

Efeitos da substituição parcial do solo por lodo de estação de tratamento de água em tijolos de solo-cimento

Effects of the partial substitution of soil by water treatment plant sludge in soil-cement bricks

Fernando Antonio Neves¹, Taylana Piccinini Scolaro², Tassiane Apolinário de Oliveira³, Ricardo Schneider⁴, Gustavo Savaris⁵, José Gustavo Venâncio da Silva Ramos⁶

*Autor correspondente: Amanda Martins de Souza – E-mail: mariabaggio@yahoo.com.br

Recebido em: 29/12/2022

Aceito em: 05/10/2023

RESUMO: Cerca de 75% da água potável no Brasil é produzida em estações de tratamento de água (ETAs) convencionais. Resíduos são gerados neste processo, principalmente o lodo de decantadores (LETA), que segundo estudos é lançado sem tratamento em corpos d'água em 68% dessas instalações. Esta pesquisa avalia a viabilidade da adição de LETA como substituto parcial do solo em tijolos de solo-cimento no traço 1:9 (cimento: solo+LETA). O resíduo foi coletado durante a limpeza dos decantadores da ETA de Toledo-PR. Os tijolos foram produzidos com 5, 10, 15, 25 e 35% de substituição de massa de solo por LETA, além do controle (0%). As moldagens ocorreram em equipamentos industriais para reproduzir ao máximo condições reais de fabricação. Com o aumento do teor de lodo, a resistência à compressão dos tijolos foi reduzida. No entanto, as exigências normativas brasileiras foram atendidas até a adição de 15% de LETA. Houve aumento da absorção de água com o aumento do teor de lodo. No entanto, os tijolos atenderam às exigências regulatórias brasileiras até a substituição de 25% de LETA. Desta forma, incorporar até 15% desse resíduo em tijolos de solo-cimento é uma alternativa técnica e ambientalmente viável, gerando menos impactos ambientais.

Palavras-chave: Resíduo sólido; Absorção de água; Resistência à compressão; Lodo de alumínio; Sustentabilidade na construção civil.

ABSTRACT: About 75% of the drinking water in Brazil is produced in conventional water treatment plants (WTPs). Residues are generated in this process, mainly the sludge from decaners (WTPS), which according to studies is released without treatment into water bodies in 68% of those facilities. This research evaluates the feasibility of adding WTPS as a partial substitute for soil in soil-cement bricks in the 1:9 (cement: soil+WTPS) mixing ratio. The waste was collected during the cleaning of the WTP decaners from Toledo-PR. The bricks

¹ Bacharel em Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, Paraná, Brasil.

² Mestre em Engenharia Civil e Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

³ Mestre em Engenharia da Construção Civil pela Universidade Federal do Paraná - UFPR, Docente no Departamento Acadêmico de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, Paraná, Brasil.

⁴ Doutor em Química pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Docente no Departamento Acadêmico de Química e membro do Grupo de Pesquisa em Polímeros e Nanoestruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, Paraná, Brasil.

⁵ Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e coordenador do Grupo de Estudos e Pesquisas em Materiais e Estruturas (GPMAES) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, Paraná, Brasil.

⁶ Mestre em Engenharia Civil (Saneamento e Recursos Hídricos) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Docente no Departamento Acadêmico de Engenharia Civil e membro do Grupo de Estudos e Pesquisas em Materiais e Estruturas (GPMAES) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, Paraná, Brasil.

were produced with 5, 10, 15, 25 and 35% of soil mass replacement by LETA, in addition to the control (0%). The moldings took place in industrial equipment to reproduce real manufacturing conditions as much as possible. With increasing sludge content, the compressive strength of the bricks was reduced. However, the Brazilian regulatory requirements were met up to the addition of 15% WTPS. There was an increase in water absorption with increasing sludge content. However, the bricks met Brazilian regulatory requirements until the 25% replacement of WTPS. In this way, incorporating up to 15% of this waste in soil-cement bricks is a technically and environmentally viable alternative, generating fewer environmental impacts.

Keywords: Solid waste; Water absorption; Compressive strength; Aluminum sludge; Sustainability in civil construction.

INTRODUÇÃO

Uma estação de tratamento de água (ETA) pode ser vista de forma análoga a uma indústria, onde a matéria-prima é a água bruta captada e o produto final é a água tratada/potável. Diversas tecnologias de tratamento de água são utilizadas atualmente em diferentes ETAs, com procedimentos específicos. Neste contexto, as ETAs denominadas convencionais ou de ciclo completo são amplamente utilizadas no Brasil (IBGE, 2020). O processo de tratamento nessas estações segue a ordem: coagulação, floculação, decantação ou flotação, filtração descendente e desinfecção, além de processos químicos para ajustar os parâmetros de potabilidade. Nesta série de operações, são gerados resíduos, sendo o lodo de estação de tratamento de água (LETA) o mais significativo deles (Achon *et al.*, 2013; Ferreira Filho, 2017).

A formação desse resíduo ocorre nos decantadores da ETA. Os sólidos suspensos presentes na água bruta são desestabilizados e aglutinam-se entre si, formando flocos. Isto se dá devido à adição de produtos químicos e mistura rápida na fase de coagulação e à mistura lenta na fase de floculação. Após este processo, ao passar por grandes tanques (decantadores) em baixas velocidades, os flocos sedimentam, depositando-se no fundo destes compartimentos. Esse material é chamado de lodo de estação de tratamento de água (Baruth, 2004; Jahanshahi; Taghizadeh, 2018; Nasier; Abdulrazzaq, 2021). É importante mencionar que a quantidade gerada e as características do lodo variam com alguns fatores, como a frequência de limpeza, mudanças sazonais na fonte de água, ocorrência de chuva e produtos químicos utilizados (Teixeira *et al.*, 2011; Taboni Junior, 2020; Żoczek; Dudziak, 2022).

Em relação ao manejo do lodo, vários autores apontam que é comum que ele seja lançado em corpos d'água sem nenhum tratamento (Achon *et al.*, 2013; Ramos, 2018; Barakwan *et al.*, 2019). Dentre os municípios brasileiros que apresentam ETAs, 68% descartavam o lodo em rios e mares (IBGE, 2011). Essa prática pode levar ao aumento dos níveis de alumínio e metais pesados na água e, conseqüentemente, nos organismos aquáticos

e nos seres humanos (Ahmad *et al.*, 2016). Além disso, desde 2010, a legislação brasileira considera o LETA como resíduo sólido, sendo proibido seu lançamento em corpos hídricos (Brasil, 2010). Dentre as destinações ambientalmente mais adequadas, podemos citar a disposição em aterros sanitários. No entanto, uma vez que este resíduo apresenta um grande teor de água, é necessário se reduzir a quantidade de líquido e conseqüentemente seu volume (espessamento, desidratação ou secagem), visando a redução dos custos de disposição. Esta redução ocorre normalmente com o auxílio de processos químicos e físicos (Baruth, 2004). É importante destacar que os custos necessários para desidratar o lodo, encontrar um local adequado, instalar e operar aterros sanitários podem tornar essa prática inviável em muitas cidades modernas (Dassanayake *et al.*, 2015; Ahmad *et al.*, 2016).

Destinações mais ambientalmente adequadas para o LETA foram avaliadas nos últimos anos. Lucena *et al.* (2016) adicionaram o lodo ao solo para ser utilizado como base para pavimento. Os resultados mostraram que o solo com uma proporção de 20% de LETA em sua composição poderia atingir um valor de Índice de Suporte Califórnia (ISC) de aproximadamente 75%, permitindo sua utilização como base para tráfego intermediário. Ruviano *et al.* (2021) incorporaram LETA calcinado em pastas de cimento como um substituto parcial para o cimento Portland comum. Os autores relataram que a incorporação de LETA pode reduzir a resistência das pastas em idade precoce; no entanto, adições de até 20% de LETA resultaram em resistências à compressão equivalentes ou superiores, em idades mais avançadas, provavelmente devido a reações pozolânicas e ao efeito fíler do LETA. Além disso, foi possível constatar que a emissão de CO_{2-eq} da produção de pasta diminuiu com o aumento do teor de LETA. Barbosa *et al.* (2019) substituíram por LETA parte do solo utilizado na fabricação de tijolos de solo-cimento. A utilização de 35,71% de lodo e 14,29% de cimento na mistura resultou em absorção de água e resistência à compressão iguais a 20% e 2,3 MPa, respectivamente, valores que estão de acordo com as normas brasileiras (absorção de água < 20%; resistência à compressão > 2 MPa). No entanto, como os autores não calcinaram o LETA, eles chamam a atenção para o teor de matéria orgânica presente no material, que poderia causar problemas futuros nos tijolos.

Na literatura podem ser encontrados vários estudos incorporando resíduos em tijolos convencionais, como lodo de ETA, resíduo de demolição, lodos industriais e cinzas, por exemplo (Sakhare; Ralegaonkar, 2017; Erdogmus, 2021; Senthil *et al.*, 2022). Os tijolos de solo-cimento são compósitos não estruturais, gerados pela compressão de uma mistura de solo, cimento e água. Esses materiais são considerados como mais sustentáveis do que os tijolos cerâmicos convencionais, principalmente por dispensar o processo de queima,

reduzindo assim a demanda de energia e as emissões de gases de efeito estufa (Reddy; Jagadish, 2003; Han *et al.*, 2020). Além disso, foi constatada a viabilidade técnica da adição de resíduos nestes elementos construtivos, proporcionando um destino mais ecológico a alguns passivos ambientais (Fungaro; Da Silva, 2014; Rodrigues; Holanda, 2015; REIS *et al.*, 2020; Nascimento *et al.*, 2021). A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) também aponta como vantagens dos tijolos de solo-cimento a utilização de equipamentos simples e de baixo custo, a necessidade de espessuras mínimas de argamassa e a possibilidade de dispensar o uso de revestimento, desde que protegido da ação direta da água, sendo, portanto, recomendado para paredes com tijolo aparente (ABCP, 2000).

Diante do exposto, considerando i) o problema atual de gerenciamento de LETA no país; ii) as características deste resíduo, que variam de acordo com a fonte de água captada e dos produtos e processos químicos utilizados no tratamento e; iii) a possibilidade de inserção de LETA em tijolos de solo-cimento, com vantagens em relação aos tijolos convencionais de cerâmica, o objetivo desta pesquisa foi avaliar os efeitos da substituição parcial de solo por LETA em tijolos de solo-cimento, em relação as suas propriedades físicas e mecânicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O solo utilizado para produção de tijolos de solo-cimento foi coletado em uma jazida industrial, localizada em Brasilândia do Sul-PR. O material consistia em solo argiloso-arenoso. Aproximadamente 70 kg de material foi coletado e armazenado em sacos plásticos até sua utilização para produção de tijolos e análise de propriedades físicas.

O lodo foi obtido dos decantadores e chicanas da ETA presente no município de Toledo-PR, que opera vazões da ordem de 120 L s^{-1} , gerando cerca de 30 toneladas de LETA mensalmente. O período de limpeza dos decantadores e das chicanas varia ao longo do ano, dependendo principalmente da frequência e intensidade das chuvas que ocorrem na região. O coagulante utilizado na planta era o policloreto de alumínio (PAC). O lodo foi coletado do fundo do decantador e chicanas com o auxílio de um balde de aço inoxidável com capacidade de 10 litros e transferido para reservatórios plásticos com capacidade de 80 L cada. Após a retirada, o LETA foi transportado para os laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Toledo. Como o material necessário para a confecção dos tijolos era a porção sólida do lodo, o excesso de água foi previamente retirado com o auxílio de manta geotêxtil e exposição ao sol. Em seguida, o material foi completamente seco em estufas a

105°C por 48 horas. Por fim, o material foi triturado manualmente com auxílio de almofariz e pistilo.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E DO LETA

O LETA e o solo foram caracterizados via análises físico-químicas. A distribuição granulométrica foi determinada pelos métodos DNER-ME 093 (DNER, 1994) e NBR 7181 (ABNT, 2018); os limites de Atterberg (liquidez e plasticidade) foram obtidos segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016) e a NBR 7180 (ABNT, 2016); as análises de difração de raios-X de pó (DRX) foram realizadas em um difratômetro SmartLab SE 3kW – Rigaku usando comprimento de onda K_{α} (Cu) 1,54059 Å, passo de 0,05 e velocidade 5° min⁻¹. É importante destacar que esta última análise foi realizada após secagem em estufa (105°C), sem calcinação, para apresentar a composição dos materiais no estado em que foram utilizados nos tijolos. As concentrações de sólidos totais e voláteis (método 2540) e pH (método 9045-D) foram obtidos baseados em APHA (2012) e USEPA (2004), respectivamente, sendo o pH medido apenas para o LETA.

2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO E CURA DOS TIJOLOS

Para manter uma produção semelhante à empregada na indústria, os tijolos de LETA-solo-cimento foram moldados em uma fábrica em Toledo-PR, com auxílio de uma prensa automática da marca Alroma®. As dimensões médias dos tijolos foram 249 ± 2 mm, 126 ± 1 mm e 68 ± 1 mm, para comprimento, largura e altura, respectivamente.

A relação de mistura cimento: LETA + solo (1:9) foi definida com base em Siqueira e Holanda (2013). As proporções de cada material (LETA, solo, cimento), considerando as substituições, são apresentadas na Tabela 1. Foi utilizado cimento Portland comum CP V-ARI. Para verificar a influência da relação água cimento (a/c) nas propriedades dos tijolos, foram produzidas duas amostras com 0% de LETA, com relações a/c iguais a 0,47 (controle) e 0,65. Com relação às misturas com LETA, a relação água/cimento não pôde ser constante em todas as misturas, devido ao ajuste da trabalhabilidade necessária para a prensagem dos tijolos. Depois de moldados, os tijolos foram colocados sobre paletes e cobertos com lona plástica para evitar perda de umidade durante os primeiros sete dias.

Tabela 1. Composição dos tijolos de solo-cimento

Substituição de solo por lodo (% em peso)	Tijolos produzidos	Solo (kg)	Lodo (kg)	Cimento Portland (kg)	Água (L)	Relação água/cimento
0% (Controle)	3	15,31	0,00	1,70	0,127	0,47
0%	4	15,31	0,00	1,70	0,420	0,65
5%	5	14,54	0,77	1,70	0,225	0,51
10%	3	13,77	1,53	1,70	0,525	0,67
15%	5	13,00	2,30	1,70	0,700	0,75
25%	5	11,48	3,83	1,70	1,545	1,21
35%	5	9,95	5,36	1,70	1,910	1,38

2.3 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de absorção de água e resistência à compressão foram realizados de acordo com a norma brasileira NBR 8492 (ABNT, 2012a). Para absorção de água, os tijolos foram primeiramente secos em estufa (105°C) por aproximadamente 15 horas, até verificação de massa constante. Em seguida, foram pesados (m_1) e submersos em água por 24 horas para saturação. Após esse período, os tijolos saturados (m_2) foram pesados e a absorção de água foi calculada usando a Equação 1.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 \quad (01)$$

Onde A (%) é a absorção de água, m_1 (g) é a massa do tijolo seco e m_2 (g) é a massa do tijolo saturado.

Após o teste de absorção de água, os tijolos foram cuidadosamente serrados em sua metade do comprimento, e os encaixes (peças sobressalentes) foram retirados. As duas metades foram então sobrepostas, ficando as faces com os encaixes removidos nas faces externas. Para a sobreposição, as duas metades foram coladas com pasta de cimento Portland, e as faces externas superior e inferior foram niveladas com pasta de cimento. Os tijolos foram identificados com giz e submersos em água por 24 horas antes dos ensaios mecânicos. O ensaio de resistência à compressão foi realizado em máquina de ensaio universal com carga constante de 500 N s⁻¹ até a ruptura.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para avaliar o efeito do lodo incorporado nas propriedades físicas e mecânicas dos tijolos de solo-cimento foram aplicados testes de ANOVA de um critério, seguidos de pós-teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) entre as amostras, por meio do software BioEstat 5.0®. O par de hipóteses considerado foi:

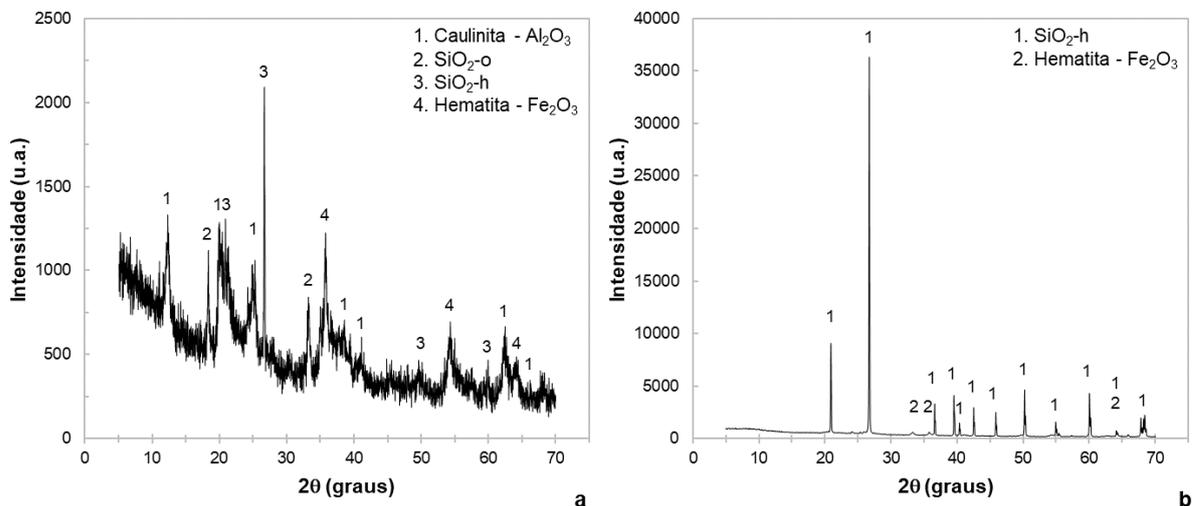
H₀: quando p-valor $> 0,05$, não houve diferença estatística no parâmetro (absorção de água/resistência à compressão) avaliado, entre as proporções de mistura analisadas;

H₁: quando p-valor $< 0,05$, houve diferença estatística no parâmetro (absorção de água/resistência à compressão) avaliado, entre as proporções de mistura analisadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LETA E SOLO

Os resultados das análises de difração de raios-X de pó (DRX) para LETA e solo são apresentadas na Figura 1a e 1b, respectivamente.



Nota: “-o” após SiO₂ significa ortorrômbico, enquanto “-h” significa hexagonal.

Figura 1. Composição mineralógica de a) lodo de estação de tratamento de água e b) solo, obtidos por difração de raios-X.

A banda em 20-30° para o LETA (Figura 1a) e os picos fracos observados para as fases cristalinas indicam a predominância da fase amorfa, o que aponta para um potencial reativo

do material ao reagir com estímulos como umidade e temperatura. As fases cristalinas identificadas foram SiO₂ ortorrômbica (SiO₂-o) e hexagonal (SiO₂-h, α -quartzo). Além disso, foram detectadas a hematita de óxido de ferro e a caulinita de óxido de alumínio (Figura 1a). Rodrigues e Holanda (2015) também encontraram esses compostos (exceto hematita) em uma amostra de LETA, além de gibsitita, goetita e illita/mica. A hematita e a caulinita encontradas nas amostras de LETA podem ser decorrentes da presença desses compostos no solo da região, que foi carregado para corpos d'água e eventualmente chegou à estação de tratamento, sendo acumulado no lodo dos decantadores. Monte Blanco *et al.* (2018) testaram 25 elementos químicos em amostras de sedimentos da zona rural de Toledo-PR, cidade onde a ETA que forneceu lodo para esta pesquisa se localiza. Os autores encontraram as maiores concentrações para ferro (42.675 - 99.691 mg kg⁻¹) e alumínio (14.534 - 56.899 mg kg⁻¹). Além disso, também encontraram altas concentrações do primeiro elemento em poços de água (inclusive acima dos parâmetros permitidos pela legislação), atribuídas ao carreamento desse material pelas chuvas. Assim, a detecção desses materiais corrobora com o relatado por Fungaro e da Silva (2014), que indicam a presença de materiais em suspensão durante o tratamento da água, como areia e derivados de argila. Quanto à amostra de solo (Figura 1b), a mesma é composta principalmente por quartzo (SiO₂-h, α -quartzo) e hematita (Fe₂O₃).

A amostra de LETA apresentou um valor de pH de 6,88. Resultados próximos foram encontrados por Barbosa *et al.* (2019) e Barakwan *et al.* (2019), para amostras de LETA de uma estação de tratamento de água brasileira (6,30) e indonésia (7,47), respectivamente. Deve-se ressaltar que valores específicos de pH são necessários para o processo de coagulação/floculação; assim, o valor observado pode estar relacionado a essa ação necessária, estando dentro da faixa ótima requerida para coagulantes a base de alumínio (5,5 – 7,5) (Baruth, 2004; Nasier; Abdulrazzaq, 2021).

Ainda para o lodo, a concentração de sólidos totais obtida de 19% foi maior do que a relatada na literatura (0,25 - 2%) (Baruth, 2004; Ahmad *et al.*, 2016; Barakwan *et al.*, 2019). Tal comportamento pode estar relacionado ao procedimento de amostragem, realizado após grande parte da água dos decantadores já ter sido escoada. Além disso, como o objetivo deste experimento era utilizar apenas a parte sólida do lodo, as amostras foram propositadamente retiradas de locais visualmente mais concentrados. Isso pode ser visto positivamente, pois o tempo/energia necessária para a secagem completa pode ter sido reduzido. Os sólidos voláteis foram cerca de ¼ dos sólidos totais, sendo um indicador da quantidade de matéria orgânica. Rodrigues e Holanda (2015) encontraram 25,85% de teor de matéria orgânica no lodo de uma ETA localizada em Campos dos Goytacazes-RJ, valor próximo ao encontrado nesta pesquisa.

Barbosa *et al.* (2019) apontaram que o elevado teor de matéria orgânica pode afetar a viabilidade do uso de LETA em tijolos de solo-cimento. Para o solo, a concentração de sólidos totais encontrada foi bastante elevada (94,2%), a umidade encontrada, provavelmente é água higroscópica. Segundo Saarenketo (1998), a água higroscópica é um tipo de água retida encontrada em todos os solos de granulação fina (argilosos, em particular), devido às cargas superficiais negativas das plaquetas minerais argilosas que compõem os solos. Com relação aos sólidos voláteis, o solo apresentou 2,2% de sólidos totais (ST), apresentando desta forma reduzido teor de matéria orgânica.

A Figura 2 mostra as curvas granulométricas dos dois materiais isoladamente e conjuntamente nas porções previamente determinadas.

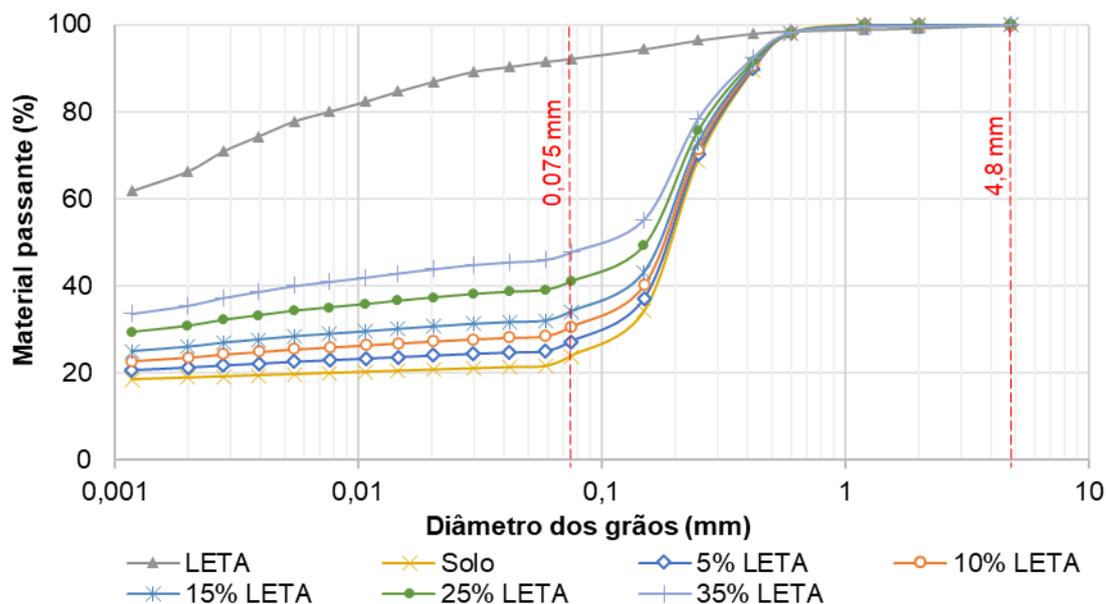


Figura 2. Curvas de distribuição granulométrica de LETA, solo e misturas solo+LETA.

Segundo ABCP (2000), os solos adequados para a produção de tijolos de solo-cimento devem apresentar 100% de grãos com diâmetro menor que 4,8 mm, e 10 a 50% com diâmetro menor que 0,075 mm; além disso, o limite de liquidez e o índice de plasticidade devem ser menores ou iguais a 45% e 18%, respectivamente. A amostra de solo apresentou um limite de liquidez de 15,6% e um limite de plasticidade de 13,6%, resultando em um índice de plasticidade de 2%; e 100% e 23,8% de material passando pelas peneiras de 4,8 mm e 0,075 mm (Figura 2), respectivamente. Assim, verifica-se que o solo possui os requisitos necessários para confecção de tijolos de solo-cimento. Por outro lado, as amostras de lodo tiveram 99,4% dos grãos passando pela peneira de 4,8 mm e 91,8% passando pela peneira de 0,075 mm,

portanto, é muito mais fino que o solo. Desta forma, o LETA sozinho não conseguiria ser moldado em tijolos de solo-cimento de forma satisfatória. Entretanto, a adição parcial de 5, 10, 15, 25 e 35% resultaram em 27, 31, 34, 41 e 48% de material passando por 0,075 mm, estando de acordo com a sugestão da ABCP (2000).

É importante mencionar que as amostras de lodo não permitiram a execução dos limites de Atterberg (sendo assim consideradas não plásticas). Lucena et al. (2016) encontraram o mesmo comportamento em outra amostra de LETA, proveniente de uma estação que utilizava sulfato de alumínio. Os autores explicam que o coagulante impermeabilizou completamente o solo, reduzindo a plasticidade, o que também poderia explicar a não plasticidade dos resíduos. Ao adicionar água ao lodo, ocorria a evaporação e a repulsão das partículas de água. O mesmo foi encontrado neste trabalho, porém o coagulante utilizado foi o policloreto de alumínio (PAC). Baruth (2004) também afirma que os lodos de alumínio são gelatinosos e com baixa compactabilidade.

3.2 ANÁLISE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Figura 3 mostra os resultados dos ensaios de absorção de água aos 14 dias para os diferentes traços analisados. A absorção de água está associada à durabilidade dos tijolos, pois indica a porosidade do material. Valores elevados de absorção de água sugerem baixa resistência às condições climáticas externas (Eliche-Quesada *et al.*, 2011; De Silva; Hansamali, 2019; Erdogmus *et al.*, 2021). De acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012b), amostras de um mesmo traço não devem apresentar absorção média de água superior a 20%, nem valores individuais superiores a 22%, com idade mínima de sete dias.

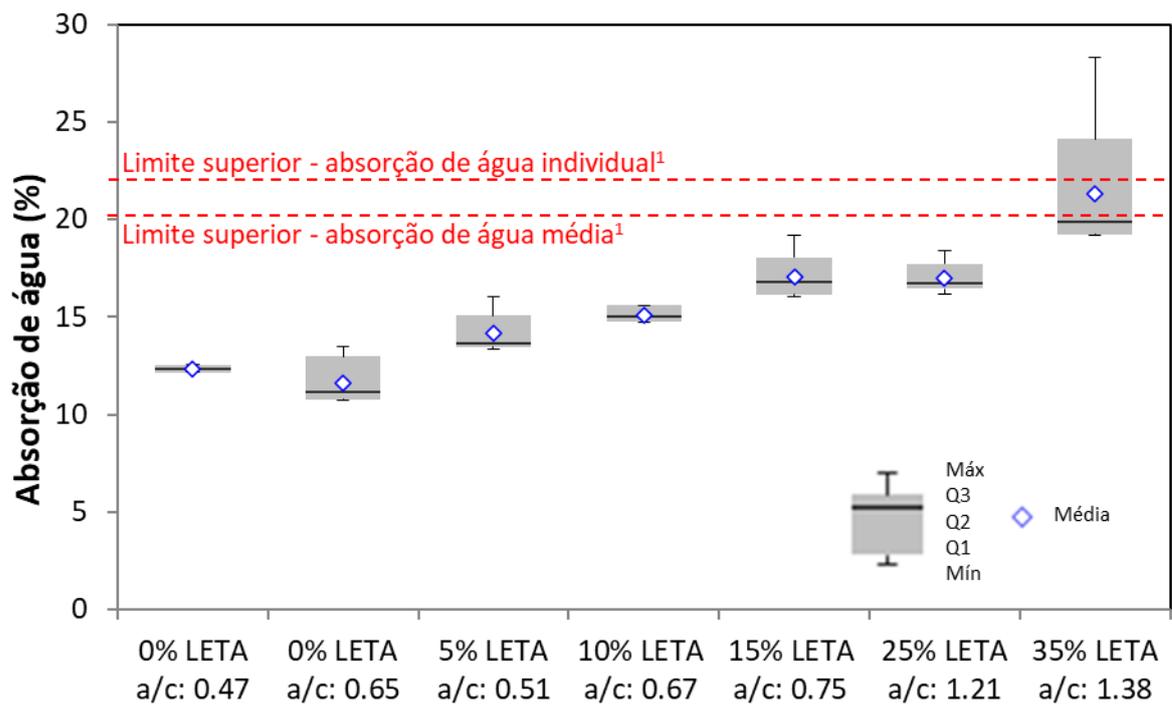


Figura 3. Resultados da absorção de água pelos tijolos de solo-cimento aos 14 dias.
 Nota: ¹conforme NBR 8491 (ABNT, 2012b). LETA: lodo de estação de tratamento de água. a/c: relação água/cimento.

Pode-se observar a partir da Figura 3, que as duas amostras com 0% de LETA, com a/c 0,47 e 0,65, apresentaram absorção de água semelhante, $12,35 \pm 0,2\%$ e $11,63 \pm 1,3\%$, respectivamente, o que sugere que a relação a/c não influenciou significativamente a absorção de água de tijolos sem incorporação de LETA.

Para as substituições de 5, 10, 15, 25 e 35%, os valores médios de absorção de água foram $14,15 \pm 1,1\%$, $15,12 \pm 0,4\%$, $17,05 \pm 1,3\%$, $17,02 \pm 0,8\%$ e $21,31 \pm 3,9\%$, respectivamente. Portanto, todos os valores com até 25% de LETA incorporado atendem aos requisitos recomendados pela NBR 8491 (ABNT, 2012b). A Figura 3 mostra que o aumento no teor de substituição de LETA aumentou gradativamente a absorção de água. Em comparação com a amostra de controle (0% LETA e a/c 0,47), foram observados aumentos na absorção de água de 22% (10% LETA), 25% (15% LETA), 37% (25% LETA) e 73% (35% LETA).

Os resultados corroboram com Rodrigues e Holanda (2015), Anjum *et al.* (2017) e Barbosa *et al.* (2019), que observaram um aumento na absorção de água com o aumento de lodo na mistura em tijolos de solo-cimento. Segundo Rodrigues *et al.* (2015), isto pode estar relacionado ao aumento da fração fina da mistura (partículas de argilominerais), evidenciado na distribuição granulométrica mostrada na Figura 2, que requer mais água para uma boa trabalhabilidade na moldagem, afetando negativamente a hidratação do cimento, devido à

maior área superficial das partículas. Entretanto, cabe ressaltar que a quantidade de água adicionada por Rodrigues et al. (2015) foi mantida constante em todas as misturas, enquanto no presente trabalho este parâmetro variou para manter a trabalhabilidade necessária.

O teste ANOVA de um critério mostrou que pelo menos um dos traços apresentou absorção de água diferente em relação aos demais (p-valor < 0,0001). A Tabela 2 mostra os resultados do pós-teste de Tukey.

Tabela 2. Resultados do p-valor do pós-teste de Tukey para absorção de água

Traço	0% LETA a/c: 0,65	5%LETA a/c: 0,51	10% LETA a/c: 0,67	15%LETA a/c: 0,75	25%LETA a/c: 1,21	35% LETA a/c: 1,38
0% LETA a/c: 0,47	ns ¹	ns ¹	ns ¹	0,0022	0,0024	<0,0001
0% LETA a/c: 0,65	-	ns ¹	0,0226	<0,0001	<0,0001	<0,0001
5%LETA a/c: 0,51	-	-	ns ¹	0,0218	0,0234	<0,0001
10% LETA a/c: 0,67	-	-	-	ns ¹	ns ¹	<0,0001
15% LETA a/c: 0,75	-	-	-	-	ns ¹	0,0015
25%LETA a/c: 1,21	-	-	-	-	-	0,0014

Nota: ¹ns significa diferença não significativa. LETA: lodo de estação de tratamento de água. a/c: relação água/cimento.

As amostras com 0% de LETA e diferentes relações a/c podem ser consideradas estatisticamente iguais em relação à absorção de água. Isso indica que a adição de água realizada neste estudo para atingir a trabalhabilidade necessária não influenciou na propriedade de absorção de água. Entretanto, sugere-se que trabalhos futuros avaliem maiores incrementos na relação a/c para melhor entendimento da influência deste parâmetro. Para misturas com teores de LETA de até 10%, apenas as amostras com 0% de LETA e a/c 0,65 e 10% de LETA foram estatisticamente diferentes, o que sugere que baixos teores de LETA não influenciam significativamente os valores de absorção de água dos tijolos. A absorção de água da amostra com 35% LETA, que é o maior valor entre os traços analisados, difere significativamente das demais. Assim, altos níveis de substituição do solo por LETA possivelmente podem prejudicar a durabilidade dos tijolos, deixando-os mais suscetíveis à

ação da umidade e agentes potencialmente agressivos carregados pela água ao longo de sua vida útil.

3.3 ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 4 mostra os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos tijolos aos 14 dias. De acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012b), amostras de um mesmo traço submetidas a ensaios de resistência à compressão não devem apresentar resultado médio inferior a 2,0 MPa. Além disso, nenhum dos tijolos ensaiados pode apresentar resistência à compressão inferior a 1,7 MPa, com idade mínima de sete dias. O teste ANOVA de um critério revelou que pelo menos um dos traços de tijolos apresenta resistência à compressão diferente dos demais (p -valor $< 0,0001$). A Tabela 3 mostra os resultados do pós-teste de Tukey.

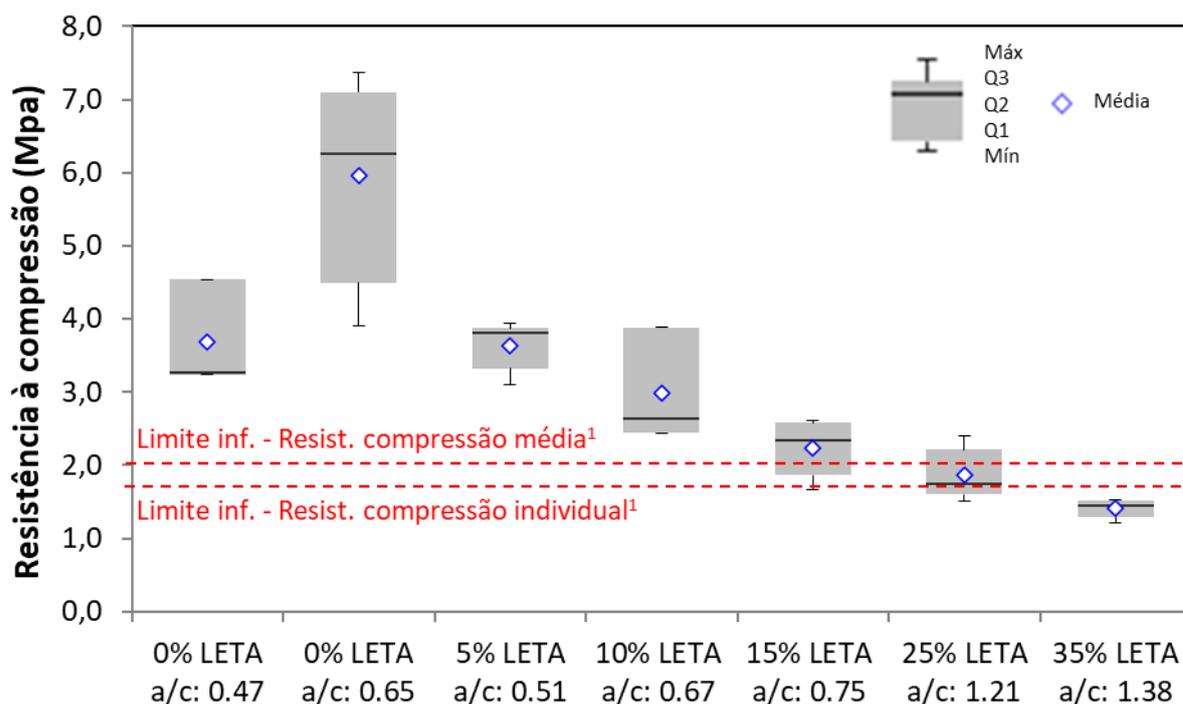


Figura 4. Resultados de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento aos 14 dias.

Nota: ¹conforme NBR 8491 (ABNT, 2012b). LETA: lodo de estação de tratamento de água. a/c: relação água/cimento.

Tabela 3. Resultados do p -valor do pós-teste de Tukey para resistência à compressão

Traço	0% LETA a/c: 0,65	5% LETA a/c: 0,51	10% LETA a/c: 0,67	15% LETA a/c: 0,75	25% LETA a/c: 1,21	35% LETA a/c: 1,38
0% LETA a/c: 0,47	< 0,001	ns ¹	ns ¹	0,0072	0,0012	< 0,001

0% LETA	-	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
a/c: 0,65						
5% LETA	-	-	ns ¹	0,0031	< 0,001	< 0,001
a/c: 0,51						
10% LETA	-	-	-	ns ¹	0,0318	0,0037
a/c: 0,67						
15% LETA	-	-	-	-	ns ¹	ns ¹
a/c: 0,75						
25% LETA	-	-	-	-	-	ns ¹
a/c: 1,21						

Nota: ¹ns significa diferença não significativa. LETA: lodo de estação de tratamento de água. a/c: relação água/cimento.

Os tijolos com 0% de LETA e relação a/c de 0,47 apresentaram resistência à compressão média de $3,68 \pm 0,5$ MPa, estatisticamente diferente e inferior à resistência à compressão do tijolo com 0% de LETA e relação a/c de 0,65 ($5,95 \pm 0,7$ MPa). Em geral, espera-se que o aumento da proporção de água reduza a resistência à compressão, fato que não foi verificado neste trabalho. Segundo Mehta e Monteiro (2006), a diminuição da resistência à compressão ocorre com o aumento da relação água-cimento, como consequência natural de um enfraquecimento progressivo da matriz causado pelo aumento da porosidade. Na Figura 3, observou-se que o tijolo com 0% de LETA e a/c 0,65 apresentou menor absorção de água, correspondendo a uma menor porosidade dessa mistura quando comparado aos tijolos com 0% de LETA e a/c 0,47. Além disso, melhorando a trabalhabilidade da mistura, a resistência da zona de transição interfacial pode ter sido melhorada. Acredita-se que devido à baixa trabalhabilidade alcançada para a mistura com a/c 0,47 a coesão entre as partículas foi prejudicada e, conseqüentemente, houve redução de sua resistência mecânica. Novos estudos são recomendados para avaliar a influência da relação a/c na resistência à compressão de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos.

Para os demais traços, as resistências à compressão médias encontradas foram $3,64 \pm 0,3$ (5% LETA), $2,99 \pm 0,8$ (10% LETA), $2,24 \pm 0,4$ (15% LETA), $1,87 \pm 0,4$ (25% LETA) e $1,41 \pm 0,1$ MPa (35% LETA). As resistências à compressão das amostras com 10 e 15% foram estatisticamente iguais ao controle (0% LETA e a/c 0,47). Observou-se que o aumento da incorporação de LETA reduziu a resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento. No entanto, as amostras com até 15% de substituição do solo por LETA ainda atendem aos requisitos de resistência estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012b). Além disso, apenas um dos tijolos com 25% de substituição apresentou resistência individual abaixo do

estabelecido, sugerindo que, com alguns ajustes, tal resistência pode ser alcançada mesmo para ¼ de substituição do solo por resíduo.

Estes resultados estão de acordo com os resultados de absorção de água apresentados anteriormente. Além disso, o LETA apresenta 25% de sólidos voláteis em relação aos sólidos totais, ou seja, espera-se um aumento do teor de matéria orgânica na mistura, o que também pode prejudicar a hidratação do cimento. Os resultados também corroboram com Rodrigues e Holanda (2015), Anjum et al. (2017) e Barbosa et al. (2019), que incorporaram LETA em tijolos de solo-cimento e observaram uma diminuição nos valores de resistência à compressão com o aumento do teor de LETA nos tijolos. Ressalta-se que todos esses trabalhos relataram resistência à compressão de até 5 MPa em 28 dias de cura dos tijolos.

Observou-se para as amostras, que as propriedades de absorção de água e resistência mecânica se comportaram de forma inversa, reforçando que a absorção de água está relacionada ao adensamento da matriz e valores reduzidos prejudicam a capacidade dos tijolos de resistir a solicitações mecânicas (Fungaro; Da Silva 2014; Rodrigues; Holanda, 2015). Quanto ao percentual de material incorporado, a mistura com 15% de LETA apresenta-se como a proporção ótima para as propriedades analisadas. Ressalta-se que a mistura com 25% de LETA pode ser adaptada futuramente para atender ambos os parâmetros e permitir uma maior substituição nos tijolos estudados.

3.4 IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E DE SUSTENTABILIDADE

Os resultados apresentados neste estudo mostram que a adição gradual de LETA aumenta a absorção de água e reduz a resistência à compressão de tijolos de solo-cimento com incorporação deste resíduo. Porém, outros aspectos devem ser considerados, principalmente do ponto de vista ambiental.

No Brasil, é comum que as estações de tratamento de água lancem seus resíduos sem tratamento em corpos hídricos (IBGE, 2011; Achon *et al.*, 2013; Ramos, 2018), causando sérios problemas ambientais (Ahmad *et al.*, 2016), mesmo com a proibição desta prática pela legislação brasileira (Brasil, 2010).

Pode-se alegar também que a energia necessária para a secagem do lodo seria uma desvantagem para a adição desse resíduo nos tijolos. No entanto, as práticas atuais de manejo de lodo mais ambientalmente adequadas (disposição em aterros sanitários, por exemplo) também já exigem essa secagem, visando reduzir o volume e consequentes custos com transporte e área de disposição (Baruth, 2004; Dassanayake *et al.*, 2015).

Além disso, a resistência à compressão encontrada para a substituição de 15% de solo por LETA atendeu ao mínimo estabelecido pela norma brasileira, aos 14 dias de idade. Desta forma, entende-se que é possível reduzir o tempo de cura e armazenamento do material, contribuindo para a agilidade na entrega para a indústria da construção civil e redução do tempo do ciclo de produção e tamanho dos depósitos. Ainda, como mensalmente são geradas grandes quantidades de lodo nas ETAs, essa agilidade pode contribuir para a utilização do maior volume possível desse material, a ser absorvido pela indústria da construção civil.

Por fim, pontuando de forma exploratória a situação atual da fábrica utilizada para se confeccionar os tijolos neste trabalho, observa-se que o solo utilizado é transportado de uma jazida cerca de 70 km distante do ponto de fabricação; se a adição de 15% de LETA permitir que os requisitos regulatórios sejam atendidos, talvez a redução dos custos de transporte do solo leve até mesmo à viabilidade financeira dessa substituição. Da mesma forma, a disponibilização/comercialização desse material pela ETA, gerando receita ou reduzindo custos de disposição final pode ser benéfica, transformando o viés do lodo de resíduo para insumo para a construção civil. Apesar desses breves comentários, cabe ressaltar que a análise da viabilidade financeira da incorporação do lodo e o atual gerenciamento na ETA não fazem parte do escopo deste trabalho.

4 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo a produção de tijolos de solo-cimento com incorporação de lodo de estação de tratamento de água (LETA), a partir da substituição parcial do solo, e a verificação da influência dessa incorporação nas principais propriedades do tijolo reguladas por norma (absorção de água e resistência à compressão).

A caracterização do resíduo revelou alto teor de sólidos em relação à literatura, provavelmente devido ao procedimento de coleta. Além disso, a análise de DRX mostrou que o resíduo apresenta características mineralógicas compatíveis com o solo da região, composto principalmente por ferro e alumínio.

Com relação à absorção de água, foi possível perceber que houve um aumento gradativo na capacidade de absorção dos tijolos à medida que se aumentava o percentual de LETA no traço, indicando que o resíduo tem maior capacidade de absorção, influenciando nessa característica do produto final. Isso foi atribuído à grande parcela de finos do LETA, com 91,8% de seus grãos passando pela peneira de 0,075 mm. Apesar disso, a adição de até

25% de LETA apresentou uma absorção média de $17,02 \pm 0,8\%$, podendo atender às exigências regulatórias brasileiras (absorção média $< 20\%$).

Em termos de resistência à compressão, a adição gradativa de resíduo provocou redução nesta propriedade mecânica, atribuída ao teor de matéria orgânica do LETA (25% de ST). No entanto, adições de até 10% não apresentaram diferença significativa neste parâmetro em relação ao controle, e a substituição do solo por 15% de lodo conseguiu atingir uma resistência à compressão média de $2,24 \pm 0,4$ MPa, atendendo à norma brasileira (resistência à compressão média > 2 MPa).

A produção de tijolos de solo-cimento com substituição parcial do solo pelo lodo de ETA mostrou-se uma alternativa viável do ponto de vista técnico. Tal substituição permite dar-se uma destinação ambientalmente mais adequada ao principal resíduo gerado em estações de tratamento de água, os quais são comumente lançados em corpos d'água, sem qualquer tratamento.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa ECOTOL, pelo fornecimento de solo e maquinário para a prensagem dos tijolos e à Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, pelo lodo de estação de tratamento de água fornecido. RS agradece ao Fundo de Defesa de Direitos Difusos/MJSP - TED FDD N° 27/2019 - 08000.012516/2019-27.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. 3. ed. rev. atual. São Paulo: ABPC, 2000. 16p. (BT-111).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**: tijolo de solo-cimento: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491**: tijolo de solo-cimento: requisitos. Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Eng. Sanit. e Ambient.**, v. 18, p. 115-122, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200003>.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3 'R' concept. **J. Clean. Prod.**, v. 124, p. 1-13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.073>.

ANJUM, T. et al. Production of soil-cement bricks using sludge as a partial substitute. **Earth Sci. Malays.**, v. 1, n. 2, p. 10-12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.26480/esmy.02.2017.10.12>.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, DC: American public health association, 2012.

BARAKWAN, R. A.; TRIHADININGRUM, Y.; BAGASTYO, A. Y. Characterization of alum sludge from Surabaya water treatment plant, Indonesia. **J. Ecol. Eng.**, v. 20, n. 5, 2019. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/104619>.

BARBOSA, M. F. L. et al. Rice husk and water treatment plant sludge incorporated into soil-cement brick. **Asian J. Civ. Eng.**, v. 20, n. 4, p. 563-570, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00124-2>.

BARUTH, E. E. **Water treatment plant design**. 4. ed. AWWA, ASCE. Nova Iorque: McGraw-Hill Education, 2004.

BRASIL. **Lei nº.12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 07 jun. 2022.

DASSANAYAKE, K. B. et al. A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. **Waste Management**, v. 38, p. 321-335, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.025>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093**: Solos – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

DE SILVA, G. H. M. J. S.; HANSAMALI, E. Eco-friendly fired clay bricks incorporated with porcelain ceramic sludge. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116754, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116754>.

ELICHE-QUESADA, D. et al. The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. **Appl. Clay Sci.**, v. 52, n. 3, p. 270-276, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.03.003>.

ERDOGMUS, E. et al. New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes. **J. Build. Eng.**, v. 42, p. 102471, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102471>

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2017.

FUNGARO, D. A.; SILVA, M. V. D. Utilization of water treatment plant sludge and coal fly ash in brick manufacturing. **Am. J. Environ. Prot.**, v. 2, n. 5, p. 83-88, 2014. DOI: <https://doi.org/10.12691/env-2-5-2>.

HAN, L. C. et al. Use of Compressed Earth Bricks/Blocks in Load-Bearing Masonry Structural Systems: A Review. In: **MSF**. Trans Tech Publications Ltd, 2020. p. 9-19. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.997.9>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2008**, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2017**, 2020.

JAHANSHAH, M.; TAGHIZADEH, M. Pre-sedimentation tank effects on water treatment unit operation. **EQA**, v. 28, p. 35-42, 2018. DOI: <https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/7804>.

LUCENA, L. C. et al. Caracterização e avaliação do potencial de aproveitamento de lodo de ETE e ETA em Pavimentação. **Eng. Agrícola**. 36: 166-178, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p166-178/2016>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Education, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1036/0071462899>.

MONTE BLANCO, S. P. D. et al. Groundwater quality monitoring of the Serra Geral aquifer in Toledo, Brazil. **J. Environ. Sci. Health A**, v. 53, n. 14, p. 1243-1252, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1528038>.

NASCIMENTO, E. S. S. et al. Soil-cement brick with granite cutting residue reuse. **J. Clean. Prod.**, v. 321, p. 129002, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129002>.

NASIER, M. A.; ABDULRAZZAQ, K. A. Conventional water treatment plant, principles, and important factors influence on the efficiency. **Design Engineering**, p. 16009-27, 2021.

RAMOS, J. G. V. S. **Análise de uma Estação de Tratamento de Água quanto à geração e destinação de resíduos**. 2018. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

REIS, F. M. D.; RIBEIRO, R. P.; REIS, M. J. Physical-mechanical properties of soil-cement bricks with the addition of the fine fraction from the quartzite mining tailings (State of Minas

Gerais–Brazil). **Bull. Eng. Geol. Environ.**, v. 79, n. 7, p. 3741-3750, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01765-3>.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of water treatment plant waste for production of soil-cement bricks. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 197-202, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.064>.

RUVIARO, A. S. et al. Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production. **J. Clean. Prod.**, v. 327, p. 129484, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129484>.

SAARENKETO, T. Electrical properties of water in clay and silty soils. **J. Appl. Geophys.**, v. 40, n. 1-3, p. 73-88, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(98\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00017-2).

SAKHARE, V. V.; RALEGAONKAR, R. V. Development and investigation of cellular light weight bio-briquette ash bricks. **Clean Techn. Environ. Policy**, v. 19, n. 1, p. 235-242, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1200-5>.

SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. Reuse of grits waste for the production of soil–cement bricks. **J. Environ. Manag.**, v. 131, p. 1-6, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1200-5>.

SENTHIL, R. et al. Utilization of various solid leather wastes for the production of blended bricks. **Clean Techn. Environ. Policy**, p. 1-13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02295-0>.

SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. Reuse of grits waste for the production of soil–cement bricks. **J. Environ. Manag.**, v. 131, p. 1-6, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.040>.

TABONI JÚNIOR. L. R. **Quantificação e caracterização de lodo gerado em estação de tratamento de água considerando a sazonalidade pluviométrica: estudo de caso na cidade de Maringá – PR**. 2020. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Maringá, 2020.

TEIXEIRA, S. R. et al. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Appl. Clay Sci.**, v. 53, n. 4, p. 561-565, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.05.004>.

U.S. Environmental Protection Agency. **Method 9045D: Soil and Waste pH**. Washington DC, 2004.

REDDY, B. V. V.; JAGADISH, K. S. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. **Energy Build.**, v. 35, n. 2, p. 129-137, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00141-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00141-4).

ŻOCZEK, Ł.; DUDZIAK, M. Types and valorization of sludge generated in water treatment processes. **Architecture, Civil Engineering, Environment**, v. 15, n. 1, p. 115-121, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21307/acee-2022-010>.