

## Avaliação comparativa da integridade e durabilidade de materiais cimentícios incorporados com resíduos sólidos

### *Comparative assessment of the integrity and durability of cementitious materials incorporating solid wastes*

Maria Sabrina Soares de Morais<sup>1</sup>, André Luiz Fiquene de Brito<sup>2</sup>, Ana Cristina Silva Muniz<sup>3</sup>, Laedson Eneas Cavalcante<sup>4</sup>

**RESUMO:** Este estudo avaliou a integridade e durabilidade de matrizes cimentícias obtidas a partir da estabilização por solidificação de três resíduos sólidos industriais – lama vermelha, lodo de esgoto e cinza de bagaço de cana-de-açúcar – visando seu reaproveitamento para outros fins, a exemplo da produção de blocos de pavimentação. As matrizes foram preparadas com cimento Portland CII-Z-32 e curadas por 28 dias. Empregou-se um delineamento experimental unifatorial (fator: tipo de resíduo; três tratamentos e três réplicas) para avaliar resistência à compressão (NBR 7215/2019), absorção de água (NBR 9778/2009) e perda de massa após três ciclos de umidificação e secagem (WTC 1991). A caracterização físico-química dos resíduos incluiu pH, sólidos totais e suas frações, difratometria de raios X (DRX) e quantificação de metais pesados e demanda química de oxigênio (DQO) no extrato lixiviado. Os ensaios de integridade e durabilidade apresentaram resultados dentro dos critérios de aceitabilidade definidos por Brito e Soares (2009), com a lama vermelha exibindo o melhor desempenho, apresentando resistência média de  $7,24 \pm 0,70$  MPa e porosidade de  $9,70 \pm 0,24\%$ . Os resultados indicam que a estabilização por solidificação é uma alternativa promissora para o reaproveitamento desses resíduos, contribuindo para práticas sustentáveis de gestão ambiental.

**Palavras-chave:** Cinza de bagaço de cana-de-açúcar; Estabilização por solidificação; Lama vermelha; Lodo de esgoto.

**ABSTRACT:** This study evaluated the integrity and durability of cementitious matrices obtained from the solidification/stabilization (S/S) of three industrial solid wastes – red mud, sewage sludge, and sugarcane bagasse ash – aiming at their reuse for other purposes, such as the production of paving blocks. The matrices were prepared with Portland cement CII-Z-32 and cured for 28 days. A one-way experimental design (factor: waste type; three treatments and three replicates) was employed to assess compressive strength (NBR 7215/2019), water absorption (NBR 9778/2009), and mass loss after three wetting and drying cycles (WTC, 1991). The physicochemical characterization of the wastes included pH, total solids and fractions, X-ray diffraction (XRD), and quantification of heavy metals and chemical oxygen demand (COD) in the leachate extract. Integrity and durability tests showed results within the acceptability criteria defined by Brito and Soares (2009), with red mud exhibiting the best performance, showing an average compressive strength of  $7.24 \pm 0.70$  MPa and porosity of  $9.70 \pm 0.24\%$ . The results indicate that solidification/stabilization is a promising alternative for the reuse of these residues, contributing to more sustainable industrial waste management practices.

**Keywords:** Sugarcane bagasse ash; Solidification/stabilization; Red mud; Sewage sludge.

**Autor correspondente:** Maria Sabrina Soares de Morais  
E-mail: mariasabrinamoraes@gmail.com

Recebido em: 2025-09-04  
Aceito em: 2025-12-10

<sup>1</sup> Mestra em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande (PB), Brasil.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professor da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande (PB), Brasil.

<sup>3</sup> Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professora da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande (PB), Brasil.

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande (PB), Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos industriais (RSI) são subprodutos gerados em atividades industriais e processos de fabricação, podendo ser classificados como perigosos ou não perigosos, reutilizáveis ou não reutilizáveis, recicláveis ou não recicláveis (Soliman; Moustafa, 2020). Estima-se que, globalmente, a geração de resíduos sólidos ultrapasse 2 bilhões de toneladas por ano, sendo o setor industrial responsável por uma parcela significativa desse total – o que o torna uma das principais fontes de poluição, especialmente em países em desenvolvimento, como o Brasil (Kaza *et al.*, 2018). Os RSI derivam de uma ampla variedade de processos e apresentam propriedades físicas e químicas distintas, resultando em uma composição heterogênea (Ke *et al.*, 2023). A gestão inadequada desses resíduos, incluindo seu descarte incorreto, representa uma séria ameaça ao meio ambiente e à saúde humana, por contribuir com a poluição do ar, a contaminação do solo e a degradação da qualidade da água.

A adoção de práticas como reutilização, reciclagem e recuperação de RSI tem se mostrado uma estratégia eficaz para o gerenciamento dos RSI, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais. Entre as principais rotas para a valorização desses resíduos estão a produção de materiais de construção, a síntese de materiais funcionais ambientais e a extração de elementos valiosos (Shen *et al.*, 2019). Atualmente, o reaproveitamento de RSI na construção civil é uma abordagem comumente empregada, em função da alta demanda por materiais de construção e ao baixo custo associado a esse processo (Ke *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o tratamento usando a estabilização por solidificação (E/S) surge como uma técnica promissora que combina dois processos inter-relacionados ocorrendo simultaneamente para resultar em um material com menor impacto ambiental quando descartado ou reutilizado (Chen; Nakamura; Hama, 2023). A E/S reduz a mobilidade dos resíduos sólidos ao encapsulá-lo em uma matriz sólida, na qual o aglomerante pode, ou não, reagir quimicamente com os resíduos, mas assegura sua fixação no material solidificado. Segundo Liu *et al.* (2018) o cimento Portland é amplamente utilizado como aglomerante na E/S devido a suas vantagens, como alta disponibilidade no mercado, baixo custo, fácil aplicação e alta eficiência.

Dois tipos de interações entre os resíduos e a matriz de cimento devem ser considerados. A primeira refere-se àquelas que influenciam diretamente a reação de hidratação do cimento, podendo acelerá-la ou retardá-la e o segundo envolve as reações que continuam a ocorrer na matriz endurecida, o que pode comprometer sua integridade e, assim, afetar sua durabilidade a longo prazo (Milestone, 2006). Assim, é necessário realizar uma avaliação física e estrutural do material E/S para determinar a viabilidade de sua utilização.

De acordo com Brito e Soares (2009), os ensaios mais relevantes para avaliação da integridade e durabilidade dos materiais E/S são de resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação e secagem. Esses ensaios avaliam a capacidade do material de suportar forças de compressão, a sua porosidade com base na quantidade de água absorvida e a durabilidade a longo prazo por meio da simulação das variações das condições ambientais.

Três tipos de resíduos sólidos foram estudados neste trabalho: lama vermelha (LV), lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) e cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). A lama vermelha é um resíduo gerado no beneficiamento da bauxita, com geração anual estimada entre 120 e 150 milhões de toneladas (Pan *et al.*, 2023). O lodo de esgoto é proveniente do tratamento de efluentes domésticos e industriais, atingindo uma geração global de cerca de 45 milhões de toneladas por ano (Giwa *et al.*, 2023). A cinza de bagaço de cana são subprodutos da incineração do bagaço, gerando aproximadamente 6,2 kg de cinza por tonelada de bagaço processado, frequentemente descartadas em aterros sanitários ou de forma irregular (Lima *et al.*, 2023).

O objetivo do estudo foi avaliar comparativamente a integridade e durabilidade de matrizes cimentícias obtidas a partir da estabilização por solidificação desses três resíduos sólidos industriais, conforme os critérios propostos por Brito e Soares (2009) para materiais estabilizados por solidificação. Para isso, foi adotado um delineamento experimental unifatorial, considerando o tipo de resíduo como fator qualitativo, a fim de analisar seus efeitos sobre as variáveis de resposta: resistência à compressão, absorção de água e perda de massa após ciclos de umidificação e secagem. A análise estatística incluiu a aplicação da análise de variância (ANOVA), com posterior teste de Tukey, para identificar diferenças significativas entre os tratamentos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento unifatorial foi adotado para investigar a influência do fator qualitativo ‘tipo de resíduo’ sobre as variáveis de resposta: resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação e secagem. Três tratamentos foram definidos (lama vermelha, lodo de esgoto e cinza de bagaço de cana), cada tratamento com três réplicas, totalizando nove experimentos.

### 2.2 CONFECÇÃO DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS

A preparação das matrizes cimentícias seguiu os procedimentos operacionais descritos por Brito e Soares (2009) no Protocolo de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação, que estabelece condições ideais e padroniza o processo de confecção. As matrizes foram produzidas em moldes cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, a partir de uma mistura de cimento Portland CII-Z-32, areia e RSI, com traço 1:3 (cimento: demais constituintes) e massa total de 450 g por corpo de prova. O percentual de RSI foi fixado em 15%, conforme proposto pelos autores. A relação água/cimento foi de aproximadamente 0,72 para as matrizes contendo lama vermelha e lodo de esgoto, e de 1,07 para aquelas com cinza de bagaço de cana-de-açúcar, ajustada para garantir a trabalhabilidade, uma vez que cada resíduo apresenta propriedades físicas distintas que influenciam a demanda de água.

Os componentes secos foram pesados e misturados manualmente até completa homogeneização; em seguida, adicionou-se a água deionizada, obtendo-se uma pasta que foi moldada e adensada manualmente. As matrizes permaneceram em repouso por 24h e, após desmolde, foram submetidas à cura por 28 dias, conforme o comportamento típico de hidratação do cimento Portland (Chidiac; Panesar, 2008).

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 2.3.1 pH, sólidos totais e frações

As análises de pH foram realizadas pelo método potenciométrico em suspensão aquosa, descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2022). Para cada resíduo e matriz cimentícia, 5,0 g de amostra foram misturados a 50 mL de água destilada previamente fervida e resfriada, permanecendo em repouso por 24h. As medições foram feitas com auxílio de um pHmetro DIGIMED DM-22, previamente calibrado com soluções tampão padrão.

As determinações de sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV), sólidos totais fixos (STF) e umidade (U) foram realizadas pelo método gravimétrico descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2022). As amostras dos resíduos e das matrizes cimentícias (5,0 g) foram secas em estufa a 105°C e posteriormente calcinadas a 550°C em forno mufla, utilizando cápsulas de porcelana previamente tratadas. Os resultados de ST, STV, STF e U foram calculados a partir das massas obtidas nas etapas de secagem e calcinação, conforme as equações recomendadas pelo método.

### 2.3.2 Difractometria de raios X (DRX)

A composição mineralógica cristalina dos resíduos foi determinada por difratometria de raios X utilizando um difratômetro LabX XRD-6100 (Shimadzu). Os difratogramas obtidos foram comparados com o banco de dados *Crystallography Open Database* (COD, 2018) para identificação das fases minerais, empregando-se o software *Match!3*. A interpretação e o refinamento dos picos e a extração dos resultados finais, foram realizados no software *Origin 2019 Professional*. A apresentação final dos resultados considerou as fases identificadas e sua interpretação qualitativa com base nas intensidades relativas dos picos difratados.

### 2.3.3 Classificação dos resíduos sólidos industriais

A norma NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a), define o ensaio de lixiviação para classificar os resíduos sólidos industriais em classe I – perigosos ou classe II – não perigosos. O procedimento para o ensaio de lixiviação foi realizado conforme a norma

NBR 10005/2004 (ABNT, 2004b). A partir do extrato lixiviado determinou-se a concentração de metais pesados por espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-AES), e a demanda química de oxigênio (DQO) pelo método de refluxo fechado descrito pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2022).

## 2.4 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE E DURABILIDADE: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E UMIDIFICAÇÃO E SECAGEM

A resistência à compressão foi determinada conforme a metodologia da NBR 7215/2019 (ABNT, 2019). Os corpos de prova ensaiado individualmente, posicionando-os centralizadamente no prato inferior da prensa manual Pavitest (Contenco) e submetido à aplicação contínua de carga até o rompimento. Por se tratar de uma prensa manual, a taxa de carregamento variou conforme a operação, mantendo-se um incremento gradual e contínuo até a falha do corpo de prova. A resistência foi calculada a partir da carga de ruptura e da área da seção comprimida.

A capacidade de absorção de água foi avaliada segundo a NBR 9778/2009 (ABNT, 2009). As matrizes foram secas em estufa a 105°C por 24h, resfriadas em dessecador e pesadas (massa seca). Em seguida, foram imersas em água a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  por 72h e, após essa etapa, colocadas em recipiente com água aquecida progressivamente até a ebulição, que foi mantida por 5h com o volume de água constante. Após o resfriamento natural até  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , as amostras foram novamente pesadas (massa saturada). O teor de absorção de água foi calculado a partir das massas seca e saturada.

O ensaio de umidificação e secagem, utilizado para avaliar a durabilidade das matrizes, foi realizado conforme o *Proposed evaluation protocol for cement-based solidified wastes* (WTC, 1991). Cada ciclo consistiu na imersão dos corpos de prova em água até completa umidificação, seguida da secagem em estufa a 105 °C por 24h, resfriamento em dessecador e pesagem. Foram realizados três ciclos consecutivos, e a degradação foi quantificada pela perda de massa acumulada após o último ciclo.

## 2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi conduzida por meio da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para comparação de pares das médias, utilizando o software *Minitab 19.0*. A ANOVA foi aplicada com nível de confiança de 95% para testar a hipótese nula de igualdade entre as médias dos tratamentos, contra a hipótese alternativa de que pelo menos uma delas difere significativamente. Em seguida, o teste de Tukey, com nível de significância de 5%, foi empregado para identificar quais médias apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO, AREIA E RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

Para a caracterização foram analisados pH, teor de sólidos totais, sólidos totais voláteis, sólidos totais fixos e umidade, conforme mostram os resultados da Tabela 1.

**Tabela 1.** Caracterização do cimento, areia e resíduos sólidos industriais

Material	pH	ST (%)	STV* (%)	STF* (%)	U (%)
LV	10,36	97,00	10,03	89,97	3,00
LETE	7,44	98,67	9,66	90,34	1,33
CBCA	10,81	89,27	57,13	42,87	10,73
CIMENTO	12,79	98,80	2,02	97,98	1,20
AREIA	9,18	99,80	0,40	99,60	0,20

ST: sólidos totais; STV: sólidos totais voláteis; STF: sólidos totais fixos; U: umidade; LV: lama vermelha; LETE: lodo de estação de tratamento de esgoto; CBCA: cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

\*relativo aos sólidos totais

A lama vermelha (LV) apresentou pH de 10,36, indicando alcalinidade, resultado consistente com o observado por Thives, Lima e Rohde (2023). Essa alcalinidade pode ser devido ao hidróxido de sódio e óxido de cálcio usados no beneficiamento da bauxita. O lodo de esgoto (LETE) apresentou pH de 7,44, próximo da neutralidade, em consonância com o estudo de Onofre, Abatti e Tessaro (2015), que identificaram pH de  $7,56 \pm 1,06$ . A cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) apresentou pH de 10,81, também alcalino, possivelmente devido à presença óxidos e hidróxidos de metais comuns em resíduos de biomassa.

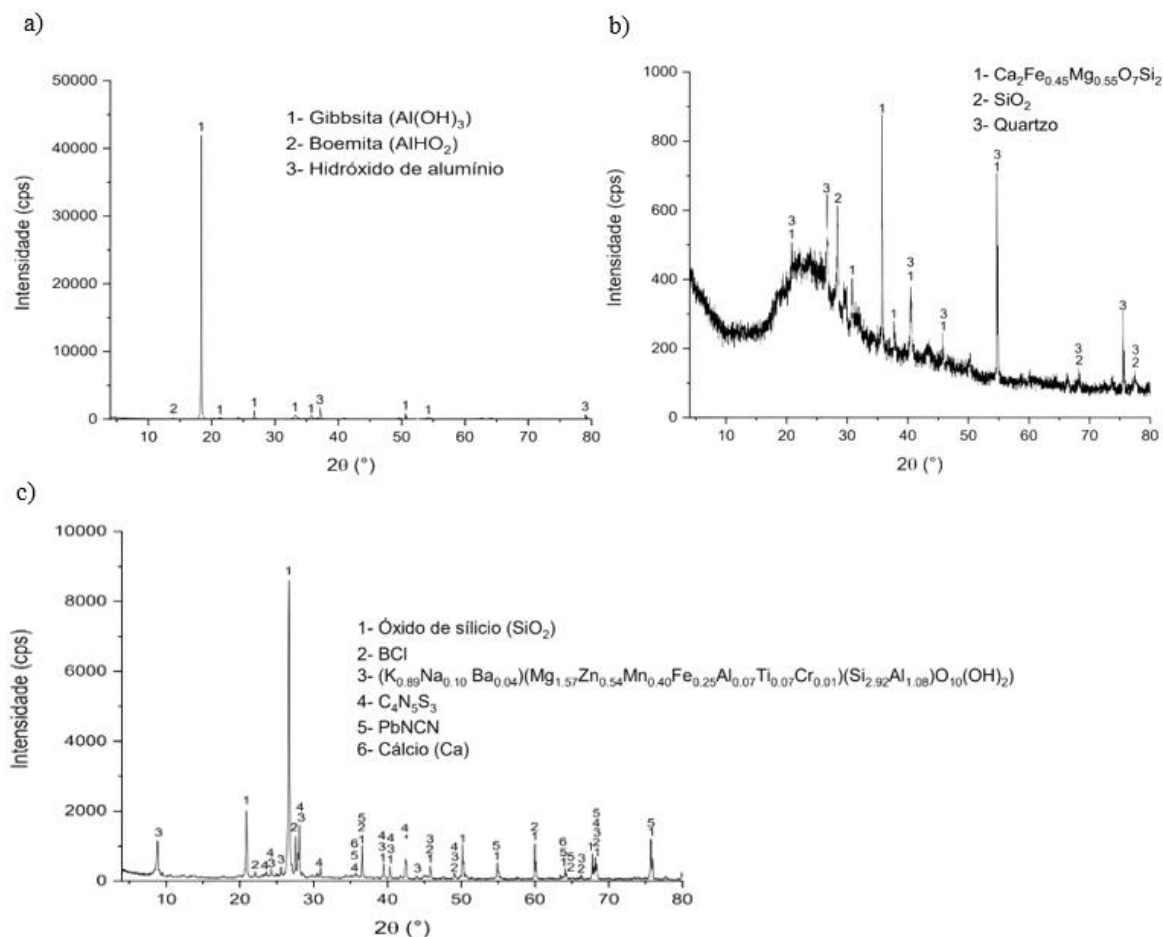
O cimento e a areia apresentaram pH alcalino, de 12,79 e 9,18, respectivamente, possivelmente devido à presença de hidróxido de cálcio (portlandita) e outros compostos alcalinos no cimento, enquanto o pH da areia pode estar relacionado à sua composição mineral. Esses resultados estão de acordo com Silva (2023), que encontrou valores de pH de 12,44 para o cimento e 9,10 para a areia.

A lama vermelha e o lodo de esgoto apresentam baixos teores de umidade (3,00% e 1,33%, respectivamente) e altos teores de sólidos totais, com uma predominância de sólidos fixos (89,97% e 90,34%), indicando uma composição majoritariamente inorgânica. Esses resíduos são pouco voláteis, característica que contribui para a resistência estrutural das matrizes solidificadas. A cinza de bagaço de cana-de-açúcar, com 89,27% de sólidos totais e 10,73% de umidade, possui uma alta fração de sólidos voláteis (57,13%), refletindo a presença de matéria orgânica não completamente queimada.

O cimento e a areia apresentam elevados teores de sólidos totais (98,80% e 99,80%) e umidade baixa, sendo ambos predominantemente inorgânicos com valores de sólidos fixos de 97,98% e 99,60%, respectivamente. Resultados semelhantes foram reportados por Cavalcante (2021), que encontrou teores de sólidos fixos de 97,96% para o cimento Portland e 99,93% para a areia. A composição mineral da areia (quartzo) e os componentes inorgânicos do cimento (silicatos, aluminatos e aluminoferritos de cálcio) justificam essa característica.

### 3.1.1 Difratometria de raios X (DRX) dos resíduos sólidos industriais

As fases cristalinas da lama vermelha identificadas por difratometria de raios X (DRX) (Figura 1a) correspondem a minerais de alumínio, como a gibbsita (COD 1011081), um hidróxido de alumínio, e a boemita (COD 9012253), um óxido de alumínio hidratado. Esses minerais são típicos de resíduos de bauxita, o minério utilizado na produção de alumina.



**Figura 1.** Difrátograma de raios X: a) lama vermelha; b) cinza de bagaço de cana-de-açúcar; c) lodo de estação de tratamento de esgoto

A cinza de bagaço de cana-de-açúcar (Figura 1b) apresentou picos de fases cristalinas com a fórmula química  $\text{Ca}_2\text{Fe}_{0.45}\text{Mg}_{0.55}\text{O}_5\text{Si}_2$  (COD 9013469), óxido de silício (COD 9005017) e quartzo (COD 1011097). Além disso, o difratograma de raio X apresenta um sinal difuso, característico da fase amorfa. A presença quartzo na fase cristalina pode estar relacionada a cinza resultante de altas temperaturas ( $> 800^\circ\text{C}$ ) e períodos de queima prolongados (Matos *et al.*, 2021) ou à areia que se adere à cana-de-açúcar durante a colheita (Moura *et al.*, 2021). A coloração preta intensa da cinza estudada indica uma quantidade significativa de carbono, sugerindo uma incineração inadequada, conforme observado por Katare e Mudurwar (2017).

O lodo de esgoto (Figura 1c) apresentou uma composição mineralógica diversa, com fases cristalinas que incluem óxido de silício (COD 1011097), cloreto de boro (COD 1100474), cianamida de chumbo (COD 9009372), cálcio (COD 1011095) e outras fórmulas

químicas, refletindo a variada e complexa composições dos esgotos processados e do tratamento aplicado nas estações.

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

A classificação dos resíduos sólidos industriais foi realizada a partir das concentrações de metais pesados e DQO no extrato lixiviado, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Classificação dos resíduos sólidos industriais

Análise	LV	LETE	CBCA	LMP
Alumínio (mg L <sup>-1</sup> )	< LQ	1,466	1,068	0,2 <sup>(1)</sup>
Ferro (mg L <sup>-1</sup> )	0,069	0,940	0,076	0,3 <sup>(1)</sup>
Manganês (mg L <sup>-1</sup> )	< LQ	1,205	0,122	0,1 <sup>(1)</sup>
DQO (mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	3205,128	3525,641	8012,821	250,0 <sup>(2)</sup>
Classificação	Classe I - Perigoso	Classe I - Perigoso	Classe I - Perigoso	-

LMP: limite máximo permissível; DQO: demanda química de oxigênio; LQ: limite de quantificação; LV: lama vermelha; LETE: lodo de estação de tratamento de esgoto; CBCA: cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

<sup>1</sup>valores baseados na Portaria GM/MS Nº 888/2021; <sup>2</sup>valor baseado na COPAM-CERH/MG nº 8/2022.

Para a lama vermelha, apenas a DQO ultrapassou o limite máximo permitido no extrato lixiviado, com um valor de 3205,128 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>, superior ao limite de 250 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>. No lodo de esgoto, alumínio, ferro, manganês e DQO apresentaram concentrações acima do permitido, com valores de 1,466 mg L<sup>-1</sup>, 0,940 mg L<sup>-1</sup>, 1,205 mg L<sup>-1</sup> e 3525,641 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>, respectivamente. Para a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, os contaminantes excedentes foram alumínio, manganês e DQO, com concentrações de 1,068 mg L<sup>-1</sup>, 0,122 mg L<sup>-1</sup> e 8012,821 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>. Conclui-se, portanto, que todos os três resíduos analisados são classificados como perigosos (classe I).

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS

Os resultados da caracterização das matrizes cimentícias, apresentados na Tabela 3, indicaram alcalinidade em todos os tratamentos, atribuída aos seus constituintes alcalinos. Os tratamentos de lodo de esgoto apresentaram o pH mais alto (12,35 ± 0,06), seguido pela lama vermelha (12,26 ± 0,08) e pela cinza de bagaço de cana de açúcar (11,96 ± 0,15).

**Tabela 3.** Caracterização das matrizes cimentícias

Material	pH	ST (%)	STV* (%)	STF* (%)	U (%)
LV	12,26 ± 0,08	98,40 ± 0,16	4,81 ± 0,41	95,19 ± 0,41	1,60 ± 0,16
LETE	12,35 ± 0,06	98,60 ± 0,16	4,12 ± 0,09	95,88 ± 0,09	1,40 ± 0,16
CBCA	11,96 ± 0,15	98,00 ± 0,16	7,28 ± 0,20	92,72 ± 0,20	2,00 ± 0,16

Resultados expressos com média ± desvio padrão (triplicata); ST: sólidos totais; STV: sólidos totais voláteis; STF: sólidos totais fixos; U: umidade; LV: lama vermelha; LETE: lodo de estação de tratamento de esgoto; CBCA: cinza de bagaço de cana-de-açúcar. \*relativo aos sólidos totais.



As matrizes cimentícias apresentaram altos teores de sólidos totais (próximos a 98%), majoritariamente sólidos fixos (acima de 92%), como esperado devido à composição do Cimento, areia e resíduos. Os tratamentos de cinza de bagaço de cana apresentaram o maior teor de sólidos voláteis (matéria orgânica), o que pode influenciar negativamente na integridade e durabilidade do material E/S.

### 3.4 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE E DURABILIDADE DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS

As matrizes cimentícias são consideradas aprovadas em termos de integridade e durabilidade quando atende aos critérios de resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação e secagem. Os resultados dos ensaios estão expressos na forma de média e desvio padrão (triplicata) na Tabela 4.

**Tabela 4.** Médias e desvios-padrão dos ensaios de resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação e secagem das matrizes cimentícias

<b>Critério</b>	<b>LV</b>	<b>LETE</b>	<b>CBCA</b>	<b>Limite de aceitação (Brito e Soares, 2009)</b>
Resistência à compressão (MPa)	7,24 ± 0,70	5,18 ± 0,39	3,87 ± 0,27	≥ 1MPa
Capacidade de absorção de água (%)	9,70 ± 0,24	10,45 ± 0,25	16,67 ± 0,09	≤ 40%
Umidificação e secagem (%)	3,37 ± 0,09	3,37 ± 0,07	3,99 ± 0,05	≤ 15%

Resultados expressos com média ± desvio padrão (triplicata); MPa: megapascal; LV: lama vermelha; LETE: lodo de estação de tratamento de esgoto; CBCA: cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

#### 3.4.1 Resistência à compressão (RC)

Todos os tratamentos foram aprovados no ensaio de resistência à compressão, apresentando resultados superiores a 1 MPa. Conforme o protocolo de Brito e Soares (2009), materiais com essa resistência podem ter duas destinações diferentes: utilização sem restrição, se atenderem aos critérios de integridade e durabilidade e imobilização de contaminantes; ou utilização com restrição, se forem aprovados nos critérios de integridade e durabilidade e na lixiviação, mas reprovados na solubilização. Em relação ao controle (sem resíduo), que teve resistência média de 10,75 ± 1,08 MPa, as resistências diminuíram: 32,65% para lama vermelha, 51,81% para o lodo de esgoto e 64,00% para cinza de bagaço de cana. Galindo e Brito (2020), Paixão (2019) e Silva (2018) também observaram essa redução.

Os tratamentos de lama vermelha apresentaram a maior resistência, possivelmente devido à atividade pozolânica. Paumgartten *et al.* (2021), observaram uma atividade pozolânica de 85,85% com o cimento Portland aos 28 dias, valor próximo ao exigido pela norma ABNT NBR 5752. Essa atividade pozolânica refere-se à capacidade do material de reagir com hidróxido de cálcio e formar compostos semelhantes aos

produzidos na hidratação do cimento Portland, como silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que contribuem para o aumento da resistência mecânica e da durabilidade da matriz.

Rigolin (2022) estudou peças de concreto com lodo de esgoto incorporado e observou a diminuição da resistência à compressão, atribuída ao alto teor de sulfatos no LETE, que reagem com o aluminato tricálcico do cimento, causando expansão, fissuração, descamação e desintegração do material. Os tratamentos de cinza de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram a menor resistência à compressão. Katare e Madurwar (2017) apontam que o carbono na cinza é o principal fator para a baixa atividade pozolânica, o que pode justificar os resultados de resistência obtidos. Além disso, Karamalidis e Voudrias (2007) observaram que resíduos com compostos orgânicos interferem na solidificação, reduzindo a resistência, pois hidratação do cimento é afetada com a formação de uma película protetora nos grãos, que dificulta a formação de hidróxido de cálcio e acelera a modificação do gel coloidal C-S-H.

### 3.4.2 Capacidade de absorção de água (CAA)

Todos os tratamentos apresentaram teores de capacidade de absorção de água inferiores ao limite de 40% estabelecido pelo protocolo de avaliação de materiais estabilizados por solidificação, conforme a norma NBR 9778/2009 (ABNT, 2009), sendo assim considerados aprovados neste ensaio. A maior capacidade de absorção de água foi observada para os tratamentos de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (16,67%), seguido pelo lodo de esgoto (10,45%) e pela lama vermelha (9,70%).

Segundo Brito e Soares (2009), a absorção de água é inversamente proporcional à resistência à compressão, o que indica que materiais com maior absorção apresentam menor resistência à compressão – comportamento verificado nos tratamentos deste estudo. Paixão (2019) e Silva (2018) corroboram essa observação em seus estudos.

A capacidade de absorção de água dos materiais estabilizados por solidificação está relacionada à sua porosidade. Os resultados experimentais indicam que os tratamentos com cinza de bagaço de cana-de-açúcar apresentam maior porosidade, enquanto que aqueles com lama vermelha apresentaram menor porosidade. De acordo com Dias *et al.* (2021), uma alta porosidade confere aos materiais estabilizados por solidificação uma maior capacidade de lixiviação de contaminantes.

### 3.4.3 Umidificação e secagem (U/S)

Todos os tratamentos foram aprovados no ensaio de umidificação e secagem, pois a perda de massa após os ciclos de umidificação e secagem foram inferiores a 15% do peso inicial das matrizes cimentícias. Os tratamentos com lama vermelha e lodo de esgoto tiveram uma perda média de 3,37%, com desvios padrão de 0,09 e 0,07, respectivamente. Embora o desvio padrão da lama vermelha seja ligeiramente superior, os resultados demonstram baixa dispersão. Os tratamentos com cinza de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram uma média de 3,99%, indicando uma perda de massa ligeiramente maior em relação à lama vermelha e ao lodo de esgoto.

Os resultados do ensaio de umidificação e secagem (U/S) mostram que os tratamentos com lama vermelha, lodo de esgoto e cinza de bagaço de cana-de-açúcar exibiram desempenho satisfatório, com perdas de massa significativamente abaixo do limite de 15%. As perdas médias de 3,37% para LV e LETE, e de 3,99% para CBCA, correspondem a 77,53% e 73,40%, respectivamente, abaixo do valor máximo permitido. Esses resultados evidenciam a eficácia de todos os tratamentos na resistência à perda de massa, sugerindo uma boa durabilidade das matrizes cimentícias, pois, segundo Brito e Soares (2009), quanto menor for a perda de massa mais eficiente será o material estabilizado por solidificação.

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

#### 3.5.1 Análise de variância (ANOVA)

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão (RC), capacidade de absorção de água (CAA) e ciclos de umidificação e secagem (U/S). Os valores de  $p$  obtidos foram 0,001 para RC, 0,000 para CAA e 0,000 para U/S.

Os valores de  $p$  foram inferiores ao nível de significância adotado ( $\alpha = 0,05$ ), indicando rejeição da hipótese nula e evidenciando que pelo menos um dos resíduos apresenta média distinta em cada um dos ensaios. Assim, confirma-se que o tipo de resíduo exerce influência significativa sobre as propriedades avaliadas de integridade e durabilidade das matrizes cimentícias. Diante disso, procedeu-se à comparação múltipla de médias pelo teste de Tukey.

**Tabela 5.** ANOVA para resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação e secagem

ANOVA - Resistência à Compressão					
Fonte	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Valor- $p^*$
Tipo de Resíduo	2	17,320	8,6598	24,63	<b>0,001</b>
Erro	6	2,110	0,3516		
Total	8	19,429			
ANOVA - Capacidade de Absorção de Água					
Fonte	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Valor- $p^*$
Tipo de Resíduo	2	87,9871	43,9936	675,53	<b>0,000</b>
Erro	6	0,3907	0,0651		
Total	8	88,3779			
ANOVA - Umidificação e Secagem					
Fonte	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Valor- $p^*$
Tipo de Resíduo	2	0,77041	0,385205	50,25	<b>0,000</b>
Erro	6	0,04599	0,007666		
Total	8	0,81640			

G.L.: graus de liberdade; S.Q.: soma quadrática; Q.M.: quadrado médio. \*diferenças significativas ( $p \leq 0,05$ ), diferenças não significativas ( $p > 0,05$ ).

### 3.5.2 Teste de Tukey

Os resultados do teste de Tukey, com um nível de confiança de 95%, são apresentados na Tabela 6. Médias seguidas por letras diferentes difere entre si pelo teste ( $p \leq 0,05$ ).

**Tabela 6.** Teste de Tukey para resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação e secagem

Teste de Tukey – Resistência à Compressão		
Tipo de Resíduo	N	Média* (Mpa)
LV	3	7,24 <sup>a</sup>
LETE	3	5,18 <sup>b</sup>
CBCA	3	3,87 <sup>b</sup>
Teste de Tukey – Capacidade de Absorção de Água		
Tipo de Resíduo	N	Média* (%)
CBCA	3	16,67 <sup>a</sup>
LETE	3	10,45 <sup>b</sup>
LV	3	9,70 <sup>c</sup>
Teste de Tukey – Umidificação e Secagem		
Tipo de Resíduo	N	Média* (%)
CBCA	3	3,99 <sup>a</sup>
LV	3	3,37 <sup>b</sup>
LETE	3	3,37 <sup>b</sup>

N: número de observações; LV: lama vermelha; LETE: lodo de estação de tratamento de esgoto; CBCA: cinza de bagaço de cana-de-açúcar. \*médias com letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Na resistência à compressão, os tratamentos com lama vermelha apresentaram uma resistência significativamente diferente dos tratamentos com lodo de esgoto e cinza de bagaço de cana-de-açúcar, os quais apresentaram valores estatisticamente iguais, indicando que ambos influenciam a resistência da matriz cimentícia de maneira similar. Para a capacidade de absorção de água, todos resíduos formaram grupos estatisticamente distintos, evidenciando que cada resíduo influencia de maneira diferente a porosidade da matriz cimentícia. No ensaio de umidificação e secagem, os tratamentos com cinza de bagaço de cana-de-açúcar diferiram significativamente dos demais resíduos, enquanto os tratamentos com lama vermelha e lodo de esgoto apresentaram resultados de perda de massa estatisticamente iguais.

Esses resultados reforçam que o tipo de resíduo utilizado no processo de estabilização por solidificação exerce influência nas propriedades e no desempenho das matrizes cimentícias nos ensaios de integridade e durabilidade, que são determinantes para a adequação desses materiais em aplicações específicas.

## 4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que todos os resíduos estudados foram classificados como perigosos (classe I). A lama vermelha apresentou valor de DQO

acima do limite máximo permissível; o lodo de esgoto apresentou concentrações de alumínio, ferro, manganês e DQO superiores ao limite máximo permissível; e a cinza de bagaço de cana excedeu o valor estabelecido para concentração de alumínio, manganês e DQO. Portanto, os três resíduos sólidos industriais precisam de tratamento.

Ainda, todos os tratamentos foram aprovados nos critérios de integridade e durabilidade, permitindo a reutilização desses materiais de várias formas, incluindo o uso na construção civil.

A lama vermelha apresentou melhor desempenho em termos de integridade e durabilidade das matrizes cimentícias, com maior resistência à compressão ( $7,24 \pm 0,70$  MPa), menor porosidade ( $9,70 \pm 0,24\%$ ) e menor perda de massa ( $3,37 \pm 0,09\%$ ). Em contrapartida, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar obteve o desempenho mais baixo, com menor resistência à compressão ( $3,87 \pm 0,27$  MPa), maior porosidade ( $16,67 \pm 0,09\%$ ) e maior perda de massa ( $3,99 \pm 0,05\%$ ), o que pode estar relacionado à sua composição predominantemente orgânica, já que a técnica de estabilização por solidificação é mais eficaz com resíduos inorgânicos.

A análise de variância (ANOVA) mostrou o fator ‘tipo de resíduo’ exerce influência nos ensaios de integridade e durabilidade das matrizes cimentícias.

O estudo adotou ensaios padronizados de durabilidade empregados em pesquisas com E/S. Ainda assim, abordagens complementares em ambiente natural podem contribuir para validar o desempenho das matrizes cimentícias em longo prazo.

Considerando que o desempenho das matrizes contendo cinza de bagaço de cana-de-açúcar pode ser influenciado pelas características físico-químicas do resíduo, futuras investigações podem explorar cinzas obtidas sob diferentes condições de queima, de modo a avaliar como variações no teor de matéria orgânica impactam a integridade e a durabilidade das matrizes cimentícias.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 24. Ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BRITO, A. L. F.; SOARES, S. R. Avaliação da integridade e da retenção de metais pesados em materiais estabilizados por solidificação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 39-48, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s141341522009000100005>.

CAVALCANTE, L. E. **Tratamento de resíduos sólidos de laboratório utilizando a técnica de estabilização por solidificação**. 2021. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

CHEN, L.; NAKAMURA, K.; HAMA, T. Review on stabilization/solidification methods and mechanism of heavy metals based on OPC-based binders. **Journal of Environmental Management**, v. 332, 2023, Article 117362. DOI: [10.1016/j.jenvman.2023.117362](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117362).

CHIDIAC, S.E.; PANESAR, D.K.. Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28days. **Cement And Concrete Composites**, v. 30, n. 2, p. 63-71, fev. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.003>.

DIAS, J.; BRITO, A. L. F.; MUNIZ, A. C. S.; GUIMARÃES, A. V. A. Optimization of the integrity and durability criteria of materials stabilized by solidification of oil industry waste. **Petroleum Science and Technology**, v. 40, n. 2, p. 129-149, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10916466.2021.1990319>.

GALINDO, E. S. F.; BRITO, A. L. F. Tratamento de metais pesados presentes em resíduos sólidos perigosos por estabilização e solidificação em matriz de cimento. **Ampliação e Aprofundamento de Conhecimentos nas Áreas das Engenharias**, v. 3, p. 94-108, 2020. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.8972017098>.

GIWA, A. S.; MAURICE, N. J.; LUOYAN, A.; LIU, X.; YUNLONG, Y.; HONG, Z. Advances in sewage sludge application and treatment: process integration of plasma pyrolysis and anaerobic digestion with the resource recovery. **Heliyon**, v. 9, n. 9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19765>.

KARAMALIDIS, A. K.; VOUDRIAS, E. A. Cement-based stabilization/solidification of oil refinery sludge: leaching behavior of alkanes and PAHs. **Journal of Hazardous Materials**, v. 148, n. 1-2, p. 122-135, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.032>.

KATARE, V. D.; MADURWAR, M. V. Experimental characterization of sugarcane biomass ash – a review. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1-15, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142>.

KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, Frank. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, DC: World Bank, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10986/30317>. Acesso em: 29 abr. 2025.

KE, Y.; CHEN, Y.; LIANG, S.; HU, J.; HOU, H.; QUAN, J.; LI, X.; DUAN, H.; YUAN, S.; YANG, J. Environmentally sound management of industrial solid waste: a paradigm of proposed bi-tetrahedron. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 198, 107212, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107212>.

LIMA, V. M.; ESTOLANO, A. M. L.; ALMEIDA, Y. M. B.; HENRIQUE, M. A.; ARAÚJO, F. W. C.; MELO NETO, A. A. Mechanical, microstructural and energetic evaluation of conventional and one-part alkali-activated mixtures with raw sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 394, 132168, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132168>.

LIU, L.; LI, W.; SONG, W.; GUO, M. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability. **Science of the Total Environment**, v. 633, p. 206-219, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>.

MATOS, W. E. C.; SILVA, H. J. B.; PAZ, G. M.; SANTOS, V. B. Utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1322>.

MILESTONE, N. B. Reactions in cement encapsulated nuclear wastes: need for toolbox of different cement types. **Advances in Applied Ceramics**, v. 105, n. 1, p. 13-20, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1179/174367606x81678>.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental; Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH nº 8, de 21 de novembro de 2022**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte: COPAM/CERH, 2022.

MOURA, E. M.; SALES, J. N. B.; NASCIMENTO, N. C.; SOUSA, V. M. Z.; SILVA, D. D. C.; LIBERA JUNIOR, V. D. Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 69-80, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100494>.

ONOFRE, S. B.; ABATTI, D.; TESSARO, A. A. Propriedades físico-químicas e microbiológicas do lodo de esgoto produzido pela estação de tratamento de esgoto (ETE) de Toledo – Paraná – Brasil. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, VI, Porto Alegre: IBEAS, 2015.

PAIXÃO, J. F. F. **Modelagem do processo de difusão de metais pesados presentes em resíduos após o tratamento de estabilização por solidificação (E/S)**. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

PAN, X.; WU, H.; LV, Z.; YU, H.; TU, G. Recovery of valuable metals from red mud: a comprehensive review. **Science of the Total Environment**, v. 904, 166686, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166686>.

PAUMGARTTEN, M. D. V.; REIS, F. J. L.; PICANÇO, M. de S.; MACEDO, A. N.; COSTA, D. dos S. R.; SANTOS, A. C. M. Caracterização e avaliação do índice de atividade pozolânica de lama vermelha e resíduo de manganês para produção de misturas ternárias cimentícias. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, p. 85965–85979, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n8-686>.

RIGOLIN, F. R. **Estudo de viabilidade técnica para incorporação de resíduos de lodo de estação de tratamento de esgoto em peças de concreto para pavimentação**. 2022. 100 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

SHEN, Z.; ZHANG, Q.; CHENG, W.; CHEN, Q. Radioactivity of five typical general industrial solid wastes and its influence in solid waste recycling. **Minerals**, v. 9, n. 3, 168, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9030168>.

SILVA, M. M. D. O. **Avaliação ambiental dos materiais estabilizados por solidificação após incorporação de lodo de indústria de curtume em matriz de cimento**. 2023. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

SILVA, P. P. **Avaliação do cromo contido em resíduo sólido de laboratório e materiais solidificados e estabilizados para confecção de blocos**. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

SOLIMAN, N. K.; MOUSTAFA, A. F. Industrial solid waste for heavy metals adsorption features and challenges: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 10235–10253, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.045>.

THIVES, L. P.; LIMA, M. S. S.; ROHDE, L. Red mud application as filler in asphalt mixtures production. **Holos**, v. 39, n. 5, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2023.16344>.

WASTEWATER TECHNOLOGY CENTRE. **Environmental Protection Series EPS 3/HA/9: proposed evaluation protocol for cement-based solidified wastes**. Ottawa, 1991.