o período de amostragem foi o mesmo. Infere-se que pode haver interferência do tipo de coagulante e do polímero utilizado nas unidades nos parâmetros avaliados. Destaca-se que, de acordo com Cardoso *et al*. (2023) a caracterização dos percentuais de material orgânico presentes nos LETAs ainda é tema não consensuado e que diferentes métodos vêm sendo empregados e geram resultados não passíveis de equiparação. Menores percentuais de matéria orgânica em LETAs de ferro também foi reportado por Botero *et al*. (2009).

As curvas granulométricas dos LETAs avaliados estão mostradas na Figura 1.



(a) (b)

Figura 1 - Curva granulométrica das amostras de LETAs, sendo: (a) ETA-1 e (b) ETA-2.

Os resultados evidenciam que os LETAs de alumínio, da ETA 1 possuem 83% de areia, 13% de silte e 4% de argila. Na ETA 2, onde se usa o coagulante a base de ferro, os teores granulométricos verificados são de 79% de areia, 20% de silte e 1% de argila. A semelhança da granulometria verificada nas amostras evidencia que essa análise não se configura como adequada para a descrição dos processos de potabilização existentes nas ETAs e nem para a caracterização da qualidade das águas brutas captadas. Destaca-se que as ETAs 1 e 2 captam águas superficiais, mas a ETA 1 possui reservatório e desarenador. O que não ocorre na ETA 2. Também não se pode afirmar que há influência do tipo do coagulante na granulometria dos LETAs.

A caracterização morfológica obtida por meio do MEV e análises químicas pontuais por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) é apresentada na Figura 2.

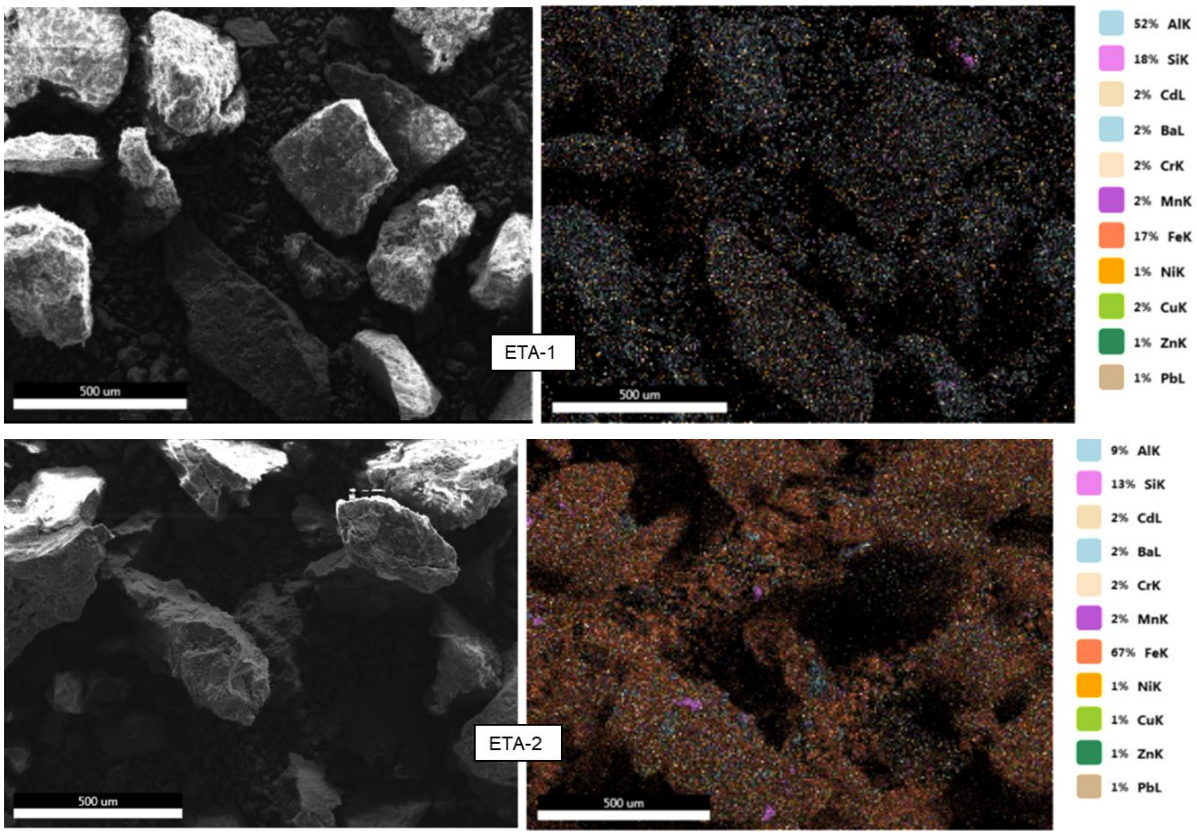


Figura 2. Imagens de MEV/EDS das partículas dos lodos brutos das ETA-1 e ETA-2 com aumento de 100 vezes.

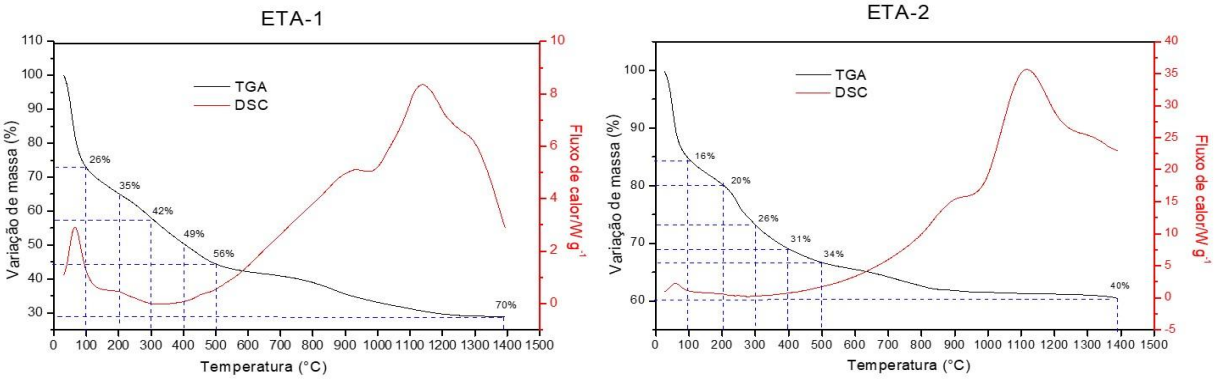
O LETA da ETA-1 apresentou baixa cristalinidade, conforme já observado por (Roque et al., 2021) as análises químicas pontuais por EDS mostraram elevada concentração de Al (52%), Si (18%) e Fe (17%) e a presença de elementos como Ca, Ba, Mn, Cu, Cr todos com cerca de 2%. Já o LETA da ETA-2 morfologicamente apresenta partículas com estruturas irregulares, que são formadas por óxidos de ferro, silício e alumínio. A análise pontual por EDS apresentou maiores concentrações de Fe (67%), Si (13%) e Al (9%) e concentrações menores de Ca, Ba, Cr e Mn, 2% cada elemento.

Esses dados evidenciam que independentemente do manancial e do coagulante utilizado no processo de potabilização das águas, na composição dos LETAs os elementos ferro, alumínio e sílica são predominantes e que nessa pesquisa representam juntos 87% da composição do LETA 1 e 89% da composição do LETA 2. É possível também observar que o tipo de coagulante adotado na ETA é o elemento predominante do LETA gerado na unidade. A constância dos elementos predominantes em LETAs também destacada por Messa, Jesus e Fiore (2025), ao avaliarem trabalhos com o resíduo em todo o mundo, e que foram corroborados com os resultados desse trabalho mostra que o resíduo pode ser empregado em cadeias produtivas que demandam previsibilidade de composição do material.

A presença de metais pesados nas amostras de LETAs avaliadas, tais como bário e cromo evidencia que o material pode inferir riscos e que, a despeito da classificação automática como resíduo não perigoso prevista na nova versão da norma técnica brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2024), estudos de especificação de cromo, toxicidade e citotoxicidade são demandados para esses resíduos. Cabe destacar que outros elementos presentes na composição dos LETAs também podem inferir riscos de toxicidade a organismos vivos e que diferentes pesquisas já evidenciaram os impactos de seu lançamento no ambiente natural (Rodgher *et al*., 2023)

Os resultados de Carbono Orgânico Total (TOC) para as amostras sem tratamento térmico evidenciou percentuais de 17,6 % para ETA-1 e de somente 5% na ETA-2. Esses resultados mostram que as análises de matéria orgânica em solos não servem para representar a totalidade do carbono orgânico total existente no material. Destaca-se que as análises de matéria orgânica em solos possuem custo inferior às análises de TOC e, por isso, em grande parte das pesquisas essa é a análise realizada. Infere-se que o polímero utilizado para a centrifugação seja degradado em temperatura superior a 440ºC.

A Figura 3 mostra as curvas termogravimétricas das amostras de LETA.



(a) (b)

Figura 3 - Curvas termogravimétricas dos LETAs, sendo: (a) ETA-1 e (b) ETA-2.

Os resultados evidenciam que o LETA de alumínio retém maiores teores de umidade do que os de ferro quando secos em temperatura ambiente, já que a perda de água ocorre até 100 graus e representa as águas livres remanescentes nas amostras que foram secas ao ar. Para o LETA de alumínio verificou-se a perda de cerca de 70% da massa total da amostra durante os ensaios, o que não ocorre com o LETA de ferro, já que cerca de 60% da massa permanece constante independentemente da temperatura aplicada. Para ambos LETAs, os maiores percentuais de redução são observados em temperaturas inferiores à 500 graus, em vista disso, o planejamento experimental adotou temperaturas abaixo desse valor para avaliar a redução mássica dos LETAs.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos com o tratamento térmico em diferentes condições.

Tabela 3: Resultantes do Tratamento Térmico dos LETAs.

Temperatura (^{0}C)	Tempo (h)	Massa inicial (g)	ETA - 1	ETA - 2
			Massa final (g)	Massa final (g)
110	24	100	14	27
200	1	100	56	44
	2	100	27	31
300	1	100	14	38
	2	100	9	21
400	1	100	8	24
	2	100	7	22
500	1	100	8	21
	2	100	7	20

Considerados os percentuais de matéria orgânica identificados por meio do TOC e que a secagem do material em estufa a 110 graus, por 24 horas, é capaz de remover a umidade do material, a partir dos dados verificados é possível inferir que:

1. Os tratamentos térmicos de LETAs em temperaturas de até 200 graus, por período de 1 ou 2 horas, é capaz de apenas reduzir a umidade do resíduo e de, portanto, aumentar o teor de sólidos do material. De acordo com Silva *et al*. (2025) esse aumento do teor de sólidos também implica na concentração de elementos químicos, inclusive potenciais contaminantes e na redução dos riscos de patogenicidade desses resíduos.

2. Os LETAs de alumínio e de ferro respondem de forma distinta às temperaturas e tempos de aplicações empregados no tratamento térmico.

3. As reduções de massa verificadas em temperaturas de 400 e 500 graus são maiores do que aquelas esperadas, quando considerados os valores de carbono orgânico total identificados nas amostras. Isso pode estar associado à redução de umidade remanescente nas amostras.

4. Para o LETA de alumínio a aplicação de tratamento térmico à 300 graus, por uma hora, já é capaz de remover a umidade do material. Para o LETA de ferro, o tempo de aplicação deve ser de aproximadamente 1h40 minutos.

5. Para os LETAs de alumínio, as temperaturas de 400 e 500 graus resultam em redução semelhante de matéria orgânica, para os mesmos tempos de aplicação. Em vista disso, é possível considerar que a temperatura de 440 graus, reportada pela norma técnica NBR 13.600 para redução de matéria orgânica em solos (ABNT, 2022), talvez possa ser adotada de forma eficiente para a remoção de matéria orgânica nos LETAs. Cabe destacar que a referida norma estabelece um período maior de aplicação do tratamento para a remoção completa da matéria orgânica nas amostras.

6. Para os LETAs de ferro não foi possível verificar a constância de massa até o limite de temperatura e tempo de aplicação avaliados.

Consideradas as temperaturas e os tempos de aplicações avaliados e as consequentes reduções de matéria orgânica alcançadas e, sobretudo, o consumo energético associado a esse tipo de tratamento, sugere-se a aplicação de 300 graus durante duas horas para as aplicações que requerem a minimização da matéria orgânica presente nos LETAs.

A Figura 4 apresenta as imagens dos LETAs tratados nas diferentes condições avaliadas.

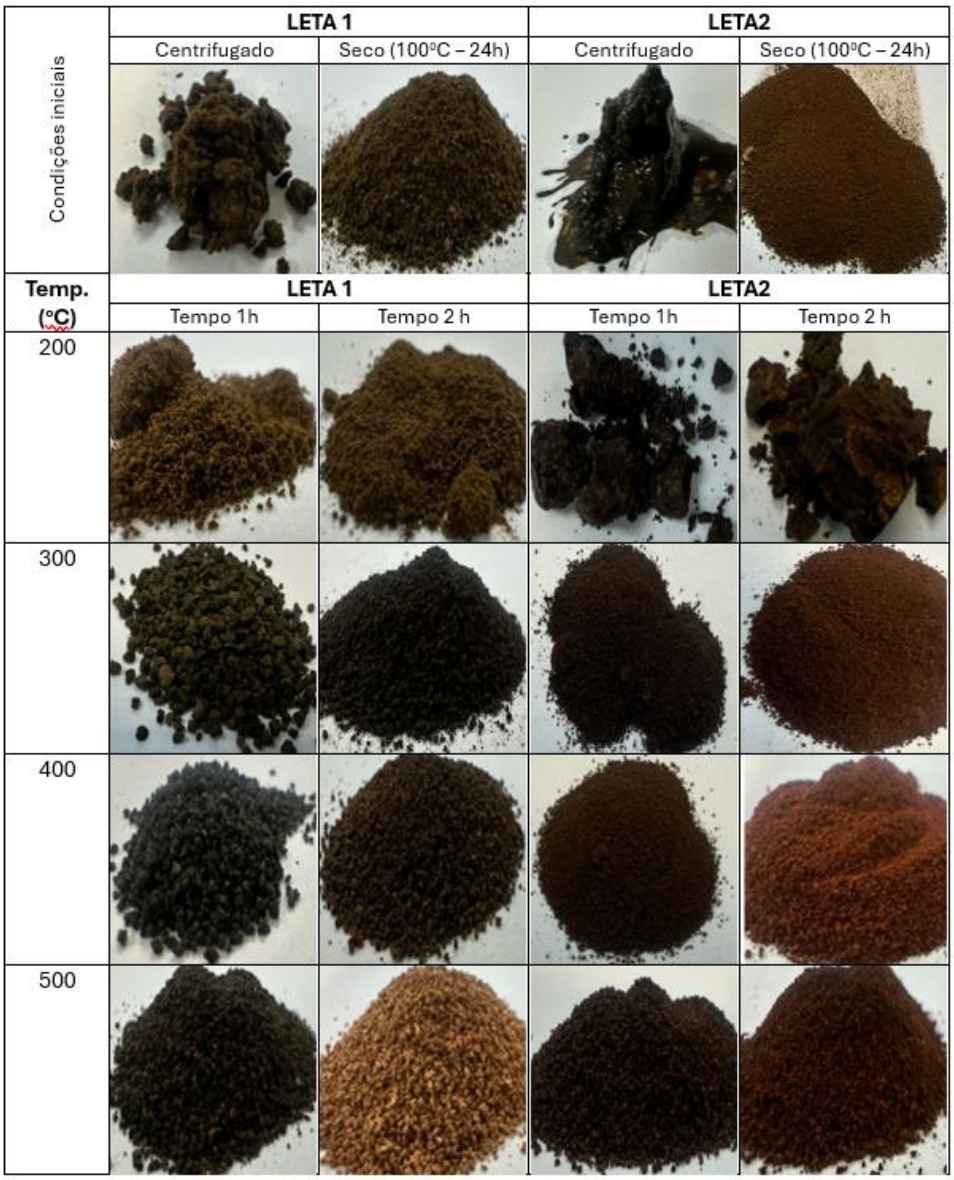


Figura 4 – Imagem de LETAs em diferentes condições.

As imagens evidenciam que o processo de secagem pode alterar as características físicas dos LETAs e, consequentemente, garantir que o material possa ser aplicado para diferentes fins. A determinação da composição química dos LETAs nas diferentes condições de secagem e seus potenciais usos são estudos já em curso pelo grupo de pesquisa desse artigo.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os lodos gerados nas estações de tratamento de água demandam desaguamento e para o alcance de menores teores de umidade, diferentes processos auxiliares vêm sendo empregados, dentre eles o tratamento térmico. Para além da redução da umidade o tratamento térmico de LETAs pode garantir a descarbonização do material e adequá-lo à usos benéficos mais restritivos.

Os resultados dessa pesquisa evidenciam que os LETAs centrifugados de alumínio e de ferro possuem granulometrias semelhantes. Consideradas as diferenças dos mananciais de captação, da qualidade das águas brutas, dos processos operacionais, do tipo de coagulante e do polímero empregados nas duas ETAs estudadas, é mister inferir que análise granulométrica não pode ser usada como indicador para identificar as condições de geração dos LETAs. A despeito das dimensões predominantes se equipararem aos grânulos arenosos, a realização de análises químicas complementares se faz necessária, já que a composição predominante evidenciada pelo EDS mostra que os coagulantes empregados nas ETAs representam mais de 50% da concentração dos elementos nas amostras nos dois lodos.

As análises evidenciaram que os elementos ferro, alumínio e sílica são predominantes na composição dos LETAs avaliados e juntos representam quase 90% da massa desses resíduos. Foram identificados metais pesados como cromo e bário nas amostras de LETAs, evidenciando a necessidade de realização de estudos de toxicidade desses resíduos.

O teor de umidade das amostras centrifugadas evidencia que mesmo quando são empregados equipamentos semelhantes, o desaguamento de águas nos LETAs pode ocorrer com eficiência distinta e isso pode estar associado ao tipo de coagulante empregado e/ou às dosagens e características dos polímeros empregados nessa etapa.

O tratamento térmico de LETAs em temperaturas de 300 graus durante 2 horas se mostrou efetivo para a redução da matéria orgânica presente no material. Destaca-se que o tratamento térmico evidenciou a ocorrência de perda de massa nas amostras de LETAs superior àquelas associadas ao carbono orgânico total existente nesse material.

AGRADECIMENTOS

Esse projeto possui o financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Proc.: 2020/12230-4). Agradecemos ao Instituto de Estudos Avançados do Mar (IEAMAR) da UNESP pela realização das análises de MEV, TGA e TOC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13.600: Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 C. Rio de Janeiro, 2022.

____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

Ackah, L.A. et. al. Characterization of Southern Illinois Water Treatment Residues for Sustainable Applications. Sustainability 2018, 10, 1374. https://doi.org/10.3390/su10051374

Almeida M. B. G. et al. Evaluating centrifuged water treatment plant sludge as an adsorbent for nutrients, microorganisms, and heavy metals removal from wastewater, Journal of Cleaner Production, 468, 2024, 142975, 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142975.

Cardoso et al. Caracterização Geoambiental de LETAs com diferentes processos de Secagem. Anais do 32.o Congresso da ABES, 2023.

Fiore, F. A.; Jesus. A. M. D; Carvalho, M. H. Análise das potenciais alterações nas propriedades químicas dos lodos de estações de tratamento de água em decorrência de diferentes condições de secagem. Anais do XXXIX Congresso da AIDIS, 2024.

Fiore, F. A. et al. Quality of surface water and generation of sludge at water treatment plants. Revista Ambiente & Água, 15(5), e2565. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2565

Fiore F. A. et al. Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study Cleaner Engineering and Technology, 9, 2022, 100512 https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100512.

Godoy L. G. G., et. al. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material, Construction and Building Materials, 223, 2019, 939-950, 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333.

Krishnan S. et al. Statistical optimization of titanium recovery from drinking water treatment residue using response surface methodology, Journal of Environmental Management, V 255, 2020, 109890, ISSN 0301-4797, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109890.

Kuldeyev, E. et al. Experimental Study on the Application of Sludge from Water Treatment Plant as a Reagent for Phosphate Removal from Wastewater. Water 2023, 15, 2691. https://doi.org/10.3390/w15152691.

Lakatos, E. M.; Marconi, M. A. (2021). Fundamentos de Metodologia Científica. 9° Edição. 368p. Editora Atlas.

Messa G. N., Fiore F. A., Jesus A. M. D., Beneficial Use of Sludge from Water Treatment Plants as a Multiple Resource: Potential and Limitations, Resources, Conservation & Recycling Advances, 2025, 200247, 2667-3789, https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200247.

Minatel M. M., Achon C. L., Reis R. F., Ensaios controlados para análise de desaguamento de lodo de ETA em leitos de drenagem: influência do teor de sólidos. Revista DAE, 72, 245, 01-14, 2024. https://doi.org/10.36659/dae.2024.035

Nguyen, M. D. et al. (2023). Phosphorus adsorption and organic release from dried and thermally treated water treatment sludge. Environmental research, 234, 116524. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116524

Rodgher, S. et al. Acute Toxicity of Leachates from Water Treatment Plants Sludge and Combinations with Soils from a Tropical Region. WATER AIR AND SOIL POLLUTION, 234, 78, 2023. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06080-7.

Roque, A., et al., Mineralogical, Chemical and Geotechnical Characterization of Sludge from Taiaçupeba Water Treatment Plant. Geotecnia, 151; 33-52 2021. http://doi.org/10.24849/j.geot.2021.151.03.

Silva, J. R. et al. Effect of thermal drying on the physico-chemical and microbiological characteristics of drinking water treatment sludge. Cleaner Engineering and Technology, Volume 26. 2025. 100947. SSN 2666-7908. https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100947.

Silva, J. R.; Menezes, A. C. B.; Pinto, F. A. F. Análise de eficiência da secagem térmica de lodos de estação de tratamento de águas: estudo de caso realizado na região metropolitana de São Paulo. In: 31 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL, 2021. Anais Curitiba.

Takao, T. W. et al. (2024). Beneficial Use of Water Treatment Sludge with Stabilizers for Application in Road Pavements. Sustainability, v.16, 5333. https://doi.org/10.3390/su16135333.

Teixeira, P. C. et al. Manual de métodos de análise de solo / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 978-85-7035-771-7.

Yang, J. et al. (2023). Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. Construction and Building Materials, 365, 130027. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130027