

Aplicações da lama de ETA visando à mitigação de impactos ambientais: uma revisão integrativa

Luana Kelly de Jesus Santos¹, Caio de Oliveira Pinto¹ e Luiz Antônio Pimentel Cavalcanti²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia. Curso de Engenharia Química. *Campus Salvador*. Rua Emídio dos Santos, S/Nº. Bairro do Barbalho. Salvador-BA, Brasil (CEP 40301-015).

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia. *Campus Salvador*. Rua Emídio dos Santos, S/Nº. Bairro de Barbalho. Salvador-BA, Brasil (CEP 40301-015). E-mail: luiz.cavalcanti@ifba.edu.br.

Resumo. O incremento no consumo de água tratada devido ao crescimento populacional, bem como o consequentemente incremento da produção industrial faz que seja gerado um enorme volume de lodo resultante do processo de tratamento da água bruta que necessita ser descartado. Este resíduo por diversas vezes é descartado diretamente na natureza, não respeitando a devida legislação e pondo em risco o meio ambiente. Nesse aspecto, o presente estudo apresenta uma revisão integrativa da literatura visando a sugerir possíveis destinos alternativos para o lodo de ETA, para assim mitigar os possíveis impactos ambientais que o material causa quando descartado de maneira indevida. A revisão foi realizada selecionando trabalhos com recorte temporal de 2007 a 2021 que abordassem o lodo de ETA nas seguintes frentes: aplicada a incineração, argamassa e cerâmica, utilizado como adsorvente, seu comportamento quando inserido na codigestão e decantação assistida em ETAR, adotada para insumo na agricultura e na recuperação de áreas degradadas e, por fim, aplicada em barreiras impermeabilizantes. Desses trabalhos, foi possível observar que o lodo de ETA é extremamente versátil, demonstrando-se viável na aplicação frente aos campos supracitados, e dando uma nova perspectiva de utilização a um material que é rejeito de um processo amplamente aplicado.

Palavras-chave: Lama de ETA; Tratamento de água; Reaproveitamento do lodo.

Abstract. *WTP sludge applications aiming mitigation of environmental impacts: An integrative review.* The increment on treated water consumption due to population increase, as well as the increment on industrial production causes a huge volume increase of sludge resulting from the process of brute water treatment that needs to be discharged. This residue by several

Recebido
05/12/2021

Aceito
29/04/2022

Publicado
30/04/2022

 Acesso aberto



- ORCID**
ID 0000-0002-7092-647X
Luana Kelly de Jesus Santos
ID 0000-0001-8021-2430
Caio de Oliveira Pinto
ID 0000-0003-4932-9387
Luiz Antônio Pimentel Cavalcanti

times is discharged directly on nature, not respecting the due legislation and putting the environment at risk. In this aspect, the current study presents an integrative literature review suggesting possible alternative destinations for WTP sludge, in order to mitigate the possible environmental impacts that the material causes when improperly discarded. The review was carried out by selecting works with a time frame from 2007 to 2021 that addressed WTP sludge on the following fronts: applied to cement, mortar and ceramic, used as an adsorbent, its behavior when inserted in co-digestion and assisted decantation in an WWTP, adopted for input in agriculture and in the recovery of degraded areas and, finally, applied in water proofing barriers. From these works, it was possible to observe that the WTP sludge is extremely versatile, proving to be viable in the application in this fields, and giving a new perspective of use to a material that is rejected from a widely applied process.

Keywords: WTP sludge; Water treatment; WTP sludge reuse.

Introdução

A água é um recurso natural vital para os seres humanos e ecossistemas, muito utilizada em processos industriais, sendo esta considerada o solvente universal, bem como importante fonte para geração de vapor. Com o aumento populacional e crescimento industrial, houve também um aumento da necessidade de obtenção de água com a qualidade e características necessárias para suas diversas aplicabilidades. Entretanto, a água bruta coletada nas fontes de captação não apresenta características dentro das especificações de potabilidade e qualidade, sendo assim essencial o seu tratamento (Pinheiro et al., 2014).

A água bruta apresenta matéria orgânica, materiais particulados e dissolvidos, entre outros constituintes, composição esta que varia de acordo com a região de captação, tanto pelas características geológicas/mineralógicas quanto pela consciência ambiental da sociedade circunvizinha e políticas públicas. Para atendimento aos requisitos de qualidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde, esta é submetida a diversos tipos de tratamento, nas chamadas Estações de Tratamento de Água (ETA) (Meert, 2019).

No Brasil, a maioria das ETAs adota o processo convencional para tratamento da água bruta, onde é feita a adição de produtos químicos, e a mesma é submetida às etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração (Pinheiro et al., 2014). Por meio deste processo de tratamento, é gerado o resíduo denominado lama/lodo de ETA, cuja quantidade e composição são dependentes das características da água bruta captada, e dos produtos químicos utilizados no processo (Rodrigues e Holanda, 2013).

Por muitos anos este resíduo vem sendo descartado diretamente na natureza, em corpos d'água, levando à contaminação dos mananciais, e oferecendo riscos ao ecossistema aquático e à saúde pública. Entretanto, esta destinação para este resíduo vem sendo restringida por conta da crescente preocupação com a sustentabilidade (Neves, 2019). A lama/lodo de ETA gerado é classificada como resíduo Classe IIA - Não inerte, segundo a NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004; Ribeiro, 2012), sendo assim exigido que seu tratamento e destinação sejam de acordo com a legislação em vigor, onde podem ser destinadas a redes coletoras, bacias com tempo de retenção (Rodrigues e Holanda, 2013), e aterros sanitários, que também podem gerar impactos ao meio ambiente por conta da

contaminação do solo e águas subterrâneas, além de apresentarem altos custos de operação (Freitas, 2018).

Por conta do alto volume de lama de ETA gerado, e pelos danos causados pelas atuais formas de destinação, tem-se que este resíduo causa um grande problema ambiental, fazendo-se necessário encontrar alternativas que possam dá-lo um direcionamento mais amigável ambientalmente. Porém, este assunto ainda é pouco discutido no Brasil, e a legislação não especifica parâmetros nem vias de reutilização deste resíduo (Schmidt, 2019). Devido à sua composição, por ser rico em matéria orgânica e diferentes metais, a lama de ETA apresenta grande potencial de aplicação nos processos de fabricação de produtos cimentícios, em aplicações agrícolas e recuperação de áreas degradadas, e em outros processos de tratamento de resíduos.

O presente trabalho trata de uma revisão de literatura, que tem por objetivo sugerir possíveis aplicações para este resíduo das ETAs, de forma a dar uma destinação a este passivo ambiental, visando não só à mitigação dos impactos ambientais causados pela destinação indevida, mas também a reduzir os impactos às atividades e à saúde da sociedade, bem como aos custos associados às destinações convencionais.

Metodologia

Neste trabalho foi apresentada uma revisão bibliográfica integrativa sobre a linha de pesquisa de reutilização da lama de ETA em variados segmentos, onde foram realizadas pesquisas nas plataformas Google Scholar, Scielo e Science Direct. Nas buscas, os descritores utilizados foram “lama de ETA”, “lodo de ETA”, “aplicação da lama de ETA”, nos idiomas inglês e português, adotando um recorte temporal entre 2007 e 2021. Para a construção do presente artigo, foram considerados trabalhos que abordassem possíveis rotas para reutilização da lama de ETA, visando a reduzir os impactos ambientais gerados pelas destinações convencionais.

Resultados e discussão

Por conta da necessidade progressiva do tratamento de água para atendimento ao consumo humano e industrial, a geração de lama de ETA apresenta-se crescente, sendo esta um problema, tanto pelos impactos ambientais quanto pelos custos associados à sua destinação final. Com o intuito de reduzir os impactos ambientais gerados pela destinação indevida deste resíduo, o presente trabalho foi desenvolvido, através da investigação e inclusão de 24 trabalhos, onde são apresentadas possíveis aplicações da lama de ETA, como na produção de cimento, argamassa e cerâmica, como adsorvente, na codigestão e decantação assistida em ETAR, na recuperação de áreas degradadas e na agricultura, no reaproveitamento de sulfato de alumínio, e em barreiras impermeabilizantes em aterros sanitários.

Ao todo foram avaliados 43 trabalhos, onde apenas 24 foram incluídos, sendo estes descritos da Tabela 1, e 19 excluídos por não atenderem ao objetivo do trabalho.

Tabela 1. Trabalhos incluídos na revisão bibliográfica integrativa.

Referência	Objetivo
Alessi (2018)	Avaliar os teores de cádmio, chumbo e cobre em lama de ETA para verificar sua possível utilização na agricultura.
Coelho (2016)	Avaliar a capacidade reativa de uma lama de ETA para remoção de metais pesados em escorrências rodoviárias.
Freitas (2018)	Avaliar a possibilidade de utilizar lama de ETA na fabricação de argamassas convencionais e geopoliméricas.

Tabela 1. Continuação.

Referência	Objetivo
Gasola et al. (2015)	Comparar o uso do sulfato de alumínio do hidroxicloreto de alumínio frente ao tratamento de água para geração de vapor.
Gonçalves et al. (2016)	Avaliar as características físicas e químicas de misturas que contém lodo de ETA destinado ao uso em barreiras impermeabilizantes.
Guimarães (2014)	Avaliar o tratamento de águas residuárias provenientes da purificação do biodiesel utilizando a quitosana e o sulfato de alumínio.
Lemos et al. (2020)	Comparar os coagulantes sulfato de alumínio ferroso e policloreto de alumínio para o tratamento de água e analisar sua viabilidade econômica.
Locastro e Angelis (2016)	Elencar os principais <i>liners</i> encontrados em aterros sanitários, apresentando suas características e expondo exemplos aplicados em aterros ao redor do país.
Meert (2019)	Avaliar a influência do uso do lodo de ETA como substituição da área natural em cimento Portland.
Moreira et al. (2007)	Avaliar a potencialidade de utilização de lama de ETA na recuperação de área degradada.
Neves (2019)	Verificar o potencial de utilização da lama de ETA como corretor de micronutrientes em um plantio de soja.
Oliveira (2020)	Avaliar o potencial de utilização das lamas de ETA como adsorventes para a remoção de sulfato.
Pinheiro et al. (2014)	Avaliar a possível aplicação da lama de ETA na fabricação de cerâmica vermelha.
Ribeiro (2012)	Analizar o comportamento da argamassa convencional após substituição do agregado miúdo por lama de ETA calcinada.
Rodrigues e Holanda (2013)	Avaliar a influência da incorporação de lodo de ETA nas propriedades dos tijolos solo-cimento.
Roldão (2020)	Avaliar os impactos causados pela utilização de lama de ETA na confecção de blocos cerâmicos intertravados.
Sampaio (2017)	Analizar a viabilidade da utilização da lama de ETA para substituição parcial de cimento na produção de betão.
Santana (2019)	Caracterizar o lodo de ETA, e avaliar sua reutilização na produção de argilas aniónicas.
Santana et al. (2020)	Realizar um estudo utilizando cascas de banana para verificar a adsorção de metais pesados em águas residuárias de perfil de indústria galvânica.
Santos et al. (2018)	Apresentar uma alternativa à produção de produtos cerâmicos através da utilização de geopolímeros.
Schmidt (2019)	Avaliar o teor de chumbo presente em lamas de ETA para possível aplicação na agricultura.
Silva (2014)	Propor a aplicação da lama de ETA como substrato no processo de codigestão da lama de ETAR.
Silva (2015)	Avaliar o potencial de remoção do Nitrogênio amoniacal da <i>Typha domingensis</i> (taboa) e do carvão ativado, por processo de adsorção, utilizando cloreto de amônia (NH_4Cl).
Silva (2017)	Analizar o desempenho do floculante alternativo proveniente da lama de ETA na decantação assistida em ETAR.

Cimento

Durante o processo de tratamento de água, um volume grande de lodo é descartado, necessitando então que haja devido descarte a fim de se evitar impactos econômicos, sociais e ambientais, pois os rejeitos são despejados principalmente em

recursos hídricos próximos. Um dos principais materiais gerados é o lodo de ETA, um resíduo que não degrada em condições ambientais, e que é rico em matéria orgânica e materiais de silicato. Buscam-se então alternativas para evitar que o material seja despejado na Natureza, sendo uma delas na indústria civil, utilizando-o na produção de cimento (Rodrigues e Holanda, 2013).

Visando a avaliar a aplicação do material nos tijolos de solo-cimento, e avaliar suas propriedades tecnológicas, Rodrigues e Holanda (2013) avaliaram traços de solo-cimento contendo até 5% do peso em lodo de ETA em substituição parcial do solo, utilizando um traço padrão de 10:1 (solo-cimento). Os autores concluíram que o lodo de ETA é viável para utilização como uma matéria-prima de baixo custo, desde que a substituição parcial seja de até 1,25% do peso de solo na fabricação do tijolo solo-cimento, tal ressalva foi explicitada, pois o lodo de ETA altera significativamente as propriedades tecnológicas do material, devido ao fato das suas características física, química e mineralógica serem bem distintas do solo que é comumente utilizado na fabricação do tijolo. Foram observadas mudanças expressivas na absorção de água, que tende a aumentar quando o lodo de ETA é incorporado, onde em contrapartida se percebeu a diminuição concomitante da massa específica bulk, a resistência mecânica também diminui conforme o lodo de ETA é incorporado.

Outra forma de aproveitamento do rejeito, de acordo com Meert (2019) é a sua utilização como substituto da areia natural em concretos de cimento Portland, com o teor em massa na escala de 0%, 5%, 10% e 20% (REF, F05, F10 e F20), a autora ainda separou em estado fresco, aplicando o ensaio de abatimento do tronco de cone, e o estado endurecido, avaliando a massa específica, porosidade aberta, resistência à compressão e à tração por compressão diametral, carbonatação e módulo de elasticidade. No estado fresco, há alterações evidentes das características físicas do material, sendo uma delas diminuição da consistência do concreto (até 50%) conforme o teor de substituição também aumenta, no caso do estado endurecido, aumentos constantes da porosidade aberta foram percebidos conforme foi adicionado lodo de ETA. As resistências à compressão e à tração diminuíram de maneira contínua conforme o lodo de ETA foi introduzido, sendo a redução de 27% a 64% e 29% a 66% respectivamente, o módulo de elasticidade também reduziu de 17% a 52%, e a carbonatação foi de 100% para amostra F20. Nesse aspecto, o estudo concluiu que concretos com lodo de ETA podem ser substituídos desde que dosados de forma adequada (teores menores ou iguais a 10%), possibilitando que sejam empregados em contrapisos, peças decorativas, placas de vedação, blocos etc.

De acordo com Sampaio (2017), a cinza obtida pela queima da lama de ETA pode ainda ser utilizada em pequenas porcentagens como substituto do cimento para melhorar as propriedades do betão. O autor concluiu que a cinza de lama de ETA não tem efeitos negativos à resistência mecânica do betão quando utilizada como substituto parcial, onde se notou ainda que a substituição de 5% de cimento por cinza mostrou resultados melhores do que no caso dos valores de referência (betão sem cinza), contudo é importante salientar que em porcentagens superiores a 10% há impactos na resistência do material. Os elevados teores de umidade e matéria orgânica tiveram influência no resultado do processo, pois uma das etapas é o tratamento térmico, notando-se então ao final que apenas 11% da massa inicial pôde ser utilizada na mistura. Por fim, o estudo explicitou que não foi possível notar se há vantagens econômicas e energéticas, contudo, o processo apresenta um ganho ambiental considerável pois utiliza um resíduo que seria descartado e evita a extração de recursos minerais, dando então o devido valor a um material que é útil e suficiente para não ser descartado em aterros ou lançado em aquíferos.

Adsorvente

A adsorção é um dos procedimentos com maior efetividade no tratamento de águas e efluentes, também é definida como o processo onde uma impureza ou componente em solução é removido de forma seletiva através do contato com uma superfície sólida. A substância adsorvida, também chamada de adsorbato, é caracterizada por se acumular nas extremidades do sólido, que será o material denominado de adsorvente (Silva, 2015). Outros detalhes técnicos devem ser levados em consideração na hora de se definir a eficiência de um adsorvente, levando isso em consideração, Silva (2015) explicita que fatores como área superficial, volume e tamanho dos poros influenciam na capacidade adsorvente, pois limitam tanto a dimensão das moléculas que participarão do processo, quanto a quantidade de material que pode ser adsorvida.

A capacidade de adsorver é presente em diversos materiais, e nesse contexto, Oliveira (2020) sugere a lama de ETA como um potencial adsorvente para diversos compostos, alguns cuja retirada pode ocasionar impactos positivos ao nível de saúde pública e de meio ambiente. O estudo apontou que lamas de ETA que possuíam carvão ativado em sua composição apresentaram capacidade adsorvente, tendo variado condições experimentais como concentração de adsorbato, dose das lamas, e tempo de contato entre os materiais. Durante os ensaios, o aumento na dose das lamas não refletiu em melhores resultados de adsorção, sendo que em determinado ponto (200 g.L^{-1} de lamas), a capacidade foi reduzida, o estudo apontou a possibilidade de se ter atingido o ponto de saturação das lamas. A melhor capacidade adsorvente foi obtida para uma amostra de 250 mg.L^{-1} de SO_4^{2-} e 20 g.L^{-1} de lama de ETA, apresentando ao final $4,70\text{ mg SO}_4^{2-}/\text{g}$ de lama. Por fim, infere-se que o material apresenta possibilidades de uso no campo da adsorção, sendo, contudo, necessários mais estudos para melhor compreensão do processo, além de entender melhor fatores como tempo de ligação da molécula do adsorvente à superfície do adsorvente e área de superfície, tamanho e volume dos poros.

Visto isso, insere-se então o contexto de poluição proveniente de metais pesados no ambiente, onde Santana et al. (2020) definem como um problema grave para o meio ambiente, e que se torna cada vez mais expressivo na sociedade em decorrência das atividades industriais, principalmente as do setor químico. Os autores explicitaram que a remoção desses metais é um processo caro e pouco efetivo, pois o material mais utilizado é o carvão ativado, sendo então importante a busca por alternativas de baixo custo visando à efetiva remoção dos poluentes. Assim, a adsorção utilizando materiais baratos, torna-se uma alternativa viável, visto que os tratamentos de efluentes bem como os de água utilizam em sua maioria técnicas de adsorção, devido a sua eficiência na remoção de moléculas.

Logo, devido ao fato da lama de ETA ter potencial adsorvente, pode-se avaliar a sua utilização para remoção de metais pesados em efluentes e na água, como foi avaliado por Coelho (2016). Considerando-se concentrações entre 3 mg.L^{-1} e 10 mg.L^{-1} e tempo de contato de cinco horas, o estudo explicitou ótima capacidade de remoção de Pb, Ni e Zn, tendo porém baixa capacidade para adsorção de crômio em decorrência da faixa de pH dos ensaios (entre 7 e 8, o crômio é melhor adsorvido em pH abaixo de 7). Seguindo-se ordem decrescente de remoção, os ensaios explicitaram que o Zn teve maior remoção (entre 83,5% e 96,7%), seguido do Pb (entre 70,9% e 89,2%) e o Ni (entre 73,1% e 75,4%), com maior parte do processo ocorrendo nas primeiras duas horas de contato, para o Cr os resultados apresentados não foram satisfatórios, ocupando o metal uma faixa de 9,8% e 22,6%. Por fim, pode-se considerar então a lama de ETA um potencial material para remoção de alguns metais pesados (níquel, chumbo e zinco) de efluentes, sendo necessários mais estudos para avaliar seu potencial frente a outros metais e condições variadas como as de pH e temperatura.

Argamassa

A lama de ETA, por conta de suas propriedades, apresenta grande potencial de aplicação em materiais da construção civil, a exemplo de sua reutilização no processo de produção da argamassa, que é um material empregado na vedação, no revestimento e assentamento de estruturas. A argamassa é diferenciada de acordo com as diferentes empregabilidades, e por conta de sua composição, onde é classificada como convencional ou geopolimérica. A argamassa convencional tem em sua composição cimento, areia e água nas proporções necessárias para a obtenção das propriedades requeridas para a dada aplicação. E a argamassa geopolimérica é constituída de *metacaulim* (fonte de aluminossilicato), solução aquosa de hidróxido de sódio, silicato de sódio (ativador) e areia, sendo esta uma alternativa à argamassa anterior, pois o cimento empregado gera muitos gases poluentes em seu processo produtivo, sendo este danoso ao meio ambiente (Freitas, 2018).

Visando a avaliar a possibilidade de empregar a lama de ETA na fabricação das argamassas convencional e geopolimérica, tanto através da substituição do cimento presente na argamassa convencional, e do *metacaulim* na argamassa geopolimérica, quanto pela adição deste resíduo na formulação original, Freitas (2018) produziu ambos os tipos de argamassa, com diferentes teores da lama de ETA, e posteriormente realizou testes de trabalhabilidade da argamassa fresca, de resistência à compressão, de densidade aparente, porosidade e absorção de água. Com base nos resultados obtidos, o autor constatou que em ambos os tipos de argamassa, a adição do resíduo impactou nas propriedades do produto, onde houve a verificada uma maior dificuldade em se trabalhar com os produtos frescos, que houve uma redução da resistência e densidade aparente, e consequente aumento da porosidade e absorção, em comparação com a amostra de referência. Porém, apesar das divergências de comportamento frente à amostra original, o autor concluiu que a aplicação da lama de ETA na argamassa geopolimérica (por adição ou substituição) é viável, já que os resultados obtidos, mesmo inferiores, foram considerados suficientes. E no caso da argamassa convencional, sua aplicação não é recomendada, pois os resultados foram inferiores aos aceitáveis.

Outra possibilidade de utilização da lama da ETA em argamassa é através de sua aplicação em lugar da areia, segundo Ribeiro (2012), onde o autor avaliou o comportamento da argamassa convencional (contendo cal em sua composição) após a substituição do agregado miúdo por diferentes teores do resíduo calcinado. O autor produziu diferentes corpos de prova, que foram submetidos a testes de resistência à compressão axial e elasticidade, e de absorção de água. Após realização dos testes, foi averiguado a variação nas propriedades analisadas de acordo com o teor de resíduo calcinado adicionado, onde chegou à conclusão de que a substituição da areia pela lama é satisfatória para adição de 5% e 10% em massa, onde foram verificadas resistências aceitáveis e até superiores, e que apesar de as mesmas terem apresentado uma absorção de água um pouco superior à amostra padrão, esta divergência pode ser corrigida por meio da utilização de um aditivo impermeabilizante. Desta forma, esta aplicação se faz importante tanto pela possibilidade de reutilização do resíduo de ETA e obtenção de propriedades satisfatórias para a argamassa produzida, quanto pela possibilidade de redução da utilização de areia, que é um material extraído da natureza, extração esta que acarreta impactos ao meio ambiente.

Codigestão e Decantação Assistida em ETAR

Os efluentes gerados em atividades domésticas e industriais são encaminhados para unidades denominadas ETAR, que são estações cuja finalidade é tratar estes resíduos aquosos por meio de diversos processos, de forma a possibilitar o retorno desta fase aquosa ao meio ambiente sem causar impactos negativos. E através destes processos de tratamento e separação da fase aquosa, é gerado um lodo composto pelos particulados

sólidos, água e matéria orgânica separados do resíduo, sendo esta bastante instável em seu estado bruto. Assim, para que a mesma receba a devida destinação final, é necessário que esta seja submetida a processos que promovam a redução de sua umidade e instabilidade, a exemplo da digestão anaeróbica, que além de promover sua estabilização, ainda leva a uma redução dos agentes patogênicos existentes (Silva, 2014).

Em muitos casos, a lama de ETAR passa pelo processo de digestão anaeróbica sem a interferência de outros compostos. Porém, existem alguns casos onde a matéria orgânica que compõe a lama não se degrada com facilidade, havendo assim a necessidade de utilização de um substrato que promova um aumento do rendimento deste processo. Baseado nisso, Silva (2014) propõe a aplicação de lama de ETA como substrato para assim avaliar a viabilidade e os efeitos desta no processo de codigestão da lama de ETAR. Assim, o autor aplicou diferentes dosagens da lama de ETA no processo de digestão aeróbica da lama de ETAR, onde posteriormente analisou-se a biodegradabilidade do produto digerido, bem como sua toxicidade por análise de ICP. Com relação ao rendimento do processo digestivo, foi verificado um bom desempenho do mesmo, bem como a utilização da lama de ETA ainda possibilitou que o CO₂ gerado na reação fosse mineralmente sequestrado. E foi verificado também, através do ICP, que o composto digerido não apresentava nenhum metal pesado, possibilitando assim que o mesmo pudesse ser empregado como fertilizante.

Outro processo utilizado no tratamento de resíduos de ETAR é a decantação primária assistida (DPA), onde, através do emprego de aditivos químicos, é feita a flocação e decantação de particulados dissolvidos e suspensos no resíduo, possibilitando assim uma separação eficiente da lama e do resíduo aquoso, bem como reduzindo o teor de fosfato existente. Este processo pode ser aplicado exclusivamente no tratamento, bem como pode ser empregado como etapa preliminar, diminuindo assim custos e dimensionamento de etapas seguintes, como os reatores biológicos (Silva, 2017). Por conta do teor de químicos coagulantes presentes na lama da ETA, a exemplo do alumínio, Silva (2017) avaliou o desempenho deste floculante alternativo através da aplicação deste (pulverizado e espessado) em experimentos jar-test, em comparação com o floculante comercial comumente empregado. Após os testes, os sobrenadantes gerados foram caracterizados, de forma a avaliar a remoção dos sólidos suspensos e dissolvidos, do fósforo e da matéria orgânica. Por meio dos resultados obtidos, o autor concluiu que, a depender da lama de ETA utilizada, é possível promover a remoção de fósforo por meio da aplicação desta lama pulverizada, bem como a utilização de solução de alumínio recuperada deste resíduo tem grande potencial de aplicação para esta finalidade, já que esta apresentou uma grande capacidade de remoção das espécies de interesse.

Cerâmica

Os produtos cerâmicos, em especial os de cerâmica vermelha (que apresentam esta coloração devido aos compostos de ferro presentes), são muito utilizados na confecção de tijolos, telhas, pisos e revestimentos cerâmicos, e vasos ornamentais, sendo sua produção e consumo crescentes no Brasil (Roldão, 2020). Para a confecção destes produtos, utiliza-se a argila como matéria-prima, estando esta presente em alguns tipos de solo, sendo assim um recurso natural finito e escasso em determinadas regiões, além de sua extração causar impactos ao meio ambiente. Por conta disto, a utilização de diferentes resíduos em substituição à argila vem sendo adotada, tanto pela economia de recursos, como pela sustentabilidade associada (Santana, 2019).

A utilização da lama de ETA na produção de cerâmica é uma das aplicações mais promissoras para este resíduo, devido às suas características mineralógicas serem muito semelhantes às características da argila, já que a lama apresenta, em sua composição, compostos de alumínio, ferro e sílica oriundos dos aditivos utilizados no tratamento da água (Santana, 2019). Entretanto, como o processo de tratamento de água pode utilizar

diferentes aditivos químicos, e a água bruta apresentar diferentes composições, a lama gerada em cada ETA pode apresentar composições distintas.

Sendo assim, para a aplicação deste resíduo na fabricação de cerâmica, é necessário realizar uma caracterização física, química e mineralógica do mesmo, como abordado por Pinheiro et al. (2014), onde os autores caracterizaram a lama proveniente da ETA de Leopoldina com o objetivo de avaliar sua possível aplicação na cerâmica vermelha, e contribuir com trabalhos já existentes. Para isto, os autores realizaram análises de espectroscopia de absorção atômica, peneiramento a úmido, fluorescência de raios X (FRX), microscopia ótica, perda ao fogo (PF), análise termogravimétrica (TG), difração de raios X (DRX) e análise térmica diferencial (ATD) em amostras de lama de ETA seca.

Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que a lama de ETA de Leopoldina apresenta grande potencial de ser aplicado na fabricação de cerâmica vermelha, já que o mesmo apresentou propriedades químicas e mineralógicas muito semelhantes às da argila da região, sendo este rico em óxidos de alumínio, ferro e silício, sendo composto pelos argilominerais caulinita e por hematita, e de particulados finos, além de apresentar um índice de plasticidade dentro dos limites recomendados para a cerâmica vermelha. Entretanto, os autores sugerem a aplicação moderada deste resíduo, visto que a amostra apresentou um limite plástico acima do recomendado para a dada aplicação, podendo assim gerar problemas durante o processo de secagem da cerâmica.

Visando a avaliar os impactos causados pela utilização de lama de ETA na confecção de blocos intertravados cerâmicos, Roldão (2020) inicialmente caracterizou diferentes resíduos e a argila da região do Amazonas, através da aplicação dos métodos de FRX, DRX, análise térmica, granulométrica e de índice de plasticidade. Em seguida foram preparados corpos de prova contendo 10% e 20% em massa da lama, que foram sinterizados a 900 °C, 1.000 °C e 1.100 °C, onde posteriormente foram determinadas a massa específica aparente, resistência à compressão, absorção de água, e retração linear. Com base nos resultados obtidos, o autor verificou que a composição química de ambas as amostras eram semelhantes, bem como suas características mineralógicas. Verificou-se também que os blocos confeccionados com os diferentes tipos de lama, e nas diferentes temperaturas, apresentaram respostas diferentes nas análises realizadas, onde, pode-se constatar que uma das amostras da lama de ETA, ao ser adicionada em uma dosagem de 10% em massa, e sinterizada a 1.000 °C, apresentaram melhores resultados com relação à absorção de água, retração linear, porosidade e massa específica aparente, e resistência à compressão, confirmando assim a viabilidade da reutilização deste resíduo para esta aplicação.

Já Santos et al. (2018) buscaram apresentar uma alternativa à produção de produtos cerâmicos através da utilização de geopolímeros. Para este fim, os autores trataram e calcinaram o resíduo da ETA, bem como o caracterizaram antes e após as etapas de tratamento. A lama calcinada foi submetida ao processo de geopolimerização, e os corpos de prova produzidos foram curados durante 1, 7 e 28 dias, onde após a cura foram realizadas análises de FRX, DRX, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e resistência à compressão. Por meio dos resultados, os autores constataram a viabilidade da aplicação do lodo da ETA na produção do geopolímero, por conta da presença de compostos de alumínio e sílica em sua composição, bem como o geopolímero produzido, endurecido e após um dia de cura, já apresentou valores de resistência superiores aos estabelecidos pelas normas brasileiras. Assim, os autores constataram a possibilidade de produzir produtos cerâmicos partindo de geopolímeros, bem como sugeriram aprimoramentos ao método de forma a otimizar as características do produto gerado.

Agricultura e recuperação de áreas degradadas

A lama da ETA é rica em compostos metálicos, tanto os provenientes da água tratada, como os adicionados ao longo do processo de tratamento por conta da utilização de floculantes e outros aditivos químicos, a exemplo do ferro (Fe) e manganês (Mn), que geralmente apresentam concentrações significativas. Nesse sentido, este resíduo apresenta grande potencial de ser utilizado na agricultura, e recuperação de áreas degradadas, já que, por conta de sua composição, este pode atuar promovendo a correção de micronutrientes do solo, possibilitando assim uma boa fertilidade e fixação da vegetação no solo (Neves, 2019).

Neves (2019) realizou estudos acerca do teor de manganês presente na lama de ETA de Sengés-PR, com o objetivo de verificar o potencial de utilização deste resíduo como fertilizante a ser aplicado no plantio de soja, na correção do micronutriente manganês (Mn), sendo este muito importante nos processos de fotossíntese e de transformação de nitratos para nitritos. Para isto, o autor realizou teste preliminar, onde verificou a presença do Mn no resíduo através do método de absorção atômica. Após a confirmação, o autor realizou nova amostragem, secagem e calcinação do resíduo, no qual foram realizadas análises de teor de sólidos fixos e totais, bem como a caracterização deste por absorção atômica. Com base nos resultados obtidos, onde verificou-se que o resíduo final apresentou grande percentual de agregado mineral, sendo este composto majoritariamente de manganês, concluiu-se que a lama de ETA analisada apresentou grande potencial de aplicação como fertilizante, bem como geraria benefícios financeiros por ser uma alternativa aos fertilizantes comerciais.

Conforme abordado por Alessi (2018), no Brasil não há legislação que especifique parâmetros aceitáveis de determinados contaminantes para a lama de ETA na qual destinação é a aplicação agrícola, sendo somente estabelecidos parâmetros para a lama de ETE, onde o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) especifica limites dos teores de cádmio, chumbo e cobre. Visando a avaliar se a lama oriunda da ETA de Guaíba atende aos requisitos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 375/2006 (Brasil, 2006) para a lama de ETE, com relação às concentrações destes metais, o autor realizou análise de determinação dos metais por voltametria de redissolução anódica com pulso diferencial. A partir dos resultados obtidos, o autor verificou que o resíduo analisado apresentou um teor de chumbo superior ao limite aceitável, sendo necessária uma maior avaliação deste resíduo para possível aplicação na agricultura; bem como verificou que o método de análise utilizado se apresentou como boa ferramenta para monitoramento deste resíduo. Já Schmidt (2019) realizou o mesmo estudo com o objetivo de avaliar somente o teor de chumbo presente nas lamas das ETA de Cachoeirinha, Gravataí e Guaíba através da espectroscopia de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e forno grafite, onde a autora verificou teores de chumbo inferiores ao estabelecido pelo CONAMA, possibilitando assim a aplicação deste resíduo para propósitos agricultáveis.

Já Moreira et al. (2007) avaliou a aplicação de lama de ETA de Ceilândia na recuperação de uma área degradada, através da comparação do solo onde foi adicionado o lodo, uma cascalheira desativada, e uma região preservada, das quais foram coletadas amostras para análise de resistividade elétrica, DRX, espectroscopia de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente, espectrofotometria de absorção atômica e UV/Vis e matéria orgânica. Os autores concluíram, com base nos resultados obtidos, que a utilização da lama de ETA para recuperação de áreas degradadas é promissora, já que foi identificado um alto teor de fósforo e matéria orgânica das amostras analisadas, possibilitando assim a diminuição da toxicidade do solo por conta da redução do alumínio, e o desenvolvimento da vegetação no local.

Reaproveitamento de sulfato de alumínio

O sulfato de alumínio, quando em solução, é expresso como um sal corrosivo com caráter ácido, necessitando de adequado acondicionamento, e podendo quando adicionado em água, formar hidróxidos de carga superficial positiva, que acabam por neutralizar as cargas de sinal oposto dos colóides em suspensão na água, prendendo-os na sua estrutura floculenta e removendo a turbidez da água (Gasola et al., 2015). Além disso, considera-se o composto como o coagulante mais utilizado no Brasil para tratar água destinada ao abastecimento, devido a sua grande eficiência na remoção de sólidos suspensos e baixo custo de aquisição (Lemos et al., 2020).

O processo de coagulação/flocação gera de forma evidente uma quantidade considerável de lodo de ETA com grande teor de alumínio, dificultando sua disposição e tratamento, e sendo necessária a utilização de alternativas para evitar seus impactos (Guimarães, 2014). Logo, a possibilidade de extrair o sulfato de alumínio do resíduo gerado durante o processo, torna-se uma alternativa interessante, e Grotto et al. (2021) aborda essa temática. Os autores realizaram processos de caracterização tanto do lodo quanto do efluente, realizaram a recuperação do coagulante, realizaram ensaios de coagulação e compararam o coagulante obtido e o comercial, sendo essa comparação realizada usando os parâmetros de redução de turbidez, remoção de íons Cu^{2+} e Pb^{2+} , bem como alteração do pH.

O estudo concluiu que há a possibilidade de recuperação do coagulante a partir do lodo de ETA, além de ser possível recuperar também o coagulante a partir de um lodo residual gerado em tratamento realizado já com o material recuperado, sendo portanto, um processo viável em mais de uma vez. Por fim, os ensaios realizados mostraram que o sulfato de alumínio recuperado tem sua eficiência mantida, viabilizando sua reutilização no processo de tratamento de efluentes, obtendo ainda características semelhantes ao efluente tratado com sulfato de alumínio comercial, sendo portanto, uma alternativa viável para reutilização do lodo, evitando assim impactos ambientais mais severos, e conservando os recursos naturais.

Barreiras impermeabilizantes em aterros sanitários

As barreiras impermeabilizantes são amplamente utilizadas como forma de evitar que os contaminantes que são produzidos no aterro sanitário acabem se propagando e, consequentemente, atingindo o subsolo e águas subterrâneas, sendo então dispositivos utilizados quando o objetivo é reter a maior quantidade possível de líquidos percolados para se evitar a entrada de água no aterro. Antigamente essas barreiras eram constituídas de solos compactados, podendo hoje ter em sua composição emulsões asfálticas, solo-cimento, misturas de areia e bentonita, polietileno (PE), cloreto polivinílico (PVC), clorosulfurado, membranas de bentonita, polietileno clorado e borracha butílica (Locastro e Angelis, 2016).

Assim, Gonçalves et al. (2016) propõe o lodo de ETA como sendo uma alternativa interessante quando misturado ao solo, em camadas impermeabilizantes de fundo, e como cobertura diária e final de aterros sanitários. Os autores demonstraram que os coeficientes de permeabilidade apresentaram valores menores para o solo argiloso, e próximo para os solos arenosos, sendo ambos comparados ao solo compactado sem adição do lodo, evidenciando potencial no acúmulo de percolados dos aterros e validando a indicação da aplicação do lodo ao solo para a construção das barreiras. Outro fator que se mostrou interessante foi a codisposição do lodo, minimizando seu volume nos aterros.

Além disso, devido a possibilidade de utilização do solo-cimento como barreira impermeabilizante, sugere-se estudos aprofundados do solo-cimento incorporado com lodo de ETA, visto que, como explicitado no presente estudo, sua incorporação é possível neste material, sendo necessária análise das características físicas e químicas do novo material e sua interação com o meio desejado.

Conclusão

Diante dos resultados discutidos, vê-se então que estudos envolvendo a aplicação da lama de ETA em distintos campos da sociedade são relevantes, visto a versatilidade do material e, por ser um rejeito de um processo amplamente aplicado, seu baixo custo, ajudando assim a diminuir os impactos ambientais decorrentes do seu descarte e dando uma nova perspectiva para o seu uso.

No âmbito industrial, viu-se que os custos associados à lama de ETA derivam mais do seu processo de descarte, sendo assim, foram apresentadas alternativas para a sua utilização que visassem tanto a diminuir o custo de compra de materiais novos, como a diminuir os custos associados ao descarte propriamente dito. Sendo assim, o presente estudo apresentou alternativas, dentre elas, a utilização da lama em cimento e argamassa, sendo o material promissor em ambas as aplicações desde que com correta dosagem, a fim de se evitar problemas na integridade do produto final. O potencial adsorptivo se mostrou um ponto de relevância para a lama de ETA, que apresentou grande potencial para a adsorção de metais pesados como chumbo, níquel e zinco, demonstrando relevância de estudos mais aprofundados para averiguar seu potencial e diferentes condições.

Demonstrou-se também potencial de extração do sulfato de alumínio da lama de ETA, onde o coagulante reutilizado não mostrou diferenças frente ao comercializado, podendo ainda ser extraído ao longo de diversos processos e evitando os impactos decorrentes da obtenção do sulfato de alumínio na natureza. A extração desse material é ainda relevante para a decantação de ETAR, visto que ele possui grande capacidade de remoção das espécies de interesse do processo. Em contrapartida, quando aplicado ao solo destinado à recuperação do ambiente, o lodo de ETA, mostrou-se promissor devido à redução do teor de alumínio no solo, e aumento dos teores de fósforo e matéria orgânica no mesmo.

Por fim, até mesmo aplicações no âmbito civil, como a fabricação de telhas e tijolos, são promissoras para a utilização do lodo de ETA, visto suas características químicas e mineralógicas semelhantes com a argila, sendo a aplicação moderada necessária, visto o limite plástico do produto final ser acima do recomendado. O lodo de ETA se mostrou ainda um material interessante para ser incorporado nas barreiras impermeabilizantes, demonstrando impedir a percolação do chorume presente no meio.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- Alessi, I. A. G. **Voltametria de pulso diferencial como alternativa no monitoramento de cádmio, chumbo e cobre em lodo de estações de tratamento de água para sua possível utilização na agricultura**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018. (Trabalho de conclusão de curso).
- Brasil. **Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=497>. Acesso em: 23 nov. 2021.

- Coelho, G. M. R. **Avaliação da capacidade reativa de uma lama de ETA para a remoção de metais pesados de escorrências rodoviárias.** Covilhã: Universidade da Beira Interior, 2016. (Dissertação de mestrado).
- Freitas, Y. R. **Estudo do comportamento de argamassas cimentícias e geopoliméricas com a incorporação de resíduo de ETA.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018. (Trabalho de conclusão de curso).
- Gasola, D. L.; Marquezi, S. L.; Azzolini, J. C. Comparação entre o uso do sulfato de alumínio e do hidroxicloreto de alumínio no tratamento de água para geração de vapor. **Unoesc & Ciência - ACET**, v. 6, n. 1, p. 7-18, 2015.
- Gonçalves, F.; Souza, C. H. U.; Tahira, F. S.; Fernandes, F.; Teixeira, R. S. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista DAE**, v. 65, n. 205, p. 5-14, 2016. <https://doi.org/10.4322/dae.2016.018>
- Grotto, L. G.; Menegoni, V. L.; Schumann, C.; Ruchel, C. K. Reutilização de sulfato de alumínio recuperado a partir do lodo de ETE - Estação de Tratamento de Efluentes. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 3, n. 3, p. 2-16, 2021.
- Guimarães, P. S. **Tratamento de águas residuárias oriundas da purificação do biodiesel por coagulação empregando sulfato de alumínio e quitosana: avaliação preliminar.** Brasília: Universidade de Brasília, 2013. (Dissertação de mestrado).
- Lemos, K. S.; Aguiar Filho, S. Q.; Cavallini, G. S. Avaliação comparativa entre os coagulantes sulfato de alumínio ferroso e policloreto de alumínio para tratamento de água: estudo da viabilidade econômica. **DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, v. 7, n. 1, p. 109-119, 2020. <https://doi.org/10.20873/uftv7-7824>
- Locastro, J. K.; Angelis, B. L. D. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 200-210, 2016. <https://doi.org/10.5902/2236117019963>
- Meert, R. L. B. **Concreto com incorporação de lodo de estação de tratamento de água in natura como agregado miúdo.** Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019. (Trabalho de conclusão de curso).
- Moreira, R. C. A.; Boaventura, G. R.; Nascimento, C. T. C.; Guimarães, E. M; Oliveira, R. P. Uso do lodo químico, rico em alumínio, produzido pela estação de tratamento de água do Rio Descoberto para a recuperação de uma área degradada. **Geochimica Brasiliensis**, v. 21, n. 1, p. 22-35, 2007.
- Neves, D. S. **Análise da viabilidade técnica do uso, na agricultura, do lodo de ETA com elevado teor de manganês.** Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019. (Trabalho de conclusão de curso).
- Oliveira, A. B. F. **Potencial de reutilização de lamas de ETA para remoção de sulfatos - caso de estudo:** ETA de Santa Águeda. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2020. (Dissertação de mestrado).
- 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 1: caracterização do lodo. **Revista Matéria**, v. 19, n. 3, p. 204-211, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762014000300003>
- Ribeiro, R. F. **Estudo de dosagem de lodo de ETA em argamassa.** Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. (Trabalho de conclusão de curso).

Rodrigues, L. P.; Holanda, J. N. F. Influência da incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. *Cerâmica*, v. 59, n. 352, p. 551-556, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000400010>

Roldão, A. J. L. N. **Adição de lodo de ETA de Manaus em massa argilosa para obtenção de cerâmica para pavimentação.** Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2020. (Dissertação de mestrado).

Sampaio, D. J. R. **Análise da viabilidade técnica da utilização de lama de ETA para substituição parcial de cimento na produção de betão.** Porto: Universidade do Porto, 2017. (Dissertação de mestrado).

Santana, J. E. **Estudo do lodo da ETA Agrestina Nova para adição em componentes cerâmicos e na obtenção de argilas aniônicas.** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2019. (Dissertação de mestrado).

Santana, J. F.; Santos, B. R.; Resende, B. O. Utilização da casca de banana como biossorvente para adsorção de metais pesados viabilizando sua utilização em águas residuárias da indústria galvânica. *Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation*, v. 8, n. 1, p. 143-157, 2020.

Santos, G. Z. B.; Melo Filho, J. A.; Manzato, L. Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado. *Cerâmica*, v. 64, n. 370, p. 276-283, 2018. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643702353>

Schmidt, A. V. **Determinação de chumbo em lodo de estação de tratamento de água visando a sua possível utilização na agricultura.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. (Trabalho de conclusão de curso).

Silva, D. C. M. **Valorização de lamas de ETA na operação de decantação primária assistida em ETAR.** Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2017. (Dissertação de mestrado).

Silva, N. P. **Utilização de diferentes materiais como adsorventes na remoção de nitrogênio amoniacial.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2015. (Dissertação de mestrado).

Silva, S. J. C. P. **Estudo da eficiência da codigestão de lamas de ETAR através da incorporação de lamas de ETA.** Minho: Universidade do Minho, 2014. (Dissertação de mestrado).



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.