



I-698 – ANÁLISE DA VIABILIDADE DE CONFEÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA COM INCORPORAÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Rafael Ávila Matos Cardoso⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) – São José dos Campos.

Carolina Massucci Marciano da Silva⁽²⁾

Graduada em Zootecnia pela Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia de Botucatu (FMVZ/UNESP). Auxiliar de suporte acadêmico do laboratório de solos, geologia e resíduos sólidos da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT/UNESP) – Departamento de Engenharia Ambiental - São José dos Campos.

Alessandro Sanches Pereira⁽³⁾

Doutor em Saneamento e Meio Ambiente (Unicamp). Mestre em Gestão e Política Ambiental, Lund University. Diretor Executivo do Instituto 17.

Fabiana Alves Fiore⁽⁴⁾

Professora do Departamento de Engenharia Ambiental do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT/UNESP) – Doutora em Saneamento e Meio Ambiente (FEC/UNICAMP - 2013), Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG - 2004) e Graduada em Engenharia Civil (UFMG – 2001).

Endereço⁽¹⁾: : Rua Riachuelo, 190, apto 10- Jd. Paulista - São José dos Campos - São Paulo- - CEP: 12.216-040- Brasil. Tel.- (12) 99663-2196 - e-mail: rafael.avila@unesp.br

RESUMO

Os lodos de Estações de Tratamento de Água (LETAs) são resíduos de produção contínua e crescente em escala global, emergindo como um desafio ambiental contemporâneo que exige abordagem integrativa para assegurar sua gestão sustentável e segura. Os LETAs apresentam potenciais atrativos para a economia circular, sendo considerados substitutos parciais viáveis de matérias-primas na fabricação de novos produtos. A utilização de LETAs de forma benéfica pode ser considerada uma oportunidade de redução de custos e de impactos ambientais associados a este resíduo. Entre as alternativas utilizadas para o reaproveitamento do lodo destaca-se o emprego como material para a construção civil. O presente trabalho foi desenvolvido para avaliar a viabilidade da confecção de argila expandida (AE), com substituição parcial de argila por lodo férrico (LF) e de alumínio (LA). Foram realizados os seguintes processos de caracterização das matérias-primas: análise morfológica das partículas por *Microscopia Eletrônica de Varredura* dos compostos; caracterização geoambiental dos LETAs, em conformidade com normas estabelecidas pela ABNT; e caracterização físico-química dos aditivos. Para a confecção das argilas realizou-se os processos de conformação, secagem e queima. Foi realizado o estudo de diferentes porcentagens de substituição da argila por lodos; avaliada a influência do tempo de cura (secagem); realizado ensaio de resistência à compressão e teste de absorção de água no produto. Nos ensaios de resistência à compressão foram obtidas as melhores respostas para a substituição de 25% de argila por LA e LF. Os maiores valores de resistência à compressão para as AE confeccionadas com LA e LF foram de 2462 e 942 N, respectivamente, ambas maiores que a resistência da AE comercial. Verificou-se que as AEs confeccionadas com lodos demonstraram ser mais suscetíveis à absorção de água do que aquelas convencionais. Conclui-se pela viabilidade técnica de confecção de AE com ambos os lodos e pela necessidade de aprofundamento dos estudos quanto aos custos e potenciais impactos ambientais desse uso benéfico.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de ETA, Argila Expandida, Incorporação de Lodos.



Os lodos de ETAs (LETAs), resíduos de geração contínua e crescente em todo o mundo, é um dos problemas ambientais contemporâneos que demanda solução integrativa para que seu manejo ocorra de forma sustentável e segura (MAO *et al.*, 2022). Os LETAs apresentam potenciais atrativos de reinserção na cadeia produtiva como substituição parcial de matéria-primas e para confecção de cerâmicas, cimentos, argamassas e concretos (MOURATIB *et al.* 2020).

A viabilidade técnica de reutilização dos LETAs vem sendo demonstrada por pesquisas que abordam o potencial de utilização do resíduo como material cimentício suplementar e substituto da areia na preparação de concreto (MOJAPELO *et al.*, 2021) e argamassa (ALQAM *et al.*, 2011; EL-DIDAMONY *et al.*, 2014); assim como para confeccionar peças cerâmicas (TEIXEIRA *et al.*, 2011), tijolos de primeiro grau (HUANG *et al.*, 2013) e para a confecção de argila expandida (SARON; OLIVEIRA, 2020).

O uso do lodo como agregado na construção civil é favorável e contribui para a redução no consumo de matérias-primas naturais, já que além de propiciar a reciclagem de resíduos e a produção de novos materiais, garante a minimização da extração de matéria prima e pode acrescentar novas propriedades aos produtos (TEIXEIRA, 2006; KRUGER e SEVILLE, 2016). Oliveira *et al.* (2004) afirmam que o uso de resíduos como o lodo de ETA na indústria cerâmica é altamente promissor, visto que as massas argilosas utilizadas são de natureza heterogênea e aceitam incorporação de materiais residuais de diversos tipos e origens, mesmo quando adicionados em quantidades significantes. A maioria das construções no Brasil, faz uso de materiais provenientes da indústria cerâmica vermelha, isso faz com que este setor seja um dos ramos mais movimentados da produção cerâmica (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Tsutiya e Hirata (2001) recomendam que os resíduos das ETAs sejam incorporados na fabricação de materiais cerâmicos como agregados leves, já que apresentam características semelhantes à argila natural. Destaca-se que, para além do uso benéfico dos LETAs, a substituição parcial da argila gera impactos positivos no que se refere a minimização da extração do recurso natural que é utilizado na fabricação de materiais cerâmicos, uma vez que essa atividade é ambientalmente impactante e resulta em devastação de áreas, devido à remoção da vegetação e do solo, o que pode inferir em impactos ambientais irreversíveis (EMBRAPA, 2006).

Entre as inovações na construção civil, destaca-se o uso da argila expandida, também chamado de agregado leve de argila expandida. O uso das argilas expandidas pode diminuir a quantidade de concreto e outros materiais de enchimento de obras (MORAVIA *et al.*, 2006). Devido principalmente à granulometria e a baixa densidade, a argila expandida gera redução de custo na obra (MORAVIA *et al.*, 2006). Rezende, Boscato e Figueiredo (2019) conduziram um estudo sobre concreto leve, empregando argila expandida para substituir a brita em proporções de 100% e 50%, em conformidade com as normas brasileiras. Os resultados das análises físicas do agregado, bem como os ensaios de resistência à compressão simples e tração, indicaram que é viável utilizar a argila expandida em substituição ao agregado graúdo em aplicações estruturais, desde que atendidas as exigências mínimas de resistência à compressão simples.

Em termos de economia, a argila expandida traz benefícios indiretos relacionados às suas propriedades. Por ser confeccionada de argila, que é um subproduto reciclável, pode trazer benefícios ambientais a depender do material que substitui (RESENDE *et al.*, 2021). A argamassa de agregado leve é um exemplo de material de construção que tem ganhado atenção significativa nos últimos anos devido às suas inúmeras vantagens, incluindo a leveza, as propriedades de isolamento térmico e excelente resistência ao fogo (JUNAID *et al.*, 2022). O uso de agregado leve de argila expandida em argamassa de agregado leve, tornou-se popular devido às suas excepcionais propriedades de isolamento, resistência mecânica e durabilidade (ROCES *et al.*, 2021). Além de argamassas, os concretos convencionais, a argila expandida também foi utilizada em concretos de alto desempenho (SAJEDI; SHAFIGH, 2012), concreto autoadensável (BOGAS *et al.*, 2012), concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (BASSAM *et al.*, 2021) e concreto resistente a altas temperaturas (BASSAM *et al.*, 2021).

OBJETIVO GERAL

Avaliar a aplicabilidade da substituição parcial da argila por lodo férrico (LF) e lodo de alumínio (LA) para a confecção de argila expandida.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar as matérias-primas utilizadas para a confecção da argila expandida;
2. Identificar a concentração ideal de substituição de argila por lodo férrico e de alumínio na produção de argila expandida;
3. Avaliar a influência do tempo de cura da argila expandida, confeccionada com lodos, na resistência e absorção de água do produto.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho é uma pesquisa experimental, com dados quantitativos (SILVA; ESTERA, 2001). Sua realização foi oportunizada pela obtenção de LETAs férrico e de alumínio de estações de tratamento de água localizadas na macrometrópole Paulista, São Paulo, Brasil. A Figura 1 apresenta as etapas e os procedimentos metodológicos adotados para a execução dessa pesquisa.

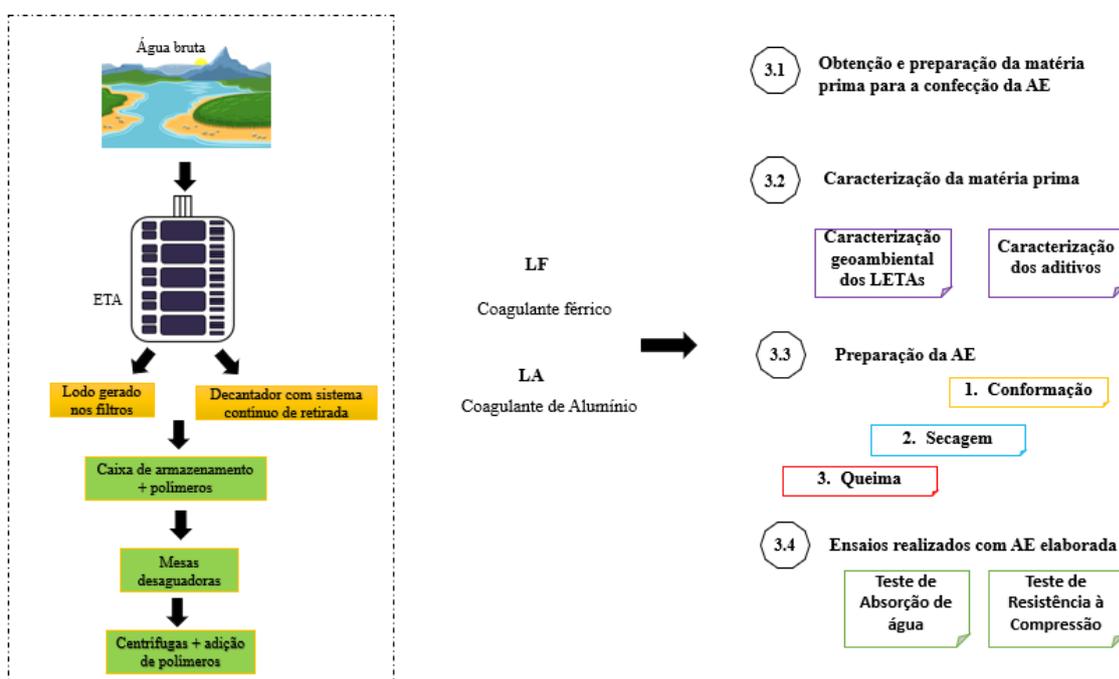


Figura 1. Atividades realizadas na pesquisa.

A revisão bibliográfica foi realizada através de consulta em base de dados científicos (*Scopus e Web of Science*) e em sistema de informação de normas técnicas (*Target GEDWeb*), visando identificar as principais contribuições teóricas existentes sobre o assunto apresentado. A revisão subsidiou a: identificação de métodos aplicáveis à caracterização de LETAs do fluxograma; preparação prévia das amostras com diferentes tipos de coagulantes para a confecção da argila expandida; elaboração, conformação, secagem e testes de corpos de prova em escala de bancada em triplicata; análise das propriedades da argila elaborada com tempos de cura de 24h e 72h.

Obtenção e preparação da matéria prima para produção da AE

A argila, serragem, bentonita e talco foram adquiridos em comércio popular de município do estado de São Paulo, Brasil. Os lodos férrico e de alumínio foram coletados em duas ETAs convencionais da macrometrópole do estado de São Paulo. Para garantir a representatividade, foram armazenadas amostras diárias de lodos centrifugados durante um período de 60 dias em cada uma das ETAs. As amostras diárias foram homogêneas e coletadas no mês de abril de 2023. As amostras de lodo de alumínio e de ferro foram acumuladas durante os meses de março e abril que correspondem ao período chuvoso na região onde foram realizadas as coletas. As amostras foram mantidas em recipiente estanque até a confecção da AE.



Os aditivos (argila, serragem, talco e bentonita) passaram por peneiras de granulometrias consideradas muito finas, que segundo Satoshi (2017) é ideal para a boa mistura e aglutinação utilizados no preparo da cerâmica. O talco e a bentonita foram obtidos com granulometrias de 200 mesh ou 0,077 milímetros, já a serragem foi obtida em uma granulometria de 80 mesh ou 0,177 milímetros.

A massa de argila utilizada para a realização dos corpos de prova foi fixada em 23,5 gramas, por ser mais próxima à dimensão da argila expandida convencional. Para a determinação das porcentagens de aditivos a serem incorporados à massa cerâmica utilizada na confecção dos corpos de prova de AE, adotou-se as melhores condições reportadas por Saron e Oliveira (2020), a saber, as proporções: 0,5% de bentonita, 7% de serragem e 0,5% de talco (Figura 2).



Figura 2. Aditivos incorporados à massa cerâmica elaborada.

Caracterização da matéria-prima

A análise morfológica das partículas dos LETAs e dos aditivos utilizados para a confecção da argila expandida foram obtidas com o uso da *Microscopia Eletrônica de Varredura* (MEV), o microscópio usado foi do modelo – MEV Quanta 250 (FEI) acoplado EDS/EDAX e aplicando-se um aumento de 100 vezes. Todos os materiais analisados por essa técnica passaram por uma etapa de metalização com ouro, a fim de melhorar a condutividade da amostra e conseqüentemente um melhor contraste e visualização da imagem (Nguyen *et. al.* 2022). As morfologias das AEs também foram avaliadas com o uso do MEV Quanta 250 (FEI) acoplado EDS/EDAX, com aumento de 100 vezes, sem o processo de metalização.

As amostras de lodos avaliadas foram obtidas em ETAs que produzem água potável com o emprego de coagulante de alumínio (PAC ou sulfato) e hidróxido férrico. Os LETAs, foram caracterizados, com o uso das normas estabelecidas pela ABNT, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Métodos utilizados para a caracterização dos LETAs.

Parâmetros	Métodos
Massa específica	NBR 6.457 (ABNT, 2016)
Umidade	NBR 6.457 (ABNT, 2016)
Matéria Orgânica	NBR 13.600 (ABNT, 2022)
Limite de Liquidez	NBR 6.459 (ABNT, 2016)
Limite de Plasticidade	NBR 7.180 (ABNT, 2016)

Os aditivos para a confecção da AE foram caracterizados conforme suas composições físico-químicas apresentadas pelo fabricante, presente na Tabela 2 e Tabela 3

Tabela 2. Ficha técnica do talco adquirido.

Características	Especificação		Unidades de medida
	Mínimo	Máximo	
Retenção #325	0,00	2,00	%
Densidade aparente	1,300	1,60	g/cm ³
Volume aparente	28,00	35,00	mL/40g
Umidade	0,00	0,50	%
Absorção em Linhaça	10,50	16,50	%
pH	7,00	11,00	%

Fonte: Ficha de composição do produto, elaborada pelo fabricante.

Tabela 3. Ficha técnica da bentonita adquirida

Características	Especificação		Unidades de medida
	Mínimo	Máximo	
Umidade	9,00	13,00	%
Inchamento	30,00	40,00	mL
Retido #200	0,00	15,00	%
Absorção de Azul de Metileno	45,00	55,00	mL/0,5g
pH	9,00	11,00	-
Resistência Compressão a Verde (R.C.V.)	11,00	13,00	N/cm ³
Resistência Tração a Úmido (R.T.U.)	0,28	0,32	N/cm ³
Compatibilidade	45,00	47,00	%

Fonte: Ficha de composição do produto, elaborada pelo fabricante.

Preparação de AE

Na elaboração dos corpos de prova com a incorporação do lodo de ETA foi realizada a mistura dos insumos e aditivos necessários (argila, água, serragem, bentonita e talco) e a substituição dos LA e LF nas concentrações percentuais de 25, 50, 75 e 100%, para que fossem comparadas em relação ao tempo de cura, resistência à compressão e absorção de água.

Foram confeccionados os corpos de prova fixando as porcentagens de bentonita, talco e serragem e variando a quantidade de lodo e da argila da massa cerâmica. Portanto, a massa cerâmica de cada corpo de prova foi preparada de acordo com as porcentagens de insumos e aditivos apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Características dos corpos de provas avaliados.

Corpo de prova	Argila incorporada (g)	Lodo incorporado (g)	Lodo (%)	Tipo de lodo	Tempo de cura (h)
1	17,62	5,87	25	Al	72
2	11,75	11,75	50	Al	72
3	5,87	17,62	75	Al	72
4	17,62	5,87	25	Fe	72
5	11,75	11,75	50	Fe	72
6	5,87	17,62	75	Fe	72
7	0,00	23,50	100	Fe	72
8	17,62	5,87	25	Al	24
9	11,75	11,75	50	Al	24
10	5,87	17,62	75	Al	24
11	17,62	5,87	25	Fe	24
12	11,75	11,75	50	Fe	24
13	0,00	23,50	100	Al	72
14	0,00	23,50	100	Al	24
15	5,87	17,62	75	Fe	24
16	0,00	23,50	100	Fe	24

Após a mistura dos insumos e aditivos da massa cerâmica, foi realizada a etapa de conformação, onde manualmente foi dado o formato arredondado aos corpos de prova. Posteriormente, os corpos de prova foram secos naturalmente, deixados sobre uma bandeja em local onde não havia incidência solar por 24 horas e 72 horas (Figura 3). Em seguida, os corpos de prova foram submetidos a uma temperatura de 900 °C, por 12 horas na mufla modelo Forno Mufla - QUIMIS (Figura 4) e posteriormente, repousaram por 30 minutos antes do início dos testes (Figura 5).

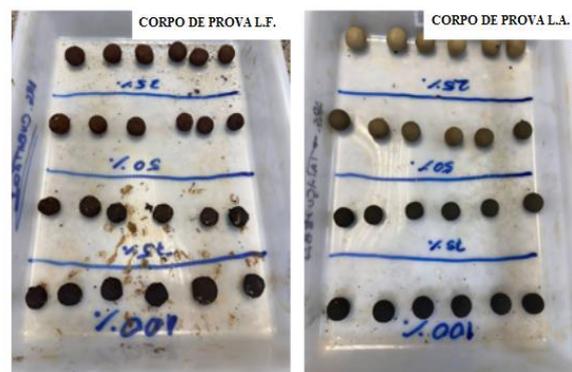


Figura 3. Corpos de prova L.F. e L.A.



Figura 4. Corpos de prova pré queima.



Figura 5. Corpos de prova L.F. e L.A. pós queima

Ensaio realizado com a AE

Teste de absorção de água e Teste de Resistência à Compressão

Foi realizado o teste de absorção de água, em conformidade com a NBR 9778 (ABNT, 2005). Em vista disso, os corpos de prova foram pesados em uma balança analítica, pós-queima, para verificação de suas massas. Após a pesagem, cada corpo de prova foi submerso em um béquer com água por 1 hora, e posteriormente foram pesados na mesma balança para que se obtivesse o ganho de massa e a quantidade de absorção de água da argila expandida elaborada e da argila expandida convencional.

Para a realização do ensaio de resistência à compressão, utilizou-se uma prensa hidráulica (marca SOLOTEST CBR - MARSHALL AUTOMÁTICA), conforme mostrado na Figura 6. Para a realização do ensaio foi utilizada a NBR 5739 (ABNT, 2018), com adaptações. Assim sendo, as argilas expandidas elaboradas e a argila expandida convencional, foram submetidas à pressão aumentada progressivamente até sua ruptura. Os resultados das forças aplicadas foram obtidos na unidade de medida de quilogramas e convertida para Newtons (N). À saber: 1 quilograma-força (kgf) é a força exercida pela gravidade da Terra sobre um objeto de massa 1 kg. A conversão das medidas ocorreu conforme apresentado a fórmula apresentada:

$$F = m.a$$

Onde:

F = força, medida em Newtons

m = massa, medida em quilogramas

a = aceleração da gravidade com valor aproximado de 9,806 m/s²



Figura 6. Teste de compressão em AE.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados da caracterização dos LETAs e das matérias primas

Os resultados da caracterização morfológica das partículas dos LETAs com diferentes coagulantes, lodo de estação de tratamento de água de alumínio (LA) e lodo de estação de tratamento de água férrico (LF) e das matérias-primas adquiridas, a saber: argila, bentonita, talco e serragem estão apresentados na Figura 7.

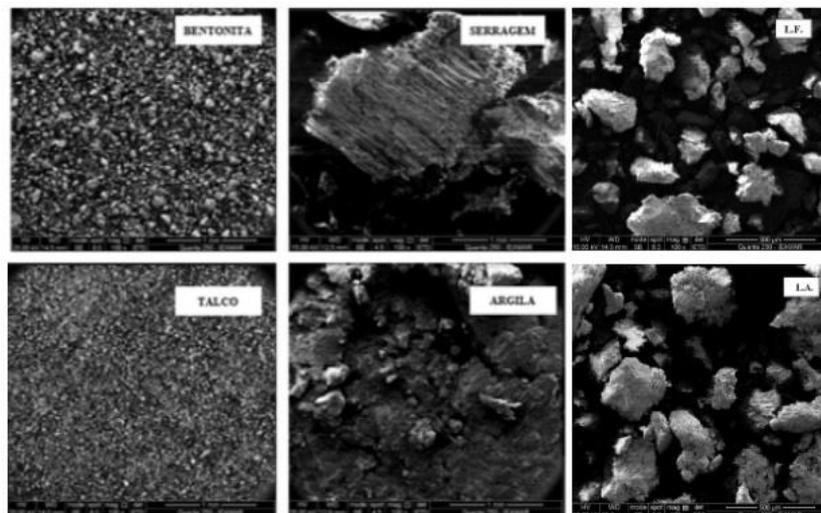


Figura 7. Microscopia Eletrônica de Varredura do L.A., L.F. e das matérias-primas

As imagens da *Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)* evidenciam que o LF apresenta elevado teor de ferro, assim como o LA apresenta elevado teor de alumínio, relacionados aos coagulantes usados no tratamento de águas das ETAs, a saber: cloreto férrico e sulfato de alumínio. Também é possível verificar que os lodos possuem complexa morfologia, formada por grânulos irregulares, desenvolvidas pela aglomeração das partículas, conforme também relatado por Buselatto *et al.* (2019).

Os resultados da caracterização geoambiental dos LETAs estão apresentados na Tabela 5. A caracterização das matérias-primas: talco, bentonita e serragem caracterizadas foram equiparadas à ficha técnica apresentada pelo fabricante. A argila adquirida, foi caracterizada e equiparada com a literatura.

Tabela 5. Caracterização dos LETAs e matérias-primas

Parâmetros	Unidade	LA	LF	Argila	Bentonita	Talco	Serragem
Massa específica	g/cm ⁻³	2,06	2,75	1,81	*	*	*
Umidade	%	481,22	266,96	12,88	0,48	0,38	0,22
Matéria Orgânica	%	7,66	3,15	1,47	0,5	0,2	0,15
Limite de Liquidez	%	556	239	49	*	*	*
Limite de Plasticidade	%	389	164	35	*	*	*

*Análises não realizadas.

Ensaio nos corpos de prova de A.E.

Verificou-se, por meio do ensaio de Resistência à Compressão, que as AEs confeccionadas com a adição de lodos foram rompidas com cargas que variaram de 167 N e 2462. As amostras de LA 75% e 100% com 24 horas

de tempo de cura, romperam antes da análise de compressão. As amostras de LA 100% com 72 horas de tempo de cura, também romperam antes da análise (Figura 8). Os resultados de resistência à compressão do LA estão contidos na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados do teste de resistência à compressão do LA.

LA (Tempo de Cura - 24 horas)	Resistência à compressão (N)	LA (Tempo de Cura - 72 horas)	Resistência à compressão (N)	Resistência à compressão (N)
(%)		(%)		AE Convencional**
25	2148	25	2462	865
50	1069	50	1353	
75	*	75	167	
100	*	100	*	

* Os corpos de prova se romperam antes das análises de compressão.

** Média obtida no teste de resistência à compressão nos corpos de prova.



Figura 8. Corpo de prova que se rompeu após a queima

As amostras de LF com 75% e 100%, com 24 horas de tempo de cura, romperam antes da análise de compressão. As amostras de LF 75% e 100% com 72 horas de tempo de cura, também romperam antes da análise (Figura 9). Os resultados de resistência à compressão do LF estão contidos na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados do teste de resistência à compressão do LF.

LF (Tempo de Cura - 24 horas)	Resistência à compressão (N)	LF (Tempo de Cura - 72 horas)	Resistência à compressão (N)	Resistência à compressão (N)
(%)		(%)		AE Convencional**
25	520	25	942	865
50	490	50	539	
75	*	75	*	
100	*	100	*	

* Os corpos de prova se romperam antes das análises de compressão.

** Média obtida no teste de resistência à compressão nos corpos de prova.



Figura 9. Corpo de prova que se rompeu após a queima.

Analisou-se o ganho de massa das A.E. convencionais e A.E. dos LETAs com tempo de cura de 24 horas e 72 horas, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados do Teste de Absorção de Água



Corpos de prova	Pesagens para absorção de água		
	Mi	Mf	% de água absorvida NBR 9778 (ABNT, 2005)
1	17,19	23,89	28,05
2	9,59	16,27	41,06
3	4,60	6,17	25,45
4	12,26	18,89	35,10
5	11,36	14,66	22,51
6	4,26	11,02	61,34
7	6,08	7,41	17,95
8	7,33	14,41	49,13
9	10,73	18,67	42,53
10	2,70	9,33	71,06
11	7,64	9,39	18,64
12	11,86	19,82	40,16
13	5,016	5,057	0,81
14	6,03	6,52	7,52
15	5,23	5,23	0,00

Resultados da caracterização morfológica da argila expandida adquirida em mercado e argila expandida com LA e LF

Os resultados da caracterização morfológica das argilas expandidas com LA e LF e das argilas expandidas convencionais, estão apresentados na Figura 9.

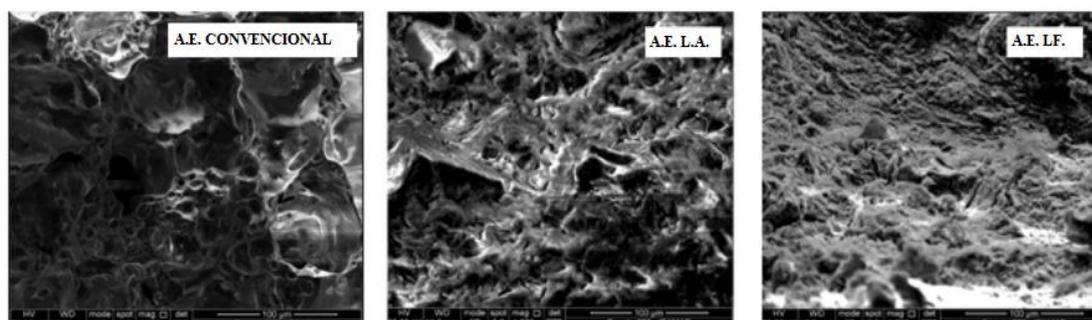


Figura 10. Microscopia Eletrônica de Varredura da argila expandida convencional e argilas expandidas com LA e LF.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos pelo MEV/EDS (Figura 10), realizados nesta pesquisa, evidenciam a presença dos seguintes elementos na morfologia dos LETAs, predominantemente: C, O, Al, Fe e Si. Esses elementos foram também reportados por Montalvan e Boscov (2021), em lodos de ETA. Os valores encontrados para o limite de plasticidade foram de 389% para o LA e de 164% para o LF, respectivamente, sendo ambos os lodos muito plásticos (Tabela 2). Os resultados obtidos para o limite de liquidez foram de 556% para o LA e de 239% para o LF. Os resultados corroboram com os valores encontrados por Montalvan e Boscov (2021), que obtiveram valores de limite de liquidez de 237 e 536% para os lodos férrico e de alumínio, respectivamente demonstrando que há variabilidade, de acordo com as partículas de natureza orgânica e inorgânica provenientes da água coletada.

O Índice de Plasticidade (IP) estabelece a faixa de teor de umidade na qual o lodo adquire características plásticas. Conforme a classificação proposta por Wolff (2008), argilas com $1\% < IP < 7\%$ são categorizadas como fracamente plásticas, aquelas com $7\% < IP < 15\%$ são designadas como medianamente plásticas, e aquelas com $IP > 15\%$ são identificadas como altamente plásticas. Destaca-se que a produção de massas cerâmicas



utilizando o lodo é inviável sem a incorporação de materiais de granulometria mais grossa, conhecidos como desplastificantes, conforme destacado por Wolff (2008).

A massa específica dos grãos do lodo de LA e LF foram obtidas, apresentando valores de 2,06 g/cm³ e 2,75 g/cm³, respectivamente. O valor apresentado pelo LA e LF, diferem já que a influência, segundo Montalvan e Boscov (2021), se deve ao fato de que a presença de matéria orgânica proveniente da água bruta tratada e os produtos químicos adicionados alterarem a massa específica dos grãos dos lodos (XIA, 1994; O'KELLY, 2016). Os resultados obtidos de matéria orgânica do LA foram de 7,66% e do LF, 3,15%. Para o LA e LF, esse valor é inferior àquele reportado por Richter (2001), com intervalo entre 15% e 25% para lodo de ETA tratado com sulfato de alumínio. A presença de matéria orgânica desempenha um papel crucial na química das argilas, influenciando propriedades como a estrutura do solo, o fornecimento de nutrientes, a capacidade de troca catiônica e o pH (Gaidzinski, 2006). O uso de materiais argilosos com elevado teor de matéria orgânica (MO) na fabricação de cerâmica vermelha pode resultar em problemas durante o processo de secagem e queima, devido à considerável contração, e pode ocasionar defeitos como eflorescência e coração negro (núcleo preto). Entretanto, em proporções reduzidas, a presença de matéria orgânica pode aumentar a plasticidade das argilas, facilitar a moldagem e elevar a resistência mecânica do produto seco (Wolff, 2008). Dessa forma, os resultados positivos obtidos na argila elaborada, caracterizada por baixo teor de MO, corroboram com tais considerações.

A umidade registrada para o LA foi de 481%, enquanto para o LF foi de 266,96%. Conforme destacado por Montalvan (2016), uma das dificuldades na utilização do Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) em combinação com o solo reside na determinação adequada do teor de umidade do lodo para assegurar uma aplicação tecnicamente apropriada. Além disso, é imprescindível avaliar a segurança ambiental, garantindo que a utilização desse resíduo sólido na construção civil seja aceitável pelos órgãos de controle ambiental. Nas pesquisas consultadas, Lucena *et al.* (2014), Lucena *et al.* (2016) e Martínez *et al.* (2020) adotaram o método da APHA (1998) e obtiveram um teor de umidade de 53%. Coelho *et al.* (2015) empregou um Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) em condições de umidade ambiente, sem fornecer dados quantitativos ou detalhes sobre o método de medição. Delgado (2016) determinou a umidade utilizando o método de análise de solo da Embrapa (1997) em um LETA seco a 40°C, resultando em uma umidade da ordem de 94%. É frequente encontrar estudos voltados para aplicações em diversas formas de obras geotécnicas, como evidenciado por Montalvan (2016), cujos valores de teor de umidade do LETA foram de 300%, aproximadamente próximos aos obtidos na presente pesquisa.

Na Tabela 6, foram apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão realizado. Nota-se que os valores obtidos a partir do ensaio de resistência à compressão de todas as argilas expandidas elaboradas variaram de 167 a 2462 N. Como pode-se observar, as argilas expandidas referentes aos corpos de prova com incorporação do LA de 25% com tempos de cura de 24 e 72 horas, foram as que obtiveram uma maior resistência em relação às demais, 2148 N e 2462 N. Já os corpos de prova com incorporação de LF (Tabela 7) de 25% com o tempo de cura de 72 horas, obteve a melhor resposta, 942 N, enquanto que as argilas expandidas convencionais apresentaram uma média de 865 N. Após o teste de resistência à compressão, (Figura 8 e 9), pôde-se observar o interior da argila expandida de cada corpo de prova que quando a serragem é totalmente queimada formam-se poros no interior da argila expandida, característica que fornece à argila expandida elaborada uma alta absorção de umidade conforme também reportado por Saron e Oliveira (2020).

É possível afirmar que as argilas expandidas elaboradas nesta pesquisa, apresentadas na Tabela 8, obtiveram uma capacidade de absorção de água elevada, variando em média a porcentagem 17,95% a 71,06% após saturação, enquanto que os corpos de prova das argilas convencionais (13, 14 e 15), obtiveram absorção de água baixa, de 0% à 7,52% de acordo com o teste de absorção de água realizado. As argilas expandidas elaboradas que continham maior quantidade de incorporação de lodo (acima de 50%) em sua composição foram as que obtiveram um resultado elevado no teste realizado, absorvendo mais umidade. Portanto, verificou-se que a adição do lodo também promoveu o aumento na porosidade das peças. Isto se deve à granulometria do lodo que conforme também constatado, por TARTARI (2008), é principalmente arenosa e siltosa.

Através dos resultados obtidos, portanto, é possível afirmar que o corpo de prova 1 e o corpo de prova 2, com as concentrações de lodo de alumínio 25% e 50%, respectivamente com o tempo de cura de 72 horas, foram os



que obtiveram melhores respostas tanto no ensaio de absorção de água quanto no ensaio de resistência à compressão. O lodo férrico obteve as melhores respostas, com o corpo de prova 4 e o corpo de prova 5, com as concentrações de lodo de alumínio 25% e 50%, respectivamente, com o tempo de cura de 72 horas. Os ensaios oportunizaram a demonstração da influência do tempo de cura da argila expandida nas respostas positivas de resistência e absorção de água do produto elaborado neste trabalho.

CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou a identificação da viabilidade técnica da substituição parcial da argila por lodos de estações de tratamento de água para a fabricação de argila expandida. Consideradas as diversas aplicações da AE no setor de construção civil e suas vantagens competitivas em relação a materiais tradicionais é mister afirmar que a produção de AE com lodos corrobora para a economia circular em sistemas de abastecimentos de água, pois além de propiciar a destinação adequada dos lodos, contribui para a minimização de recursos naturais finitos.

No processo da elaboração da massa cerâmica, a adição da serragem é um processo fundamental para a obtenção dos poros e da leveza do produto final. Ao realizar o ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova elaborados, verificou-se que quanto maior a quantidade de lodo adicionada à massa cerâmica, maior seria a porosidade e leveza do AE, diminuindo a resistência. Em relação ao teste de absorção de água, todos os corpos de prova tiveram alta absorção de água. A explicação está no valor fixado de serragem, 7% e o aumento da incorporação de lodo em cada corpo de prova (acima de 50%), absorvendo mais umidade, tornando as peças mais porosas.

AGRADECIMENTOS

Esse projeto possui o financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Proc.: 2020/12230-4). O autor principal usufruiu de bolsa de pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Edital 04/2022 - PIBIC) e apoio do Instituto I17. Agradecemos também à PROGRAD/UNESP (Edital 04/2024), a CAPES (88887.839652/2023-00) e ao Instituto de Estudos Avançados do Mar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALQAM M, JAMRAH A, DAGHLAS H. Aproveitamento de cimento incorporado com lamas de tratamento de água. *Jordan J Eng. Civil*. 2011; 5: 268-77. COSTA, E. R. H. Metodologia para o uso combinado de polímeros naturais como auxiliares de coagulação. XVII CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA. 1993. Anais. Natal, RN, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão para corpos de prova cilíndricos. 2018. DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de tratamento de Água - V. I e II. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, Brasil, 1993.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6.459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.600: Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro, 1996.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 2 ed. [s.i]: ABNT, 1986. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2005. DI BERNARDO, L. Comunicação pessoal sobre Técnicas de Tratabilidade. 1993/1995.
- BASSAM A. TAYEH, ABDULLAH M. ZEYAD, IBRAHIM SAAD AGWA, AMIN MOHAMED. Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete (2021)
- BOGAS A. J., AUGUSTO GOMES, M.F.C. PEREIRA. Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate, *Construction and Building Materials*, V. 35, 2012.



10. COELHO, R.V., TAHIRA, F.S., FERNANDES, F., FONTENELE, H.B., TEIXEIRA, R.S. Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária. Goiânia: Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v.10, n.2, p.11-22, 2015. Acesso em 28 de março de 2021, disponível em: <https://revistas.ufg.br/index.php/reec/index>
11. DELGADO, J. V. C. Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada. 2016. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
12. EL-DIDAMONY H, KHALIL KA, HEIKAL M. "Características físico-químicas e superficiais de algumas pastas de cimento compostas de lodo de água potável queimadas com escória granulada" . *HBRC J.* 2014; 10 (1) : 73-81 .
13. EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 1997. 212 p.
14. KRUGER, Abe; SEVILLE, Carl. Construção verde: princípios e práticas na construção residencial. Adaptação: Sasquia Hizuro Obata. 1.ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.
15. LUCENA L. C. de F. L., SOARES J. F. T. J., BARBOSA J., FILHO P. G. T. M. Use of wastewater sludge for base and subbase of road pavements. In *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, V. 33, 2014.
16. MARTÍNEZ, JUAN BASTIDAS; CARVALHO, J. CAMAPUM DE; LUCENA, LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIRÊDO LOPES; FARIAS, M.M.; RONDÓN-QUINTANA, H. A.. Preliminary Study of Hot Mix Asphalt Containing Water Treatment And Sewage Sludge. *Archives Of Civil Engineering*, Warsaw, Poland, V. 66, N. 1, P. 226-240, 04 Fev. 2020.
17. MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; GUMIERI, A. G.; VASCONCELOS, W. L. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto leve estrutural. *Cerâmica*, v.52, p.193-199, 2006.
18. MONTALVAN, E. L. T. Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo de estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP. 2016. 134 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo -SP, 2016.
19. NGUYEN, M. D., ADHIKARI, S., MALLYA, D. S., THOMAS, M., SURAPANENI, A., MOON, E. M., MILNE, N. A., 2022. Reuse of aluminium-based water treatment sludge for phosphorus adsorption: Evaluating the factors affecting and correlation between adsorption and sludge properties, *Environmental Technology & Innovation*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102717>.
20. O'KELLY B.C. Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling. *Geotech Res.* 2016; 3(4): 148–79.
21. REZENDE, K. S; BOSCATO, L. C.; FIGUEIREDO, T. C. Análise comparativa de propriedades mecânicas de um concreto leve em relação ao concreto convencional. *Revista Uniscientiae*, [s. l], v. 2, n. 1, p. 3-9, jun. 2019.
22. ROCES, E.; MUÑIZ-MENÉNDEZ, M.; GONZÁLEZ-GALINDO, J.; ESTAIRE, J.; Lightweight expanded clay aggregate properties based on laboratory testing, *Construction and Building Materials*, v. 313, 2021.
23. SARON, A., OLIVEIRA, A. C. C. Incorporação do lodo de estação de tratamento de água na fabricação de argila expandida para fins de construção civil. Paraná: Atena Editora, p. 59, 2020.
24. SAJEDI, F., SHAFIGH, P. High-Strength Lightweight Concrete Using Leca, Silica Fume, and Limestone. *Arab J Sci Eng* 37, 1885–1893 (2012). <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0285-3>.
25. SHAFIGH, P., HASSANPOUR, M.H., RAZAVI, S.V., KOBRAEI, M. An investigation of the flexural behaviour of reinforced lightweight concrete beams (2011) *International Journal of Physical Sciences*, 6 (10), pp. 2414-2421.
26. SILVA, Edna Lúcia da. e Menezes, Estera M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 3ª ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.
27. TEIXEIRA S.R., SANTOS G.T.A., SOUZA A.E. , ALESSIO P. , SOUZA S.A. , SOUZA N.R . O efeito da incorporação de lodo de estação de tratamento de água brasileira nas propriedades de materiais cerâmicos. *Appl Clay Sci* . 2011; 53 (4) : 561 – 5 .
28. WOLFF, E. O uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal De Minas Gerais Programa De Pós-Graduação Em Saneamento, Meio Ambiente E Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2008.