

Caracterização do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Palmeira dos Índios - Alagoas para potencial aplicação em massas cerâmicas

Characterization of sludge from the Water Treatment Plant (WTP) of the city of Palmeira dos Índios - Alagoas for potential application in ceramic masses

Samantha Ferreira Mendonça de Oliveira¹, Taísa Menezes Tenório², Sheyla Karolina Justino Marques¹

¹Instituto Federal de Alagoas. Palmeira dos Índios, AL, Brasil.

²Faculdade UNIRB - Arapiraca. Arapiraca, AL, Brasil.

e-mail: sfm1@aluno.ifal.edu.br, tenorio.taisa@gmail.com, sheyla.marques@ifal.edu.br

RESUMO

O lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) quando disposto inadequadamente pode ocasionar desequilíbrio ambiental e problemas de saúde pública, devido à lixiviação de metais pesados para os corpos hídricos. Dito isso, este trabalho objetivou caracterizar de maneira física, química, térmica e mineralógica o lodo da ETA da cidade de Palmeira dos Índios-AL. A metodologia empregada foi de caráter experimental através da realização dos ensaios de granulometria, limites de Atterberg, fluorescência de Raios X, difração de Raios X e análise termogravimétrica. Após o ensaio de granulometria o lodo apresentou característica de areia fina. Na análise química identificou-se presença do Ca (7,81%) e Mg (2,51%), que podem interagir com elementos formadores de fase vítrea Si (55,65%) e Al (12,03%) durante a sinterização. Ademais, os percentuais mais significativos de silício e alumínio apresentaram-se na forma de quartzo e caulinita, corroborando com os resultados de fluorescência de Raios X. Na análise térmica houve perda de massa em torno de 42% até a temperatura de 400°C, sinalizando a possibilidade de tratar termicamente o subproduto, antes de sua incorporação em cerâmicas. Por fim, o lodo apresenta potencial de aplicação em matrizes cerâmicas, dado a presença de elementos com características fundentes.

Palavras-chave: Subproduto; Caracterização físico-química; Elementos Fundentes; Economia Circular.

ABSTRACT

The sludge from Water Treatment Plants (WTP) when disposed of improperly can cause environmental imbalance and public health problems due to leaching of heavy metals into water bodies. Therefore, this work aimed to characterize the physical, chemical, thermal and mineralogical characteristics of the sludge from the WTP of the city of Palmeira dos Índios-AL. The methodology used was experimental, through the performance of granulometry tests, Atterberg limits, X-ray fluorescence, X-ray diffraction and thermogravimetric analysis. After the granulometry test, the sludge presented characteristics of fine sand. The chemical analysis identified the presence of Ca (7.81%) and Mg (2.51%), which may interact with glass phase forming elements Si (55.65%) and Al (12.03%) during sintering. Furthermore, the most significant percentages of silicon and aluminum were in the form of quartz and kaolinite, corroborating the X-ray fluorescence results. In the thermal analysis there was a loss of mass around 42% until the temperature of 400°C, indicating the possibility of thermally treating the by-product before its incorporation into ceramics. Finally, the sludge presents potential for application in ceramic matrices, given the presence of elements with melting characteristics.

Keywords: By-products; Physical-chemical characterization; Melting Elements; Circular Economy.

1. INTRODUÇÃO

A água constitui-se como item indispensável para a sobrevivência de todo e qualquer ser vivo, além de fazer parte de diversas etapas dos processos industriais [1]. A Organização das Nações Unidas prevê o aumento no

consumo de água para todos os setores da sociedade, dentre eles o setor doméstico, acréscimo que ocorrerá principalmente nos países emergentes, como é o caso do Brasil.

Diante da elevada demanda de produção de água, exigir-se-á das empresas responsáveis pelo tratamento e distribuição, melhoramento em seus sistemas com intuito de garantir à sociedade acesso à água tratada e de qualidade, que atenda aos padrões de potabilidade solicitados pela portaria n.º 2.914 [2]. Concomitantemente com o ganho de produção, haverá aumento no montante de subproduto gerado pelas Estações de Tratamento de Água (ETA), que, na maioria das vezes, são responsáveis pelo lançamento indevido de lodo nos corpos hídricos, sem o devido tratamento e autorização dos órgãos competentes, causando efeitos nocivos ao meio ambiente [3–5].

Neste trabalho, convém esclarecer que o termo subproduto é compreendido como os insumos derivados da ineficiência das operações e processos dos sistemas industriais, considerando o ciclo de vida do produto-serviço, que se encontram em estado de perdas e podem entrar em estado de fluxo de materiais e se reintegrar ao sistema produtivo de origem ou a novo sistema industrial [6].

Segundo OLIVEIRA e RONDON [7], às concessionárias que realizam o tratamento de água devem ser encaradas como indústrias, já que há formação de subproduto durante o processo de obtenção da água potável. O lodo advindo desta atividade industrial caracteriza-se como aglomerado de materiais que são removidos da água durante o tratamento, cujas propriedades estão relacionadas com o tipo e dosagem do coagulante utilizado, bem como, com a qualidade da água bruta.

MOTTA *et al.* [8], evidenciaram que a disponibilização do lodo sem prévio tratamento impacta diretamente no solo e, conseqüentemente, na atividade agrícola, devido à elevada toxicidade causada pelo alumínio. No ambiente aquático o lançamento do lodo aumenta os níveis de íons de alumínio, que segundo BONDY [9], compromete a saúde do ser humano, contribuindo para o início e avanço do Alzheimer.

A NBR 10.004 [10], que trata da classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente, classificou o lodo como classe II-A, não inerte, que tem como característica a combustibilidade, solubilidade em água ou biodegradabilidade, sendo que essa última característica não se aplica ao lodo de ETA. Por se tratar de subproduto, sua destinação final precisa ser adequada, seguindo procedimentos que visem reaproveitamento em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, buscando reduzir o volume de sólidos gerados e mitigar os impactos ambientais, como mencionado na Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 [11].

Diante desse contexto, surgem as indústrias cerâmicas que apresentam capacidade de incorporar subprodutos provenientes de outras atividades industriais no seu ciclo produtivo. O setor de cerâmica vermelha tem como principal matéria-prima a argila, material versátil e de ampla aplicabilidade, cujas jazidas são exploradas, na maioria das vezes, indevidamente, prejudicando o meio ambiente. Em razão disso, estudos acerca das argilas combinadas com outros materiais tornam-se imprescindíveis para a valorização e melhoramento do produto final [12].

Logo, a incorporação de subprodutos na argila pode promover diminuição da exploração de novas jazidas, além de pleno aproveitamento dos materiais utilizados para produção dos corpos cerâmicos. Além disso, nos últimos tempos, em virtude de leis mais rígidas, exigir-se-á a disponibilização adequada dos materiais sólidos produzidos pelas próprias empresas. Isso acarretará necessidade de destinação com baixo ou nenhum fator de impacto para o meio ambiente, maior circularidade dos passivos e parcerias com indústrias que possam inserir esses subprodutos nos seus ciclos de produção [13, 14].

Na literatura encontram-se estudos que indicam a viabilidade de incorporação de subprodutos para a fabricação de diversos artefatos cerâmicos. OLIVEIRA *et al.* [15] mostraram viabilidade na produção de blocos de vedação com inserção de telha (chamote), resultados semelhantes foram expostos por SILVA JÚNIOR, POMPEU NETO e OLIVEIRA [16] na fabricação de telhas cerâmicas com inserção de pedras ornamentais (granito), tratada termicamente.

Os resultados apontados como favoráveis pelos autores possuem como justificativa a ação dos elementos fundentes em ambos os subprodutos, que acabam por atuarem na formação da fase líquida e, conseqüentemente, no ganho de resistência mecânica, absorção de água e tempo de sinterização. A incorporação do subproduto em outro ciclo produtivo representa ganho econômico e ambiental, uma vez que, é dada finalidade ao material que seria descartado no meio ambiente de forma errônea [15].

Com isso, o objetivo deste trabalho foi caracterizar o lodo da Estação de Tratamento de Água da cidade de Palmeira dos Índios, Alagoas de forma físico-química, térmica e mineralógica visando analisar o potencial de aplicação em massas cerâmicas para fins de destinação intrinsecamente sustentáveis. O artigo foi dividido em cinco seções: Introdução, Referencial Teórico, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão e Conclusão, com intuito de reunir as etapas realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

A primeira seção apresenta contextualização da problemática da geração do lodo de ETA. A segunda seção traz todo o aporte teórico acerca do processo de tratamento de água, estudos com o lodo de ETA e informações da indústria cerâmica. A terceira seção engloba a metodologia utilizada na obtenção da matéria-prima,

ensaios e métodos de caracterização. A quarta seção discute os resultados obtidos pelas técnicas de caracterização, relacionando com a literatura existente; e, na quinta seção, apresenta-se a conclusão acerca dos resultados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Estação de Tratamento de Água

A água distribuída segundo a Portaria 2.914 [2] deve ser apropriada para o consumo humano e isenta de patógenos. Para adequar-se aos parâmetros, a água bruta passa por uma sequência de processos físicos e químicos, ou até mesmo a combinação dos dois, com o intuito de torná-la apta para o abastecimento doméstico. As etapas de tratamento da ETA convencional de ciclo completo englobam os processos de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação [17], que podem ser evidenciados na Figura 1.

O processo de coagulação consiste na adição de produto químico na água bruta, de modo a desestabilizar as partículas suspensas (coloides) e transformá-las em flocos maiores para que possam sedimentar. Segundo KAMIWADA, ANDRADE e REIS [18] “para que o tratamento resulte em um bom desempenho é fundamental que a coagulação seja eficiente”. A etapa de floculação, por sua vez, possui a função de agregar o maior número de partículas primárias desestabilizadas e precipitadas em flocos, para que sejam separadas por sedimentação ou flotação [19].

Na fase da decantação o tratamento se dá pela separação das partículas sólidas, por meio da ação da gravidade. Durante este processo é possível remover areias e flocos químicos provenientes da etapa de coagulação/floculação. Vale destacar, que a velocidade de sedimentação sofre influência da forma, massa e tamanho das partículas suspensas, como também, das propriedades físicas da água [20].

Quanto a filtração, segundo SECKLER [21], constitui-se em processo físico-químico que remove partículas coloidais presentes na água através de meio granular e que, por ventura, não foram removidas nas etapas anteriores de sedimentação e decantação, já que por mais eficientes que sejam estes processos não haverá remoção de 100% destas partículas. Além da remoção das partículas suspensas também há a remoção de microorganismos [22].

As estações de tratamento de água enfrentam grande problemática, referente ao uso de grandes volumes de água para a lavagem dos filtros, na maioria das vezes, este processo é executado utilizando-se métodos empíricos que comprometem o bom funcionamento dos filtros, reduzindo a taxa de filtração e permitindo o acúmulo de lodo nos vazios do meio filtrante [23].

Segundo LUSTOSA *et al.* [24] a água utilizada durante a lavagem dos filtros constitui-se também por fração sólida (lodo), que quando lançada diretamente no meio ambiente, prejudica os corpos receptores ocasionando possível contaminação. Durante o processo de limpeza dos filtros são produzidos a maior quantidade de lodo em termos volumétricos, já nas ETA de dupla filtração o passivo é obtido tanto pela lavagem dos filtros, quanto pela descarga de fundo. Vale destacar, que o lançamento deste efluente deve ocorrer somente após caracterização, que terá influência do tipo de tratamento dado à água bruta.

Quanto à etapa de desinfecção, essa exerce papel fundamental na redução de doenças por veiculação hídrica. Nesta etapa, ocorre a eliminação de microorganismos patogênicos através do uso de desinfetantes, geralmente, à base de cloro, apresentando como vantagens baixo custo e elevada eficiência contra diversos agentes causadores de doenças [25, 26]. Já a fluoretação, de acordo com FRAZÃO e NARVAI [27], configura-se em tecnologia que visa garantir o controle dos teores de fluoretos, com o intuito de promover o efeito de proteção à cárie dentária, tornando-se grande aliado da saúde pública.



Figura 1: Etapas de tratamento de ETA convencional.

2.2. Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA)

A qualidade da água bruta captada nos mananciais, influencia diretamente no montante de lodo produzido pela ETA, já que se os níveis de impurezas forem elevados haverá maior produção do subproduto e consequentemente, consumo extra de produtos químicos para atingir os padrões de qualidade [28].

Outro fator que influencia na produção de lodo ocorre pela escolha do produto químico utilizado pelas estações de tratamento de água nas etapas de coagulação e floculação, que se configura imprescindível para obtenção de sólidos com concentrações menores de metais. Os coagulantes à base de sais de alumínio e ferro são comumente utilizados pelas ETA, visto a eficiência na formação dos flocos e velocidade de sedimentação. Como exemplo de coagulante químico pode-se citar o policloreto de alumínio (PAC) que promove redução na turbidez da água (94,8%), baixo consumo de alcalinidade do meio (5,5%), não excedendo esse valor, e diminuição dos sólidos gerados (79,5%) [29].

No dimensionamento da capacidade de produção de lodo da ETA Funil em Cachoeira do Campo, distrito do município de Ouro Preto-MG, os autores FRANCO *et al.* [30] através de equações empíricas e dados de entrada fornecidos pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto (SEMAE) quantificaram a geração de sólidos totais e voláteis. Comparando-se os resultados de duas equações, uma com coagulante e outra sem, foi possível observar, que o uso do produto químico proporciona a formação do dobro de subproduto volátil, do que aquele sem a utilização do coagulante. Isso mostra a influência dos produtos químicos na formação do precipitado, juntamente com a turbidez da água bruta, tempo de permanência do lodo nos tanques, forma de limpeza desses locais e eficiência da sedimentação [24].

2.3. Indústria cerâmica

Historicamente o uso da cerâmica no Brasil antecede à chegada dos colonizadores portugueses. Estudos indicam que na ilha de Marajó foram encontrados os primeiros indícios de sua presença, naquele local viveram os indígenas Marajoaras (400 a 1300 d.C), que desenvolveram técnicas especializadas no uso da cerâmica e que se tornaram parte da identidade brasileira até os dias atuais [31, 32].

A principal matéria-prima utilizada pelas indústrias ceramistas são as argilas e trata-se de materiais de características heterogêneas, compostas de argilominerais de silicatos e óxidos de alumínio, de granulometria fina e comportamento plástico. Possuem ampla aplicabilidade por estas indústrias, visto as suas propriedades quando submetidas a altas temperaturas [33].

De acordo com PALMA e PASKOCIMAS [34], os artefatos cerâmicos são fabricados a partir da argila, por meio dos processos de moldagem, secagem e queima. A diversidade dos processos que englobam a produção na indústria cerâmica, contribuem para a fabricação de materiais cerâmicos com características tecnológicas variadas, que englobam louças cerâmicas, tijolos, telhas e refratários. O termo cerâmica diz respeito ao material inorgânico não metálico, que quando submetido a elevadas temperaturas melhora suas propriedades de estabilidade química, resistência ao calor e corrosão [13].

O ciclo de produção da indústria cerâmica pode ser observado na Figura 2 e contempla as etapas de: extração da argila, na qual impacta negativamente o meio ambiente, por meio da supressão vegetal e erosão do solo, transporte e estocagem da matéria-prima para eliminação da umidade e mistura com a argila magra, produção dos corpos cerâmicos e, por fim, expedição do produto para o consumidor final.

Segundo dados do Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos de 2020 [35] a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) estimou produção de aproximadamente 63,6 bilhões de peças/ano, quantidade esta que incorrerá na necessidade de 140 Mt de argila, já que em média utiliza-se 2 kg/peça. Os indicadores estatísticos relativos ao mercado da indústria cerâmica no Brasil são prejudicados, devido à variedade de pequenas unidades responsáveis pela fabricação destes produtos. Em decorrência deste fato, há dificuldade de acompanhamento e monitoramento do desempenho do setor no mercado [35]. Em razão

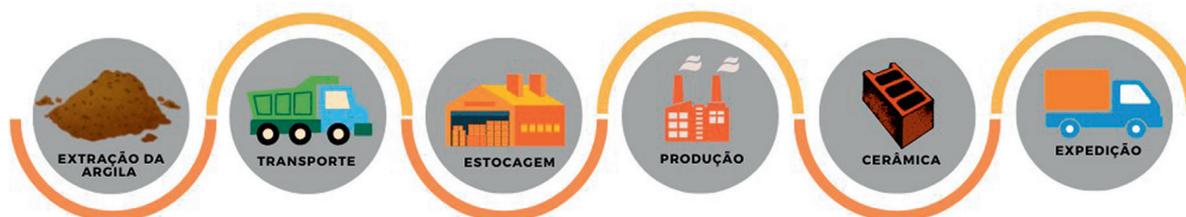


Figura 2: Ciclo de produção da indústria cerâmica.

dessas características, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de analisar a viabilidade de substituição parcial de subprodutos na fabricação de materiais cerâmicos.

SILVA JÚNIOR, POMPEU NETO e OLIVEIRA [16], estudaram a viabilidade de incorporação de pedras ornamentais (granito) tratadas termicamente para fabricação de telhas cerâmicas, com intuito de produzir material de qualidade que atenda aos parâmetros das normas regulamentadoras. ALMEIDA *et al.* [36] avaliaram o potencial de incorporação de subproduto de gesso para fabricação de adoquim cerâmico ou intertravado como popularmente é conhecido no Brasil. Em ambos os estudos foram avaliados as características do subproduto e da argila, através dos ensaios físico-químico, mineralógico e microestrutural.

Como resultados, infere-se dos trabalhos dos autores a presença de elementos fundentes nos subprodutos e argilas submetidas às técnicas de Raios X. Logo, percentuais em torno 60% de silício, 20% de alumínio, 1,5% magnésio e 2,0% de potássio conferiram aos materiais características físicas e mecânicas favoráveis para a produção de massas cerâmicas, com redução do tempo e temperatura de sinterização [16, 36].

2.4. Estudos utilizando subprodutos provenientes do processo de tratamento da água

A geração de lodo nas Estações de Tratamento de Água necessita de destinação ambientalmente correta para conseguir boa operacionalização do sistema de tratamento. Na literatura é possível identificar estudos que envolvem o aproveitamento do lodo pelo setor da construção civil, buscando propor destinação intrinsecamente sustentável ao subproduto, diminuindo sua disponibilidade no meio ambiente.

Para isso, faz-se necessário estudo detalhado acerca da microestrutura do subproduto, a fim de melhor compreensão das suas especificidades. A utilização do lodo em substituição parcial ou total por agregados, cimentos e argilas passou a ser analisada e discutida por diversos autores como forma de caracterizar e ampliar o conhecimento a respeito deste passivo ambiental.

PETTERLE *et al.* [37] analisaram a microestrutura da argila caulim, cinza da casca do arroz e lodo de ETA para produção de placas cerâmicas, com objetivo de conhecer as características intrínsecas desses materiais. Atendo-se ao estudo realizado com lodo, foi detectada a presença de óxidos fundentes formadores de fase vítrea, permitindo maior estabilidade superficial e dimensional ao material cerâmico. A detecção das fases cristalinas como a caulinita, sílica na forma de quartzo e óxidos como o magnésio e cálcio conferiram propriedades termomecânicas ao composto cerâmico, despertando interesse das indústrias [37].

Os percentuais de óxidos de silício (36,31%) e alumínio (32,31%) encontrados por PETTERLE, *et al.* [37] na Fluorescência de Raios X conferiram ao lodo características de outras adições minerais que apresentam os mesmos constituintes em sua composição sendo, portanto, subproduto com potencial de substituição de parte da barbotina cerâmica [37].

SANTOS, MELO FILHO e MANZATO [38] realizaram estudo para caracterizar o lodo proveniente da Estação de Tratamento de Água da cidade de Manaus, encarregada por tratar água bruta proveniente de dois mananciais Rio Negro e Solimões, designados “lodo do Rio 1” e “lodo do Rio 2”, respectivamente, de modo a propor alternativas de destinação do subproduto para emprego na construção civil.

O passivo ambiental após coletado passou por processo de beneficiamento através da secagem em estufa, moagem, peneiramento e calcinação, buscando melhorar suas características. O ensaio de Fluorescência de Raios X realizado no lodo calcinado, tanto no Rio 1, quanto no Rio 2, apontou que o somatório de óxidos SiO_2 e Al_2O_3 corresponde mais de 80% da composição, indicando a possibilidade de atividade pozzolânica. Além disso, no lodo do Rio Negro foi também identificado elevado percentual de óxido de ferro, no entanto, no ensaio de Difração de Raios X este não foi identificado em fase cristalina, indicando que este encontra-se, possivelmente, em sua fase amorfa [38].

No decorrer das análises os autores detectaram por meio dos resultados que os subprodutos possuem forte influência dos locais de coleta dos cursos d'água, quantidade de sólidos suspensos, variações sazonais de turbidez, presença de matéria orgânica decomposta e coagulantes utilizados durante o processo de tratamento de água [38].

Como forma de gerenciamento do lodo de ETA, a alternativa apontada por SANTOS, MELO FILHO e MANZATO [38] foi de direcionamento do subproduto para materiais cerâmicos, visto a similaridade entre os seus constituintes, bem como em substituição parcial ao cimento Portland em pastas, argamassas e concretos; aditivo mineral ou pozolana artificial; precursor ou agregado geopolimérico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi de caráter experimental, com natureza tecnológica e abordagem quali-quantitativa, sendo executada, predominantemente, *in vitro*. Após a coleta, a matéria-prima foi submetida aos ensaios de Análise Granulométrica (AG), Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP), Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX) e Análise Térmica (AT).

3.1. Coleta do subproduto

O lodo utilizado foi proveniente da ETA do Município de Palmeira dos Índios-AL, inserida na bacia hidrográfica do Rio Coruripe, localizada na parte central do Estado de Alagoas. A modernização da ETA que recebe água bruta da Barragem Carangueja, localizada na Zona Rural de Quebrangulo, permitiu aumento na quantidade de água tratada para 540 m³/h e, conseqüentemente, maior geração de lodo de ETA, com produção diária em torno de 223,3 kg.

O sistema é composto por 3 filtros descendentes convencionais, decantadores modulares, oito células de floculação e quatro leitos de secagem com rotatividade a cada quinze dias. O processo de tratamento ocorre inicialmente na câmara de carga na qual é colocado o produto químico Policloreto de Alumínio (PAC) e, segue para os tanques floculadores, responsáveis por unir as partículas de sólidos suspensos. A etapa seguinte é composta por tanques que possuem a função de decantar os flóculos formados na fase de coagulação e floculação. As partículas de dimensões pequenas que não conseguem se aglomerar e, conseqüentemente, decantar são retidas em filtros de areia, cascalho e carvão. A água resultante deste processo de filtração é misturada com cloro, que por gravidade é armazenada em reservatório para posteriormente ser distribuída na cidade.

A água utilizada para funcionamento da ETA (lavagem de filtro, descarga do decantador, água de sistema de vácuo para adição de produtos químicos) fica armazenada em tanques equalizadores. Quando atingida a capacidade máxima, a água é direcionada para três adensadores que possuem a função de armazenamento temporário, recuperando água limpa e recalando a parte mais densa (lodo mais água) para leitos de secagem.

O ciclo de geração do lodo pode ser observado na Figura 3 e contempla as etapas de: captação da água bruta, adução do corpo hídrico para estação de tratamento, decantação dos sólidos suspensos em forma de flóculos, filtração, descarga da água proveniente do sistema em tanques equalizadores e recalque do lodo para leitos de secagem.

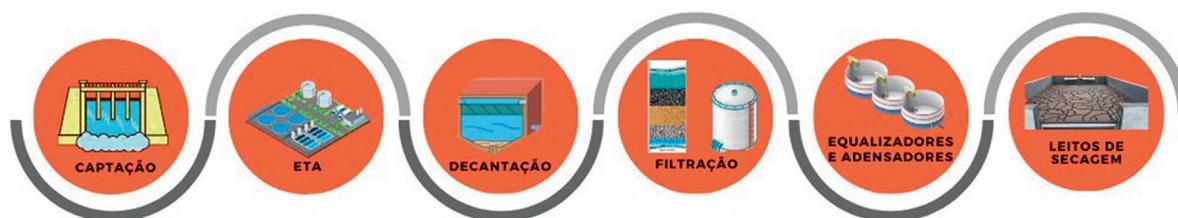


Figura 3: Ciclo de geração do lodo da ETA da Cidade de Palmeira dos Índios – AL.

3.2. Análise granulométrica

O subproduto foi submetido ao ensaio de granulometria conforme as recomendações da NBR 7181 [39], de modo a observar as dimensões e formas dos particulados. Através do processo de peneiramento o peso em porcentagem do material em relação a sua massa total pôde ser determinado, de modo a classificar as amostras em faixas específicas de solo, dividindo-as com base em suas dimensões em areia: grossa (0,6–2 mm), média (0,2–0,6 mm) e fina (0,06–0,2 mm); silte (0,002–0,06 mm) e argila (<0,002 mm) NBR 6502 [40].

A análise granulométrica, segundo DONAGEMMA *et al.* [41], possui como objetivo quantificar as diferentes partículas presentes no solo, de modo a obter distribuição por tamanho dos grãos. Logo, considera-se o ensaio importante atributo físico para materiais de naturezas distintas, pois a depender da forma como grãos estão arranjados, a combinação entre eles ajuda nas características finais do compósito. Todo procedimento experimental para obtenção da granulometria do lodo de ETA foi realizado no laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas campus Palmeira dos Índios.

3.3. Limite de liquidez e Limite de plasticidade

A compreensão acerca do comportamento dos solos na presença de água permitiu conhecer os diferentes limites de consistência, que o cientista sueco Albert Atterberg dividiu em fronteiras bem definidas de umidade. O limite de Liquidez marca a transição do estado líquido para plástico, tendo como ensaio para determinação deste ponto o procedimento descrito pela NBR 6459 [42]. Quando a água presente no solo evapora, a plasticidade do material reduz, tornando-o friável e com pouca ou nenhuma capacidade de ser moldado, visto a passagem do estado plástico para semi-sólido. A esta transição denomina-se limite de Plasticidade e o ensaio é prescrito pela NBR 7180 [43].

O solo apresenta comportamentos de suma importância para atividades da construção civil e agricultura. A compreensão acerca da menor ou maior capacidade de suporte das camadas do subsolo, níveis de compactação, coesão e aderência são fatores relacionados aos diferentes graus de umidade do solo. Por isso, a importância da identificação dos limites de consistência na determinação desses e outros parâmetros geotécnicos. Os ensaios preconizados pelas normas regulamentadoras da ABNT, para determinação dos limites de Liquidez e Plasticidade do lodo de ETA foram realizados no laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas Campus Palmeira dos Índios.

3.4. Fluorescência de Raios X (FRX)

A partir da técnica não destrutiva de Fluorescência de Raios X (FRX) a identificação da composição química dos materiais foi determinada, de modo a obter análise qualitativa dos óxidos presentes na amostra, assim como estabelecer a proporção (análise quantitativa) de cada elemento [44].

A espectrometria de fluorescência de Raios X (FRX) possui como princípio de funcionamento a radiação de feixes nos átomos da substância que se deseja instabilizar e deixar os elétrons carregados energeticamente. A busca pela estabilização e por conseguinte, a retomada dos elementos ao seu estado fundamental dar-se por meio da emissão da energia absorvida que caracteriza os diferentes elementos químicos da amostragem [44, 45]. O ensaio mostra-se importante na identificação de componentes nocivos ao meio ambiente, bem como na influência destes elementos em tratamentos térmicos que alguns materiais são submetidos.

A execução do ensaio deu-se no Laboratório de análise das propriedades físicas dos materiais cerâmicos (Lapfime) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), no qual o espectrômetro por fluorescência de Raios X (EDX-700, Shimadzu) em atmosfera a vácuo, foi utilizado, empregando o método semiquantitativo para determinação dos elementos presentes nas amostras de lodo de ETA.

3.5. Difração de Raios X (DRX)

Através da análise por difração de Raios X os minerais presentes nas amostras foram identificados e caracterizados cristalograficamente. O fenômeno acontece pela incidência de feixes de Raios X em cristal no qual interage com os átomos da amostra, de modo a produzir padrão de difração específico para cada sólido [46, 47].

Dentre as várias técnicas de caracterização de materiais, a técnica de difração de Raios X é a mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes em materiais cerâmicos. Isto é possível porque na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos Raios X [46]. Trata-se, portanto, de importante técnica de caracterização, que corrobora com os resultados de fluorescência de Raios X, por meio da detecção de elementos químicos como a sílica na forma de quartzo (fase cristalina).

As amostras de lodo de ETA foram analisadas em difratômetro de Raios X (XRD-6000, Shimadzu), localizado no Laboratório de análise das propriedades físicas dos materiais cerâmicos (Lapfime) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), utilizando-se as seguintes condições: radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, ângulo de varredura (2θ) de 10° a 80° .

3.6. Análises Térmicas (TG)

De acordo o Instituto de Química da USP, a Análise Termogravimétrica ou TGA (*Thermogravimetric analysis*) pode ser dita como a técnica “que acompanha perda e/ou ganho de massa da amostra em função do tempo ou temperatura” [48]. Portanto, a massa de agregação ou perda do material constitui a propriedade física medida a partir da TGA, que encontra aplicação em materiais de construção, cerâmicas, solos, argilas, materiais orgânicos e polímeros [48].

Dentre os eventos térmicos analisados pelo fenômeno da TGA, juntamente com a Termogravimetria Derivada (DTG) destaca-se a mudança de fase, decomposição, desidratação, oxidação e reações químicas acompanhadas de efeitos endotérmicos e exotérmicos [48]. A análise térmica do lodo teve como objetivo detectar a temperatura na qual ocorre estabilização da perda de massa, de modo a servir como parâmetro para a determinação da temperatura de sinterização dos materiais cerâmicos incorporados com o subproduto. O ensaio foi realizado no Laboratório de análise das propriedades físicas dos materiais cerâmicos (Lapfime) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) usando o Shimadzu DTG-60, na qual a amostra foi submetida à temperatura máxima de 1000°C , fluxo de gás de 50 mL/min , taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera de gás Argônio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do lodo de ETA, por meio de tabelas, gráficos e imagens, juntamente com as discussões e análises correspondentes.

4.1. Análise granulométrica

A curva granulométrica do lodo de ETA pode ser identificada na Figura 4. Baseando-se na NBR 7211 [49] foi possível reconhecer as dimensões dos grãos e classificá-los como areia fina.

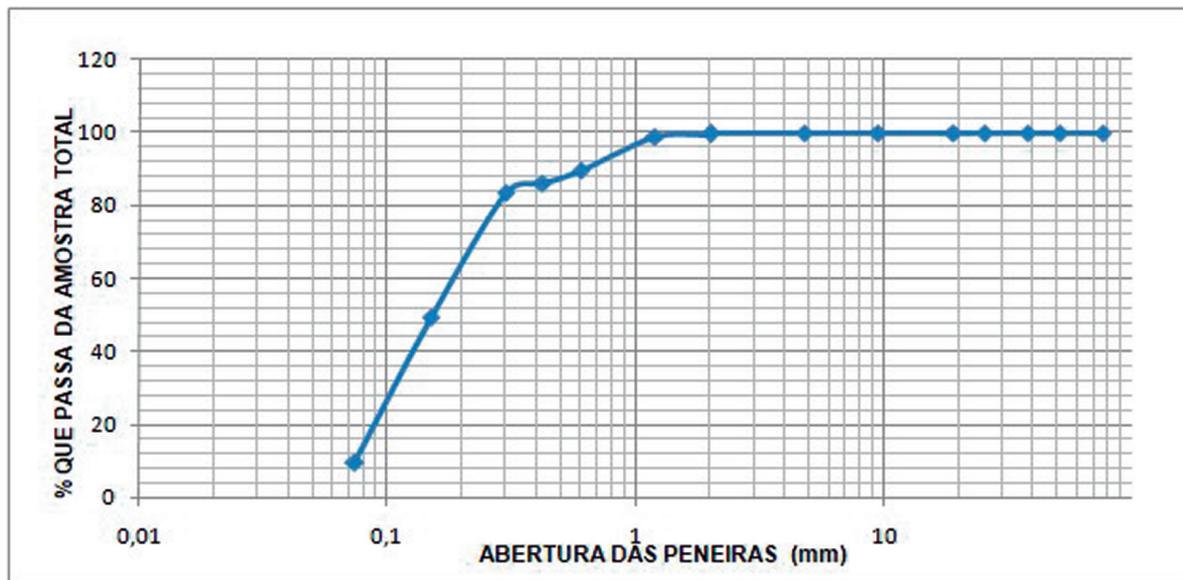


Figura 4: Análise granulométrica do lodo.

Realizando-se a análise da curva granulométrica do lodo e correlacionando os resultados com a NBR 6502 [40], constatou-se percentual de 76,61% de areia fina; 13,36% areia média; 0,42% areia grossa e 9,61% de partículas menores que 0,075mm, siltes e argilas. PETTERLE *et al.* [37] detectou em seu estudo a presença de 71,12% de partículas arenosas.

O passivo ambiental compõe-se por frações inorgânicas de areia fina, argila e silte e sua distribuição granulométrica é influenciada por diversos fatores, dentre eles, o coagulante empregado no tratamento, a estação climática e umidade da amostra no momento do ensaio [50, 51].

Este estudo é de extrema importância para uso em massas cerâmicas, uma vez que as características dos grãos podem interferir na plasticidade, empacotamento do sistema e preenchimento do molde, relacionando-se com a densificação do produto [52].

4.2. Limite de liquidez e plasticidade

Os resultados identificados nos ensaios de Limites de liquidez e plasticidade podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Limites de Liquidez (LL), Limites de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP) do lodo.

MATERIAL	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Lodo de ETA	ND	Não plástico	ND

Nota: ND – Não determinado.

Os resultados dos limites de liquidez e plasticidade obtidos para o subproduto são semelhantes aos observados na pesquisa ALVES [53], que realizou análise laboratorial do lodo de ETA desidratado para o uso em pavimentação. Segundo o autor, a não plasticidade do material, pode ser justificada pelo fato do coagulante

utilizado no tratamento da água, na situação sulfato de alumínio, atua impermeabilizando as partículas do lodo, promovendo redução da plasticidade.

Resultado similar foi detectado no estudo de GONÇALVES *et al.* [51], que identificaram lodo com características não plásticas (NP). Por esta razão, por não ser possível a determinação dos limites de liquidez e plasticidade, o lodo do presente estudo foi classificado como não plástico. Os resultados de LP são necessários, pois indicam a quantidade mínima de água necessária para conformar massa cerâmica, já o LL diz respeito a quantidade máxima que esta mesma massa deve conter para poder ser moldada.

Adicionando lodo às argilas gordas, altamente plásticas, em porcentagens suficientemente adequadas, consegue-se melhorar a maneira como as partículas se organizam, minimizando o tempo e a eficácia da secagem. Além disso, a junção desses materiais poderá promover maior entrosamento dos grãos, de modo a reduzir a forte interação entre as partículas, que adsorvem água para os interstícios do corpo cerâmico, melhorando as características finais do compósito [54].

4.3. Fluorescência de Raios X (FRX)

Os elementos químicos do lodo de ETA, obtidos a partir da fluorescência de Raios X, estão evidenciados na Tabela 2, abaixo. Observou-se valores mais expressivos de Si (55,65%) e Al (12,03%), seguido do Ca (7,81%) e Zr (6,91%) não sendo detectada, portanto, a presença de metais pesados. A perda ao fogo (PF) foi de 1,22%, que corresponde às substâncias voláteis.

Tabela 2: Fluorescência de Raios X do lodo de ETA.

ELEMENTOS QUÍMICOS	VALORES ENCONTRADOS (%)
Si	55,65
Al	12,03
Ca	7,81
Zr	6,91
Zn	5,82
B	3,1
Mg	2,51
K	2,33
Fe	1,22
Na	1,2
PF	1,42

Com base nos resultados obtidos na análise de fluorescência de Raios X foi possível detectar no lodo de ETA a presença de elementos como o Ca (7,81%), Mg (2,51%), K (2,33%) e Na (1,2%), que podem promover diminuição da temperatura de sinterização das placas cerâmicas. Materiais com estas características fundentes possuem em sua composição química elementos alcalinos e alcalino-terrosos, como estes apontados no presente trabalho, que podem interagir com elementos formadores de fase vítrea, Si (55,65%) e Al (12,03%), na fase de sinterização [55].

Trabalhos correlatos como o de INOCENTE *et al.* [56], evidenciou os efeitos positivos da incorporação de rejeito de esmalte em massas cerâmicas para produção de blocos de alvenaria, devido às características fundentes do subproduto, que atuou melhorando as propriedades dos corpos de prova auxiliando na diminuição da absorção de água e aumentando a resistência mecânica, à medida que os teores de subproduto aumentavam nas formulações. Além disso, segundo os autores, foi possível obter sinterização mais rápida ou em menor temperatura, visto a presença dos óxidos de SiO₂ (52,34%), CaO (7,41%), K₂O (2,68%), NaO₂ (1,3%) e MgO (2,02%) [56].

Os percentuais de óxidos encontrados por meio da técnica de Raios X podem sofrer variações, a depender do tipo de coagulante utilizado no tratamento, da qualidade do manancial, do mês e da região de coleta, fatores

estes que implicam diretamente nas características do lodo gerado [38]. A presença do alumínio no subproduto advém do Policloreto de Alumínio (PAC), utilizado no processo de tratamento de água da cidade de Palmeira dos Índios/AL. Os teores podem variar de 9,0% a 19,0%, conforme especificações contidas nas fichas técnicas dos fabricantes [57, 58].

4.4. Difração de Raios X (DRX)

O Difratoograma de Raios X do lodo apresentado na Figura 5, abaixo, mostra picos característicos das fases caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e quartzo (SiO_2). Esses resultados corroboram com análise química, tendo a caulinita apresentando-se predominantemente na forma de silício e alumínio (67,68%) e o quartzo na forma de silício.

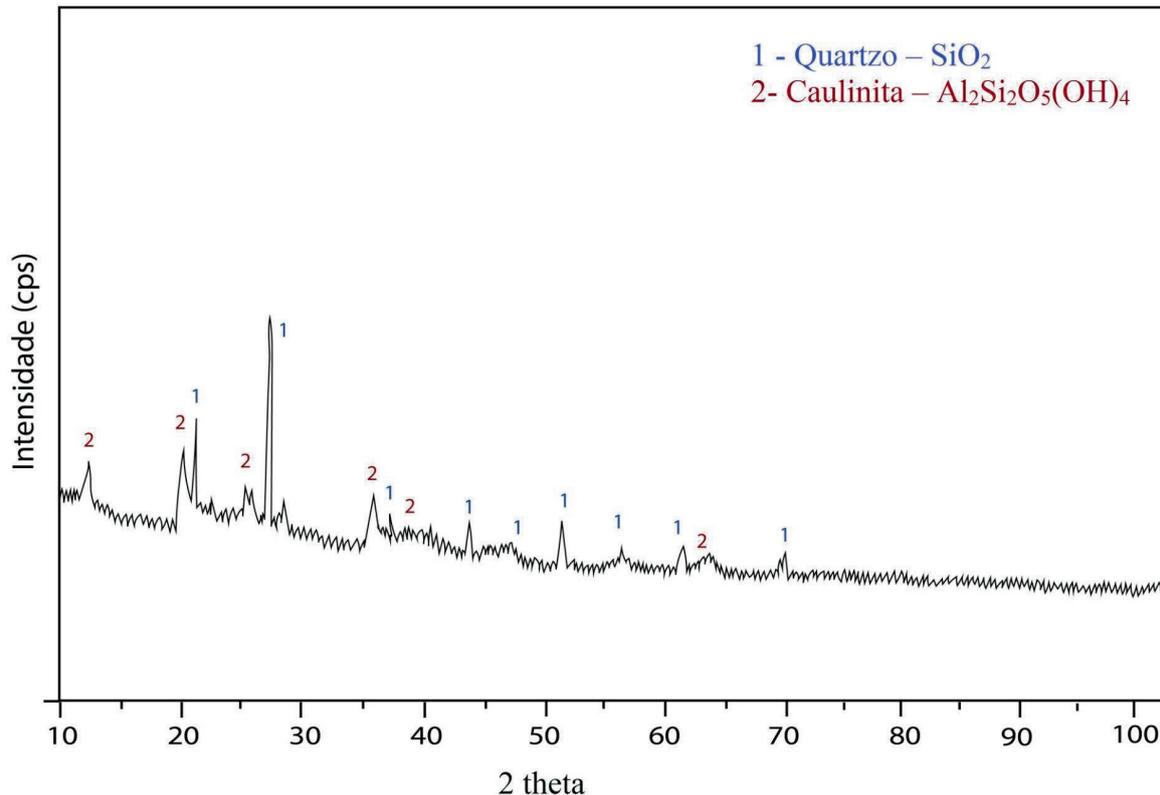


Figura 5: Difratometria de Raios X do lodo de ETA com detecção de picos dos minerais caulinita e quartzo.

O silício segundo SANTOS [59] e INOCENTE *et al.* [56] é um dos materiais mais relevantes para indústria cerâmica, sendo utilizada para a produção de esmaltes, abrasivos e vidros, podendo ser identificada na forma cristalina quartzo, forma mais pura, e caulinita. Em alguns trabalhos as fases cristalinas caulinita e quartzo foram as que apresentaram picos mais característicos no lodo de ETA, melhorando o processo de conformação e trabalhabilidade da massa cerâmica [5, 60, 61].

4.5. Análises Térmicas (AT)

As curvas TG/DTA (Termogravimétrica e Análise Térmica Diferencial) do lodo de ETA estão evidenciadas na Figura 6. Observou-se que o lodo perde em torno de 42% de massa a 400°C, com estabilização a partir dessa temperatura. No entanto, no estudo de BUSELATTO *et al.* [60], a estabilização completa ocorreu na temperatura de 845°C, que retornou o percentual médio de perda de 31,7%.

Na literatura identificam-se técnicas de beneficiamento empregadas com o objetivo de minimizar falhas microestruturais advindas da perda de massa, ocasionada pela combustão de matéria orgânica presente no lodo de ETA durante o processo de sinterização. SANTOS, MELO FILHO e MANZATO [38] submetem o lodo utilizado na pesquisa ao processo de calcinação e constataram efeitos positivos para seu emprego na construção civil, inclusive para produção de massas cerâmicas.

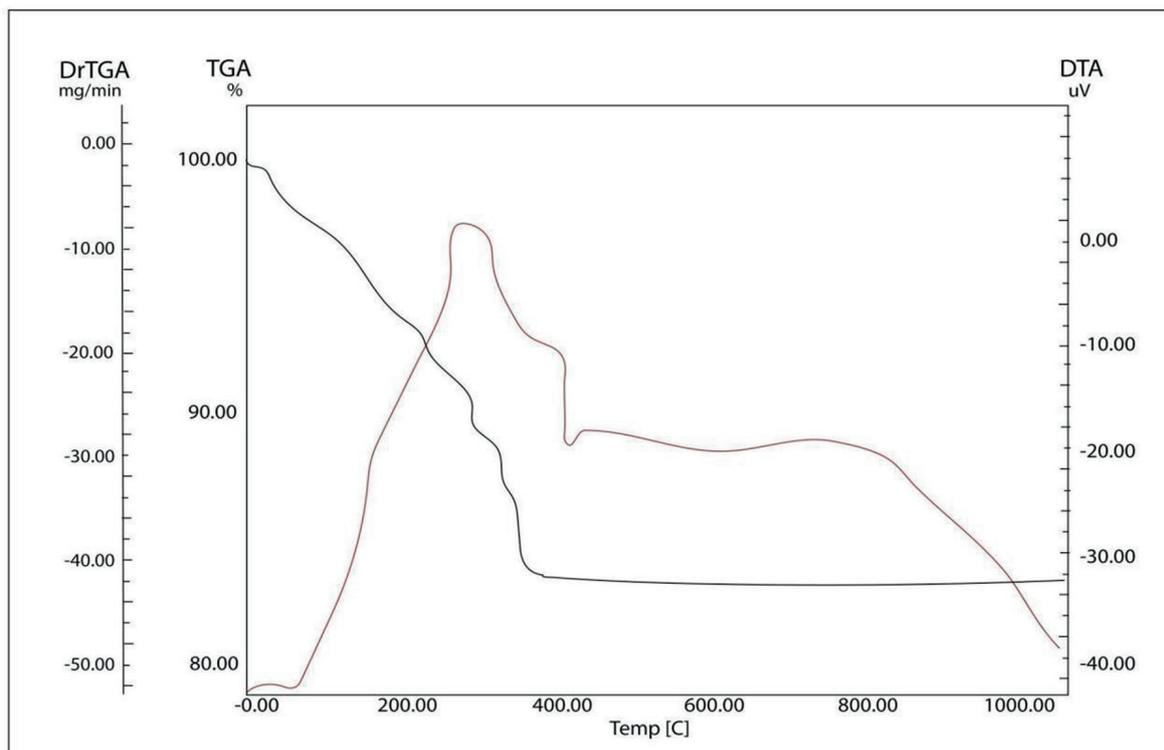


Figura 6: Análise Térmica do lodo de ETA.

A variação dos valores encontrados a partir da análise da curva de TGA se dar em função da heterogeneidade dos lodos de ETA, que possuem características distintas a depender da região geográfica no qual o manancial de captação da água bruta está inserido e os processos adotados durante o tratamento da água [60].

A eliminação da água adsorvida, hidroxilas e decomposição da matéria orgânica presentes no subproduto deu-se até temperaturas de 900°C. Todavia, as perdas de massa não foram significativas em torno dos 500°C. Inferiu-se, com base em trabalhos correlatos, que a curva de TGA para temperaturas entre 600°C e 800°C há pequena perda de massa [38, 60, 62].

Na curva DTA do lodo é possível observar dois picos exotérmicos nas faixas de temperatura próximas a 300°C e 400°C, que pode ser associado a volatilização de compostos orgânicos e de fases baseadas no silício, evento este compatível com o percentual de silício de 55,65% encontrado na análise química do lodo [63, 64]. As reações segundo DELAQUA *et al.* [63] iniciam a aproximadamente 267°C e terminam a cerca de 490°C, sendo responsáveis pela maior perda de massa total (42%), evidenciada neste estudo.

5. CONCLUSÃO

Diante do que foi exposto, evidencia-se que o lodo da ETA da cidade de Palmeira dos Índios-AL apresenta características que corroboram para aplicação em massas cerâmicas, devido à presença de elementos fundentes. Nos trabalhos desenvolvidos por PETERLE *et al.* [37], OLIVEIRA [15] e MENEZES, DUTRA e CAM POS [65] a presença destes elementos elevaram o desempenho de materiais cerâmicos, ratificando o potencial de aplicação pelo setor ceramista.

Os resultados obtidos na caracterização do lodo de ETA classificaram o subproduto como areia fina (76,61%) e não plástico ao realizar-se os limites de Atterberg. Na fluorescência de Raios X foram identificados percentuais Ca (7,81%) e Mg (2,51%), elementos que apresentam características fundentes e que interagem com o Si (55,65%) e Al (12,03%) para formação de fase vítrea durante o processo de sinterização, importante para aplicação em massas cerâmicas. O difratograma de Raios X corrobora com a análise química do lodo, visto a detecção dos picos característicos das fases cristalinas quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), adições minerais importantes para fabricação de materiais cerâmicos, já que auxiliam na trabalhabilidade e conformação das massas. A curva termogravimétrica do lodo de ETA mostrou perda em torno de 42% de massa a 400°C com estabilização a partir dessa temperatura.

A caracterização do lodo proveniente da estação de tratamento de água da cidade de Palmeira dos Índios-AL proporcionou conhecimento mais amplo das especificidades do subproduto, sendo verificada através de técnicas não-destrutivas a perspectiva de sua incorporação em materiais cerâmicos. Logo, a substituição da argila pelo lodo de ETA poderá configurar alternativa para as indústrias cerâmicas, garantindo a circularidade do passivo ambiental e configurando ganhos ambientais e econômicos para a indústria cerâmica.

6. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas Campus Palmeira dos Índios. Ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas Campus Marechal Deodoro. E ao Laboratório de análise das propriedades físicas dos materiais cerâmicos (Lapfime) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] CARDOSO, D.K., FERNANDES, L.V.O., FERNANDES, C.E., *et al.*, “Reutilização de água: uma alternativa para o desperdício e economia da água em residências”, *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 5, pp. 24566–24581, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n5-056>
- [2] BRASIL, “Portaria n.º 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre normas de potabilidade de água para o consumo humano”, *Diário Oficial da União*, 14 Dez. 2011.
- [3] URASHIMA, D.C., FARIA, A.P.M., GUIMARÃES, M.G.A., *et al.*, *Sistema de confinamento de resíduos: estudo de caso lodo de ETA*, Ponta Grossa, Atena, pp. 1388–1416, 2021. Coleção Desafios das Engenharias: Engenharia Sanitária 2.
- [4] PINHEIRO, B.C.A., ESTEVÃO, G.M., SOUZA, D.P., “Lodo proveniente da estação de tratamento de água do município de Leopoldina, MG, para aproveitamento na indústria de cerâmica vermelha Parte I: caracterização do lodo”, *Matéria*, v. 19, n. 3, pp. 204–211, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762014000300003>
- [5] ALEXANDRE, E., LUZ, C.A., “Substituição parcial do cimento CPV-ARI por lodo de estação de tratamento de água (ETA)”, *Matéria*, v. 25, n. 1, e-12586, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0912>
- [6] RAPÔSO, A.L.Q.R S., “*Modelo de sistema de produto-serviço para estofado personalizado: sustentabilidade ambiental e inovação em modelo de negócio para Estofadora do APL de Móveis do Agreste (Alagoas, Brasil)*”, Tese de D.Sc., Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.
- [7] OLIVEIRA, I.Y.Q., RONDON, O.C., “Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul”, *Interações*, v. 17, pp. 687–698, 2016.
- [8] MOTTA SOBRINHO, M.A., TAVARES, R.G., ARRUDA, V.C.M., *et al.*, “Geração, tratamento e disposição final dos resíduos das estações de tratamento de água do estado de Pernambuco”, *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, n. 4, pp. 761–771, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019175810>
- [9] BONDY, S.C., “Low levels of aluminum can lead to behavioral and morphological changes associated with Alzheimer’s disease and age-related neurodegeneration”, *Neurotoxicology*, v. 52, pp. 222–229, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuro.2015.12.002>. PubMed PMID: 26687397.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação*, Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- [11] BRASIL, “Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a lei n.9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências”, *Diário Oficial da União*, 2010.
- [12] RAMOS, S.O., DANTAS, G.C.B., LIRA, H.L., *et al.*, “Caracterização de argilas de novos jazimentos situados em Parelhas/RN, Brasil, visando aplicação na indústria cerâmica”, *Matéria*, v. 24, n. 2, e12352, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0667>
- [13] ALMEIDA, K.S., SOARES, R.A.L., MATOS, J.M.E., “Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica”, *Matéria*, v. 25, e-12568, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0893>
- [14] VIEIRA, C.M.F., MORAIS, A.S.C., MONTEIRO, S.N., *et al.*, “Teste industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente”, *Cerâmica*, v. 62, n. 364, pp. 376–385, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623642035>

- [15] OLIVEIRA, Y.L., LINHARES, Z., ANCELMO, L., *et al.*, “Estudo da reutilização de resíduos de telha cerâmica (Chamote) em formulação de massa para blocos cerâmicos”, *Cerâmica Industrial*, v. 21, n. 2, pp. 45–50, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2016.013>
- [16] SILVA JUNIOR, P.F., POMPEU NETO, B.B., OLIVEIRA, M.A.B., “Cerâmica vermelha incorporada com resíduo de pedras ornamentais tratada termicamente”, *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 9, pp. 72545–72561, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n9-633>
- [17] MELO, L.D.V., “Avaliação estatística de desempenho de estações de tratamento de água, em função da tecnologia, do porte e do tipo de manancial”, Tese de D.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- [18] KAMIWADA, W.Y., ANDRADE, P.V., REIS, A.G., “Emprego do cloreto de polialumínio em estudos de tratabilidade de água de abastecimento via coagulação, floculação e sedimentação”, *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 25, n. 5, pp. 667–676, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-4152202020180005>
- [19] ANDRADE, E.L., “Análise de eficiência de biopolímero como composto coadjuvante no processo de coagulação-floculação e sedimentação”, Tese de M.Sc., Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2017.
- [20] MARTINS, T.J.C., “Sistemas de abastecimento de água para consumo humano: desenvolvimento e aplicação de ferramenta informática para a sua gestão integrada”, Tese de M.Sc., Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior Agrária, Bragança, 2014.
- [21] SECKLER, S., “Filtração”, In: Ferreira Filho, S.S. (ed), *Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento. Um guia prático para alunos e profissionais*, 1 ed., capítulo 6, Rio de Janeiro, Elsevier, 2017.
- [22] TERTO, R.S., ARAÚJO, A.L.C., DUARTE, M.A.C., “Caracterização dos resíduos da água de lavagem de filtros em ETA de filtração direta”, Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- [23] ALBUQUERQUE, T.N., BARRETO, F.M.S., “Identificação do ponto ótimo de lavagem de um sistema de dupla filtração convencional de bancada através de curva de lodo”, In: *Anais do 30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Natal, RN, 2019.
- [24] LUSTOSA, J.B., BRACARENSE, D.C., CASTRO, F.M.S.D., *et al.*, “Tratamento e aproveitamento de água de lavagem de filtro em estação de tratamento de água”, *Revista Dae*, v. 65, n. 206, pp. 44–61, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2016.027>
- [25] CHAU, H.T.C., KADOKAMI, K., DUONG, H.T., *et al.*, “Occurrence of 1153 organic micropollutants in the aquatic environment of Vietnam”, *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 25, n. 8, pp. 7147–7156, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5060-z>. PubMed PMID: 26199005.
- [26] GILCA, A.F., TEODOSIU, C., FIORE, S., *et al.*, “Emerging disinfection byproducts: a review on their occurrence and control in drinking water treatment processes”, *Chemosphere*, v. 259, pp. 127476, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127476>
- [27] FRAZÃO, P., NARVAI, P.C., “Fluoretação da água em cidades brasileiras na primeira década do século XXI”, *Revista de Saúde Pública*, v. 51, pp. 47, 2017.
- [28] SANTOS, L.A.R., GOIS, M.D.C., JESUS, T.M., “Verificação da produção de lodo de ETA em função da quantidade e da qualidade da água bruta”, *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 15, n. 2, pp. 235–258, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2021v15n2p235-258>
- [29] NICOLAU, R.H.G., FURUYA, D.E.G., SILVA, L.M.S., *et al.*, “Utilização do tanfloc sg como auxiliar de coagulação do policloreto de alumínio no tratamento de água bruta do Rio Santo Anastácio”, *Colloquium Exactarum*, v. 10, n. 4, pp. 77–83, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.5747/ce.2018.v10.n4.e259>
- [30] FRANCO, E.S., MARQUES, I.C., CAMARGO, J.A., *et al.*, “Produção teórica de lodo utilizando o coagulante sulfato de alumínio nos decantadores da estação de tratamento de água do funil em Ouro Preto/MG”, *Vértices*, v. 22, n. 1, pp. 100–110, 2020.
- [31] HENRIQUE, M.C., LINHARES, A.M.A., “Cerâmica marajoara e Círio de Nazaré: significação e sacralização do patrimônio cultural brasileiro”, *Topoi*, v. 20, n. 41, pp. 394–420, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2237-101x02004106>
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, *Seis décadas de conquistas e superação de desafios*, 1 ed., São Paulo, Editora BB, 2017.
- [33] GONÇALVES, C.L., CORAZZA, M.L., OLIVEIRA, M.M., *et al.*, “Síntese e caracterização de catalisadores SnO₂/Nb suportado em argila maranhense”, *Matéria*, v. 23, n. 1, e11972, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0308>

- [34] PALMA, A.J.R., PASKOCIMAS, C.A., “Incorporação de resíduos cerâmicos na formulação da argila-padrão do isolador cerâmico de velas de ignição”, *Scientia: Revista Científica Multidisciplinar*, v. 6, n. 1, pp. 125–141, 2021.
- [35] BRASIL, *Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos – ano base 2019*, Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2020, <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatitico-2021-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-ano-base-2020.pdf/view>, acessado em dezembro de 2022.
- [36] ALMEIDA, K.S., SOARES, R.A.L., MATOS, J.M.E., *et al.* “Incorporação de resíduo de gesso em formulação para adoquim cerâmico”, *Cerâmica Industrial*, v. 25, n. spe, pp. 1–11, 2021. doi: <https://doi.org/10.4322/cerind.2020.005>
- [37] PETTERLE, A.R., SANTIAGO, G., CHONG, W., *et al.*, “Placas Cerâmicas contendo lodo de ETA e Cinza de Casca de Arroz: Correlação de suas propriedades físico-químicas com sua microestrutura”, *Química Nova*, v. 41, pp. 1117–1126, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170288>
- [38] SANTOS, G.Z.B., MELO FILHO, J.A., MANZATO, L., “Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos rios Negro e Solimões”, *Matéria*, v. 23, n. 3, e-12167, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0501>
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 7181, Solo - *Análise granulométrica*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 6502 – *Rochas e solos – Terminologia*, Rio de Janeiro, ABNT, 1995
- [41] DONAGEMMA, G.K., CAMPOS, D.V.B., CALDERANO, S.B., *et al.*, “Análise granulométrica”, In: Donagemma, G.K., Campos, D.V.B., Calderano, S.B. (eds), *et al.*, *Manual de métodos de análise de solo*, 3 ed., capítulo 10, Brasília, Embrapa, 2017.
- [42] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Solo - Determinação do limite de liquidez*, ABNT NBR 6459, Rio de Janeiro, ABNT, 2017.
- [43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Solo - Determinação do limite de plasticidade*, ABNT NBR 7180, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [44] OLIVEIRA, E.A., “*Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X*”, Tese de M.Sc., PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2011.
- [45] BECKHOFF, B., KANNGIEßER, N., LANGHOFF, R., *et al.*, (eds), *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*, Berlin, Springer, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-36722-2>
- [46] ALBERS, A.P.F., MELCHIADES, F.G., MACHADO, R., *et al.*, “Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X”, *Cerâmica*, v. 48, n. 305, pp. 34–37, 2002. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132002000100008>
- [47] SILVA, L.B., “*Desenvolvimento de cerâmicas com alta sinterabilidade à base de Nano Alumina reforçada com CBC produzidas por tape casting*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- [48] DENARI, G.B., CAVALHEIRO, E.T.G., *Princípios e aplicações da análise térmica. Material de apoio curso teórico/prático, São Carlos*, Instituto de Química de São Carlos, 2012.
- [49] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 7211: *Agregados para concreto – Requisitos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2019.
- [50] MONTALVAN, E.L.T., “*Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP*”, Tese de M.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- [51] GONÇALVES, F., SOUZA, C.H.U., TAHIRA, F.S., *et al.*, “Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário”, *Revista Dae*, v. 65, n. 205, pp. 5–14, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2016.018>
- [52] SANTOS, R.C., SILVA, T.R., NEVES, G.A., *et al.*, “Interação entre características de argilas e parâmetros de processamento sobre propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos”, *Cerâmica*, v. 63, n. 367, pp. 361–368, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633672126>

- [53] ALVES, H.C., “*Análise laboratorial de lodos desidratados de estações de tratamento de água da região metropolitana de Belo Horizonte- MG para uso em pavimentação*”, Tese de M.Sc., Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.
- [54] TARTARI, R., DÍAZ-MORA, N., MÓDENES, A.N., *et al.*, “Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: parte I: caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense”, *Cerâmica*, v. 57, n. 343, pp. 288–293, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132011000300006>
- [55] SILVA, E.L.G., MACIEL, A.P., “Uso de resíduos sólidos de estação de tratamento de água como carga em blocos cerâmicos”, *Cerâmica Industrial*, v. 24, n. 4, pp. 29–36, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2019.021>
- [56] INOCENTE, J.M., NANDI, V.S., ROSSO, F., *et al.*, “Estudo de recuperação de resíduos vítreos na formulação de cerâmica vermelha”, *Cerâmica Industrial*, v. 23, n. 3, pp. 34–39, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2018.004>
- [57] POOLTÉCNICA QUÍMICA, *Ficha técnica: policloreto de alumínio*, 2015, <http://www.pooltecnica.com.br/admin/assets/repositorio/3878353ffb10605e8303ce7b9d98d8e6.pdf>, acessado em janeiro de 2022.
- [58] GOTAQUÍMICA PRODUTOS QUÍMICOS LTDA, *Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – FISPQ*, 2016, <https://gotaquimica.com.br/wp-content/uploads/2021/05/POLICLORETO-DE-ALUMINIO-18.pdf>, acessado em janeiro de 2022.
- [59] SANTOS, D.H., “*Influência da sílica e da temperatura nas propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos com resíduo do processo Bayer*”, Tese de D.Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA/ITEC), Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
- [60] BUSELATTO, D.M., WENZEL, M.C., ROCHA, G.H., *et al.*, “Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas”, *Matéria*, v. 24, n. 1, e-12270, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0645>
- [61] GASTALDINI, A.L.G., HENGEN, M.F., GASTALDINI, M.C.C., *et al.*, “The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition”, *Construction & Building Materials*, v. 94, pp. 513–520, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.038>
- [62] RUVIARO, A.S., SILVESTRO, L., SCOLARO, T.P., *et al.*, “Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar”, *Ambiente Construído*, v. 20, n. 4, pp. 243–260, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400470>
- [63] DELAQUA, G.C.G., FERREIRA, M.N., AMARAL, L.F., *et al.*, “Incorporation of sludge from effluent treatment plant of an industrial laundry into heavy clay ceramics”, *Journal of Building Engineering*, v. 47, pp. 103451, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103451>
- [64] CIRINO, M.A.G., CABRAL, A.E.B., SILVA, D.A.A., *et al.*, “*Caracterização e avaliação da atividade pozolânica das cinzas provenientes da queima de carvão mineral das termelétricas do Pecém, Ceará, Brasil*”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 4, e13090, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1390>
- [65] MENEZES, R.R.N., DUTRA, R.P.S., CAMPOS, L.F.A., “Formulações de resíduos industriais tratados por hidrociclonação para obtenção de cerâmica de revestimento”, *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 8, pp. 54364–54383, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n8-014>