



Blocos com lodo de curtume: efeito da proporção e cura na integridade e imobilização

Paving blocks with tannery sludge: effects of proportion and curing on integrity and immobilization

 Laedson Eneas Cavalcante¹,  Maria Sabrina Soares de Moraes¹,  Ana Cristina Silva Muniz¹,
 André Luiz Fiquene de Brito¹

RESUMO

Este estudo avaliou a influência da proporção de lodo de curtume e do tempo de cura na integridade mecânica e na imobilização de contaminantes em materiais tratados por estabilização/solidificação (E/S), com aplicação na produção de blocos de pavimentação. A integridade foi analisada por meio da resistência à compressão, conforme a ABNT NBR 7215 (2025), enquanto a imobilização foi avaliada pela demanda química de oxigênio (DQO), balanço de massa e eficiência de retenção. A classificação dos materiais seguiu a ABNT NBR 10004 (2024), com caracterização por espectrometria de absorção atômica e difração de raios X. Adotou-se um planejamento fatorial do tipo 2^k com três repetições no ponto central, considerando teores de lodo de 10%, 25% e 40% e tempos de cura de 7, 17,5 e 28 dias, com análise estatística por ANOVA ($p < 0,05$). Os resultados indicaram influência significativa dos fatores avaliados. A resistência à compressão variou entre 47,540 MPa e 62,580 MPa, atendendo aos critérios normativos para pavimentação. O melhor desempenho foi observado para 25% de lodo e 17 dias de cura. Houve redução da carga contaminante em relação ao resíduo bruto; contudo, os valores de DQO permaneceram acima de 1000 mg L⁻¹ e alguns metais excederam limites normativos, indicando atenuação parcial da periculosidade. A técnica de E/S mostrou potencial para reaproveitamento do resíduo, desde que consideradas suas limitações ambientais.

Palavras-chave: Estabilização por solidificação; Lodo de curtume; Metais pesados; Economia circular; Valorização de resíduos.

ABSTRACT

This study investigated the effects of tannery sludge proportion and curing time on the mechanical integrity and contaminant immobilization of cement-based materials treated by solidification/stabilization (S/S), aiming at their application in paving blocks. Mechanical integrity was evaluated through compressive strength tests, in accordance with ABNT NBR 7215 (2025), while contaminant immobilization was assessed by chemical oxygen demand (COD), mass balance, and retention efficiency. Material classification followed ABNT NBR 10004 (2024), and characterization was performed using atomic absorption spectrometry and X-ray diffraction. A 2^k factorial design with three central point replicates was adopted, considering sludge contents of 10%, 25%, and 40% and curing times of 7, 17.5, and 28 days. Statistical analysis was conducted using ANOVA ($p < 0.05$). Results indicated that both factors significantly affected material performance. Compressive strength ranged from 47.540 to 62.580 MPa, meeting the requirements for paving applications. The optimal condition was observed at 25% sludge and 17 days of curing. Although a reduction in contaminant load was achieved compared to the raw residue, COD values remained above 1000 mg L⁻¹ and some metals exceeded regulatory limits, indicating only partial environmental risk attenuation. The S/S technique demonstrated potential for waste reuse, provided its environmental limitations are considered.

Keywords: Solidification/stabilization; Tannery sludge; Heavy metals; Circular economy; Waste valorization.

¹ Universidade Federal de Campina Grande.

Autor correspondente: laedson.cavalcante@hotmail.com

Recebido em: 14/08/2025. Aceito em: 03/05/2026.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado. 

1 INTRODUÇÃO

O setor de curtumes é um dos ramos industriais com maior impacto ambiental, principalmente devido à quantidade e complexidade dos resíduos gerados. O processo de transformação da pele animal em couro requer o uso intensivo de produtos químicos como sal, cal, sulfuretos, cromo e outros metais pesados, que resultam em resíduos sólidos e líquidos altamente tóxicos (Ma *et al.*, 2023). Esses resíduos são potencialmente nocivos aos seres humanos e ao meio ambiente, causando poluição do solo, contaminação dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos, mau odor, proliferação de vetores de doenças e perda de biodiversidade aquática (Tuci *et al.*, 2023).

Estima-se que apenas 20% a 25% do peso da pele do animal seja efetivamente transformado em couro, sendo o restante descartado como resíduo ou subproduto (Tuci *et al.*, 2023). Entre os resíduos gerados, destacam-se os materiais curtidos ao cromo, classificados como perigosos (Classe 1) segundo a Resolução CONAMA n.º 313/2002 e a ABNT NBR 10004 (2024), por conterem altos teores de cromo trivalente (2% a 3%) e apresentarem baixa biodegradabilidade. Por outro lado, resíduos provenientes do curtimento vegetal são considerados não perigosos (Classe 2) e encontram aplicação na fabricação de recouro e fertilizantes (ABNT NBR 10004, 2024).

Diante da complexidade do descarte seguro e sustentável desses resíduos, destaca-se a técnica de estabilização por solidificação (E/S), amplamente utilizada, em países desenvolvidos, para a imobilização de contaminantes em resíduos industriais (Ma *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023). Essa tecnologia emprega principalmente matrizes cimentícias para imobilizar compostos perigosos, sendo valorizada por seu baixo custo, simplicidade de aplicação e eficiência na contenção dos poluentes. A E/S atua por meio de dois mecanismos complementares: (a) estabilização química, que transforma os metais pesados em espécies menos solúveis ou menos tóxicas; e (b) encapsulamento físico, que isola os resíduos em uma matriz sólida de baixa permeabilidade, impedindo seu contato com o meio ambiente (Yang *et al.*, 2023).

A eficiência da técnica de E/S depende diretamente da interação entre a matriz cimentícia e os resíduos incorporados. Essa interação é influenciada por variáveis como o tempo de cura e a quantidade de resíduo adicionado à mistura. A cura adequada do cimento é fundamental para a evolução das reações de hidratação, que resultam em aumento da resistência mecânica do material ao longo do tempo. Entretanto, quando a proporção de resíduos incorporados é excessiva, ocorre a saturação da matriz, prejudicando a coesão e comprometendo a integridade do compósito (Chen *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a reutilização de resíduos sólidos perigosos em materiais de construção civil surge como alternativa ambiental e economicamente viável. Especificamente, a incorporação do lodo de curtume em blocos de pavimentação pode reduzir a destinação inadequada desses resíduos, ao mesmo tempo que gera um produto de valor agregado. Além disso, iniciativas que adotam práticas sustentáveis têm ganhado reconhecimento no mercado por meio de certificações e selos verdes, o que favorece sua aceitação pelo consumidor final e incentiva políticas de responsabilidade socioambiental (Villagrán-Zaccardi *et al.*, 2022; Quan *et al.*, 2024).

A viabilidade técnica e econômica da aplicação de materiais reciclados depende da qualidade final do produto e da sua competitividade em relação aos materiais

convencionais. A introdução desses resíduos no ciclo produtivo da construção civil, se realizada de forma segura e controlada, pode contribuir significativamente para a mitigação dos impactos ambientais e para a promoção de uma economia circular no setor como alternativa sustentável para valorização de resíduos industriais (Zhu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023). Apesar dos avanços na reutilização de resíduos industriais em matrizes cimentícias, ainda são limitados os estudos que avaliam simultaneamente a integridade estrutural e a eficiência de imobilização de contaminantes provenientes de lodos de curtume (Herrera-González *et al.*, 2024).

O presente estudo tem como objetivo analisar a influência da concentração de resíduos de curtume e do tempo de cura na integridade mecânica e na capacidade de imobilização dos contaminantes nos blocos de pavimento produzidos por meio da técnica de estabilização por solidificação. A avaliação será realizada por meio de ensaios que permitam verificar a viabilidade do uso desses resíduos na fabricação de blocos para aplicação na construção civil, contribuindo para o reaproveitamento sustentável desses materiais e mitigação dos impactos ambientais associados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os testes experimentais foram conduzidos no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos (LABGER), vinculado à Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no município de Campina Grande, Paraíba.

2.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Empregou-se um planejamento fatorial do tipo 2^k com a inclusão de três repetições no ponto central, onde "k" representa o número de fatores e os níveis variam entre -1 (nível inferior) e +1 (nível superior). Os fatores estudados foram: tempo de cura e proporção de resíduo de curtume. A definição dos níveis seguiu a norma ABNT NBR 7215 (2025) para o tempo de cura e pesquisas anteriores como Brito; Soares (2009) e Dias *et al.* (2021) para a proporção do resíduo.

Os níveis adotados para cada fator investigado foram os seguintes: tempo de cura (dias) — 7, 17,5 e 28; e percentual de lodo de curtume (%) — 10, 25 e 40.

A análise estatística das respostas foi realizada por meio de ANOVA (Análise de Variância), com nível de significância de ($p < 0,05$), utilizando o software Minitab 19.0, com o objetivo de validar o modelo e identificar efeitos significativos.

2.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a confecção dos corpos de prova, foi utilizado um traço 1:3, ou seja, uma parte de cimento para três partes de agregados (brita, areia e lodo). Cada corpo de prova foi

preparado com massa total de 1500 g. Após a moldagem, os corpos permaneceram 24 horas no molde e, em seguida, foram mantidos à temperatura ambiente pelo período de cura correspondente (7 a 28 dias).

A massa de cimento foi mantida constante em 375 g, enquanto as proporções de brita e areia foram ajustadas conforme o percentual de resíduo adicionado (variando de 0% a 40%). A quantidade de água foi mantida constante em todos os ensaios, correspondendo a 50% da massa de cimento (187,5 mL).

A moldagem dos corpos de prova seguiu as recomendações gerais da ABNT NBR 7215 (2025), garantindo condições padronizadas para ensaios de resistência à compressão.

2.4 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O lodo de curtume utilizado neste estudo foi proveniente de uma indústria de processamento de couro localizada no estado da Paraíba, Brasil. O resíduo foi coletado e acondicionado em recipientes plásticos devidamente vedados e transportado ao laboratório. Em seguida, o lodo seco foi triturado e peneirado, visando à obtenção de granulometria mais homogênea, adequada para incorporação na matriz cimentícia.

Foi empregado cimento Portland tipo CII-Z-32 como aglomerante, e os agregados (areia e brita) foram adquiridos localmente em Campina Grande - PB.

A classificação dos resíduos seguiu os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 10004 (2024), enquanto os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados conforme as normas ABNT NBR 10005 (2004) e ABNT NBR 10006 (2004), respectivamente. A análise de metais como alumínio (Al), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr) e ferro (Fe) foi feita por espectrometria de absorção atômica.

A caracterização do cimento e do lodo também incluiu análise por difração de raios X (DRX).

2.5 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE

A integridade dos materiais estabilizados por solidificação foi avaliada por meio de ensaios de resistência à compressão, realizados conforme a ABNT NBR 7215 (2025), seguindo também o protocolo experimental descrito por Brito; Soares (2009).

2.6 IMOBILIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES

A determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi realizada conforme os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2023).

2.7 BALANÇO DE MASSA E EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO

O balanço de massa dos contaminantes seguiu a Lei da Conservação da Massa de Lavoisier. A massa de contaminantes retida foi calculada pela diferença entre a massa presente no resíduo bruto e a massa no material tratado, conforme a Equação 1:

$$\text{Massa}_{\text{Contam.Retida}} = \text{Massa}_{\text{Contam. (RSI bruto)}} - \text{Massa}_{\text{Contam. (Tratado)}} \quad (1)$$

Em que:

$\text{Massa}_{\text{Contam. Retida}}$ = Massa do contaminante retida na matriz de cimento

$\text{Massa}_{\text{Contam (RSI bruto)}}$ = Massa do contaminante presente na RSI antes do tratamento em g.

$\text{Massa}_{\text{Contam (Tratado)}}$ = Massa do contaminante presente no Material E/S após o tratamento em g.

A eficiência de retenção foi calculada pela Equação 2:

$$[X]_{\text{Eficiência de Retenção (\%)}} = \left[1 - \left(1 + \frac{RS}{Agglom.} \right) \cdot \frac{[Y_{\text{Tratado}}]}{[Z_{\text{Bruto}}]} \right] \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

RS: massa do resíduo (kg)

Agglom.: massa do aglomerante (kg)

[Y] tratado: concentração no material tratado (mg kg^{-1})

[Z] bruto: concentração no resíduo bruto (mg kg^{-1})

A adoção de normas técnicas reconhecidas garante a padronização dos procedimentos experimentais, aumentando a confiabilidade dos resultados e possibilitando a reprodutibilidade do estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CLASSIFICAÇÃO DO LODO DE CURTUME E DOS AGLOMERANTES NOS EXTRATOS LIXIVIADOS E SOLUBILIZADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados do ensaio de lixiviação e solubilização dos materiais utilizados (cimento, lodo de curtume, areia e brita), com a concentração de metais pesados expressa em mg L^{-1} para alumínio (Al), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr) e ferro (Fe).

Com base nos resultados da Tabela 1, observa-se que todos os materiais analisados, no ensaio de lixiviação, apresentaram concentrações de cádmio, chumbo e cromo inferiores aos limites máximos permissíveis estabelecidos nos critérios de classificação da ABNT NBR 10004 (2024). Dessa forma, em relação ao extrato lixiviado, os materiais são classificados como resíduos não perigosos. Entretanto, para a completa classificação do resíduo como Classe 2, é necessária a realização do ensaio de solubilização. Ressalta-se

que a ABNT NBR 10004 (2024) não estabelece limites para alumínio e ferro no extrato lixiviado, sendo esses parâmetros considerados apenas na avaliação do extrato solubilizado.

Tabela 1. Teor de metais pesados no extrato lixiviado e solubilizado do lodo de curtume, cimento, areia e brita.

Metais pesados	Resultado - Lixiviação (mg L ⁻¹)				Limite máximo permissível
	Cimento	Areia	Brita	Lodo de curtume	Valor (mg L ⁻¹)
Alumínio total	< 0,100	0,736	3,126	< 0,100	N A
Cádmio total	< 0,001	0,004	0,031	0,034	0,300 ⁽¹⁾
Chumbo total	< 0,010	0,066	0,268	< 0,010	1,000 ⁽¹⁾
Cromo total	0,509	0,020	0,037	0,447	5,000 ⁽¹⁾
Ferro total	< 0,100	0,219	4,615	< 0,100	N A

Metais pesados	Resultado - Solubilização (mg L ⁻¹)				Limite máximo permissível
	Cimento	Areia	Brita	Lodo de curtume	Valor (mg L ⁻¹)
Alumínio total	0,118	0,519	0,271	0,236	0,200 ⁽²⁾
Cádmio total	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,053	0,003 ⁽²⁾
Chumbo total	0,012	< 0,010	< 0,010	0,010	0,010 ⁽²⁾
Cromo total	0,071	< 0,010	< 0,010	0,996	0,050 ⁽²⁾
Ferro total	0,554	0,351	< 0,100	< 0,100	0,300 ⁽²⁾

LEGENDA – ¹Parâmetros estabelecidos pela NBR 10004 (2024), com base na Portaria GM/MS nº 888/2021, multiplicados por fator 100 para lixiviação. N/A – Não aplicável. ²Parâmetros e limites máximos permissíveis no extrato solubilizado, conforme ABNT NBR 10004 (2024) e Portaria GM/MS nº 888/2021. Fonte: O autor (2025).

De acordo com os resultados obtidos no ensaio de solubilização, o lodo de curtume apresentou concentrações superiores aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 10004 (2024), para alumínio (0,236 mg L⁻¹), cádmio (0,053 mg L⁻¹) e cromo (0,996 mg L⁻¹), evidenciando que o processo de estabilização/solidificação não promoveu a completa imobilização desse elemento. Esse comportamento pode ser atribuído à incorporação parcial do cromo na matriz cimentícia ou à presença de fases mineralógicas mais solúveis, que favorecem sua liberação em determinadas condições (Chen *et al.*, 2024).

A presença de cromo nos materiais analisados constitui um aspecto crítico sob o ponto de vista ambiental, considerando o potencial tóxico desse elemento, especialmente em sua forma hexavalente (Cr⁶⁺), caracterizada por elevada mobilidade e toxicidade. Embora o lodo de curtume apresente predominantemente cromo na forma trivalente (Cr³⁺), considerada menos tóxica, estudos indicam que condições ambientais específicas podem favorecer sua oxidação, aumentando os riscos associados à sua liberação no meio ambiente (Shen *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023).

O cimento ultrapassou os limites para chumbo (0,012 mg L⁻¹), cromo (0,071 mg L⁻¹) e ferro (0,554 mg L⁻¹), sendo classificado como resíduo Classe 2 para esses metais. A areia excedeu os limites para alumínio (0,519 mg L⁻¹) e ferro (0,351 mg L⁻¹), enquanto a brita apresentou concentração acima do limite apenas para o alumínio (0,271 mg L⁻¹). Dessa forma, esses materiais também podem ser enquadrados como resíduos Classe 2, conforme os critérios de classificação estabelecidos na (ABNT NBR 10004, 2024).

Entretanto, é importante destacar que cimento, areia e brita são amplamente utilizados na construção civil e, em condições naturais de uso, não apresentam características de periculosidade que os classifiquem como resíduos perigosos. Assim, embora alguns elementos apresentem concentrações acima dos limites estabelecidos nos

ensaios de solubilização, esses materiais não representam, isoladamente, risco ambiental significativo nas condições usuais de aplicação.

Shen *et al.* (2017) analisaram a presença de metais pesados no lodo de curtume e no cimento, encontrando concentrações reduzidas de cobre, chumbo e zinco no lodo. Embora o cobre tenha apresentado maior concentração, permaneceu dentro dos limites permitidos. Já no cimento, os metais como cádmio, cobre, chumbo e zinco ficaram abaixo dos limites de detecção, sendo o cromo o metal com maior concentração, ainda assim muito abaixo dos níveis regulatórios para ser classificado como perigoso (Classe 1). Esses resultados corroboram os obtidos neste estudo.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS ESTABILIZADOS POR SOLIDIFICAÇÃO NOS EXTRATOS LIXIVIADOS E SOLUBILIZADOS

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os resultados obtidos nos extratos lixiviados e solubilizados dos corpos de prova após serem submetidos à estabilização por solidificação analisando a concentração em mg L⁻¹ para o alumínio (Al), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo(Cr) e ferro (Fe).

Tabela 2. Teor de metais pesados: Extrato lixiviado e solubilizado dos corpos de prova após a E/S.

Resultado Lixiviação (mg L ⁻¹)		Contaminantes			
Tratamentos	Alumínio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Ferro total
0% e 28 dias	< 0,100	0,001	< 0,010	0,126	< 0,100
10% e 7 dias	< 0,100	< 0,001	< 0,010	0,647	< 0,100
40% e 7 dias	< 0,100	< 0,001	< 0,010	1,876	< 0,100
10% e 28 dias	0,284	< 0,001	< 0,010	0,652	< 0,100
40% e 28 dias	0,953	< 0,001	< 0,010	2,280	< 0,100
25 % e 17 dias	< 0,100	< 0,001	< 0,010	1,214	< 0,100
25 % e 17 dias	< 0,100	< 0,001	< 0,010	1,193	< 0,100
25 % e 17 dias	0,440	< 0,001	< 0,010	1,199	< 0,100
Limite máximo permissível (mg L ⁻¹)	N A	0,300 ⁽¹⁾	1,000 ⁽¹⁾	5,000 ⁽¹⁾	N A
Resultado Solubilização (mg L ⁻¹)		Contaminantes			
Tratamentos	Alumínio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Ferro total
0% e 28 dias	1,267	< 0,001	< 0,010	0,120	< 0,100
10% e 7 dias	2,403	< 0,001	< 0,010	0,627	< 0,100
40% e 7 dias	6,885	< 0,001	< 0,010	1,726	< 0,100
10% e 28 dias	3,068	< 0,001	< 0,010	0,595	< 0,100
40% e 28 dias	6,495	< 0,001	< 0,010	1,200	< 0,100
25 % e 17 dias	157,000	< 0,001	< 0,010	1, 111	< 0,100
25 % e 17 dias	24,440	0,001	< 0,010	2,971	< 0,100
25 % e 17 dias	119,100	< 0,001	< 0,010	0,716	< 0,100
Limite máximo permissível (mg L ⁻¹)	0,200 ⁽²⁾	0,003 ⁽²⁾	0,010 ⁽²⁾	0,050 ⁽²⁾	0,300 ⁽²⁾

LEGENDA – ⁽¹⁾ Parâmetros e limites máximos permissíveis no extrato lixiviado, conforme recomendação da ABNT NBR 10004, (2024), baseados no Ministério da Saúde (MS) - Portaria GM/MS Nº 888 (MS, 2021), multiplicados pelo fator 100. N A- Não aplicável. ⁽²⁾ Parâmetros e limites máximos permissíveis no extrato solubilizado, conforme recomendação da ABNT NBR 10004, (2024), baseados no Ministério da Saúde (MS) - Portaria GM/MS Nº 888 (MS, 2021). Fonte: O autor (2025).

De acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, observa-se que, no ensaio de lixiviação, todos os corpos de prova apresentaram concentrações de cádmio, chumbo e cromo inferiores aos limites máximos permissíveis estabelecidos nos critérios de classificação da ABNT NBR 10004 (2024), os quais se baseiam nos valores de referência do Ministério da Saúde, conforme a Portaria GM/MS nº 888 (MS, 2021). Dessa forma, todos os tratamentos foram enquadrados como resíduos Classe 2, sendo necessária a realização do ensaio de solubilização para a completa avaliação da classificação. Ressalta-se que os elementos ferro e alumínio não foram considerados nesta etapa, uma vez que a ABNT NBR 10004 (2024) não estabelece limites máximos permissíveis para esses contaminantes no extrato lixiviado, apenas no extrato solubilizado.

Com base nos resultados obtidos no ensaio de solubilização, verifica-se que todos os tratamentos apresentaram concentrações inferiores aos limites máximos permissíveis para cádmio, chumbo e ferro, cujos valores de referência são $0,003 \text{ mg L}^{-1}$, $0,010 \text{ mg L}^{-1}$ e $0,300 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. Entretanto, para alumínio e cromo, todos os tratamentos apresentaram concentrações superiores aos limites máximos permissíveis de $0,200 \text{ mg L}^{-1}$ e $0,050 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente.

Dessa forma, os tratamentos foram classificados como resíduos Classe 2 (não perigosos). Esse comportamento pode estar associado à maior concentração de alumínio e cromo presente no lodo de curtume utilizado na composição das misturas, o que contribuiu para concentrações mais elevadas desses elementos nos corpos de prova em comparação aos demais contaminantes avaliados.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE CURTUME E DO CIMENTO

A

Figura 1 apresenta os difratogramas de raios X (DRX) do lodo de curtume e do cimento. O lodo de curtume revelou presença de berlinita (AlPO_4), cálcio (Ca) e um composto com cromo, potássio e oxigênio (Cr_3KO_8). Já o cimento apresentou composição formada por silicato de cálcio (Ca_3SiO_5), calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Cr_3KO_8 e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

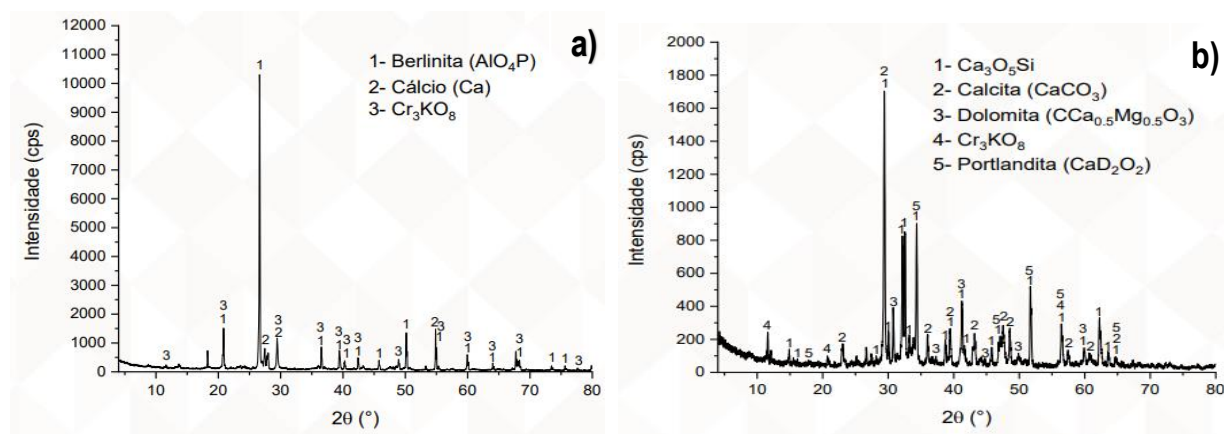


Figura 1. Difratograma de raios X com as fases identificadas no lodo de curtume e no cimento - a) Difratograma do lodo de curtume; b) Difratograma do cimento. Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A berlinita apresentou maior intensidade no lodo de curtume em ângulo de aproximadamente 25°, com predominância de regiões amorfas. Segundo Gao *et al.* (2023), a composição mineralógica do lodo de curtume é influenciada pela temperatura: acima de 1000 °C, o CaCrO_4 pode ser reduzido a CaCr_2O_4 ou convertido em $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\text{CrO}_4$ pela interação com Al_2O_3 .

No cimento, destacaram-se picos de silicato de cálcio, calcita e portlandita, indicando a predominância desses minerais. As áreas amorfas também foram observadas. Esses resultados são consistentes com os obtidos por Chen *et al.* (2023), que identificaram portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) na composição do cimento.

3.4 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DOS CORPOS DE PROVA

Segundo o protocolo proposto por Brito; Soares (2009), para que um material estabilizado por solidificação (E/S) seja considerado íntegro, ele deve atender ao critério de integridade quanto à resistência à compressão, apresentando valor ≥ 1 MPa, sendo assim aprovado para uso sem restrições.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nas análises de integridade e durabilidade correspondente aos 7 tratamentos e o corpo de prova com 0% de resíduo.

Tabela 3. Resultados obtidos nas análises de resistência à compressão.

% Lodo de curtume	Dias	Parâmetro
		Resistência à compressão (MPa)
0	28	83,610
10	7	55,930
40	7	33,950
10	28	62,580
40	28	47,540
25	17	47,790
25	17	52,780
25	17	51,720
		s= 14,349

Legenda: s: Desvio padrão amostral. Fonte: O autor (2025).

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em corpos de prova moldados no formato de blocos, conforme a ABNT NBR 7215 (2025), variando-se o teor de resíduo e o tempo de cura.

Conforme os dados da Tabela 3, observa-se que todos os experimentos atingiram resistência superior a 1 MPa, sendo classificados como materiais estabilizados por solidificação com potencial para uso sem restrições.

Verifica-se que a ausência de resíduo resulta em resistência superior, como no caso do corpo de prova com 0% de lodo, que apresentou resistência de 83,610 MPa. Além disso, o aumento do teor de resíduo tende a reduzir a resistência, enquanto o aumento do tempo de cura contribui para seu incremento. Tal tendência é confirmada ao comparar os corpos de prova com 10% de resíduo em 7 e 28 dias de cura (55,930 e 62,580 MPa,

respectivamente), evidenciando que a hidratação do cimento se intensifica com o tempo, melhorando a resistência mecânica.

Da mesma forma, ao comparar corpos com o mesmo tempo de cura (28 dias) e diferentes concentrações de resíduo (10% e 40%), nota-se queda da resistência de 62,580 para 47,540 MPa, o que sugere que componentes do resíduo podem interferir negativamente nas reações de hidratação do cimento. Os pontos centrais do planejamento, com 25% de lodo e 17 dias de cura, realizados em triplicata, apresentaram resistência entre 47,790 e 52,780 MPa.

A redução da resistência mecânica com o aumento do teor de lodo de curtume pode ser atribuída à interferência dos constituintes do resíduo nas reações de hidratação do cimento. Estudos indicam que a presença de matéria orgânica e metais pesados pode retardar ou inibir a formação dos principais produtos de hidratação, especialmente o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), comprometendo a coesão e a integridade da matriz cimentícia (Chen *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2022).

Por outro lado, o tempo de cura exerce papel fundamental no desenvolvimento das propriedades mecânicas, uma vez que promove o avanço das reações de hidratação e a formação de uma matriz mais densa e estável. Esse processo contribui para o aumento da resistência à compressão e para a melhoria da capacidade de encapsulamento dos contaminantes (Yang *et al.*, 2023).

Segundo a ABNT NBR 9781 (2013), blocos de concreto com menos de 28 dias de cura devem apresentar no mínimo 80% da resistência característica à compressão (f_{pk}). Os valores mínimos de resistência admissíveis são ≥ 35 MPa para aplicações com tráfego leve e de pedestres, e ≥ 50 MPa para situações de tráfego pesado.

Com isso, todos os testes estão aprovados para serem utilizados como pisos para tráfego leve e de pedestres e alguns também podem ser usados para tráfego pesado.

No contexto da estabilização/solidificação, a imobilização dos contaminantes ocorre por meio de mecanismos combinados de encapsulamento físico e estabilização química. O encapsulamento físico está associado à retenção dos contaminantes na estrutura da matriz cimentícia, enquanto a estabilização química envolve a transformação dos metais em formas menos solúveis e menos disponíveis ambientalmente (Chen *et al.*, 2024).

Chen *et al.* (2023) também evidenciaram o efeito do tempo de cura: com 7 e 28 dias de cura, os valores de resistência foram de 21,830 MPa e 26,470 MPa, respectivamente, confirmando a importância do tempo para o ganho de resistência.

Silva (2023), realizou o ensaio de resistência a compressão em corpos de prova estabilizados por solidificação submetidos a diferentes quantidades de lodo de curtume (10, 20 e 30%) e diferentes tempos de cura (7; 17,5 e 28 dias). O autor percebeu que a medida em que aumenta a concentração de resíduo diminuiu o resultado da resistência, em contrapartida, a medida em que aumentou o tempo de cura aumentou a resistência, corroborando com os resultados obtidos na presente pesquisa.

3.4.1 Análise variância (anova)

A Tabela 4 mostra a ANOVA para o ensaio de integridade dos materiais estabilizados.

Tabela 4. ANOVA para o ensaio de RC.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P	Significância ($\alpha=0,05$)
Modelo	2	445,150	222,575	33,140	0,003	Significativo
Linear	2	445,150	222,575	33,140	0,003	Significativo
%	1	342,802	342,802	51,040	0,002	Significativo
Tc	1	102,349	102,349	15,240	0,017	Significativo
Curvatura	1	1,002	1,002	0,120	0,756	Não Significativo
Falta de ajuste	1	12,056	12,056	1,750	0,317	Não Significativo

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; %: Percentual de lodo de curtume; Tc: Tempo de cura; RC: Resistência à compressão. * Valor P : $P \leq 0,05$ médias significativamente diferentes, $P > 0,05$ diferença não significativa. Fonte: Dados da pesquisa (2025).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4, as análises de variância da resistência à compressão os valores de p para o percentual de lodo de curtume e para o tempo de cura foram respectivamente 0,002; 0,017. Esses valores foram menores que o nível de significância adotado ($P \leq 0,05$).

Com isso, pode-se afirmar com 95% de confiança que a diferença estatística é significativa para os tratamentos utilizados. Com isso, como o valor de p para a curvatura foi 0,756 ($p \leq 0,05$) pode-se afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo linear. Para encontrar o ponto ótimo, pode-se usar a Equação 3.

$$RC \text{ (MPa)} = 57,33 - 0,6172 \% + 0,482 Tc \quad (3)$$

3.4.2 Efeitos das respostas obtidas no ensaio de integridade

A partir da análise de integridade foi obtido o gráfico de contorno mostrando melhor os resultados de RC, conforme está apresentado na Figura 2.

Analisando a Figura 2, pode-se observar que com o aumento da concentração de lodo de curtume houve uma redução da resistência dos corpos de provas, sendo os experimentos com 40% de resíduo em sua composição apresentaram menor resistência, como pode ser visualizado no canto inferior direito da figura. Os corpos de prova com menor percentual de resíduo obtiveram a maior resistência, como observado no experimento com 10% de resíduo que obteve a maior resistência, podendo ser visualizada no canto superior esquerdo. Todos os experimentos foram aprovados segundo o protocolo de Brito; Soares (2009), atingindo uma resistência superior a 1 MPa.

O tempo de cura também apresentou influência nas respostas dos resultados tendo em vista que quanto menor for o tempo de cura, menor será a resistência. E conforme diminui o tempo de cura e aumenta a quantidade de resíduo tem-se a diminuição da resistência, como pode ser observado na parte inferior da figura. Logo, o ponto ótimo para

a resistência à compressão foi obtido utilizando a concentração de 10% de lodo de curtume com tempo de cura de 28 dias.

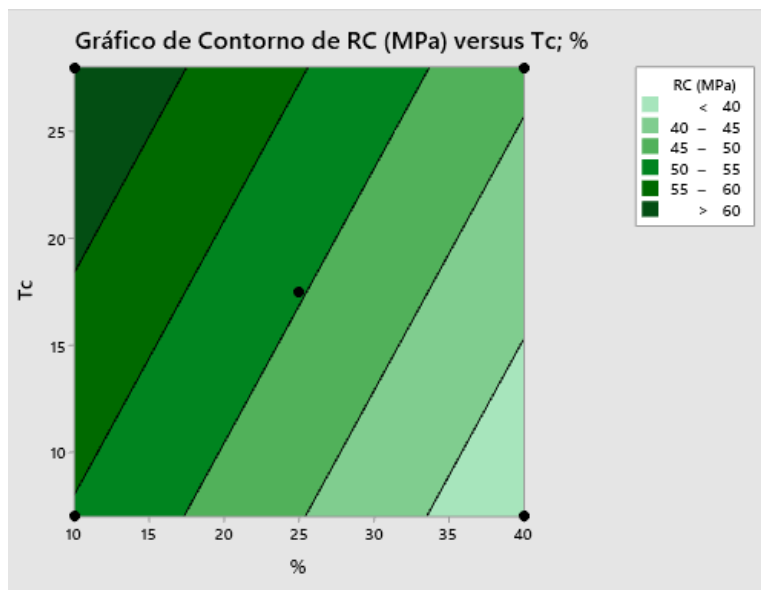


Figura 2. Superfície de contorno do percentual de resíduo em função do tempo de cura para RC.
Fonte: Minitab (2025).

O aumento da fração de resíduo incorporado tende a elevar a porosidade do material, favorecendo a formação de vazios e descontinuidades estruturais. Esse comportamento reduz a densidade do compósito e, conseqüentemente, sua resistência mecânica, conforme observado em estudos que avaliam a incorporação de resíduos industriais em matrizes cimentícias (Shen *et al.*, 2017).

Dias *et al.*, (2021) avaliaram a integridade e durabilidade de resíduo industrial e realizaram a modelagem dos dados e detectam na superfície de resposta que na medida em que aumenta a quantidade de resíduo ocorre a diminuição da resistência do material, o aumento da porosidade e o aumento da perda de massa, como também, quando diminui o tempo de cura acontece a redução da resistência, diminui a absorção de água e aumenta a perda de massa.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo estão alinhados com a literatura, evidenciando que o desempenho mecânico dos materiais estabilizados por solidificação depende diretamente da interação entre a matriz cimentícia, o teor de resíduo incorporado e o tempo de cura.

3.5 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO), BALANÇO DE MASSA E EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES

O ensaio de DQO foi realizado com o lixiviado dos corpos de prova, visando avaliar a imobilização da matéria orgânica presente nos resíduos. Os resultados estão na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados da DQO no extrato lixiviado das matrizes cimentícias, balanço de massa e eficiência da E/S na retenção da DQO.

% Lodo de curtume	Dias	Parâmetros					
		DQO (mg L ⁻¹)	DQO (mg Kg ⁻¹)	Massa da DQO Aplicada i lodo de curtume bruto (g)	Massa da DQO Transformada ii tratado (g)	Massa da DQO retida (g)	Eficiência
Lodo Bruto		280,900	5617,980	50,900	-	-	
0	28	119,570	2391,300	-	-	-	-
10	7	168,480	3369,570	50,900	31,540	19,360	38,480
40	7	184,780	3695,650	50,900	33,630	17,270	26,910
10	28	190,220	3804,350	50,900	36,140	14,760	30,550
40	28	179,350	3586,960	50,900	33,360	17,540	29,060
25	17	146,740	2934,780	50,900	27,120	23,780	44,280
25	17	157,610	3152,170	50,900	29,570	21,330	40,150
25	17	135,870	2717,390	50,900	25,490	25,410	48,410
S		46,494	499,799				

Legenda: s: Desvio padrão amostral. Fonte: O autor (2025).

Embora tenha sido observada uma redução significativa da Demanda Química de Oxigênio (DQO) em comparação ao resíduo bruto, os valores obtidos ainda permanecem acima do limite de 1000 mg L⁻¹ estabelecido pela legislação ambiental vigente, como a Resolução CONAMA n° 430/2011. Esse resultado indica que a técnica de estabilização/solidificação (E/S) contribui para a atenuação da carga orgânica, mas não promove sua remoção completa, logo, são classificados como resíduos perigosos.

Apesar disso, houve significativa redução da DQO em comparação ao lodo bruto, indicando que o processo de E/S contribuiu para atenuar a periculosidade do resíduo. O melhor desempenho foi observado no corpo de prova com 0% de resíduo (2391,300 mg kg⁻¹), enquanto a maior concentração foi registrada com 10% de resíduo e 28 dias de cura (3804,350 mg kg⁻¹). Constata-se que o tempo de cura e o teor de resíduo influenciam diretamente os resultados: maior teor de lodo e menor tempo de cura implicam maiores concentrações de DQO. Swarnalatha *et al.* (2008) afirmam que a redução dos contaminantes do material após serem estabilizados ocorre devido à eficiência do processo de E/S.

Resultados semelhantes são relatados na literatura, onde a técnica de E/S demonstra eficiência na redução da mobilidade dos contaminantes, mas apresenta limitações quanto à completa eliminação da periculosidade ambiental, especialmente em relação à matéria orgânica e metais potencialmente solúveis (Chen *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2023).

Guimarães (2017) obteve resultados semelhantes, demonstrando que maiores teores de lodo elevaram a DQO, especialmente em tempos curtos de cura. Silva (2023) também concluiu que a técnica de E/S, embora não elimine completamente os contaminantes, reduz significativamente a concentração da DQO.

Adicionalmente, os ensaios de solubilização evidenciaram concentrações elevadas de alguns elementos, como alumínio e cromo, acima dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 10004 (2024). Esse comportamento pode estar relacionado à liberação parcial desses elementos devido à incompleta incorporação na matriz cimentícia ou à presença de fases mais solúveis, conforme discutido por (Shen *et al.*, 2017).

A Tabela 5 também apresenta os valores de massa aplicada, transformada e retida, além da eficiência de retenção da DQO para cada tratamento.

Conforme a Tabela 5, todos os experimentos retiveram contaminantes na matriz cimentícia, com variação entre 14,760 g e 25,410 g. O melhor desempenho foi obtido com 25% de resíduo e 17 dias de cura, enquanto o pior ocorreu com a concentração de 10% e 28 dias de cura.

Os resultados indicam que o tempo de cura e o percentual de resíduo influenciam diretamente a retenção de contaminantes. Isso é evidente, por exemplo, no experimento com 10% de resíduo, que apresentou maior retenção com apenas 7 dias de cura. Conclui-se que a combinação de 25% de resíduo e 17 dias de cura foi a mais eficiente para retenção de contaminantes.

Silva (2023) também observou essa relação ao avaliar materiais E/S com diferentes concentrações de lodo de curtume. Os maiores valores de DQO retida foram obtidos com menor teor de resíduo (10%) e tempo de cura reduzido (7 dias), enquanto os menores ocorreram com 20% de resíduo e 17,5 dias de cura.

Assim, os dados confirmam que o tempo de cura e a concentração de resíduo impactam a retenção de contaminantes, e que a técnica de E/S mostrou bom desempenho no tratamento do lodo de curtume.

Os resultados indicam a eficiência da técnica de estabilização/solidificação na retenção da matéria orgânica presente no lodo de curtume variando amplamente conforme a concentração de resíduo e o tempo de cura.

Observa-se que as maiores eficiências de retenção ocorreram para os corpos com 25% de resíduo e tempo de cura de 17 dias, apresentando eficiências entre 44 e 48 %.

Por outro lado, os menores índices foram obtidos com maiores concentrações de resíduo e menor tempo de cura, indicando que a presença elevada de matéria orgânica dificulta a imobilização eficiente quando o tempo de hidratação é insuficiente.

Esses dados corroboram com estudos anteriores (Guimarães, 2017; Silva, 2023), que destacam a importância do tempo de cura para a formação adequada da matriz cimentícia capaz de encapsular e reduzir a lixiviação dos contaminantes.

Assim, os resultados indicam que a técnica de E/S atua principalmente na redução da mobilidade dos contaminantes por meio de processos de encapsulamento e estabilização química, sendo mais adequada como técnica de contenção do que de eliminação do contaminante, embora sua eficácia dependa das condições do sistema e nem sempre resulte na completa eliminação da periculosidade (Chen *et al.*, 2024). Dessa forma, sua aplicação deve ser avaliada em conjunto com critérios normativos e condições específicas de uso, especialmente quando se considera a destinação final do material.

De acordo com a literatura, a eficiência da técnica de estabilização/solidificação na imobilização de metais pesados está diretamente relacionada à interação entre os contaminantes e os produtos de hidratação do cimento, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), além das condições de cura e da composição química do sistema (Chen *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023). Entretanto, tais mecanismos nem sempre são suficientes para garantir a estabilização completa, especialmente em sistemas contendo elevadas concentrações de contaminantes.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o lodo de curtume foi classificado como resíduo Classe II (não perigoso), conforme a ABNT NBR 10004 (2004), indicando a necessidade de estratégias adequadas de tratamento antes de sua disposição ambiental. Nesse contexto, sua incorporação em matrizes cimentícias mostrou-se uma alternativa promissora para estabilização e reaproveitamento.

O tempo de cura e o percentual de lodo influenciaram significativamente a resistência à compressão, sendo observado que maiores teores de resíduo reduzem a integridade dos corpos de prova, enquanto o aumento do tempo de cura contribui para a melhoria do desempenho mecânico. Ainda assim, todos os materiais atenderam aos critérios normativos, demonstrando viabilidade para aplicação em pavimentação.

Os resultados ambientais indicaram redução da DQO em todos os tratamentos, bem como elevada retenção do resíduo na matriz cimentícia, evidenciada pelo balanço de massa. O ponto central do planejamento experimental apresentou o melhor desempenho global, indicando uma condição otimizada de incorporação e cura.

De forma geral, a técnica de estabilização/solidificação mostrou-se eficaz na redução do potencial de impacto ambiental do lodo de curtume e viável para sua aplicação na produção de blocos de pavimentação.

Apesar dos resultados promissores, o estudo apresenta limitações relacionadas à escala laboratorial e à faixa restrita de variáveis analisadas, não contemplando condições reais de aplicação e comportamento em longo prazo. Nesse sentido, recomenda-se que estudos futuros avaliem o desempenho dos materiais em escala piloto, incluindo análises de durabilidade, resistência a agentes ambientais e investigação de diferentes proporções de resíduo, ampliando a aplicabilidade da técnica.

5 AGRADECIMENTOS

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba –FAPESQ, pelo financiamento da pesquisa, e ao laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos (LABGER), onde foi desenvolvido o estudo.

REFERÊNCIAS

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: cimento Portland — determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781: peças de concreto para pavimentação — especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington, DC: APHA, 2023.

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.

CHEN, S. et al. Solidification mechanism and strength characteristics of alkali-activated tannery sludge. **Buildings**, v. 14, p. 1060, 2024.

CHEN, X. et al. Mechanical properties and micro mechanism of alkali-activated tannery sludge/fly ash composite cement-based recycled concrete. **Construction and Building Materials**, v. 391, p. 131813, 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 313, de 22 de novembro de 2002**. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2002.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2011.

DIAS, J. et al. 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>.

GAO, D. et al. A green tanning method based on POSS-COONa and zirconium: achieving cleaner leather production. **Progress in Organic Coatings**, v. 183, p. 107718, 2023.

GUIMARÃES, A. V. A. **Cinética dos contaminantes e otimização da estabilização por solidificação de lodo de curtume**. 2017. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

HERRERA-GONZÁLEZ, J. et al. Use of waste material from the chemical industry for the production of low-strength concrete hollow blocks. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 40, p. e00870, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00870>.

MA, J. et al. Stabilizing Cr(III) deriving from tannery sludge with kaolin and organic matter. **Environmental Research**, v. 236, p. 116798, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116798>.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Dispõe sobre o padrão de potabilidade da água para consumo humano. Brasília, DF, 2021.

MINITAB. **Minitab Statistical Software**, version 19. State College: Minitab Inc., 2025.

QUAN, Z. et al. Do industrial solid waste recycling and technological innovation promote low-carbon development in China? **Science of the Total Environment**, v. 916, p. 170446, 2024.

SHEN, D. et al. Effect of waste addition points on the chromium leachability of cement produced by co-processing of tannery sludge. **Waste Management**, v. 61, p. 345–353, 2017.

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

SWARNALATHA, S. et al. Safe disposal of toxic chrome buffing dust generated from leather industries. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, p. 290–299, 2008.

TUCI, G. A. et al. Tannery sludge valorization through zeolite-assisted anaerobic process for short-chain fatty acids production. **Environmental Research**, p. 118046, 2023.

VILLAGRÁN-ZACCARDI, Y. A. et al. Complete re-utilization of waste concretes: valorisation pathways and research needs. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 177, p. 105955, 2022.

YANG, Y. et al. Immobilization of chromium in real tannery sludge via heat treatment with coal fly ash. **Chemosphere**, v. 335, p. 139180, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139180>.

ZHANG, Z. et al. Solidification/stabilization and risk assessment of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash: a review. **Science of the Total Environment**, v. 892, p. 164451, 2023.

ZHU, Y. et al. Advances in immobilization of radionuclide wastes by alkali-activated cement and related materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 126, p. 104377, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104377>.