

Emprego do lodo de uma estação de tratamento de água beneficiado como material suplementar ao cimento Portland

Use of sludge from a water treatment plant processed as a supplementary material to Portland cement

Gabriele Ferreira¹ , Kelvin Techera Barbosa¹ , Maurício Silveira Quadro¹ , Guilherme Höer Trindade¹ , Rafael Beltrame¹ , Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli¹ , Robson Andrezza^{1*} 

RESUMO

O lodo de estação de tratamento de água (ETA), resíduo Classe II A, tem geração crescente, alto custo de tratamento e, quando descartado incorretamente no meio ambiente, acarreta danos ambientais. Assim, o objetivo do estudo foi analisar o emprego do lodo da ETA Santa Bárbara, da cidade de Pelotas/RS, beneficiado por calcinação a 600°C, como material suplementar ao cimento Portland. Amostras do lodo *in natura* e calcinado foram submetidas a ensaios de microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de raios X por dispersão de energia, e foram determinadas a umidade do lodo *in natura*, a perda de massa e a massa específica do lodo calcinado. Realizaram-se ensaios de índice de atividade com cimento branco, cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) e cal para identificar a atividade pozzolânica do material. Posteriormente, foi executada a moldagem de dois traços de concreto, um de referência e outro com 10% em massa de substituição do aglomerante pelo lodo beneficiado, sendo analisadas as propriedades nos estados fresco e endurecido do concreto. Embora a incorporação do lodo tenha apresentado resultados favoráveis e aumento de resistência à compressão axial, o resíduo não pode ser classificado como pozolana por causa dos materiais e condições de ensaio empregadas na pesquisa. Contudo, com os resultados obtidos neste trabalho é possível averiguar que o uso do lodo beneficiado em matrizes de concreto é efetivo e constitui uma alternativa sustentável de destinação ao lodo de ETA.

Palavras-chave: saneamento; resíduo; matrizes de concreto; materiais pozzolânicos.

ABSTRACT

The sludge from the Water Treatment Plant (WTP), Class II A waste, has an increasing generation, high treatment cost and, when improperly disposed of in the environment, causes environmental damages. Thus, the objective of the study was to analyze the use of sludge from WTP Santa Bárbara, in the city of Pelotas, Rio Grande do Sul, benefited by calcination at 600°C, as a supplementary material to Portland cement. Samples of *in natura* and calcined sludge were subjected to SEM and EDS tests, the moisture of the *in natura* sludge was determined, and the loss of mass and specific mass of the calcined sludge. Activity index tests were performed with white cement, Portland cement CPV-ARI and lime, to identify the pozzolanic activity of the material. Subsequently, the molding of two concrete strips was carried out, one of which is a reference and the other with 10% by mass of substitution of the binder by the processed sludge, and the properties in the fresh and hardened state of the concrete were analyzed. Although the incorporation of the sludge has shown favorable results and increased resistance to axial compression, the residue cannot be classified as pozzolan to the detriment of materials and test conditions employed in the research. However, with the results obtained in this work it is possible to verify that the use of the processed sludge in concrete matrices is effective and constitutes a sustainable alternative for the disposal of WTP sludge.

Keywords: sanitation; waste; concrete matrices; pozzolanic materials.

¹Universidade Federal de Pelotas - Pelotas (RS), Brasil.

*Autor correspondente: robsonandrezza@yahoo.com.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - G1Capes 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Bolsa Produtividade PQ-2) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS - 17/2551-0001185-6).

Recebido: 14/09/2020 - **Aceito:** 13/10/2021 - **Reg. Abes:** 20210035

INTRODUÇÃO

O lodo de estação de tratamento de água (ETA), que pode ser considerado o principal resíduo produzido na atividade de potabilização de água (FERONE *et al.*, 2019), é um resíduo sólido de Classe II A (ABNT, 2004; MARASCHIN *et al.*, 2020), que acompanha a crescente necessidade por água potável e o crescimento econômico das cidades. Com isso, verifica-se a necessidade de uma gestão sustentável desse resíduo gerado (HOWE *et al.*, 2016). O conceito de desenvolvimento sustentável foi concebido no relatório *Brundtland* como o “desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1991).

De modo geral, considera-se como lodo proveniente de ETA o resíduo gerado na etapa de decantação, composto de sólidos suspensos, acrescido de produtos químicos reagentes utilizados nos processos de tratamento (RICHTER, 2001). O Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas (SANEP) é a empresa responsável pela ETA Santa Bárbara, que fornece água potável para 50% da população de Pelotas, faz uso de policloreto de alumínio (PAC) como coagulante e possui vazão diária de 40 milhões de litros de água (SANEP, 2018).

No Brasil, o lodo de ETA é comumente lançado em corpos hídricos sem tratamento prévio, contaminando o meio ambiente por conta de algumas de suas características, tais como a presença de metais pesados, a elevada quantidade de sólidos, a alta demanda química de oxigênio (DQO) e a alta turbidez (KATAYAMA *et al.*, 2015; RICHTER, 2001). Todavia, as propriedades físico-químicas do lodo de ETA demonstram sua semelhança com materiais da construção civil e justificam seu uso como matéria-prima ambientalmente correta na fabricação de materiais cerâmicos, cimentícios, como substituição parcial de cimento Portland, na pozolana artificial, entre outros (SANTOS; MELO FILHO; MANZATO, 2018).

A cadeia produtiva da construção civil é consolidada como a principal consumidora de matérias-primas e uma das principais geradoras de resíduos (JOHN, 2000). O cimento Portland, matéria-prima essencial para a produção do concreto, sendo o material construtivo de maior destaque e consumo do ramo da construção civil (HELENE; ANDRADE, 2010), é composto essencialmente de cal, sílica, alumina e óxido de ferro (BAUER, 2019a).

Diante disso, a composição química mais comum de lodos de ETA são justamente os óxidos de alumínio, ferro e silício presentes na fabricação do cimento Portland (RUVIARO *et al.* 2020), o que demonstra a possibilidade de reciclagem do resíduo de ETA na indústria da construção civil. Diversas pesquisas realizaram a incorporação de lodo de ETA em concretos e analisaram seu potencial pozolânico (GASTALDINI *et al.*, 2015; GODOY *et al.*, 2019; GOMES *et al.* 2020; HAGEMANN *et al.*, 2019).

As pozolanas produzem compostos com propriedades cimentantes na reação química de hidróxido de cálcio na presença de água. O uso desses materiais melhora o manuseio do concreto, aumenta a resistência aos ataques de sulfatos, reduz a percolação de água, diminui o calor de hidratação, reduz o risco de eflorescência e de reação álcali-agregado (ABNT, 2014b). Para Gomes *et al.* (2019), a resistência à compressão de materiais cimentícios é inversamente proporcional a sua adição de lodo de ETA, sendo necessários, portanto, estudos para cada caso.

A incorporação do lodo de ETA na fabricação de materiais para a construção civil, além de resultar em ganhos para o meio ambiente, evitando sua degradação e possibilitando um descarte sustentável, evita a extração de mais

matérias-primas para a fabricação de novos produtos. Sendo assim, avaliou-se o potencial do emprego do lodo de ETA, beneficiado por calcinação, como material suplementar ao cimento Portland.

METODOLOGIA

Beneficiamento do lodo

O lodo *in natura*, com aspecto pastoso e alto teor de umidade, foi coletado na ETA Santa Bárbara, em Pelotas/RS, durante limpeza dos decantadores após período de chuvas. A fim de eliminar a umidade, o lodo foi seco em estufa a 100°C, tornando-se um material pulverulento com alguns grumos densificados. Posteriormente, no intuito de destorroar esses grumos e aumentar a superfície específica desse material, as amostras foram submetidas a processos de moagem em moinho de jarros com esferas cerâmicas, por aproximadamente 3 horas. Por fim, esses finos foram queimados em forno mufla à temperatura de 600°C por 4 horas, procedimento seguido de um resfriamento em temperatura ambiente, que deu origem ao lodo beneficiado. O processo de beneficiamento do lodo de ETA foi repetido quatro vezes, conforme os estudos de Gastaldini *et al.* (2015) e Hagemann *et al.* (2019).

Caracterização físico-química e análise de superfície do lodo

A umidade do resíduo foi analisada seguindo procedimentos da norma *Standard methods for the examination of water & wastewater* (APHA, 2012). A determinação da massa específica do lodo pós-incineração deu-se por meio de procedimentos da norma brasileira (NBR) 16605 (ABNT, 2017). A perda de massa foi realizada conforme os procedimentos da Associação Brasileira de Fundição — ABIFA (2015).

As amostras de lodo seco e de lodo beneficiado passaram por um processo de metalização com ouro para a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDS). O equipamento para a MEV foi do modelo JSM-6610LV da JEOL, possui resolução de 3 nm, modo de alto e de baixo vácuo e trabalha com tensões que podem variar até 30 Kv. Tais ensaios permitem a obtenção das composições químicas e a análise microscópica da superfície das amostras, e seus resultados podem expressar quais são as alterações no material decorrentes da submissão a elevadas temperaturas (HOLLER; SKOOG; CHOURCH, 2009).

Atividade pozolânica

A determinação do índice de desempenho pozolânico do lodo beneficiado seguiu os procedimentos das normas NBR 5752 (ABNT, 2014a) e NBR 13956-3 (ABNT, 2012b) e foi realizado com cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) e cimento branco não estrutural, pois ambos não apresentam nenhum tipo de adição pozolânica em sua constituição. Foram realizados ensaios de resistência à compressão nas idades de sete e 28 dias, para ambos os cimentos.

Outro parâmetro analisado foi a determinação do índice de atividade pozolânica do lodo beneficiado com cal, aos sete dias, pela análise dos resultados de resistência à compressão, conforme a NBR 5751 (ABNT, 2015). A cal empregada nesta investigação foi do tipo hidratado dolomítico CH II.

A cura de sete dias dos corpos de prova (CP) foi realizada nos próprios moldes metálicos de dimensões 5 x 10 cm, que permaneceram vedados durante todo o processo. Nas primeiras 24 horas de cura, os CP foram mantidos em ambiente à temperatura de aproximadamente 23°C; nas 144 horas posteriores, foram mantidos em estufa à temperatura de 55°C até a data de ruptura, aos sete dias.

Produção dos corpos de prova

Dosagem e índice de desempenho com cimento

Foi preestabelecido que o concreto deveria atender à classe estrutural C25 ou superior, mantendo-se fixos os parâmetros de dosagem, consumo de aglomerante, relação de água/aglomerante e teor de argamassa, variando somente o teor de substituição em 10% em peso do lodo beneficiado em relação ao cimento. Cada traço foi dosado para a moldagem de seis CP com dimensões de 5 x 10 cm, sendo seis para o traço de referência e seis para o traço com lodo beneficiado (C10), totalizando 12 CP cilíndricos de concreto. Em razão das limitações para a obtenção do lodo beneficiado, empregou-se a brita 0 como agregado graúdo, possibilitando a redução do consumo do lodo beneficiado e a moldagem de CP de concreto menores que os habituais, com 10 x 20 cm.

Os traços de referência foram dosados conforme a NBR 13956-3 (ABNT, 2012b), e os traços com lodo beneficiado foram realizados com cimento branco e cimento Portland CPV-ARI. Cabe ressaltar que, embora a normativa para a determinação do índice de desempenho com cimento para materiais pozolânicos seja a NBR 5752 (ABNT, 2014a), optou-se por utilizar a NBR 13956-3 (ABNT, 2012b), pois o teor de 25% de lodo beneficiado em substituição ao cimento (argamassa B) aumentou significativamente a demanda de água do material. Contudo, a normativa específica que se deve utilizar aditivo para regular o abatimento com o traço de referência sem o resíduo. O índice de consistência foi obtido conforme especificações da NBR 7215 (ABNT, 2019).

Na Tabela 1 se encontram os traços para os CP com cimento. A argamassa A foi o traço de referência para quatro CP e executada com cimento branco; a argamassa B, para quatro CP, teve 25% de lodo beneficiado, cimento branco e superplastificante; a argamassa C foi o traço de referência para a execução de seis CP, com cimento branco; a argamassa D foi feita para seis CP, com 10% de lodo beneficiado e cimento branco; a argamassa E foi feita para seis CP de referência, com cimento CPV-ARI; e a argamassa F, para seis CP, foi feita com 10% de lodo beneficiado e cimento CPV-ARI.

A quantidade de superplastificante (0,5%) dosado para a argamassa D visou à obtenção do mesmo índice de consistência da referência (argamassa C). As aberturas obtidas para o índice de consistência dos traços com cimento branco foram de 230 mm para o traço C e de 175 mm para o traço D. Embora não se tenham obtido índices similares, optou-se por fixar o uso de aditivo em 0,5% em relação ao aglomerante, evitando a retardação da pega do cimento.

Tabela 1 - Traços de cimento Portland e abatimentos para as argamassas A, B, C, D, E e F, com cimento.

Materiais	A	B	C	D	E	F
	Massa (g)					
Cimento Branco	416	312	624,0	561,6	-	-
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	-	-	-	-	624,0	561,6
Lodo Beneficiado	-	104	-	62,4	-	62,4
Areia Normal	1.248	1.248	1.872	1.872	1.872	1.872
Água	200	220	300,0	322,2	300,0	322,2
Aditivo Superplastificante	-	5,3	-	3,12	-	3,12
Abatimento (mm)	230	185	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Atividade pozolânica

A água adicionada correspondeu à quantidade necessária para obter um índice de consistência de 225 ± 5 mm, e a massa do material pozolânico, no caso o lodo beneficiado (236,5 g), foi obtida com sua massa específica e a do hidróxido de cálcio ($2,30 \text{ g.cm}^{-3}$). Embora a norma não demande um traço de referência, optou-se por realizá-lo para fins comparativos. A massa de hidróxido de cálcio utilizada no traço GA (de referência) foi a soma das massas de 208 g, obtida somando a massa de 104 g prevista para o traço com pozolana (traço GB). Os ensaios de atividade pozolânica com cal seguiram procedimentos da norma NBR 5751 (ABNT, 2015), e os traços utilizados para a moldagem de três CP encontram-se na Tabela 2.

Análise em estado fresco

A análise em estado fresco foi feita por meio do índice de consistência para ambos os traços de concreto. Na dosagem do concreto, por efeito da substituição parcial do cimento por um novo material com massa específica diferente, alguns ajustes são necessários, porém provocam alteração no peso dos agregados. A Tabela 3 apresenta a massa dos materiais que constituíram os traços de referência e o traço com 10% de lodo beneficiado (C10).

Tabela 2 - Traços para a moldagem de corpos de prova com hidróxido de cálcio.

Materiais	Argamassa GA (REF)	Argamassa GB
	Massa (g)	
Hidróxido de Cálcio	312	104
Areia Normal	936	936
Material Pozolânico	-	236,5
Água	245,1	381,7

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Tabela 3 - Traços de concreto com cimento Portland de alta resistência inicial dosados em massa.

Materiais	REF	C10
	Massa (kg.m ⁻³)	
Cimento CPV-ARI	434,5	390,5
Cinza	-	43,4
Areia	797,76	796,6
Brita 0	881,4	880,2
Água	186,9	186,6
Superplastificante	0,22%	0,55%

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Verificou-se no ensaio o comportamento do concreto para três e 30 golpes na mesa de índice de consistência, conforme procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016). Com recurso à inspeção visual do concreto, foi possível aferir as propriedades físicas de desagregação, coesão e exsudação.

Análise em estado endurecido

Para a análise do estado endurecido, foi realizado o ensaio de compressão axial, conforme procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 2019). Os CP de concreto foram vedados após sua moldagem para evitar a perda de umidade e, realizada a desmoldagem, foram submetidos à cura por submersão total até a data de ruptura aos sete, 11 e 16 dias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

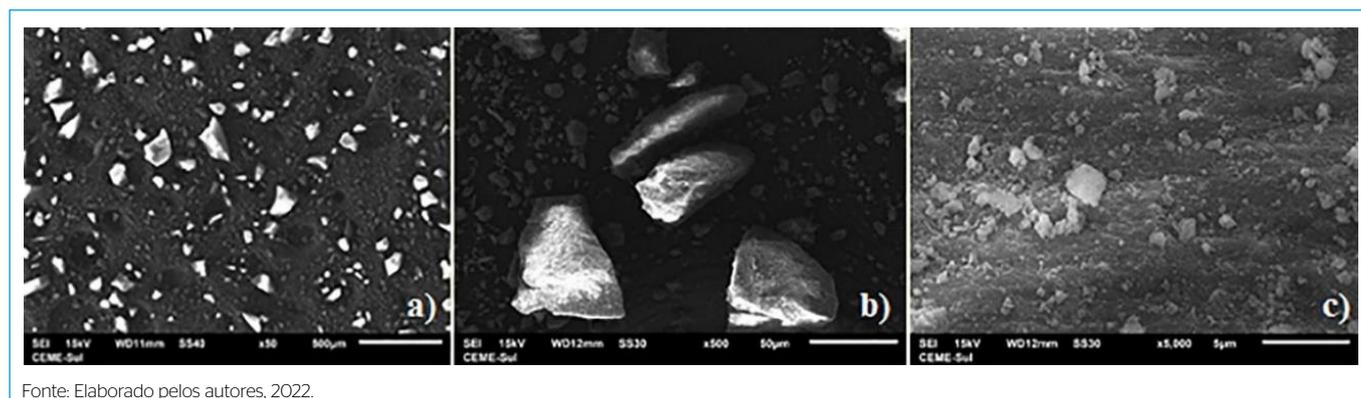
Caracterização físico-química e análise de superfície – microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de raios X por dispersão de energia

O teor de umidade obtido com o lodo *in natura* foi de aproximadamente 95,5%, valor considerado alto, mas consoante ao esperado para lodos provenientes do uso de coagulantes à base de alumínio, conforme Richter (2001). O valor encontrado por Castão *et al.* (2017), de 77,03% de umidade para o

lodo de Guarulhos/SP, foi abaixo do encontrado nesta pesquisa. Já o lodo de Marrocos, analisado por Dahhou *et al.* (2017), apresentou umidade de 95,2%, muito próxima à do lodo estudado. A massa específica média do lodo beneficiado foi de 2,615 g.cm⁻³, valor semelhante ao de 2,16 g.cm⁻³ encontrado por Buselatto *et al.* (2019) para o lodo de Gravataí/RS e ao de 2,61 g.cm⁻³ encontrado por Gonzalez *et al.* (2020) para o lodo de Barranquilla, na Colômbia.

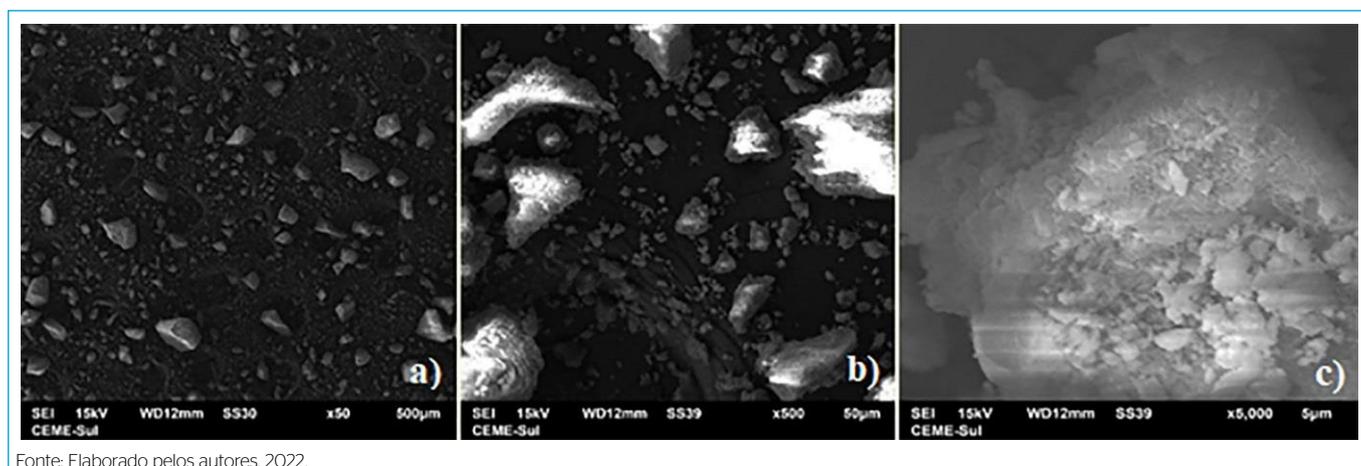
A perda de massa, sob a temperatura de 600°C, das amostras do lodo analisado foi de 29,95%, em média. Entretanto, esteve acima do resultado obtido por Ferone *et al.* (2019) para o lodo do sul da Itália, calcinado a 650°C, que demonstrou perda de massa de 23,8%. Já o de ETA de Santa Maria/RS, calcinado a 600°C por Grassi *et al.* (2020), apresentou perda de massa de 33,7%, valor próximo ao do lodo beneficiado nesta pesquisa. O lodo de ETA possui, em quantidades variáveis, matéria orgânica e argilominerais (RICHTER, 2001), elementos estes que são eliminados no processo de calcinação do lodo. Esses componentes prejudicam os produtos para a construção civil, aumentando sua porosidade e diminuindo sua resistência à compressão (BAUER, 2019b; CASTÃO *et al.*, 2017), sendo importante a calcinação do lodo de ETA previamente a sua incorporação na indústria da construção, para eliminar a presença desses elementos (PETTERLE *et al.*, 2018).

As análises por MEV e EDS foram realizadas para o lodo seco a 100°C e para o lodo beneficiado, calcinado a 600°C, e os resultados encontram-se nas Figuras 1 e 2.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Figura 1 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura do lodo seco, ampliadas em x50 (a), x500 (b) e x5.000 (c).



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Figura 2 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura do lodo beneficiado, ampliadas em x50 (a), x500 (b) e x5.000 (c).

Conforme a Figura 1A, verifica-se que o material apresenta partículas com distribuição e tamanho uniformes, apresentando superfície irregular. Na Figura 1B, é possível observar que as partículas do material possuem tamanho aproximado de 50 μm , e que seu exterior apresenta certa rugosidade. Já com relação à Figura 1C, essas partículas exibem aglomerações de componentes do lodo aderidas a sua superfície. As distintas tonalidades observadas são decorrentes de efeito de carregamento metálico de superfície, em que partes claras representam elementos químicos mais pesados como Fe, Ti e Al, presentes no resultado de EDS (Figuras 3 e 4).

Na Figura 2, visualiza-se a presença de rugosidade na superfície com aglomerações de partículas, que se mantiveram no lodo após o processo de beneficiamento. Com o auxílio das figuras obtidas do ensaio de MEV, pode-se verificar que as partículas apresentam formato geométrico poligonal e lamelar, caracterizando elevada superfície específica, que provoca imbricamento quando incorporada ao concreto e dificulta a rolagem das partículas, acarretando maior demanda de água nos traços (BAUER, 2019a).

Ferone *et al.* (2019) encontraram, para o lodo do sul da Itália, partículas lamelares e amorfas, e atribuíram-nas à ligação de silicato presente nas amostras calcinadas. O lodo analisado por Paixão *et al.* (2008) apresentou superfícies relativamente lisas, partículas grossas, multifacetadas, com formas angulares, que, conforme os autores, causaram microtrincas na matriz argilosa à qual o lodo foi incorporado. O lodo de Terra Preta/SP analisado por Silva e Fungaro (2011) demonstrou, por meio de ensaio de MEV, possuir grãos com formatos irregulares e de tamanhos variados, com composições químicas variáveis.

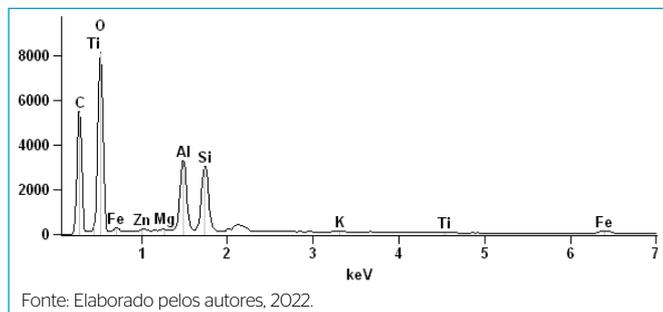
Já para Andrade *et al.* (2018), o lodo de ETA apresentou uma variedade ampla de tamanhos, o que, conforme os autores, melhora o efeito de empacotamento

de argamassas e torna-o apropriado para esse uso. Mansour, Abdel-Shafy e Azab (2020) analisaram microscopicamente o lodo do Egito, que apresentou natureza amorfa e uma superfície porosa, áspera e rugosa, que se justifica, de acordo com os autores, pela presença dos poros na superfície do resíduo pela presença de Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Observa-se, com os resultados do EDS (Figuras 3 e 4) e na Tabela 4, que os componentes detectados foram C, O, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, Zn e Au, sendo os componentes majoritários O, C, Si e Al. Com relação ao carbono, parte de seu percentual refere-se à metalização da amostra por processos necessários para a realização da análise. Isso também vale para o ouro, visto que é possível verificar, pela coloração do material, que a amostra após o processo de queima apresentou mudança de coloração, indo do marrom ao amarelo rosado e indicando a ocorrência da eliminação do carbono.

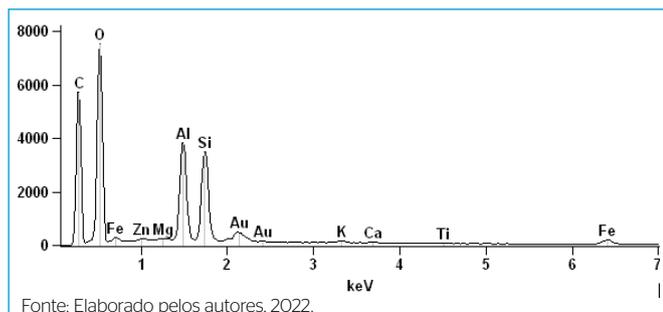
É possível observar, segundo a Tabela 4, que as amostras apresentaram cerca de 9% de sua composição em Si, elemento que compõe a sílica, material fundamental para efetivar o uso do lodo de ETA no concreto. Entretanto, tendo em vista que os teores de carbono e ouro são, em suma, provenientes da preparação da amostra, assim como o oxigênio, que demonstra ligações químicas entre os elementos presentes nos compósitos, ao remover esses teores da análise obtemos um percentual majoritário de Si e Al, o que corresponde a 41,12 e 36,41% para o lodo seco e a 39,79 e 37,26% para o lodo beneficiado, respectivamente. Esperava-se encontrar alumínio em grandes quantidades, tendo em vista que a ETA Santa Bárbara utiliza coagulante de alumínio.

Paixão *et al.* (2008) verificaram, em microanálises químicas no lodo de ETA, a presença de altos teores de O, Fe, Si e Ca, além de proporções menores de K, Ti, Al e Mg. Araújo *et al.* (2015) analisaram o lodo de Meia Ponte/GO e encontraram O, C, Fe, Al, Si, Mg, K em sua composição. Ferone *et al.* (2019) encontraram teores de O, Si, N, Al, Na, K e Mg com a análise por MEV-EDS. O lodo analisado por Mansour, Abdel-Shafy e Azab (2020) demonstrou a presença de C, Mg, Al, Si, Cl, Ca e Fe em sua microestrutura. González *et al.* (2020), ao incorporarem lodo de ETA em argamassas hidráulicas, encontraram os óxidos de alumínio, ferro e silício compondo 90% da composição do lodo calcinado e classificaram-no como material pozolânico com potencial de suplementação de materiais cimentícios.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Figura 3 - Espectrometria de raios X por dispersão de energia da amostra de lodo seco a 100°C.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Figura 4 - Espectrometria de raios X por dispersão de energia da amostra de lodo beneficiado.

Tabela 4 - Composição química em peso (%) das amostras de lodo seco e lodo beneficiado.

Composição química (%)	Lodo seco	Lodo beneficiado
C-K	27,71 ± 0,34	27,58 ± 0,33
O-K	49,99 ± 0,70	45,58 ± 0,63
Mg-K	0,11 ± 0,06	0,20 ± 0,06
Al-K	8,12 ± 0,16	8,72 ± 0,17
Si-K	9,17 ± 0,17	9,31 ± 0,17
K-K	0,37 ± 0,12	0,32 ± 0,06
Ca-K	-	0,22 ± 0,06
Ti-K	0,24 ± 0,10	0,25 ± 0,09
Fe-K	3,73 ± 0,52	3,67 ± 0,49
Zn-K	0,56 ± 0,54	0,71 ± 0,51
Au-M	-	3,41 ± 0,20

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Índice de desempenho com cimento

A adição de 25% de lodo beneficiado demandou mais água do que o traço de referência, sendo necessária a utilização de aditivo para regular o abatimento com o de referência. Embora se tenha utilizado carga de aditivo superplastificante de 1,27% (argamassa B), teor maior que o permitido pelo fabricante, de 1% em relação ao aglomerante, não foi possível obter abatimentos próximos entre as argamassas A e B (Tabela 1). Por sua vez, o alto teor de aditivo, de 5,3%, utilizado na argamassa B acarretou a retardação da pega do cimento, fazendo com que os CP dessa argamassa não endurecessem a tempo para o rompimento aos sete dias. No entanto, a argamassa A já apresentava resistência suficiente para a desforma 24 horas após sua moldagem. Em vista disso, com o intuito de reduzir a demanda por aditivo superplastificante na argamassa com lodo beneficiado, optou-se por utilizar um teor inferior de substituição do resíduo pelo cimento.

A normativa de sílica ativa estipula teor de 10% de substituição em relação ao cimento para a avaliação do potencial pozolânico do material. Com base nesse menor teor de substituição, de 10% em relação ao cimento, foi verificada a viabilidade da confecção e desmoldagem dessas argamassas. A mesma percentagem foi obtida por González *et al.* (2020), que estudaram a incorporação de 10 e 30% de lodo de ETA calcinado a 600 e 800°C em argamassas hidráulicas. No entanto, eles somente obtiveram resultados semelhantes ao traço referencial com 10% de lodo calcinado a 600°C em peso. Os autores verificaram que a resistência à compressão aumenta conforme o tempo, e que houve formação de etringita pela hidratação das pastas e de silicatos de cálcio hidratados em consequência da atividade pozolânica.

Embora os traços das argamassas com cimento branco e cimento CPV-ARI possuam a mesma proporção de material, os índices de consistência foram diferentes. O índice obtido para a argamassa E do traço de referência foi de 197,5 mm e, para o traço que continha o lodo, argamassa F, o valor de 200,33 mm. Após a determinação do índice de consistência das argamassas, identificou-se que o emprego do lodo beneficiado na proporção de 10% aumentou a demanda de água de todas as argamassas, sendo necessário o emprego de aditivos redutores de água. Entretanto, o uso do lodo beneficiado demonstrou eficiência no controle da exsudação.

O traço GB, de argamassa com cal e 10% de lodo de ETA beneficiado, demandou mais adição de água para a obtenção da mesma consistência do traço de referência. O mesmo ocorreu na pesquisa de González *et al.* (2020), os quais precisaram adicionar mais água ao traço das argamassas com 10% de lodo calcinado, em razão da finura das partículas do resíduo, aumentando, portanto, a relação água/cimento (a/c).

Conforme a Tabela 5, o traço que continha 10% de substituição por lodo em relação ao cimento branco apresentou, em ambas as idades, valores de resistência à compressão axial superiores aos do traço de referência. Pode-se depreender

que, para a idade de sete dias, o traço D (10%) obteve resistência superior em 1,53 MPa, o que corresponde a um ganho de 26,48% quando comparado ao traço C. O mesmo comportamento se observou para 28 dias, quando a argamassa que continha lodo demonstrou ganho de 3,74 MPa, correspondendo a 47,88%.

Em relação à atividade pozolânica, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 5, quando utilizados os critérios referentes ao cimento Portland para resultados obtidos em cimento branco se obtêm parâmetros indicativos de que o material pode ser classificado como material pozolânico e como sílica ativa, segundo critérios da NBR 12653 (ABNT, 2014b), em que $I(28d) \geq 90\%$, e da NBR 13956-1 (ABNT, 2012a), em que $I(7d) \geq 105\%$.

De maneira contrária aos resultados com cimento branco, em que o traço contendo lodo beneficiado apresentou ganho significativo de resistência à compressão axial, os dados obtidos com o cimento Portland CPV de alta resistência inicial apontaram perda de resistência para os CP F (10%) em relação à referência. Tal ocorrido pode ser majorado em perda média de 1 MPa para a idade de sete dias, correspondendo a 2,11%, e de 1,43 MPa para a idade de 28 dias, resultando em redução de 2,42%. Contudo, ao analisarmos os resultados de compressão axial de maneira individual, não por média geral, constatamos que as maiores resistências, tanto para a idade de sete quanto para a de 28 dias, se referem ao traço com 10% de substituição por cinza do lodo de ETA, sendo esses resultados 49,61 MPa e 61,17 MPa, respectivamente.

Analisando os dados obtidos quanto à atividade pozolânica no intuito de classificar o material segundo parâmetros instituídos pela NBR 12653 (ABNT, 2014b), que determina que o índice de desempenho de misturas com material pozolânico aos 28 dias deve atingir 90% em relação à mistura de referência, foi possível constatar que o material pode ser considerado uma pozolana, visto que o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias resultou em valor 97,58% maior que o da referência. Esse resultado corrobora os obtidos por Gastaldini *et al.* (2015), que encontraram desempenho 120% maior que o da referência para a mesma temperatura de queima e durante o mesmo período de queima que o efetuado neste trabalho, porém com substituição de 25% de lodo de ETA; e os de Hagemann *et al.* (2019), que apresentaram desempenho 97% maior, nas mesmas condições de temperatura e queima, com substituição de 25% de lodo de ETA.

A diminuição da resistência observada, ainda assim, foi inferior às obtidas na revisão de Gomes *et al.* (2019), que verificaram haver normalmente redução de 5–60% na resistência à compressão para adições de até menos de 10% de lodo como material pozolânico e diminuição de 14–65% da resistência à compressão para adições de 10–30% de lodo.

Contudo, tendo em vista o índice de desempenho aos sete dias, de 97,89%, o material não atingiu o parâmetro necessário de 105% para ser classificado com potencial de sílica ativa, segundo a NBR 13956-1 (ABNT, 2012a).

Tabela 5 - Índice de desempenho à compressão dos traços.

Traço	Resistência Média à Compressão Axial aos 7 dias (Mpa)	Resistência Média à Compressão Axial aos 28 dias (Mpa)	Índice de Desempenho com Cimento Branco (7d)	Índice de Desempenho com Cimento Branco (28d)
C (Ref)	5,77	7,82	-	-
D(10%)	7,30	11,56	126,47%	147,88%
E (Ref)	47,33	58,81	-	-
F (10%)	46,33	57,38	97,89%	97,58%

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Atividade pozolânica com cal

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014b), para ser considerado pozolânico é necessário que o material obtenha resistência mínima, aos sete dias, de 6 MPa no ensaio de atividade pozolânica com cal. Pode-se observar nos resultados médios de resistência à compressão axial, expressos na Tabela 6, que o traço com lodo beneficiado não apresentou resistência suficiente para que o material se classificasse como pozolânico.

Entretanto, na comparação com o traço de referência que contém cal, realizada para fins comparativos, a argamassa com cinza apresentou ganho de 0,71 MPa, o que corresponde a aumento de 42,86%, podendo chegar ao nível exigido de resistência média à compressão em idade mais avançada.

Alguns fatores que podem ter acarretado as baixas resistências obtidas foram a falta de controle dos parâmetros de laboratório e a cal utilizada, que difere na recomendada por norma. Durante o experimento, a temperatura de 55°C não foi possível de ser mantida de maneira constante, e a cal possuía origem de calcário dolomítico; ambos os fatores interferem negativamente no desenvolvimento da atividade pozolânica.

Análise no estado fresco

É possível analisar, na Tabela 7, que, embora o traço C10 tenha em sua composição teor superior de aditivo superplastificante em relação ao aglomerante, de 0,55% comparado ao 0,22% do traço de referência, ele não adquiriu melhor manuseio, similar ao traço sem o uso da cinza. Analisando a Tabela 7, percebe-se perda de 8 mm para o abatimento de três golpes e de 25 mm para o com 30 golpes, resultando em perda no índice de consistência para o traço C10 relacionado à referência de 61,54 e 15,79% respectivamente.

Identifica-se que o traço C10 apresentou consistência mais seca, o que mostra que o material em estudo requer uma demanda superior de água para atingir a mesma trabalhabilidade sem o uso do lodo. Esse fenômeno também foi identificado por Lima (2013), para quem o aumento da demanda de água de amassamento nos concretos foi diretamente proporcional ao teor de substituição do lodo beneficiado. Na pesquisa de González *et al.* (2020) foi necessário aumentar a quantidade de água acima das normas estipuladas.

Observou-se que ambos os traços de concreto realizados não apresentaram segregação e exsudação. Contudo, tendo em vista o aspecto parcialmente

mais seco do traço C10, ele apresenta coesão inferior à do concreto de referência. De maneira geral, ambos os traços de concreto apresentaram comportamento adequado no estado fresco, embora seja importante ressaltar a necessidade de ajustar o teor de aditivo superplastificante para que a mistura produzida com o lodo apresente propriedades similares às do traço de referência, sem ele.

Análise no estado endurecido

Pode-se verificar acréscimo, para o traço C10 em relação à referência, de 9,05 MPa aos sete dias de idade, assim como aumento de 11,31 MPa aos 16 dias, indicando incrementos de 16,31 e 17,04%, respectivamente (Figura 5).

O concreto referência exibiu aumento médio de 10,88 MPa no decorrer de nove dias, correspondendo a incremento de 19,62%. Por outro lado, os CP com 10% de lodo beneficiado demonstraram elevação média de 13,14 MPa na resistência, o que equivale a acréscimo de 20,37% em sete dias. Logo, quando comparados os traços, o concreto C10 desenvolveu elevação da resistência ao longo dos nove dias corridos, superior em 2,26 MPa ao acréscimo da referência, o que corresponde a elevação de 20,75% no ganho de resistência.

É possível perceber que ambos os traços apresentaram resistências à compressão axial muito superiores a 25 MPa aos sete dias, requisito para a utilização para elementos estruturais. O traço que continha lodo beneficiado apresentou, em ambas as idades de ruptura analisadas, valores de resistência média à compressão axial superiores aos do concreto realizado apenas com cimento Portland como aglomerante. Esse melhor desempenho em concretos, provocado por substituição com índice de atividade pozolânica inferior aos limites de norma, podem ser observados no estudo de Gastaldini *et al.* (2015) e Lima (2013). Infere-se, portanto, que os dados demonstram a atividade pozolânica do material, mesmo sem ter atingido os limites mínimos normatizados para a classificação como material pozolânico.

Por fim, embora ainda se necessite de estudos mais aprofundados, os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que o lodo da ETA, quando beneficiado por calcinação, possui elevado potencial para se tornar um material suplementar ao cimento Portland, além de ser uma alternativa sustentável de destinação do resíduo.

Tabela 6 - Ensaio de atividade pozolânica com cal.

Traço	GA (Ref)	GB (cinza)
Resistência média à compressão axial (MPa)	1,66	2,38
Abertura índice de consistência (mm)	200	205
Consumo de água (g)	2451	3817

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Tabela 7 - Índice de consistência do concreto no estado fresco.

Traço	REF	C10
Abatimento - 3 golpes (mm)	13,0	5,0
Abertura índice de consistência - 30 golpes (mm)	158,3	133,3

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

REF: traço de referência; C10: traço com 10% de lodo beneficiado.

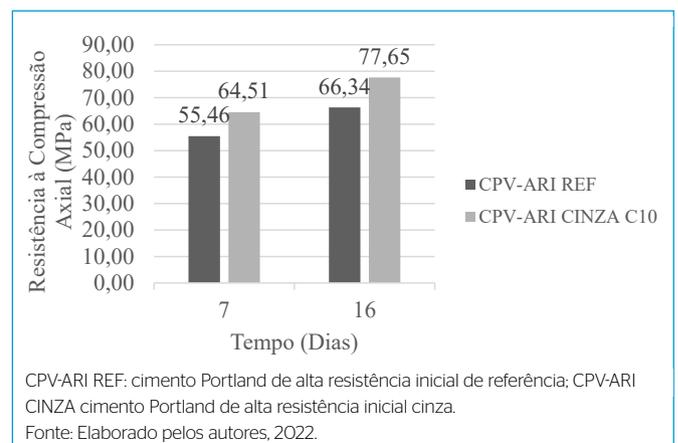


Figura 5 - Resistência média à compressão axial (MPa) aos 7 e 16 dias para os traços de concreto.

CONCLUSÃO

A caracterização física e química por meio de MEV e EDS mostra que o lodo, após o processo de beneficiamento adotado, apresenta partículas com formato geométrico irregular poligonal e lamelar e superfície com certa rugosidade. Ainda foi possível identificar que esse material é constituído majoritariamente de silício e alumínio.

Verifica-se que o aumento da substituição de lodo de ETA para 25% se mostra inviável, pois exige maior demanda de água e aditivo, retardando a pega do cimento e inviabilizando a moldagem. A demanda de mais água e de aditivos plastificantes para a obtenção de melhor trabalhabilidade do material justificam-se pela quantidade de finos do lodo, pela grande área de superfície dos finos e pelo formato de suas micropartículas.

Foi possível identificar o potencial pozolânico do lodo beneficiado nos ensaios realizados, no entanto os limites de norma para sua classificação como material pozolânico não foram atingidos em sua maioria. De forma

geral, ambos os traços de concreto apresentam comportamento adequado no estado fresco, apesar da maior demanda de água e aditivo superplastificante para apresentar propriedades de trabalhabilidade similares ao traço sem o resíduo. A substituição de 10% do aglomerante por lodo de ETA calcinado a 600°C provoca melhora no desempenho de resistência dos concretos à compressão axial.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Ferreira, G.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Escrita – Primeira Redação. Barbosa, K.: Escrita – Primeira Redação. Quadro, M.: Metodologia. Trindade, G.: Conceituação, Metodologia, Administração do Projeto, Escrita – Primeira Redação. Beltrame, R.: Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Morselli, L.B.G.A.: Escrita – Revisão e Edição. Andreazza, R.: Escrita – Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
- ANDRADE, J.J.O.; WENZEL, M.C.; ROCHA, G.H.da.; SILVA, S.R.da. Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. *Journal of Cleaner Production*, [S.L.], v. 192, p. 159-168, ago. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.246>
- ARAÚJO, F.C.; SCALIZE, P.S.; ALBUQUERQUE, A.; ANGELIM, R.R. Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. *Cerâmica*, [s.l.], v. 61, n. 360, p. 450-456, dez. 2015. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613601931>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 10004*: Resíduos sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 13956*: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 13956-3*: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 3: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias. Rio de Janeiro, 2012b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5752*: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, 2014a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 12653*: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. *Materiais para fundição - determinação da perda ao fogo*. Comissão de Estudos de Matérias Primas. São Paulo, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5751*: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 13276*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 16605*: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 7215*: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais de construção*, v. 2.6. Rio de Janeiro LTC, 2019b.
- BAUER, L.A.F. *Materiais de construção*. v. 1, 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019a.
- BAUER, L.A.F. *Materiais de construção*. v. 2, 6. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2019b.
- BRUNDTLAND, G.H. *Nosso futuro comum*: comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.
- BUSELATTO, D.M.; WENZEL, M.C.; ROCHA, G.H.da.; WEBBER, J.; SILVA, S.R.da; ANDRADE, J.J.O. Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 1-21, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190001.0645>
- CASTÃO, E.S.; CASTRO, A.L.de.; MESQUITA FILHO, A.; ROCHA, G.A.da.; SANTOS, S.R.dos. *Reúso de lodo de estação de tratamento de água (ETA) na fabricação de tijolos cerâmicos*. Congresso Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, FENASAN, 2017.

- DAHOU, M.; MOUSSAOUITI, M.E.; ARSHAD, M.A.; MOUSTAHSINE, S.; ASSAFI, M. Synthesis and characterization of drinking water treatment plant sludge-incorporated Portland cement. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, [s.l.], v. 20, n. 2, p. 891-901, 29 jul. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0650-0>
- FERONE, C.; CAPASSO, I.; BONATI, A.; ROVIELLO, G.; MONTAGNO, F.; SANTORO, L.; TURCO, R.; CIOFFI, R. Sustainable management of water potabilization sludge by means of geopolymers production. *Journal of Cleaner Production*, [s.l.], v. 229, p.1-9, ago. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.299>
- GASTALDINI, A.L.G.; HENGGEN, M.F.; GASTALDINI, M.C.C.; AMARAL, F.D.do; ANTOLINI, M.B.; COLETTI, T. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. *Construction and Building Materials*, v. 94, p. 513-520, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.038>
- GODOY, L.G.G.de.; ROHDEN, A.B.; GARCEZ, M.R.; COSTA, E.B.da; DALI, S.da.; ANDRADE, J.J.O. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, [s.l.], v. 223, p.939-950, out. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>
- GOMES, S.C.; ZHOU, J.L.; LI, W.; LONG, G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, [S.L.], v. 145, p. 148-159, jun. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.032>
- GOMES, S.C.; ZHOU, J.L.; LI, W.; QU, F. Recycling of raw water treatment sludge in cementitious composites: effects on heat evolution, compressive strength and microstructure. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 161, n. 145, p. 148-159, out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104970>
- GONZÁLEZ, K.B.; PACHECO, E.; GUZMÁN, A.; PEREIRA, Y.A.; CUADRO, H.C.; VALENCIA, J.A.F. Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. *Materials Today Communications*, [S.L.], v. 23, p. 2352-4928, jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100930>
- GRASSI, P.; DRUMM, F.C.; GEORGIN, J.; FRANCO, D.S.P.; FOLETTO, E.L.; DOTTO, G.L.; JAHN, S.L. Water treatment plant sludge as iron source to catalyze a heterogeneous photo-Fenton reaction. *Environmental Technology & Innovation*, [s.l.], v. 17, p. 100544-100556, fev. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100544>
- HAGEMANN, S.E.; GASTALDINI, A.L.G.; COCCO, M.; JAHN, S.L.; TERRA, L.M. Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: technical and economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, n. 214, pg. 916-926, Passo Fundo, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.324>
- HELENE, P.; ANDRADE, T. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. [s.l.], IBRACON, 2010.
- HOLLER, F.J.; SKOOG, D.A.; CHOURCH, S.R. *Princípios de análise instrumental*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009
- HOWE, K.J.; HAND, D.W.; CRITTENDEN, J.C.; TRUSSELL, R.R.; TCHOBANOGLOUS, G. *Princípios de tratamento de água*. São Paulo: Cengage Learning, 2016.
- JOHN, V.M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. PCC USP, 2000.
- LIMA, J.F. *Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concretos de cimento Portland*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/14850>>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- KATAYAMA, V.T.; MONTES, C.P.; FERRAZ, T.H.; MORITA, D.M. Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica. *Eng. Sanit. Ambiental*, v. 20, n. 4, Lorena, out/dez, p. 559-569, 2015.
- MANSOUR, M.S.M.; ABDEL-SHAIFY, H.I.; AZAB, W.I.M.E. Innovative reuse of drinking water sludge for the treatment of petroleum produced water to enhance oil recovery. *Egyptian Journal of Petroleum*, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 163-169, jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2020.02.002>
- MARASCHIN, M.; FERRARI, K.F.S.H.; SILVA, A.P.H.da.; CARISSIMI, E. Aluminum sludge thickening: novel helical pipes for aggregation by dual flocculation and thickening by filtration applied to water treatment plants. *Separation and Purification Technology*, n. 241, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116560>
- PAIXÃO, L.C.C.; YOSHIMURA, H.N.; ESPINOSA, D.C.R.; TENORIO, J.A.S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. *Cerâmica*, v. 54, p. 329, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000100010>
- PETTERLE, A.R.; SANTIAGO, G.G.; CHONG, W.; SOMENSI, L.; TAMBORIM, S.M. Placas cerâmicas contendo lodo de ETA e cinza de casca de arroz: correlação de suas propriedades físico-químicas com sua microestrutura. *Revista Quím. Nova*, v. 41, n. 10, p. 1117-1126, 2018. <https://doi.org/10.21577/O100-4042.20170288>
- RICHTER, C.A. *Tratamento de lodos de estações de tratamento de água*. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.
- RUVIARO, A.S.; SILVESTRO, L.; SCOLARO, T.P.; PELISSER, F.; GLEIZE, P.J.P. Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar. *Ambiente Construído*, [S.L.], v. 20, n. 4, p. 243-260, dez. 2020. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400470>
- SANTOS, G.Z.B.dos.; MELO FILHO, J.A.; MANZATO, L. Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos rios Negro e Solimões. *Revista Matéria*, v. 23, n. 03, artigo e-1267, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109328>
- SERVIÇO AUTÔNOMO DE SANEAMENTO DE PELOTAS. Barragem Santa Bárbara comemora 50 anos de história. *Pelotas*, 2019. Disponível em: <<http://www.pelotas.com.br/noticia/barragem-santa-barbara-comemora-50-anos-de-historia>> Acesso em: 2 out. 2019.
- SILVA, M.V.da.; FUNGARO, D.A. *Caracterização de lodo de estação de tratamento de água e cinzas de carvão visando sua utilização na manufatura de tijolo*. International Workshop Advances in Cleaner Production 3. São Paulo, 2011.

