

Caracterização de Lodo de Tratamento de Esgoto como Matéria-prima Alternativa para Obtenção de Materiais Cerâmicos

Characterization of sewage sludge aiming for its potential use as ceramic material

*Caracterización de lodos de depuradora con miras a su potencial uso como material
cerámico*

Lucas José Nasraui

Engenheiro Químico e Civil, Mestrando em Engenharia Civil, USJT, Brasil.
l.nasraui@hotmail.com

Dayana Corrêa Pereira

Graduanda em Engenharia Civil, USJT, Brasil
dayaluma@gmail.com

Cláudia Terezinha Kniess

Docente do Mestrado Profissional em Engenharia Civil, USJT, Brasil.
claudia.kniess@saojudas.br

Renan Picoło Salvador

Docente do Mestrado Profissional em Engenharia Civil, USJT, Brasil.
renan.salvador@saojudas.br

Ana Paula Branco do Nascimento

Docente do Mestrado Profissional em Engenharia Civil, USJT, Brasil.
ana.branco@saojudas.br

RESUMO

Estima-se que o Brasil produza 15,7 bilhões de litros de esgoto por dia, sendo que apenas 49,1% são tratados, tornando seu descarte um grave problema ambiental e sanitário. A busca de alternativas de reciclagem de um resíduo poluente e abundante, quanto o lodo de esgoto, torna-se essencial para a sustentabilidade do setor de saneamento. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do emprego de lodo de esgoto doméstico, oriundo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), como matéria-prima alternativa para materiais de construção civil. A pesquisa é de natureza exploratória e investigativa, com abordagem quantitativa e qualitativa, analisando as características do lodo de esgoto por meio de ensaios laboratoriais realizados com amostras *in natura* e sinterizadas. A caracterização foi realizada em relação ao pH, teor de umidade, condutividade, teor de sódio, perda ao fogo e análises de Fluorescência de raios X (FRX), Difração de raios X (DRX) e termogravimétrica. O resíduo mostrou propriedades compatíveis com matérias-primas cerâmicas comerciais. A análise de FRX identificou alumina (muito comum em cerâmicas), sílica e hematita como principais componentes do lodo. Análise de DRX identificou presença de caulinita na amostra *in natura* e mullita na amostra sinterizada, argilominerais presentes em cerâmicas. O estudo evidenciou a aplicabilidade do lodo de esgoto na indústria de construção civil, especificamente para a obtenção de materiais cerâmicos. Adicionalmente, a pesquisa tem aderência com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, 9 e 12 da Agenda 2030 da ONU.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de esgoto. Material Cerâmico. Sustentabilidade. Caracterização.

ABSTRACT

*This paper evaluated the potential of using sewage sludge from WWTP as a ceramic material for civil construction, aligning the research with Sustainable Development Goals 6, 9 and 12 of the 2030 Agenda. It is estimated that Brazil produces 15.7 billion liters of sewage per day, of which only 49.1% is treated, making its disposal a serious environmental and sanitary problem. The research is of an exploratory and investigative nature (analyzing the characteristics of the sewage sludge), with a quantitative and qualitative approach, through laboratory tests carried out with *in natura* and sintered samples of the sewage sludge, object of study. The characterization identified considerable affinity of sewage sludge as a possible ceramic material. FRX analysis identified alumina (quite common in ceramics), silica and hematite as the main components of the sludge. XRD analysis identified the presence of kaolinite in the *in natura* sample and mullite in the sintered sample, clay minerals present in ceramics. All these indications form an argumentative basis to ratify the use of sewage sludge as a ceramic material, at least partially. However, the field of study has gaps, opening space for further research related to the topic. Finally, there is a need to seek sustainable processes, meeting the 2030 Agenda, of which Brazil is a signatory country. The study presents compelling evidence for the applicability of sewage sludge in the civil construction industry, specifically in ceramic materials. There is a certain affinity between the mineral, physical and chemical composition of clays and sewage sludge.*

KEYWORDS: Sewage sludge. Ceramic material. Sustainability. Characterisation

RESUMEN

*Se estima que Brasil produce 15,7 mil millones de litros de aguas residuales por día, de los cuales solo el 49,1% es tratado, lo que convierte su eliminación en un grave problema ambiental y sanitario. La búsqueda de alternativas de reciclaje para un abundante residuo contaminante como son los lodos de depuradora se vuelve fundamental para la sostenibilidad del sector saneamiento. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el potencial del uso de lodos de depuradora doméstica provenientes de una Estación de Tratamiento de Aguas Residuales (ETE) como materia prima alternativa para la construcción civil. La investigación es de carácter exploratorio e investigativo, analizando las características de los lodos de depuradora, con un enfoque cuantitativo y cualitativo, a través de ensayos de laboratorio realizados con muestras *in natura* y sinterizadas de lodos de depuradora. La caracterización se realizó en relación al pH, contenido de humedad, conductividad, contenido de sodio, pérdida por ignición y análisis FRX, DRX y termogravimétrico. El residuo mostró propiedades compatibles con materias primas cerámicas comerciales. El análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) identificó alúmina (muy común en la cerámica), sílice y hematita como los componentes principales del lodo. El análisis de difracción de rayos X (XRD) identificó la presencia de caolinita en la muestra *in natura* y mullita en la muestra sinterizada, minerales arcillosos presentes en la cerámica. El estudio mostró la aplicabilidad de los lodos de depuradora en la industria de la construcción civil, concretamente para la obtención*

de materiales cerámicos. Además, la investigación se adhiere a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, 9 y 12 de la Agenda 2030 de la ONU.

PALABRAS CLAVE: Lodos de depuradora. Materia Cerámica. Sostenibilidad. Descripción.

1 INTRODUÇÃO

A reciclagem de resíduos é uma oportunidade de transformação de uma fonte importante de despesas em uma fonte de faturamento ou, pelo menos, de redução das despesas de deposição. A incorporação de resíduos nos processos produtivos reduz custos e abre novas oportunidades de negócios, além de reduzir o volume de extração de matérias-primas, preservando os recursos naturais limitados.

Entre os resíduos de origem conhecida, encontram-se os resíduos gerados no tratamento de esgoto de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). O esgoto, quando não contém resíduos industriais, é basicamente composto por 99,87% de água, 0,04% de sólidos sedimentáveis, 0,02% de sólidos não sedimentáveis e 0,07% de substâncias dissolvidas (NUVOLARI *et al.*, 2011). Para minimizar os impactos causados pelo despejo de águas residuais na natureza foram criadas as Estações de Tratamento de Esgoto que buscam minimizar os impactos na devolução de águas residuais ao meio ambiente.

O método que de modo geral é utilizado pelas estações de tratamento no Brasil é denominado 'método de lodos ativados'. Durante este processamento são geradas grandes quantidades de lodos, que são resíduos que podem caracterizados por conter em sua composição cerca de 30% de matéria mineral e 70% de matéria orgânica, biodegradáveis e inertes, que serão separadas ao longo do processo de tratamento dos esgotos. No decorrer da digestão, o lodo perde cerca de 2/3 de matéria orgânica, apresentando após a digestão 45% de matéria orgânica e 55% de substâncias minerais (MATOS; ISEWAKI, 2017). O lodo de ETE (LE) é um resíduo complexo. As características do esgoto, principalmente a carga orgânica, exigem que as águas residuárias passem por processos biológicos, para correta degradação da matéria orgânica e o seu consequente tratamento.

Com uma população de aproximadamente 213 milhões de habitantes (IBGE, 2021) e considerando que a média diária de geração de esgoto por pessoa é de 150 litros (SAAEARA, 2021) e que apenas 49,1% da população brasileira possui rede de coleta de esgoto (SNIS, 2021), pode-se aferir a hipótese de que o Brasil gera um volume de esgoto coletado de 15,7 bilhões de litros. Entretanto, os dados mais recentes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021) indicam que apenas 51,2% do volume gerado de esgoto é tratado no país. Neste cenário, a gestão dos resíduos provenientes do tratamento de esgoto adquire relevância fundamental no combate à degradação do meio ambiente.

Outro aspecto relevante nesta discussão é que em apenas 2807 municípios no país (50,4% do total) contam com sistema público de esgotamento sanitário. Adicionalmente, em 1937 municípios são utilizadas soluções alternativas, como fossa séptica, lançamento em curso d'água e vala a céu aberto (a fossa séptica é a única destas soluções considerada adequada segundo o Plano Nacional de Saneamento Básico) (SNIS, 2021). Este panorama faz com que a busca por alternativas para destinação do lodo de esgoto (LE) seja investigada com interesse cada vez mais acentuado. A utilização do lodo de ETE em processos de reciclagem, além de evitar a sua deposição em lugares inadequados e a contaminação do solo e da água, possibilitaria a redução do custo de gerenciamento das ETEs, públicas e privadas.

A disposição do lodo de esgoto é um problema comum em muitas comunidades no Brasil. As destinações finais para esse resíduo são comumente os aterros sanitários, aplicações na agricultura, incineração e como materiais alternativos. O gerenciamento do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento é uma atividade de grande complexidade e alto custo, que, se for mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados desses sistemas. A disposição final deste resíduo, dado que são geradas grandes quantidades que, quando não manejado de forma adequada, pode comprometer até 50% do orçamento operacional de um sistema de tratamento e ainda apresentarem elevado potencial de carga poluidora, capaz de gerar sérios problemas socioambientais (VISENTIN *et al.*, 2017).

No Brasil, o novo marco legal do saneamento básico (Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020), tem como uma meta alcançar a universalização dos serviços de saneamento até 2033, garantindo que 99% da população brasileira tenha acesso à água potável e 90% ao tratamento e à coleta de esgoto, reduzindo os despejos in natura em bacias e mares (BRASIL, 2020).

A busca de soluções economicamente viáveis e ambientalmente vantajosas para o tratamento e disposição final de lodos de ETE continua sendo um grande desafio em todos os países, principalmente no Brasil (MOREIRA *et al.*, 2019). Geralmente para destinação final do lodo são utilizados os aterros sanitários, no entanto, alguns estudos vislumbram sua aplicação como insumo agrícola, fertilizante ou na construção civil. Entretanto, existem restrições para o uso de lodo no solo, devido à presença de patógenos, sais solúveis, compostos orgânicos persistentes e metais tóxicos, bem como ao teor de metais já existentes no solo. Assim, é necessária tanto a determinação das suas características e a avaliação do seu valor agrônômico e econômico, bem como conhecer o potencial tóxico para plantas e/ou animais (SILVA, 2001).

Diversos trabalhos descritos na literatura demonstram a viabilidade do reaproveitamento do lodo de tratamento do esgoto de ETE em vários setores, como na obtenção de materiais de construção, como destaque para os materiais cerâmicos: Pires *et al.*, (2012); Rodrigues e Holanda (2013); Lucena *et al.*, (2013); Gasparim (2013); Hirata, *et al.*, (2015), Fontes *et al.*, (2016); Silva, *et al.*, (2017); Areias *et al.*, (2018), Moreira *et al.*, (2019), Diniz e Melo (2019) entre outros.

Os processos de reciclagem e reaproveitamento de resíduos em processos produtivos estão alinhados com as metas dos objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU (ONU, 2023), no caso do lodo de tratamento de esgoto, com o ODS 6 - Água Potável e Saneamento, ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura e ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis.

Para a realização do processo de reciclagem, primária ou secundária, é necessário a caracterização do resíduo em questão para análise das melhores alternativas. Por meio das técnicas de caracterização é possível conhecer as principais propriedades de um material ou matéria-prima, como informações relacionadas ao seu comportamento térmico, estrutura e composição. Este tipo de entendimento torna-se necessário quando se tem o objetivo de desenvolver novos materiais, como por exemplo, com reaproveitamento de resíduos industriais como matéria-prima alternativa. Deste modo, é possível, além de estudar a aplicabilidade de certos materiais, otimizar as operações relacionadas ao processo.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial para a utilização do lodo de esgoto, oriundo de ETE, como matéria-prima alternativa para a elaboração de materiais de construção civil. Para isto, realizou-se a caracterização físico-química de amostra de LE da ETE

de Várzea Paulista. A estação fica localizada no município de mesmo nome, no Estado de São Paulo, operada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP).

2 METODOLOGIA

A seguir são descritos o procedimento de coleta do lodo de esgoto e os ensaios realizados para a sua caracterização.

2.1 Origem e Coleta do Lodo de Esgoto

O lodo de esgoto utilizado neste trabalho foi cedido pela SABESP, sendo especificamente coletado na Estação de Tratamento de Esgoto Várzea Paulista, ilustrada com seus principais pontos na Figura 1. Ao final da linha de tratamento da estação há um secador solar, similar a uma estufa com ventilação e exaustão, permitindo a secagem do lodo tratado. Foram coletados aproximadamente 100 kg de lodo de esgoto desidratado, que estava pronto para ser encaminhado para a sua destinação final segundo os critérios de operação da ETE. A Figura 2 ilustra o local com a destinação do LE no secador.

Figura 1 - ETE Várzea Paulista: algumas das suas principais unidades.



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Figura 2 - Aspecto do secador solar existente na ETE Várzea Paulista, local de coleta das amostras de lodo de esgoto.



Fonte: SABESP (2022).

2.2 Ensaios de Caracterização do Lodo de Esgoto

O resíduo foi caracterizado em relação a seguintes propriedades: teor de umidade, perda ao fogo (calcinação), pH, condutividade elétrica, teor de sódio, fluorescência de raios x (FRX), difração de raios x (DRX) e análise termogravimétrica (TGA/DTG). Os ensaios de DRX e TGA foram realizados com amostra de lodo seco em estufa e com amostra de lodo sinterizado em mufla. O FRX foi realizado com amostra calcinada.

Os ensaios de teor de umidade, perda ao fogo, pH, condutividade elétrica e teor de sódio foram realizados nos laboratórios do campus Mooca da Universidade São Judas Tadeu (USJT/SP). Já as análises de DRX e TGA foram realizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo. A análise de FRX foi realizada pelo Laboratório de Caracterização Técnica (LCT) da Universidade de São Paulo (USP).

2.2.1 Teor de Umidade

Inicialmente, o lodo de esgoto foi homogeneizado mecanicamente e quarteado até se obter amostras de aproximadamente 2,5 kg. Na sequência, o lodo foi moído em almofariz de porcelana, manualmente, e o material foi passado em peneira ABNT 40 (0,425 mm de abertura). Deste modo minimiza-se a chance de água livre ficar retida em grãos maiores da amostra, o que possibilitaria resultados imprecisos. Após a moagem, foram pesadas três amostras de aproximadamente 15,0 g cada e dispostas em vidros-relógio (também com suas massas anotadas previamente). As amostras foram então dispostas em uma estufa, com temperatura regulada em 105°C e deixadas para secar por aproximadamente 1 h. Pela diferença de valor entre a massa das amostras antes e depois de adentrarem a estufa, foi possível obter o valor do teor de umidade. O ensaio teve como base a NBR 6457 (ABNT, 2016).

2.2.2 Perda ao Fogo (calcinação)

O ensaio baseou-se na Norma 120 da CEMP (ABIFA, 2015), que trata da metodologia para determinação de perda ao fogo de materiais fundentes. Foram utilizadas amostras de

aproximadamente 1,0 g cada, pesadas em balança analítica. As amostras utilizadas estavam secas em estufa, através do mesmo procedimento realizado no ensaio de teor de umidade. A análise de perda ao fogo também foi feita em triplicata, assim como no ensaio de umidade. O ciclo térmico foi realizado com o uso de uma mufla para aquecer as amostras por 1 h à uma temperatura de 1000°C.

2.2.3 Medição de pH

A análise de fase líquida (sobrenadante) foi feita em amostra de lodo de esgoto diluída e filtrada (filtro de papel). Foram diluídos 10,0 g de LE em 190,0 g de água deionizada. Após este procedimento realizou-se agitação magnética da amostra por aproximadamente 10 minutos com posterior repouso da solução. Finalmente, um pHmetro foi utilizado para se medir o pH, introduzindo-se seu eletrodo no béquer que continha a solução de LE repousada.

2.2.4 Condutividade Elétrica

A avaliação da condutividade elétrica foi realizada em uma solução diluída de LE em água deionizada. A metodologia empregada foi a mesma para se avaliar o pH. A diferença aqui está apenas no equipamento utilizado para se medir o parâmetro. Fez-se uso de um condutivímetro e seu eletrodo foi mergulhado na solução contendo o LE.

2.2.5 Teor de Sódio (Na⁺)

Para se estimar o teor de sódio também foi necessário elaborar uma fase líquida diluída, adaptando o processo para análise de solos presente no Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes (EMBRAPA, 1999). Entretanto, diferentemente da análise de pH e de condutividade, nas quais se empregou água para diluir o LE, o teor de sódio foi avaliado diluindo-se o resíduo em ácido nítrico (HNO₃) concentrado. A amostra de 1,0g do lodo foi diluída em 10 mL de ácido.

2.2.6 Fluorescência de Raios X (FRX)

A análise química foi realizada para amostra de lodo de esgoto sinterizado (1000°C por 1 h em mufla, com resfriamento natural dentro do forno até atingir temperatura ambiente) com dosagem em amostra prensada, em espectrômetro de Fluorescência de raios X da marca *Malvern Pananalytical*, modelo *Zetium*. Os valores foram normalizados para 100%. De modo complementar, realizou-se uma análise de perda ao fogo (PF), com aquecimento a 1020°C por 2 h.

2.2.7 Difração de Raios X (DRX)

Para a análise DRX foram utilizadas amostras secas e amostras calcinadas do lodo de esgoto coletado. Para a amostra seca, o lodo ficou em estufa a 105°C por aproximadamente 24 h, até atingir massa constante. Já para a amostra calcinada, o lodo de esgoto após passar pela

secagem foi para forno tipo mufla, no qual permaneceu por 1 h ao atingir temperatura de 1000°C e teve resfriamento lento, natural, dentro da própria mufla até atingir temperatura ambiente.

Utilizou-se um difratômetro de pó da fabricante *Malvern Pananalytical*, modelo *X'Pert PRO MPD Alpha1*. A geometria de parafocagem de Bragg-Brentano, com ângulo de incidência $\theta/2\theta$, é equipada com detector de aceleração que possui comprimento ativo de 2,122° e valor de fenda de divergência fixa de 0, 5°. O difratômetro opera com radiação alfa de CuK (comprimento de onda de 1,5418 Å) com filtros de níquel a 45 kV e 40 mA. Foram utilizados cadinhos de formato cilíndrico, com 16 mm de diâmetro e profundidade de 2,5 mm que, após carregados, rotacionam a uma velocidade de 2 revoluções por segundo. Os padrões de difração foram gravados entre 5°2 θ até 70°2 θ utilizando-se um passo de 0,017°2 θ e 100 s por passo.

2.1.8 Análise Termogravimétrica (TGA/DTG)

O equipamento empregado na TGA foi a balança térmica *Netzsch Libra 209 F1*. A análise foi efetuada entre 25°C e 1000°C a uma taxa de aquecimento constante de 10 °C/min, em atmosfera de gás nitrogênio com fluxo de 60 mL/min. Para a amostra, testou-se 50 mg de LE em cadinhos abertos de alumina, de 90 μ L.

3 RESULTADOS

Na sequência são apresentados os resultados da caracterização da amostra lodo de tratamento de esgoto utilizada neste estudo.

3.1 Processo de Tratamento do Lodo de Esgoto

A ETE de Várzea Paulista funciona por sistema sequencial, contendo: Unidade de Gradeamento Grosso, Estação Elevatória de Esgoto Bruto, Tratamento Preliminar com Calha *Parshall*, Desarenadores (retangulares mecanizados), Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente (UASB), Reatores Aeróbios de Lodos Ativos (aeração intermitente, permitindo a criação de zonas com baixa oxigenação, tornando o sistema mais econômico e possibilitando a remoção de nutrientes na ETE). Existem ainda a Casa de Sopradores, Estações Elevatórias de Recirculação de Lodo, Unidade de Adensamento e Desidratação Mecanizada de Lodo e Tanque de Contato para desinfecção final do efluente tratado. Todo este processo, aliado ao secador solar, gera um LE que possui menor quantidade de matéria-orgânica e menor teor de umidade.

3.1 Teor de Umidade

A amostra de lodo de esgoto apresentou um teor de umidade de (6,2% \pm 0,1%). É interessante notar a eficiência do secador solar empregado na ETE Várzea Paulista, visto que tipicamente o lodo pode apresentar valores acima de 99% de água em sua composição.

3.2 Perda ao Fogo (calcinação)

Após a análise em triplicata, as amostras de lodo apresentaram um percentual de perda do fogo médio de $54,2\% \pm 5,4\%$.

3.3 Medição de pH

O lodo de esgoto apresentou um pH de 8,23, denotando um caráter alcalino. Este resultado era esperado, uma vez que o lodo de esgoto possui uma natureza alcalina, independente do processo de tratamento. Nascimento (2016) realizou trabalho de caracterização de lodo de esgoto, coletando amostras em 19 ETEs de São Paulo em três épocas distintas, e o valor médio do pH foi de 8,42.

O pH pode ser considerado um bom indicador do estado de decomposição da matéria orgânica. Em caso de acidez do lodo é preciso a correção do pH para favorecimento da decomposição dos compostos orgânicos (CORREIA, 2009).

3.4 Condutividade Elétrica

A solução de lodo de esgoto apresentou uma condutividade elétrica de 2,03 mS/cm, indicando uma característica semicondutora.

3.5 Teor de Sódio (Na^+)

O teor de sódio da solução contendo o lodo de esgoto foi de 0,1 N., ou seja, significa que na amostra existe 0,1 equivalente-grama de Na^+ por litro de solução.

3.6 Fluorescência de Raios X (FRX)

A análise por FRX permitiu observar que mais de 50% da composição da amostra de LE em estudo é composta por alumina, isolante térmico e elétrico, (Al_2O_3 - 22,5%) e sílica (SiO_2 - 35,3%), que são materiais cerâmicos e com razoável caráter iônico. Adicionalmente, o lodo apresentou um teor de hematita (Fe_2O_3) de 13,4%. Esta composição é compatível com várias matérias-primas cerâmicas. Vale ressaltar que a alumina faz parte da composição de alguns argilominerais comuns em argilas, como a caulinita e a muscovita. A perda ao fogo (PF) resultou em 8,82%, valor menor daquele ensaiado anteriormente visto que a amostra já estava calcinada. O Quadro 1 apresenta o resultado da análise.

A matéria orgânica do lodo de esgoto é composta por proteína, lignina e lipídeos, independentemente do tipo de tratamento adotado (HATTORI; MUKAI, 1986). Já no que se refere aos constituintes inorgânicos presentes no resíduo, é frequente encontrar estudos de caracterização que indicam a sílica, alumina e a hematita como componentes principais, o que vai de encontro ao resultado obtido. Sígolo e Pinheiro (2010) caracterizaram diversas amostras de lodo de esgoto oriundo da ETE Barueri (São Paulo) coletadas durante período chuvoso, que apresentaram estes compostos na seguinte proporção: SiO_2 - 17,7%, Al_2O_3 - 9,0% e Fe_2O_3 - 6,2%.

Quadro 1- Análise por fluorescência de raios x realizada na amostra de lodo de esgoto calcinado (limite de quantificação de 0,01%).

Componente	%	Componente	%
SiO ₂	35,30	K ₂ O	1,41
Al ₂ O ₃	22,50	TiO ₂	1,06
Fe ₂ O ₃	13,40	MgO	0,61
PF	8,82	Na ₂ O	0,32
P ₂ O ₅	5,77	ZnO	0,26
SO ₃	5,52	Cr ₂ O ₃	0,20
CaO	4,30	Constituintes Minoritários (< 0,20%)	0,53

Fonte: elaborado pelos autores, 2023.

3.7 Difração de Raios X (DRX)

As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, os difratogramas das amostras de LE seco e LE calcinado, processados pelo *software HighScore*, com a identificação dos 15 picos mais intensos nomeados. Para o lodo de esgoto seco, a análise qualitativa dos picos indicou a presença das fases cristalinas sílica, gipsita, nacrita, caulinita e muscovita na amostra. Já no lodo calcinado, o difratograma permitiu identificar a presença de quartzo- α (também conhecido em inglês como *low quartz* (estável até 573°C), hematita e mulita.

A presença de mulita na amostra de lodo calcinado é esperada, pois esta fase advém da transformação da caulinita (que se mostrou presente no lodo seco) em temperaturas próximas a 1000°C. A transformação detalhada da caulinita em mulita é complexa e ocorre em uma série de reações, entretanto, inicia-se com a perda de água e formação de um composto amorfo. Na sequência, ela pode se formar por transformação polimórfica de mulita cúbica (até 1250°C) e pela nucleação da mulita presente em aluminossilicato amorfo e crescimento acima de 1250°C (CHAKRAVORTY; GHOSH, 1991). No Quadro 2 são apresentadas informações acerca de cada fase cristalina presente nas amostras.

Figura 3 - Difratograma da amostra de lodo de esgoto seco, com identificação dos 15 picos mais intensos.

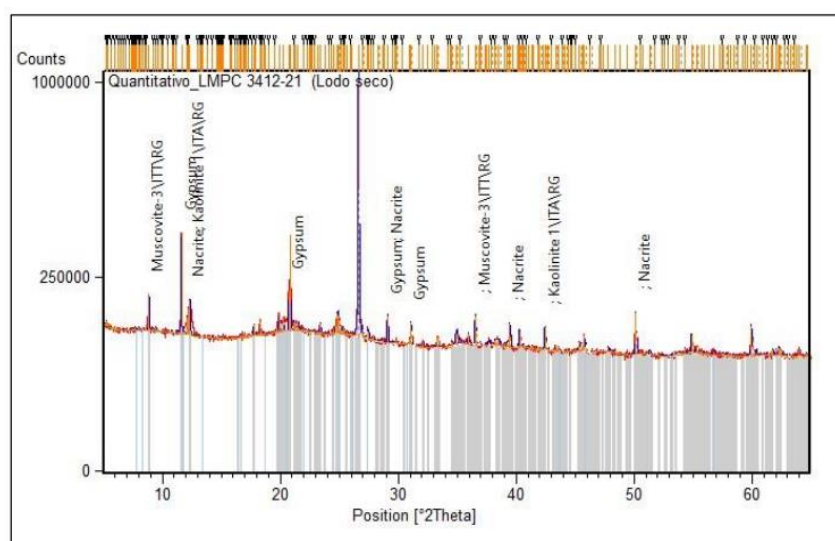
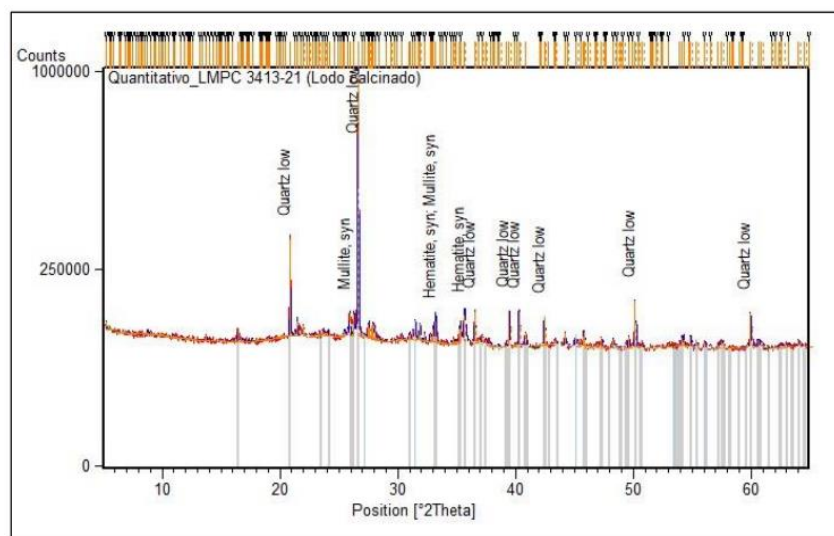


Figura 4 - Difratoograma da amostra de lodo de esgoto calcinado, com identificação dos 15 picos mais intensos.



Quadro 2- Informações sobre as fases cristalinas presentes nas amostras de lodo de esgoto seco e calcinado.

Amostra	Fase Cristalina	Fórmula Química	ICSD*
Lodo de Esgoto Seco	silica	SiO ₂	039830
	gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O	2057
	nacrita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	80033
	caulinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	63315
	muscovita	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	26818
Lodo de Esgoto Calcinado	quartzo-α	SiO ₂	100341
	hematita	Fe ₂ O ₃	082137
	mulita	3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ (possui variação estequiométrica)	066448

*Inorganic Crystal Structure Database
 Fonte: elaborado pelos autores, 2023.

4.8 Análise Termogravimétrica (TGA/DTG)

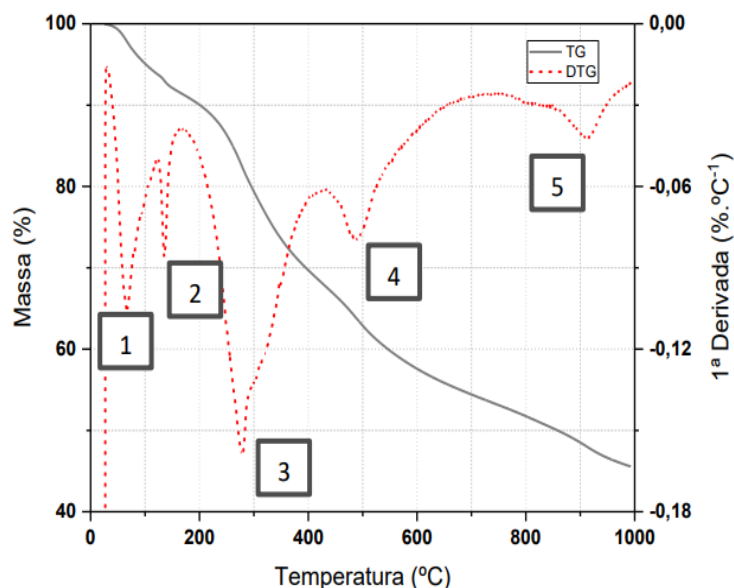
A Figura 5 apresenta a curva da análise termogravimétrica e de sua primeira derivada (DTG) para amostra de lodo seco, após tratamento dos dados brutos no *software Origin*. Com as curvas, é possível levantar as hipóteses acerca dos eventos que ocorrem no LE durante sua decomposição térmica. O primeiro evento térmico notado (Evento 1) ocorre aos 67,0°C e há perda de aproximadamente 2,2% de massa, provavelmente se referindo à perda de água livre ainda existente na amostra, mesmo após secagem prévia em estufa. O Evento 2 ocorre aos 135,8°C a variação de massa neste caso é de 4,8%. Areias *et al.* (2017) argumentam que na faixa de 120°C até 150°C o lodo de esgoto perde água fisicamente adsorvida. Por outro lado, pode se inferir também que nesta faixa ocorre a desidratação da gipsita, composto identificado no ensaio de DRX em amostra de lodo seco.

Na sequência, o Evento 3 apresentou pico de 277,7°C, com perda de 10,5% de massa. Neste caso é possível que haja continuidade da desidratação da gipsita além de outros processos, como a decomposição de componentes orgânicos e voláteis. O Evento 4 apresentou pico aos 490,6°C, com perda de massa expressiva: 18,9%. Nesta faixa de temperatura ainda ocorre a decomposição de matéria orgânica, por exemplo pela desnaturação de proteínas e

lipídeos, componentes majoritários da carga orgânica do lodo. Entretanto, também é importante comentar que nesta faixa de temperatura também ocorre a desidroxilação da caulinita, também identificada na DRX, formando metacaulinita (SANTOS, 1989).

Finalmente, o último Evento (5), com pico em 913,8°C e perda de 15,7% de massa pode estar associado à continuidade dos processos citados anteriormente e à descarbonatação de compostos (a gipsita, por exemplo, apresenta o íon carbonato em sua composição). A perda de massa total da amostra de lodo seco foi de aproximadamente 45%.

Figura 5 - Curvas de TGA/DTG para amostra de lodo de esgoto seco em estufa.

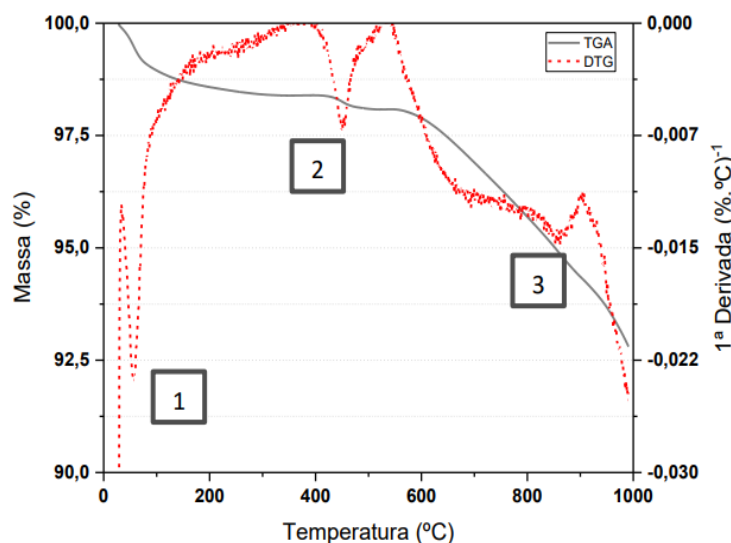


Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Já a Figura 6 apresenta as curvas TGA e DTG para amostra de lodo de esgoto calcinado. A curva inicia-se com uma perda de massa, Evento 1, que apresenta pico em 55,3°C e que representa a perda de água livre ainda presente, e possui uma variação de massa mínima, 0,5%. Isto se relaciona ao fato de que a amostra havia sido calcinada previamente. Já o Evento 2, em 450,2°C e com perda de 1,2% pode ser relacionado ao conjunto de perdas menores relacionadas tanto à desidroxilação dos argilominerais presentes na amostra quanto à decomposição de resquícios de matéria orgânica.

O Evento 3, despontando em 857,0°C e com perda de 3,4%, a mais significativa nesta curva, pode estar associado à descarbonatação e desidroxilação dos minerais, além de perda de carga orgânica. Para a amostra de lodo calcinado, a perda de massa total foi de aproximadamente 7,4%, vale ressaltar que este valor está próximo ao da Perda ao Fogo fornecido pela análise de FRX.

Figura 6 - Curvas TGA/DTG para amostra de lodo de esgoto calcinado em mufla.



Fonte: elaborado pelos autores, 2023.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram o potencial de utilização do lodo de esgoto, oriundo da ETE de Várzea Paulista, como matéria-prima alternativa para fabricação de materiais de construção civil, em específico materiais cerâmicos. Esta conclusão teve como base (a) a semelhança na composição química do LE em termos de óxidos, especialmente em relação aos percentuais de alumina e sílica, como matérias-primas cerâmicas comerciais; (b) a presença de caulinita na amostra *in natura* e de mulita em amostra sinterizada, além de outros argilominerais na composição mineralógica do lodo, indica afinidade com argilas; (c) a indústria de cerâmica possui características inerentes ao seu processo produtivo (calcinação e homogeneização da massa cerâmica) que permitem o emprego de resíduos para a fabricação dos materiais.

O teor de umidade do LE (6,2%) é um parâmetro importante para avaliar o quanto de água deve ser adicionado junto às argilas, para a etapa de umidificação do processamento cerâmico, quando se empregar o LE apenas seco. O pH do LE apresentou um valor levemente alcalino (8,42) devido às próprias características do lodo, que independente do processo de tratamento, apresenta natureza alcalina. O valor de pH de argilas é um importante parâmetro para caracterizar a plasticidade do material. Valores de pH entre 4 e 6 para argilas geralmente indica presença de hematita e alumina, minerais que influenciam muito na plasticidade do material (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Já a perda ao fogo do LE, aproximadamente 54,2%, também é um parâmetro importante para análise. Durante a etapa de sinterização do material cerâmico, a carga orgânica volatiliza, gerando poros. Estes, por sua vez, ocasionam trincas e o surgimento de bolhas na superfície do material cerâmico acabado, causando defeitos nas peças. É importante avaliar a viabilidade técnica e econômica de se trabalhar com o LE sinterizado previamente, de modo a minimizar o percentual matéria-orgânica presente. Isto tudo pode ocasionar blocos cerâmicos

com baixa densidade, e que geram material com baixa resistência mecânica (ALMEIDA *et al.*, 2015).

A análise química por Fluorescência de Raios X no LE apresentou teores de 35,3% de sílica, 22,5% de alumina e 13,4% de óxido de ferro. A caracterização de argilas nacionais mostra o material como majoritariamente composto por alumina, sílica e óxido de ferro. Outros óxidos menores, como de titânio e de potássio também aparecem em análises de FRX. (MONTEIRO *et al.*, 2017).

Por sua vez, a caulinita é o mineral mais comum nas argilas empregadas para produção de cerâmica, com característica refratária e de baixa plasticidade, utilizada em conjunto com outros minerais, como illita e esmectita (DUTRA, 2007). Análise mineralógica por difração de raios X do LE mostrou que os minerais com picos mais intensos presentes na amostra foram caulinita, sílica, hematita e gipsita.

Finalmente, é importante apresentar alguns trabalhos que obtiveram êxito ao se empregar LE como matéria-prima cerâmica. Areias *et al.* (2017) empregou LE de ETE em cerâmica vermelha e concluiu que é possível incorporar até 2,5% em massa de lodo para formular as massas cerâmicas vermelhas. Além disso, o lodo utilizado pelos autores também apresentou caracterização química e mineralógica semelhante ao empregado neste trabalho.

Duarte (2008) fez uso de lodo de esgoto como alternativa na massa cerâmica para fabricar tijolos maciços e chegou à conclusão de que a dosagem máxima de lodo para se empregar é de 20%. Pires *et al.* (2012) empregou LE de ETE para fabricar tijolos cerâmicos, e concluiu de forma positiva quanto à viabilidade do uso do resíduo em materiais cerâmicos, proporcionando uma alternativa ambientalmente correta e promissora.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se realizar estudos adicionais que permitam caracterizar os materiais cerâmicos obtidos com adição de lodo de esgoto como matéria-prima, por meio de propriedades como absorção d'água, porosidade aparente, módulo de resistência à flexão, densidade e retração linear. A utilização de planejamento experimental, por meio de delineamento de misturas, por exemplo (arranjo Simplex), para formulações cerâmicas contendo LE podem colaborar para a otimização das propriedades dos materiais.

6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ALMEIDA, P. H. S.; FRANCO, J. D. M.; TAVARES, C. R. G. Influência do tipo de argila no processo de solidificação/estabilização de lodo têxtil. *Cerâmica*, [s. l.], v. 61, n. 357, p. 137–144, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/ce/a/MwRk7xp9xPWHM5sVL9SZgnx/?lang=pt>. Acesso em: 29 out. 2022.

AREIAS, I. O. R.; VIEIRA, C. M. F.; MANHÃES, R. S. T.; INTORNE, A. C. Incorporation of sludge of the sewage treatment station (STS) into red ceramic. *Cerâmica*, v. 63, p. 343-349, 2017.

ABIFA. **CEMP (Comissão de Estudos de Matérias-Primas)**: Materiais para Fundição – Determinação da Perda ao Fogo. São Paulo, n. 120, ABIFA, 2015;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**. Amostras de Solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico. [S. l.], 15 jul. 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 07 ago. 2022.

CHAKRAVORTY, A. K.; GHOSH, D. K. Kaolinite mullite reaction series: the development and significance of a binary aluminosilicate phase. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 74, p. 1401–1406, 1991.

CORREIA, J. E. **Caracterização físico-química e microbiológica do lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgoto Contorno**. Feira de Santana, BA. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2009.

DINIZ, M. A. O. M.; MELO, D. C. P. Potencial aproveitamento de lodo de ETE na construção civil em Recife/PE. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s. l.], 12 out. 2019.

DUTRA, R. P. S. **Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural**. 2007. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

EMBRAPA. **Manual de análises química de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, EMBRAPA, 1999.

HATTORI, H.; MUKAI, S. Decomposition of sewage sludges in soil as affected by their organic matter composition. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.32, n.3, p.421-432, 1986. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00380768.1986.10557522>>. Acesso em: 25 jun. 2022.

HIRATA, D., KNISS, C. T., CORTESE, T. T. P., & QUONIAM, L. O uso de informações patentárias para a valorização de resíduos industriais: o caso do lodo de tratamento de esgoto doméstico. **Revista de Ciências da Administração**, v.1, n. 55. 2015.

HOPPEN, C., *et al.* Estudo de dosagem para incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto, como forma de disposição final. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental**, 2005, Mato Grosso do Sul. p. 7, 2005.

IBGE. **População do Brasil**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/box_popclock.php>. Acesso em: 04 jun. 2021.

LUCENA, L. C. L.; MARINHO FILHO, P. G. T.; PORTELA, M. G. Monitoramento de parâmetros físicos e ambientais de camadas de solo estabilizadas com lodo de ETA e de ETE. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.10, n.3, p.873-890, 2017.

MATOS, A. C. M.; ISEWAKI, N. T. Alternativa de aplicação de lodo de estação de tratamento de esgoto em cobertura de aterros sanitários. In: **Congresso Mineiro de Engenharias e Arquitetura**. Anais. Belo Horizonte, CEMEA, 2017.

Monteiro, F. M.; Costa, F. A.; Machado, T. G.; Assis, R. B. Caracterização de argila caulínica da região metropolitana de Natal-RN –parte 1. **72º Congresso Anual da ABM**. Anais. 2017.

MOREIRA, S. F.; SANTOS, S. D. O.; SARDINHA, A. S.; JÚNIOR, A. P. ETE sludge as an alternative to soil recovery in degraded areas. **Brazilian Applied Science Review**, v.3, n.3, p.1564-1585, 2019.

NASCIMENTO, A. L. **Caracterização microbiológica, química e presença de poluentes orgânicos em amostras de lodo de esgoto de São Paulo**. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2016.

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

ONU. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals/no-poverty?gclid=Cj0KCQjwXyOiBhC9ARIsANiEIfYYaXiqMMH0vLRYzrfo6pd62b4ylwDEoqL1JxbEqJ1OPEZABpmnwOgaAg eNEALw_wcB>. Acesso em: 15 abr. 2023.

PIRES, G. T.; GERALDO, R. H.; ZECHINATTI, V. H.; GONÇALVES, R. R. V.; GOMES, M. A. F.; VALENTE, A. M. M. P. Adição de lodo de esgoto da ETE do município de Jaguariúna em tijolos cerâmicos: estudo de viabilidade. **Revista Intellectus**, n. 22, 2012.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Influence of the incorporation of water treatment plant (WTP) sludge on the technological properties of soil-cement bricks. **Cerâmica [online]**. v.59, n. 352, pp.551-556, 2013.

SAAEARA. **Esgoto – Curiosidades**. Disponível em: <<https://www.saaeara.com.br/informacao/esgoto---curiosidades/>>. Acesso em: 04 jun. 2021.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2ª ed. São Paulo: Ed. Blucher, v. 1, 408 p., 1989.

SÍGOLO, J. B.; PINHEIRO, C. H. R. Lodo de esgoto da ETE Barueri-SP: proveniência do enxofre elementar e correlações com metais pesados associados. *Geologia USP. Série Científica*, v. 10, p. 39-51, 2010.

SILVA, J. M.; VIER, L. C.; ROSSI, C. T.; SANTOS, R. R.; RODRIGUES, M. F. Alternativas de destinação e reuso ambientalmente corretos e economicamente viáveis para o lodo das ETEs no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Gestão e Desenvolvimento em Contexto**, v.5, n.1, p.66-69, 2017.

SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2019/Diagn%C3%B3stico_SNIS_AE_2019_Republicacao_31032021.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2021.

RIBEIRO, A. P. **Avaliação do uso dos resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos**. Tese (Doutorado em Engenharia). 2010. 142 p. Universidade de São Paulo. São Paulo.

VISENTIN, R., et al. Compostagem de lodo de esgoto em Botucatu: avaliação preliminar de custos. **Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**. Porto Alegre, 2017.