

Efeito do tratamento químico de resíduo industrial de zinco com ligantes químicos

Effects of treatment of zinc industrial waste with chemical binders

Tennison Freire de Souza Junior¹; Alessander Cristopher Morales Kormann²; Sidnei Helder Cardoso Teixeira³; Paulo Henrique Nogueira Metzker⁴; Marcio Rogério Jorge⁵

- 1 Universidade Federal do Paraná, PPGEC/DCC, Curitiba/PR, Brasil. Email: tennisongeotec@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7874-0593>
- 2 Universidade Federal do Paraná, PPGEC/DCC, Curitiba/PR, Brasil. Email: acmkormann@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4512-3763>
- 3 Universidade Federal do Paraná, PPGEC/DCC, Curitiba/PR, Brasil. Email: sidnteix@outlook.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3522-1706>
- 4 NEXA Resources, Gerência, Três Marias/MG, Brasil. Email: phmetzker@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8622-0675>
- 5 NEXA Resources, Gerência, Três Marias/MG, Brasil. Email: Marcio.jorge0071@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1119-2274>

Resumo: A geração de rejeitos industriais de mineração é um resultado inerente ao processo de beneficiamento, exigindo práticas de gestão sustentáveis e economicamente viáveis em conformidade com as normas vigentes. Atualmente, tais rejeitos podem ser dispostos em barragens, cavas, geobags ou empilhamento a seco, dependendo das necessidades específicas e estratégias operacionais das empresas mineradoras. No caso do empilhamento a seco, um dos principais desafios para as mineradoras é a disponibilidade de áreas adequadas para secagem e disposição, o que ressalta os potenciais benefícios do uso de aglutinantes químicos para acelerar a secagem e reduzir os níveis de contaminantes presentes nos rejeitos. Este estudo investiga o uso de aglutinantes químicos para reduzir o tempo de secagem e analisa o comportamento químico e geomecânico do Rejeito Industrial de Zinco Filtrado e Compactado (RIZFC) e do Rejeito Industrial de Zinco Melhorado e Compactado (RIZMC), em diferentes períodos de cura (7, 28 e 120 dias), por meio de ensaios laboratoriais. Os resultados indicam que a aplicação de aglutinantes químicos reduziu significativamente tanto o tempo de secagem quanto as concentrações de contaminantes perigosos nos rejeitos de mineração de zinco. Entretanto, a incorporação de aglutinantes também ocasionou alterações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, influenciadas pelo teor de aglutinante, tempo de cura e níveis de pH.

Palavras-chave: Resíduo industrial de mineração; Comportamento geomecânico; Ligantes químicos.

Abstract: The generation of industrial mining waste is an inherent outcome of the beneficiation process, requiring sustainable and cost-effective management practices in compliance with current regulations. At present, such waste may be disposed of via dams, pits, geobags, or dry stacking, depending on the specific needs and operational strategies of mining enterprises. In the case of dry stacking, a primary challenge for mining companies is securing adequate areas for drying and disposal, underscoring the potential benefits of employing chemical binders to accelerate drying and reduce contaminant levels in the waste. This study investigates the use of chemical binders to decrease drying time and examines the chemical and geomechanical behavior of compacted filtered zinc industrial waste (RIZFC) and compacted improved zinc industrial waste (RIZMC) at different curing periods (7, 28, and 120 days) through laboratory testing. The results indicate that the application of chemical binders significantly reduced both the drying time and concentrations of hazardous contaminants in zinc mining waste. However, the incorporation of binders also led to alterations in the shear strength parameters, influenced by binder content, curing duration and pH levels.

Keywords: Industrial Mining Waste; Geomechanical Behavior; Chemical Binders.

1. Introdução

Atualmente, as barragens de rejeitos permanecem amplamente utilizadas nas operações de mineração, tanto em razão de seu papel historicamente consolidado como método de disposição quanto pela simplicidade operacional e praticidade associadas ao depósito dos materiais. No entanto, após os rompimentos das barragens de Fundão (Mariana/MG) e Córrego do Feijão (Brumadinho/MG), observou-se, no Brasil, uma intensificação na adoção de soluções fundamentadas em métodos mais seguros, tecnicamente robustos e economicamente viáveis para a disposição dos rejeitos e resíduos provenientes dos processos de extração e beneficiamento mineral. Nesse contexto, entre as alternativas analisadas, a disposição de rejeitos ou resíduos industriais por meio do empilhamento filtrado, também denominado *dry stacking*, tem se consolidado como uma opção relevante e preferencial no setor mineral, sobretudo em função da publicação da NBR 13.028 (2025).

A ainda incipiente experiência prática com o empilhamento filtrado no Brasil, aliada à ausência de um arcabouço normativo específico e abrangente que discipline esse método de disposição, tem gerado incertezas quanto ao comportamento geomecânico de longo prazo desses materiais engenheirados. Atualmente, algumas das principais normas aplicáveis ao empilhamento de resíduos filtrados contaminados no país incluem a NBR 10.157 (ABNT, 1987), que estabelece requisitos mínimos para o projeto, a implantação e a operação de aterros de resíduos perigosos, com vistas à proteção dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, bem como à segurança dos operadores das instalações e das comunidades adjacentes. Adicionalmente, a Resolução CONAMA nº 313 (BRASIL, 2002) institui o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, estabelecendo diretrizes relacionadas à geração, caracterização, armazenamento, transporte, tratamento, reaproveitamento, reciclagem, recuperação e disposição final dos resíduos sólidos industriais.

O emprego de cal virgem com o objetivo de acelerar o processo de secagem de subprodutos da mineração de ferro foi investigado por Rissoli *et al.* (2024). De forma complementar, estudos recentes têm indicado que a estabilização química por meio da adição de cal virgem e/ou cimento Portland constitui uma abordagem promissora para a otimização da disposição de resíduos industriais ou rejeitos de mineração (Consoli *et al.*, 2022; Consoli *et al.*, 2023; Mafessoli *et al.*, 2023). Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de um resíduo industrial de zinco (RIZ) submetido à estabilização química mediante a adição de cal virgem e cimento Portland, em comparação com o comportamento do resíduo filtrado sem tratamento. Conforme discutido por Han (2015), agentes químicos — também denominados ligantes — podem ser incorporados aos solos e combinados com geomateriais preexistentes para a produção de materiais endurecidos, denominados geomateriais melhorados, os quais apresentam incrementos significativos de resistência e rigidez. Esses agentes podem incluir cal, cimento Portland, géis à base de silicatos e diversas soluções químicas.

Os efeitos da estabilização química do RIZ foram avaliados por meio de ensaios laboratoriais realizados em amostras contendo 5% de cal virgem e 10% de cimento Portland, moldadas com diferentes índices de vazios (variando de 1,5 a 2,2) e submetidas a períodos de cura de 7, 28 e 120 dias. Os resultados obtidos demonstraram que a adição dos agentes ligantes promoveu uma redução significativa no tempo de secagem do material, diminuiu a concentração de constituintes contaminantes presentes no resíduo industrial e resultou em melhorias substanciais nos parâmetros de resistência mecânica, incluindo a coesão efetiva (c') e o ângulo de atrito efetivo (ϕ').

2. Revisão Literária

O uso de agentes ligantes químicos em rejeitos de mineração constitui uma alternativa promissora para a melhoria de suas propriedades geotécnicas e ambientais. Esses materiais, tais como cal (hidratada ou virgem), cimento Portland, escória de alto-forno e outros ligantes industriais, podem promover reações químicas capazes de reduzir a plasticidade, aumentar a resistência ao cisalhamento, diminuir a permeabilidade dos rejeitos, acelerar o tempo de secagem, bem como mitigar o potencial de liquefação (Kramer, 1986; Consoli *et al.*, 2022) e os fenômenos de erosão, tanto interna quanto superficial (citar uma ou mais referências). Além disso, rejeitos ou resíduos industriais, mesmo após a etapa de filtragem, ainda apresentam teores de umidade superiores à umidade ótima de compactação, o que demanda extensas áreas de secagem para que se atinjam condições adequadas de compactação. Uma alternativa para a redução do tempo de secagem consiste na incorporação de cal virgem ao material (Rissoli *et al.*, 2023).

De acordo com Han (2015), a adição de cal virgem promove a hidratação do ligante, reações de troca iônica e a formação de produtos de reações pozolânicas. Essas reações químicas são exotérmicas, contribuindo para a redução do teor de umidade do solo e, consequentemente, para o aumento de sua resistência mecânica (Craig, 2004; Carvalho *et al.*, 2023; Mafessoli *et al.*, 2023). Esse processo, comumente denominado hidratação do ligante, envolve também a dissolução da cal hidratada em água, elevando as concentrações de íons cálcio (Ca^{2+}) e hidroxila (OH^-). Os íons cálcio, por sua vez,

desencadeiam reações de troca iônica entre o ligante e o solo, promovendo alterações nas propriedades físicas do material, tais como a redução da plasticidade.

Han (2015) destacou que, além da hidratação do ligante, das reações de troca iônica e da formação de produtos pozolânicos, a estabilização química dos solos com esse agente envolve processos reacionais responsáveis pela geração de produtos específicos de hidratação. O cimento Portland é constituído por diversos compostos capazes de reagir quimicamente com a água, sendo o principal produto da hidratação o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formado a partir da hidratação dos principais constituintes do cimento Portland comum (C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF). Durante esse processo, ocorre também a liberação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), o qual favorece reações pozolânicas semelhantes às observadas na estabilização com cal. A formação progressiva dos produtos de hidratação ao longo do tempo resulta no enrijecimento do solo (perda de trabalhabilidade), na pega (solidificação) e no endurecimento (ganho de resistência).

Especificamente no processo de beneficiamento do zinco, ocorre a formação de jarosita, um subproduto mineral pertencente ao grupo dos sulfatos (KFe₃(SO₄)₂(OH)₆), classificado como resíduo industrial. Segundo Seyer et al. (2001), os precipitados de jarosita formados durante a lixiviação de ferritas de zinco podem ser combinados com proporções predeterminadas de cimento Portland, cal e água para a produção do material denominado Jarofix, o qual apresenta estabilidade química, física e ambiental a longo prazo. A literatura reporta casos bem-sucedidos de aplicação do Jarofix na construção de pavimentos (Pappu et al., 2010; Sinha et al., 2012, 2018, 2019, 2022). Ademais, empresas localizadas em países como Índia, Canadá e Espanha têm adotado a disposição de resíduos industriais de zinco por meio da tecnologia Jarofix.

3. Metodologia

3.1 Materiais

O cimento Portland utilizado foi do tipo CP III (NBR 16.697, 2018), juntamente com cal virgem industrial (NBR 6.473, 2003) e água potável de abastecimento local. O resíduo industrial empregado neste estudo é proveniente da produção de zinco no interior do estado de Minas Gerais, Brasil. Esse resíduo, denominado lama terciária, consiste em uma mistura de três subprodutos: (a) flotação, com teor de sólidos de aproximadamente 3%; (b) underflow com pH 9, contendo cerca de 8% de sólidos; e (c) lodo de neutralização, que, após a etapa de filtragem, forma um belt cake com aproximadamente 40% de sólidos. Conforme apresentado na Figura 1, o resíduo industrial de zinco (RIZ) é constituído predominantemente por silte (40%–60%), areia (20%–40%) e uma fração residual de pedregulho em torno de 10%, de acordo com a norma D7928 (ASTM, 2021).

Segundo classificações internacionais, o RIZ foi enquadrado como MH (silte de alta compressibilidade) pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS), conforme a norma D2487-17 (ASTM, 2020). Embora a distribuição granulométrica apresente uma fração significativa de silte, o material foi classificado como A-7-5 pelo sistema HRB (Highway Research Board), em conformidade com a norma D3282 (ASTM, 2024).

Os ensaios de limites de Atterberg realizados nas amostras do resíduo industrial indicaram valores de limite de liquidez (LL) variando entre 59% e 62% e índices de plasticidade (IP) entre 11% e 13%, de acordo com a norma D4318 (ASTM, 2017). Os ensaios de determinação da massa específica dos sólidos resultaram em valores compreendidos entre 25,96 kN/m³ e 26,43 kN/m³, conforme a norma D854 (ASTM, 2023). A composição química da lama terciária foi determinada como sendo predominantemente constituída por CaSO₄ (47,3%), SiO₂ (27,4%), Fe₂O₃ (10,1%), Mg₂(OH)₂SO₄ (5,8%), NH₄Fe₃(SO₄)₂(OH)₆ (3,5%), além de outros componentes minoritários em proporções inferiores a 6%.

Nos ensaios de compactação realizados com energia Proctor Normal (D698-12) (ASTM, 2021), para os materiais RIZMC e RIZFC, o teor de umidade ótima (w_{ot}) do RIZMC variou entre 57,5% e 63,4%, enquanto o do RIZFC apresentou valores entre 53,23% e 56%. Como pode ser visto na Figura 2, a introdução de ligantes químicos (cimento Portland CP III e cal virgem) provocou o deslocamento da curva de compactação para a esquerda, resultando em menores valores de peso específico seco máximo e em maiores teores de umidade ótima. Esse comportamento é atribuído à natureza fina e hidrofílica dos ligantes químicos incorporados ao material.

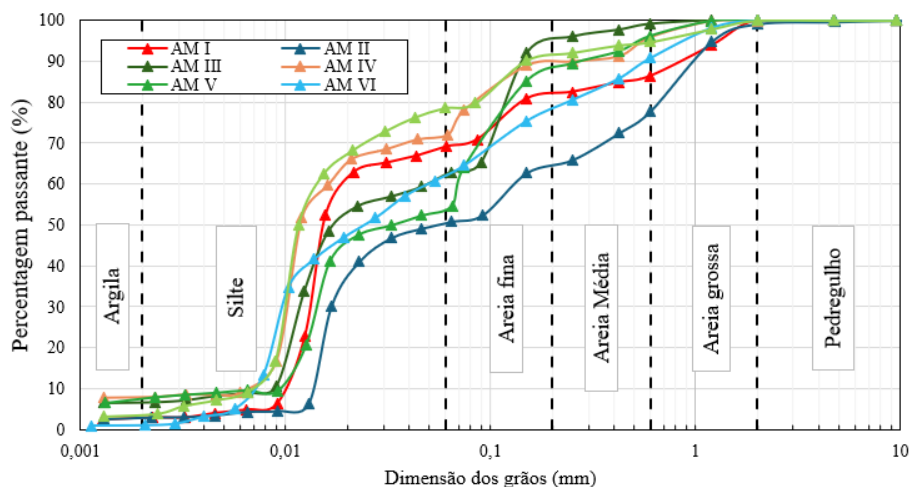


Figura 1 – Distribuição granulométrica das amostras de resíduo industrial de zinco.

Fonte: Autores (2025).

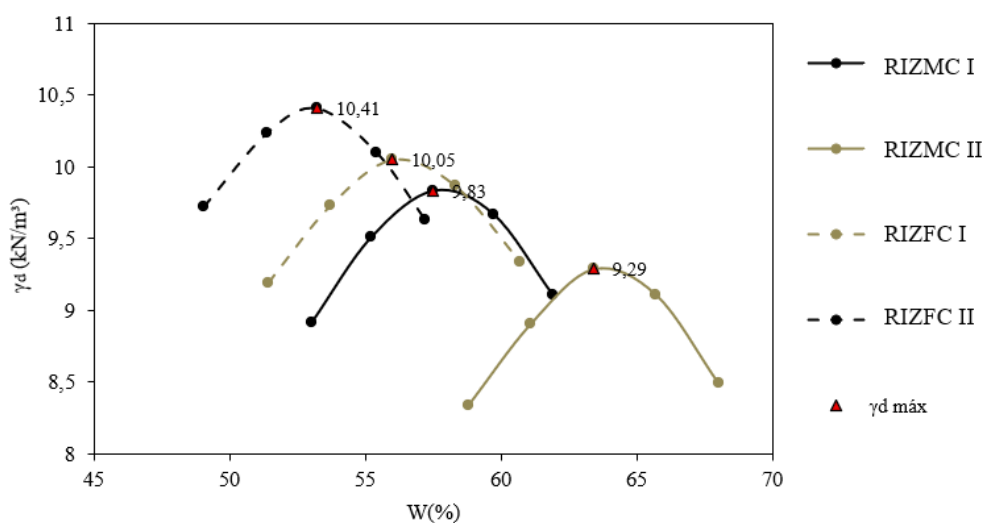


Figura 2 – Curvas de compactação Proctor Normal das amostras de RIZMC e RIZFC.

Fonte: Autores (2025).

3.2 Métodos

3.2.1 Procedimento executivo dos aterros experimentais

O presente estudo teve como objetivo investigar o comportamento geomecânico e químico do RIZFC e do RIZMC sob diferentes esforços de compactação, resultando em distintos índices de vazios, totalizando quatro cenários de análise. As proporções de cimento Portland e cal virgem foram definidas com base em uma adaptação das dosagens consagradas do método Jarofix propostas por Sinha *et al.* (2018), ajustadas de modo a atingir um pH-alvo de 12. Foram construídos, ao todo, seis aterros experimentais (ELs), variando em função da faixa de umidade ótima apresentada na Figura 2, dos índices de vazios, do tipo de tratamento e dos tempos de cura de 7, 28 e 120 dias, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de ensaios dos aterros experimentais.

EL	ID	e_{med}	Tempo de cura (dias)	H _L (m)	W _c (%)	Material
EL 01	EL 01 120d	2,2	120	0,20	56,65	RIZMC
EL 02	EL 02 120d	1,9	12	0,20	60,83	RIZMC
EL_03	EL 03 7d	1,5	7	0,20	56,68	RIZMC
	EL 03 28d	1,5	28	0,20	56,68	RIZMC
	EL 03 120d	1,5	120	0,20	56,68	RIZMC
EL 04	EL 04 0d	1,5	0	0,20	51,69	RIZFC
EL 05	EL 05 0d	1,8	0	0,20	55,20	RIZFC
EL 06	EL 06 0d	1,7	0	0,20	55,35	RIZFC

Legenda: EL = Aterro experimental; e_{med} = índice de vazios médio; H_L = espessura da camada compactada; e W_c = teor de umidade.

Fonte: Autores (2025).

O geomaterial utilizado neste estudo foi proveniente de uma unidade de beneficiamento de zinco, na qual o resíduo industrial foi desaguado por meio de filtro-prensa e, posteriormente, estocado em pátio. Esse material é denominado resíduo industrial de zinco filtrado (RIZF). O resíduo industrial de zinco quimicamente melhorado (RIZM) foi produzido por meio de um processo de tratamento semelhante ao método Jarofix, conforme descrito por Seyer et al. (2001). Nesse processo, o RIZF foi inicialmente misturado com leite de cal (mistura de água e cal virgem) e homogeneizado com o auxílio de misturadores industriais. Em seguida, o cimento Portland foi aspergido sobre o RIZF previamente tratado, sendo a mistura novamente homogeneizada por meio de misturadores industriais instalados em correias transportadoras, em um pátio específico.

O material proveniente da planta de beneficiamento apresentou teor de umidade após a filtragem, w_f (%), superior ao teor de umidade de compactação desejado, w_c (%), tornando necessária a redução da umidade antes da disposição. Dessa forma, previamente à execução das etapas de lançamento e compactação do RIZM e do RIZF, os materiais foram dispostos temporariamente em uma área específica sob a tenda inflável (*inflatable tent*) e monitorados diariamente até atingirem as condições adequadas para compactação.

Ambos os materiais foram coletados com o auxílio de escavadeira hidráulica e transportados até a área de construção dos aterros experimentais por meio de caminhões basculantes. Os processos construtivos dos aterros experimentais seguiram práticas convencionais de terraplenagem, empregando escavadeiras, caminhões-pipa, motoniveladoras, tratores de esteiras com implementos de nivelamento e compactadores do tipo *tamper*. A tenda inflável consiste em uma estrutura de grande porte, mantida por ventiladores/exaustores de alta capacidade, projetada para controlar as condições de umidade do RIZFC e do RIZMC e para evitar o incremento de umidade em decorrência de precipitações pluviométricas. A Figura 3 ilustra a execução das camadas nos aterros experimentais.



(a) (b)
Figura 3 – Construção de aterros experimentais utilizando equipamentos de terraplenagem: (a) espalhamento da camada; (b) compactação da camada.

Fonte: Autores (2025).

Ao final da execução das camadas dos aterros experimentais (4,00 m × 10,00 m), foi respeitado um período de espera de 24 horas antes do início da coleta das amostras deformadas e indeformadas. Na região central de cada aterro experimental, foram realizadas escavações com o objetivo de extrair blocos indeformados com dimensões de 30 cm × 30 cm × 30 cm, bem como amostras deformadas, coletadas em sacos de 25 kg, provenientes das camadas de resíduo industrial filtrado e tratado.

As amostras indeformadas foram cuidadosamente aparadas, envolvidas em filme de PVC liso, recobertas com tecido morim branco e acondicionadas em caixas de madeira para proteção durante o transporte e o armazenamento. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em câmara úmida mantida à temperatura de 23 °C ± 2 °C e umidade relativa mínima de 95%, de modo a garantir condições adequadas de cura para o desenvolvimento do estudo, em conformidade com a norma ASTM C511 (ASTM, 2021).

3.2.2 Análises químicas -Lixiviação e Solubilização

A caracterização do resíduo industrial zinco (RIZ) foi realizada por meio de ensaios em amostras indeformadas, extrato lixiviado e extrato solubilizado, sendo a classificação efetuada de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), com base nos dados apresentados na Tabela 2. A coleta de amostras representativas, de forma a assegurar a confiabilidade dos resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização, foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 10.007 (ABNT, 2004). A classificação do RIZMC e do RIZFC quanto aos riscos ao meio ambiente e à saúde pública foi realizada com base na NBR 10.004 (ABNT, 2004). A determinação da presença de substâncias solúveis em água, tais como metais pesados, no RIZMC e no RIZFC, foi conduzida de acordo com os procedimentos descritos na NBR 10.005 (ABNT, 2004). Adicionalmente, a avaliação do potencial de liberação de contaminantes em meio ácido — diferentemente do ensaio de lixiviação, que utiliza meio neutro — foi realizada conforme a NBR 10.006 (ABNT, 2004).

3.2.3 Tempo de secagem

A avaliação do tempo de secagem consistiu na determinação do período necessário para que os materiais atingissem os teores de umidade alvo $W(\%)$ apresentados na Tabela 2. Para esse fim, os valores de $W(\%)$ do RIZMC e do RIZFC foram monitorados por meio de ensaios de determinação do teor de umidade realizados de acordo com a norma ASTM D2216-19 (ASTM, 2019), sob temperatura controlada de 50 °C. Em razão das elevadas concentrações de sulfatos e etringita presentes no material, temperaturas superiores a 50 °C poderiam provocar processos de degradação, conforme indicado por Alonso e Fernández (2004).

3.2.4 Análise de resistência ao cisalhamento – ensaios triaxiais CIU

Os ensaios triaxiais CIU (*Consolidated Isotropically Undrained*) foram realizados de acordo com a norma ASTM D4767-11 (ASTM, 2020). Corpos de prova cilíndricos foram talhados a partir de blocos indeformados, obedecendo às dimensões padronizadas de 50 mm × 100 mm (H/D = 2,0). Após o preparo, os corpos de prova foram posicionados no equipamento triaxial e submetidos à saturação por contrapressão de 500 kPa, até que fosse atingido um valor mínimo do parâmetro B igual a 0,95. As condições de ensaio adotadas para os ensaios triaxiais CIU realizados em amostras indeformadas provenientes dos aterros experimentais são apresentadas na Tabela 2.

O tempo de cura das amostras de RIZMC foi definido como o intervalo compreendido entre a execução do aterro experimental e o início dos ensaios triaxiais CIU. Essa metodologia foi adotada com o objetivo de evitar a cura sob tensão de confinamento, conforme destacado por Rotta et al. (2003).

Tabela 2 – Condições de ensaio para os ensaios triaxiais CIU em aterros experimentais.

EL	e _{med}	W _t (%)	p' ₀ (kPa)
EL_01_120d	2,2	53,75	100, 400, 700 e 1000
EL_02_120d	1,9	56,17	100, 400, 700 e 1000
EL_03_7d	1,5	48,64	100, 400, 700 e 1000
EL_03_28d	1,5	49,53	100, 400, 700 e 1000
EL_03_120d	1,5	49,00	100, 400, 700 e 1000
EL_04_0d	1,5	44,54	100, 400, 700 e 1000
EL_05_0d	1,8	46,91	100, 400, 700 e 1000
EL_06_0d*	1,7	63,80	250, 500, 750 e 1000

Fonte: Autores (2025).

4. Resultados e discussões

4.1 Análise química dos resíduos industriais (RIZMC e RIZFC) - Extratos lixiviados e solubilizados

De acordo com a NBR 10.006 (ABNT, 2004), a solubilização é o processo ou a capacidade pela qual uma substância, geralmente no estado sólido, se dissolve em um solvente, formando uma solução homogênea. Esse processo envolve interações entre as partículas do soluto e do solvente, permitindo que o soluto se disperse uniformemente no solvente e resulte em uma mistura monofásica. O ensaio de solubilização foi conduzido colocando-se 250 g da amostra em contato com 1000 mL de água deionizada por um período de 7 dias, à temperatura de 23 ± 2 °C.

As Tabelas 3 a 8 apresentam os resultados referentes às substâncias cujas concentrações nos ensaios de solubilização e de lixiviação excederam os valores máximos permitidos (VMP) estabelecidos na legislação brasileira. Inicialmente, a análise do resíduo industrial filtrado compactado indicou que as concentrações de alumínio, arsênio, cádmio, chumbo, manganês e sulfatos ultrapassaram os VMP. Destaca-se, em particular, que as concentrações de sulfatos nas amostras EL_04, EL_05 e EL_06 excederam significativamente os limites estabelecidos pela NBR 10.006 (ABNT, 2004), atingindo valores entre 3905,9 mg/L e 6574,3 mg/L. Os valores de pH dessas amostras variaram entre 6,18 e 7,23, indicando condições que variam de levemente ácidas a ligeiramente alcalinas, conforme apresentado na De acordo com a NBR 10.005 (ABNT, 2004), os lixiviados são líquidos gerados pela percolação ou passagem de água (ou outros líquidos) através de resíduos industriais. Durante esse processo, compostos químicos são extraídos por um solvente — seja ele ácido, básico ou neutro — que apresenta afinidade pelos constituintes a serem removidos. Conforme apresentado na Tabela 3, nos aterros experimentais EL_04, EL_05 e EL_06, as concentrações de cádmio e chumbo excederam os valores máximos permitidos (VMP) em aproximadamente 20 vezes.

Tabela 3.

De acordo com a NBR 10.005 (ABNT, 2004), os lixiviados são líquidos gerados pela percolação ou passagem de água (ou outros líquidos) através de resíduos industriais. Durante esse processo, compostos químicos são extraídos por um solvente — seja ele ácido, básico ou neutro — que apresenta afinidade pelos constituintes a serem removidos. Conforme apresentado na Tabela 3, nos aterros experimentais EL_04, EL_05 e EL_06, as concentrações de cádmio e chumbo excederam os valores máximos permitidos (VMP) em aproximadamente 20 vezes.

Tabela 3 – Análise química dos parâmetros de solubilização das amostras de RIZFC — EL_04, EL_05 e EL_06.

Parâmetros	MPV (mg/L)	RIZFC
------------	------------	-------

		EL_04 (pH=7,23)	EL_05 (pH=6,18)	EL_06 (pH=6,55)
Alumínio	0,200	0,272	0,319	0,326
Arsênio	0,010	0,024	0,019	0,015
Cádmio	0,005	0,279	0,368	0,347
Chumbo	0,010	0,021	-	0,009
Manganês	0,100	8,233	14,516	12,904
Sulfatos	250,000	6574,300	3905,900	4257,600

Fonte: Autores (2025).

Tabela 4 – Análise química dos parâmetros de lixiviação das amostras de RIZFC — EL_04, EL_05 e EL_06

Parâmetros	MPV (mg/L)	RIZFC		
		EL_04 (pH=5,72)	EL_05 (pH=5,41)	EL_06 (pH=5,38)
Cádmio	0,500	4,049	4,356	4,781
Chumbo	1,000	15,106	22,367	26,668

Fonte: Autores (2025).

Ao comparar os aterros EL_01 e EL_02 com os aterros EL_04, EL_05 e EL_06, observa-se que o RIZMC apresentou valores inferiores nas concentrações solubilizadas de cádmio, chumbo e manganês, reduzindo-as para níveis abaixo dos valores máximos permitidos (VMP). As concentrações de sulfatos apresentaram redução superior a 50%; contudo, ainda permaneceram acima do VMP estabelecido. Adicionalmente, conforme apresentado na Tabela 4, verificou-se um aumento notável do pH (atingindo valores de 7,87 e 8,87), conferindo caráter alcalino ao resíduo industrial de zinco (RIZ).

A alcalinidade favorece a estabilidade química dos componentes hidratados C-S-H e Ca(OH)₂, reduzindo a probabilidade de sua dissolução e, simultaneamente, preservando a integridade mecânica e a durabilidade estrutural do material. Além disso, promove a neutralização química e aumenta a inertização dos metais pesados. No que se refere aos componentes lixiviados (Tabela 6), observa-se que apenas o cádmio excedeu o VMP em meio levemente alcalino (pH pouco superior a 7), o que sugere um aumento da retenção de contaminantes induzido pelo processo de solubilização. O leve aumento da concentração de alumínio pode estar associado à presença de C₃A na composição do clínquer do cimento Portland.

Tabela 5 – Análise química dos parâmetros de solubilização das amostras de RIZMC — EL_01 e EL_02

Parâmetros	MPV (mg/L)	RIZMC - 120 dias	
		EL_01 (pH = 7,87)	EL_02 (pH = 8,87)
Alumínio	0,200	0,302	0,414
Arsênio	0,010	0,0670	0,073
Nitrato	10,000	34,170	19,450
Sulfato	250,000	703,000	1379,700

Fonte: Autores (2025).

Tabela 6 – Análise química dos parâmetros de lixiviação das amostras de RIZMC – EL_01 e EL_02

Parâmetros	MPV (mg/L)	RIZMC - 120 dias	
		EL_01 (pH = 7,02)	EL_02 (pH = 7,11)
Cádmio	0,500	-	0,726

Fonte: Autores (2025).

Destaca-se que, embora o cimento Portland tenha sido incorporado primordialmente com o objetivo de melhorar a resistência mecânica, o estudo do tempo de cura evidenciou um aumento nos teores de sulfatos com o prolongamento do período de cura (Tabela 7). Esse comportamento pode indicar certo grau de heterogeneidade das amostras ou a formação de etringita em condições alcalinas em estágios mais avançados (pH > 7).

As Tabelas 7 e 8 mostram que, ao longo do período de cura, não ocorreram alterações significativas nos parâmetros de solubilização e lixiviação do rejeito industrial de zinco melhorado. Ao comparar as amostras EL_03 em diferentes tempos de cura com as amostras EL_01 e EL_02, observou-se novamente uma redução expressiva nas concentrações solubilizadas de cádmio, manganês e sulfatos em relação ao MPV, provavelmente associada à neutralização dos contaminantes decorrente do aumento da alcalinidade. Também foi constatada a presença de alguns componentes residuais, como sódio e nitrato, no rejeito industrial de zinco melhorado, possivelmente em decorrência da incorporação do cimento Portland.

Tabela 7 – Análise química dos parâmetros de solubilização das amostras de RIZFC – EL 03.

Parâmetros	MPV (mg/L)	EL 03 - RIZMC		
		7 dias (pH = 8,18)	28 dias (pH =7,13)	120 dias (pH =8,19)
Alumínio	0,200	0,4507	0,352	0,943
Arsênio	0,010	0,044	0,101	0,122
Cádmio	0,005	-	-	-
Chumbo	0,010	-	-	0,034
Manganês	0,100	-	-	0,192
Nitrato	10,000	19,760	20,460	-
Sódio	200,000	-	-	209,660
Sulfato	250,000	1525,800	1696,700	1944,200

Fonte: Autores (2025).

Tabela 8 – Análise química dos parâmetros de lixiviação das amostras de RIZFC – EL 03

Parâmetros	MPV (mg/L)	EL 03 - RIZMC		
		7 dias (pH =7,26)	28 dias (pH = 7,1)	120 dias (pH = 6,73)
Cádmio	0,500	0,762	1,224	1,536
Chumbo	1,000	-	1,246	1,939

Fonte: Autores (2025).

Com base nas normas vigentes, os estudos realizados com o resíduo industrial filtrado compactado (RIZFC) e com o resíduo melhorado com cal e cimento Portland (RIZMC) indicaram que os extratos lixiviados e solubilizados apresentaram concentrações de cádmio, chumbo e sulfatos superiores aos limites estabelecidos, classificando o material como Classe I — Resíduo Perigoso, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004). Embora a adição de cal virgem tenha interagido com os contaminantes livres, promovendo a redução de suas concentrações ao longo do período de cura em razão do efeito de encapsulamento, a dosagem de 5% mostrou-se insuficiente para reduzir esses teores a níveis compatíveis com a disposição ambientalmente segura.

4.2 Tempo de secagem das amostras de RIZMC e RIZFC

A Figura 4 ilustra o tempo total de secagem dos materiais que compõem o RIZMC e o RIZFC. Observa-se que, sob as condições de exposição e climáticas vigentes durante o período de estudo, os materiais do RIZMC atingiram o teor de umidade alvo (W_c) em um intervalo de tempo inferior ao observado para os materiais do RIZFC. Excluindo-se a amostra EL_1, que apresentou um tempo de secagem atipicamente reduzido em relação às demais, a incorporação de ligantes químicos resultou, de modo geral, em uma redução de aproximadamente 40% no tempo de secagem do RIZ.

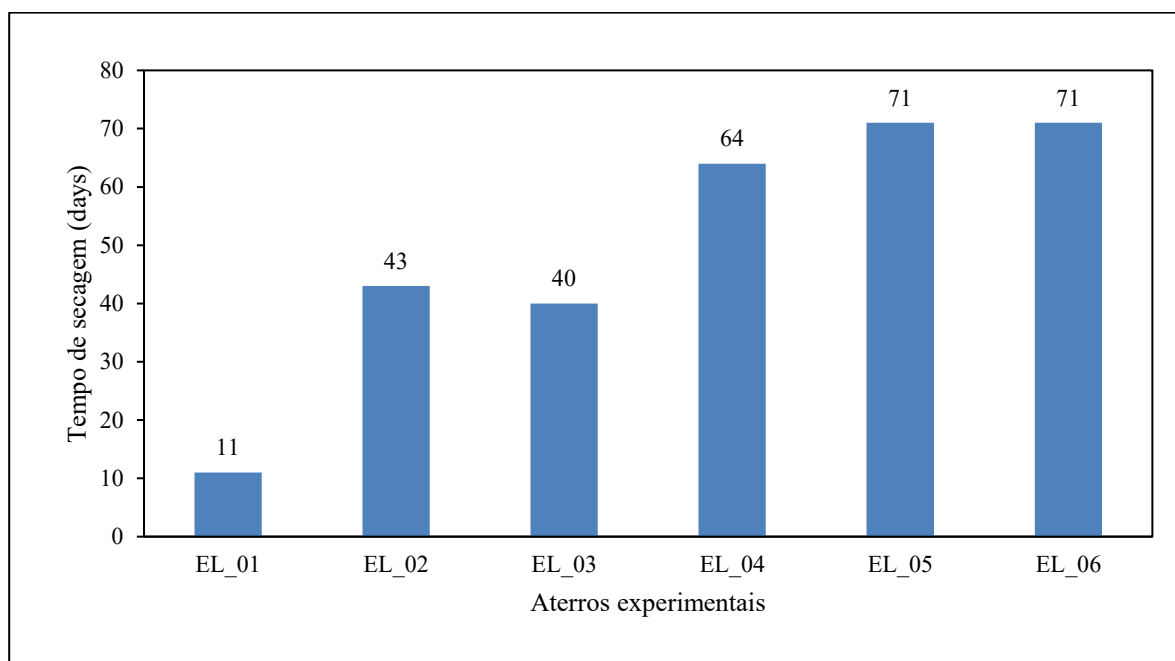


Figura 4 – Evolução dos tempos de secagem nas amostras de RIZMC e RIZFC.

Fonte: Autores (2025).

Os aglomerantes químicos absorveram e se hidrataram ao entrarem em contato com a água excedente presente no RIZ pós-filtração, ao mesmo tempo em que favoreceram a evaporação da água em decorrência das reações exotérmicas associadas à hidratação do cimento Portland e da cal virgem, conforme descrito por Ingles e Metcalf (1973). Embora essa abordagem possa implicar no aumento dos custos de disposição do RIZ, os resultados demonstram que o uso de aglomerantes químicos é eficaz na aceleração do processo de secagem.

4.3 Análise de resistência ao cisalhamento — Ensaio triaxiais CIU

Nesta seção, as Figuras 6 a 13 apresentam os resultados dos ensaios triaxiais CIU (Tabela 1) por meio de gráficos de tensão desviadora em função da deformação axial e de pressão neutra excedente em função da deformação axial. Observa-se que, com exceção de alguns casos para $p'_0 = 100$ kPa, tanto o RIZFC quanto o RIZMC apresentaram comportamento predominantemente contrativo ($\Delta u > 0$). A quantidade residual de agentes químicos, aliada a uma compactação insuficiente, não foi suficiente para induzir um comportamento dilatante nas amostras. É provável que esse comportamento esteja relacionado à perda de adesão decorrente da hidratação do cimento Portland.

Observa-se também que, de modo geral, nos ensaios triaxiais CIU, independentemente da presença de agentes químicos, a rigidez das amostras aumentou com o incremento da tensão de confinamento. Provavelmente em razão do baixo grau de cimentação dos materiais, as tensões de confinamento aplicadas não foram suficientes para provocar a ruptura das ligações químicas (no caso do RIZMC). Dessa forma, o aumento da tensão de confinamento resultou, consequentemente, em maiores valores de resistência ao cisalhamento, bem como em maior rigidez das amostras de RIZMC e RIZFC.

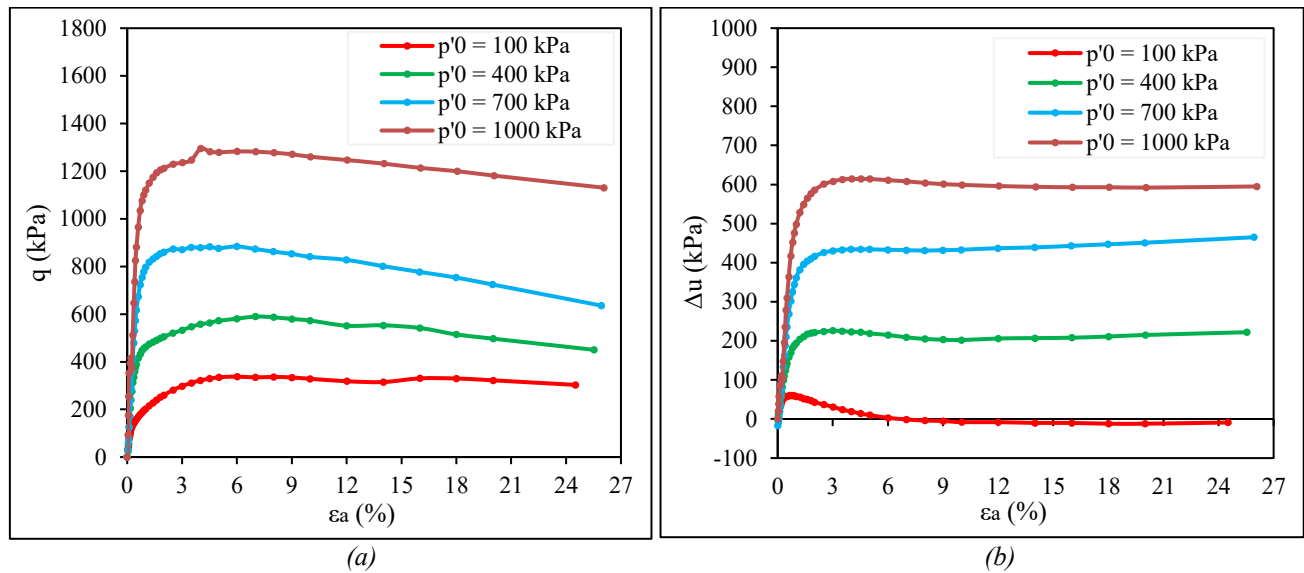


Figura 5 – Ensaios triaxiais CIU - EL_01: (a) tensão desviadora vs. deformação axial; (b) excesso de poro-pressão vs. deformação axial.
Fonte: Autores (2025).

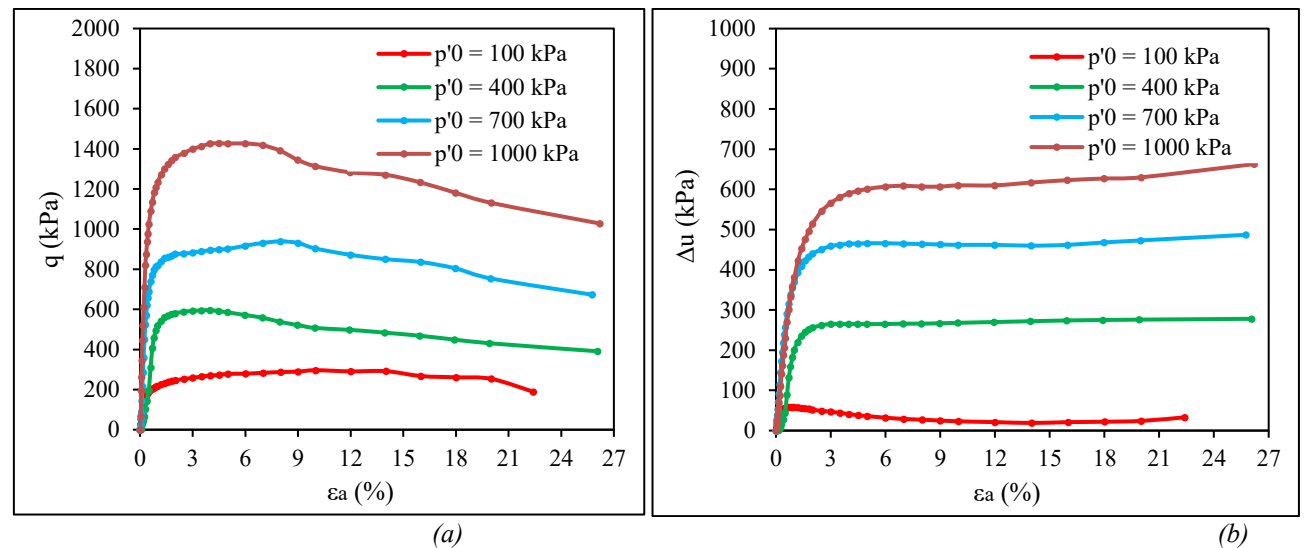


Figura 6 – Ensaios triaxiais CIU - EL_02: (a) tensão desviadora vs. deformação axial; (b) excesso de poro-pressão vs. deformação axial.
Fonte: Autores (2025).

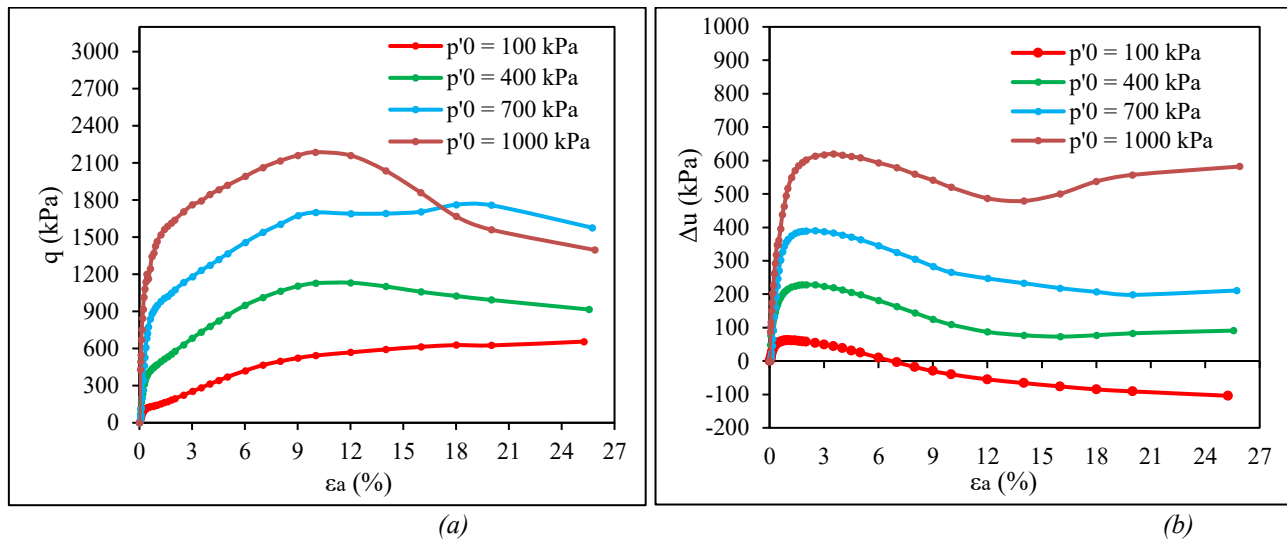


Figura 7 – Ensaio triaxiais CIU - EL_03_7d: (a) tensão desviadora vs. deformação axial; (b) excesso de poro-pressão vs. deformação axial.
Fonte: Autores (2025).

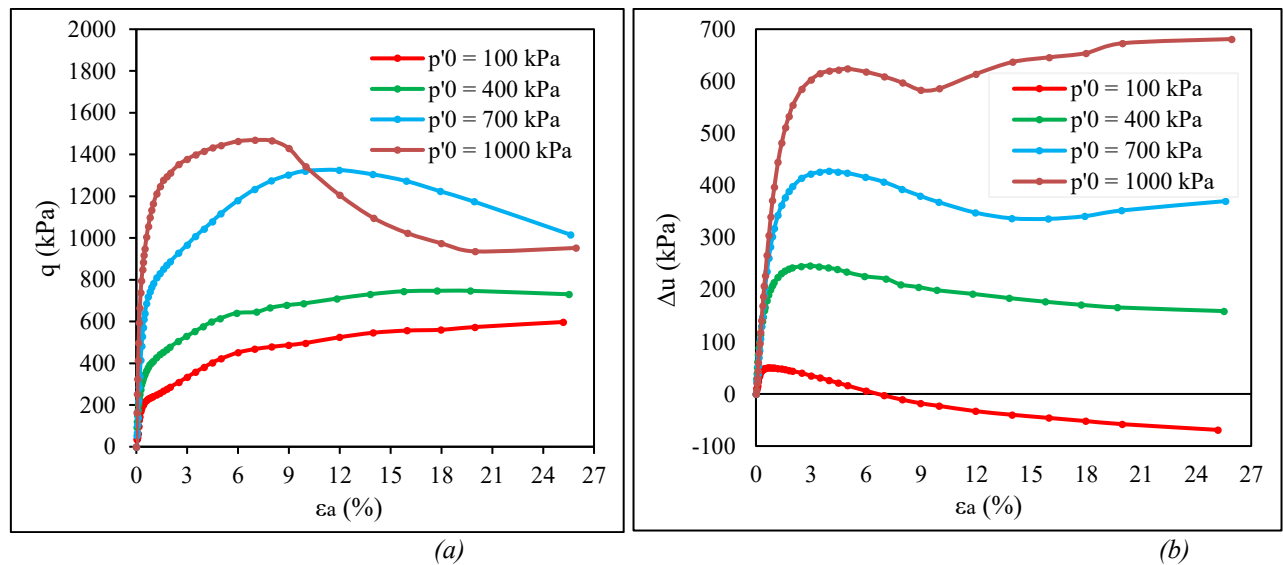


Figura 8 – Ensaio triaxiais CIU - EL_03_28d: (a) tensão desviadora vs. deformação axial; (b) excesso de poro-pressão vs. deformação axial.
Fonte: Autores (2025).

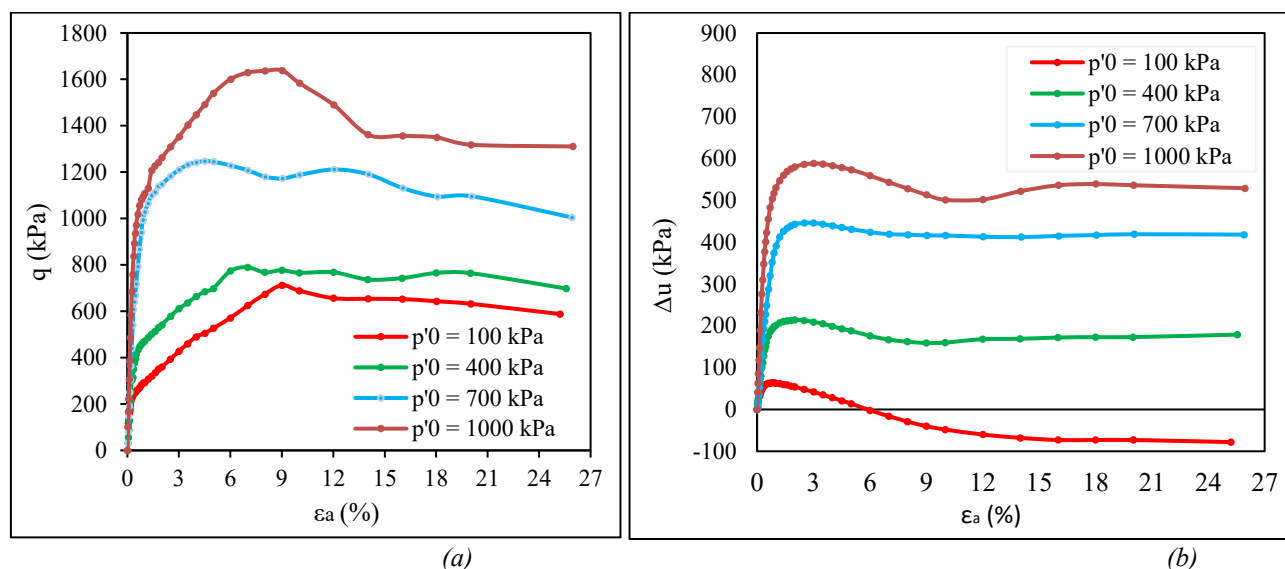


Figura 9 – Ensaaios triaxiais CIU - EL_03_120d: (a) tensão desviadora vs. deformação axial; (b) excesso de poro-pressão vs. deformação axial.

Fonte: Autores (2025).

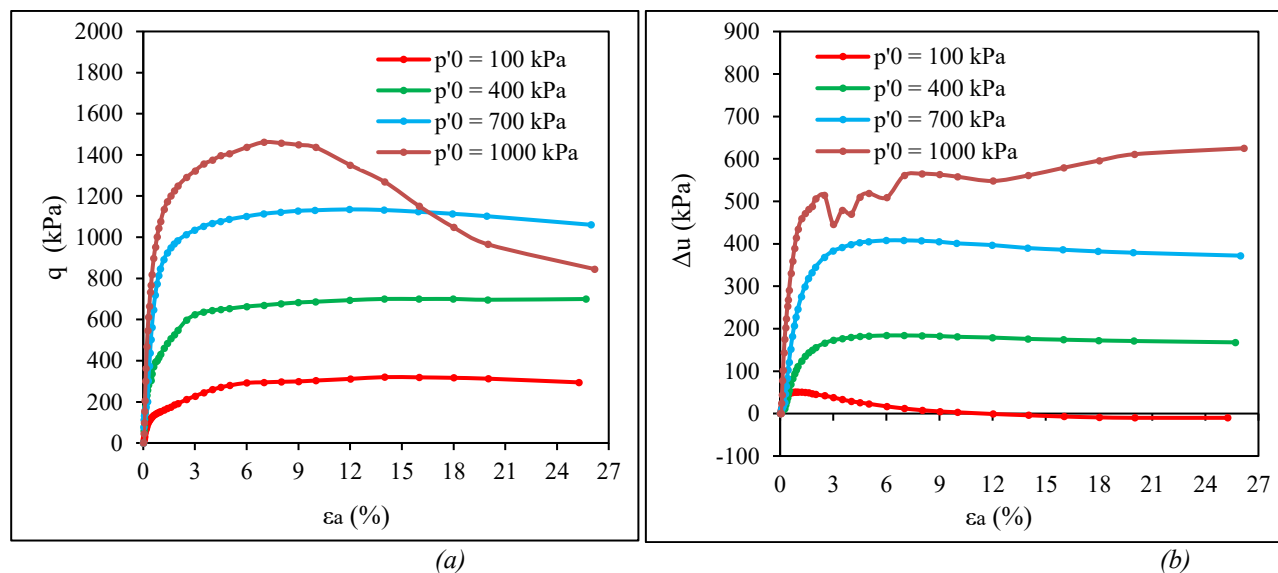


Figura 10 – Ensaaios triaxiais CIU - EL_04_0d: (a) tensão desviadora vs. deformação axial; (b) excesso de poro-pressão vs. deformação axial.

Fonte: Autores (2025).

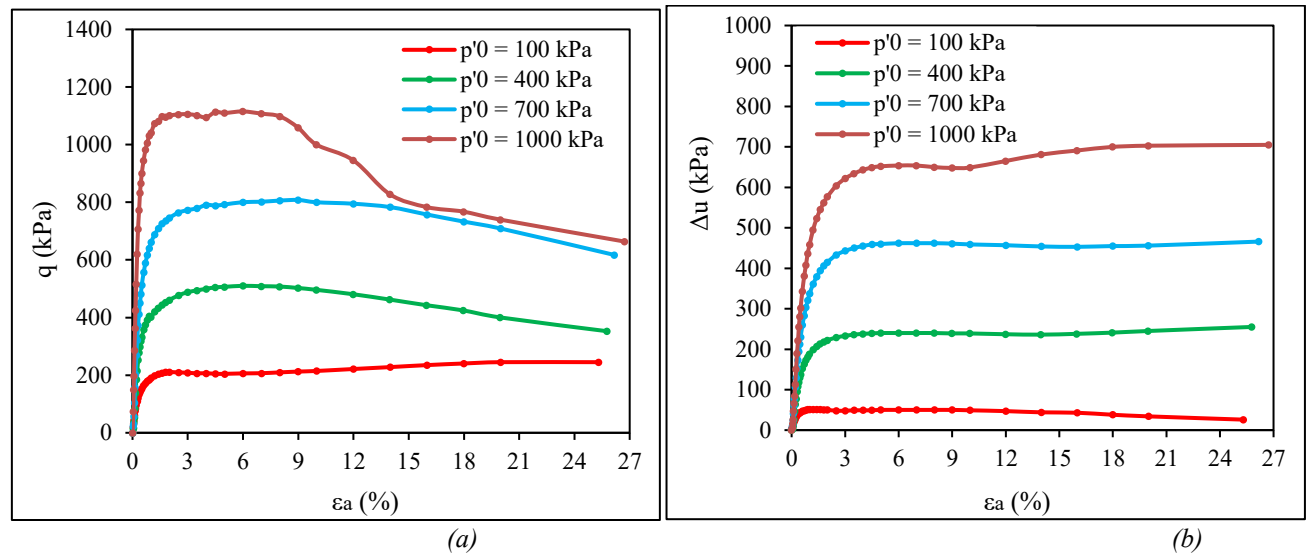


Figura 11 – Ensaios triaxiais CIU - EL_05_0d: (a) tensão desviadora vs. deformação axial; (b) excesso de poro-pressão vs. deformação axial.
Fonte: Autores (2025).

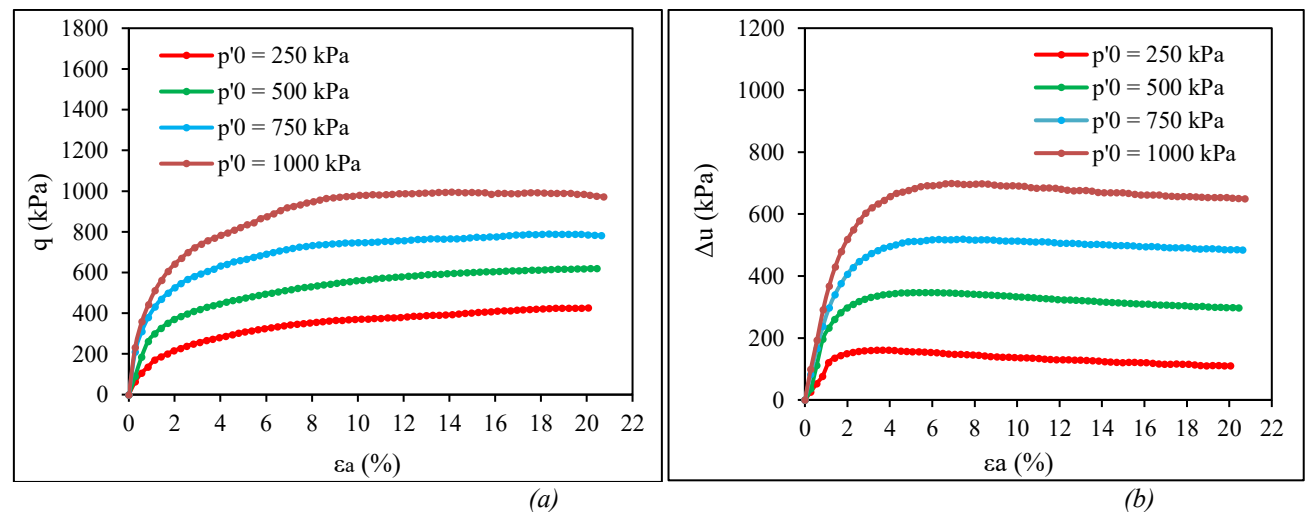


Figura 12 – Ensaios triaxiais CIU – EL_06_0d: (a) tensão desviadora vs. deformação axial; (b) excesso de poro-pressão vs. deformação axial.
Fonte: Autores (2025).

A Figura 13 ilustra o comportamento do RIZMC sob diferentes condições de índice de vazios médio após 120 dias de cura. Conforme observado, os parâmetros de resistência ao cisalhamento aumentaram com a redução do índice de vazios, sendo que o ângulo de atrito efetivo se elevou de $38,79^\circ$ para $41,51^\circ$ à medida que o índice de vazios diminuiu de 2,2 para 1,5. Essa redução do índice de vazios implicou uma diminuição do volume de ar, promovendo o aumento do contato intergranular (Lambe e Whitman, 1969; Ingles e Metcalf, 1973).

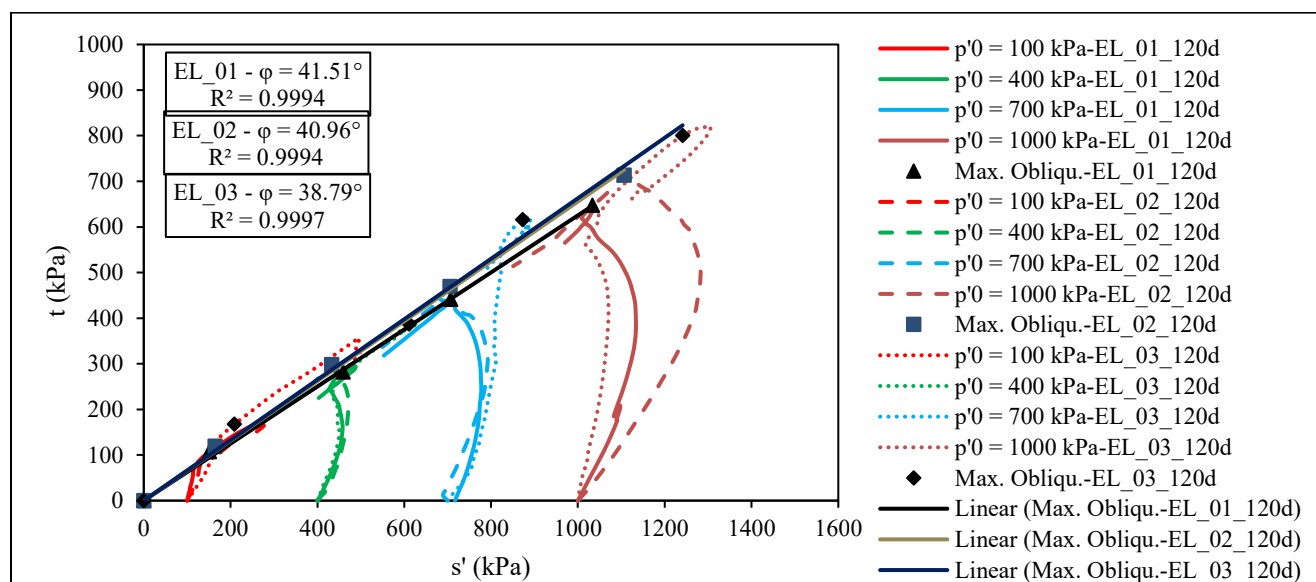


Figura 13 – Comparativo entre diferentes trajetórias de tensões de RIZMC com diferentes índices de vazios
Fonte: Autores (2025).

Comportamento semelhante foi observado para o RIZFC, como pode ser visto na Figura 14, ao comparar os gráficos de trajetória de tensões para diferentes índices de vazios. O ângulo de atrito efetivo do RIZFC variou em uma faixa mais restrita (aproximadamente $1,2^\circ$) em função do índice de vazios. Destaca-se ainda que os parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras EL_05 e EL_06 apresentaram um certo grau de repetibilidade, mesmo sob diferentes valores de p'_0 , o que, em alguma medida, sugere homogeneidade das amostras estudadas.

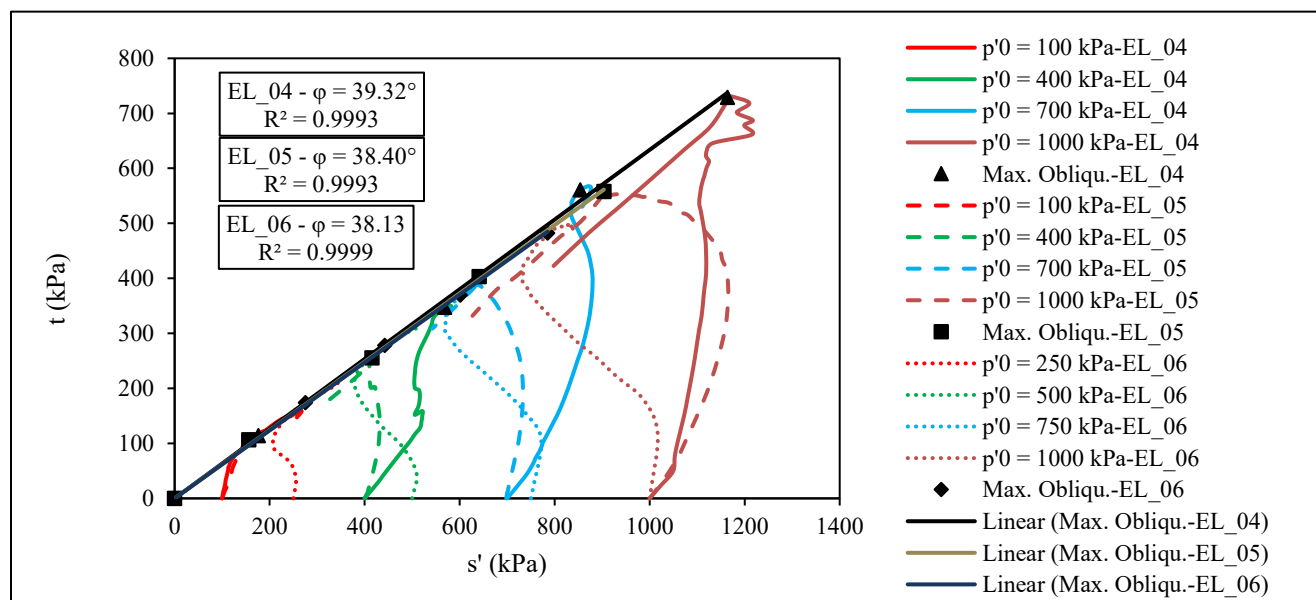


Figura 14 – Comparativo entre diferentes trajetórias de tensões de RIZFC com diferentes índices de vazios.
Fonte: Autores (2025).

A Figura 15 ilustra o efeito do tempo de cura sobre o comportamento mecânico do RIZMC. Do ponto de vista teórico, períodos de cura mais prolongados tendem a promover o aumento da resistência mecânica em decorrência da formação de

compostos hidratados estáveis provenientes da ação dos ligantes químicos, conforme indicado por Ingles e Metcalf (1975), Carvalho *et al.* (2023), Mafessoli *et al.* (2023) e Consoli *et al.* (2022).

Entretanto, observou-se uma redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento com o aumento do tempo de cura, o que sugere a possibilidade de degradação química associada à elevada concentração de sulfatos presente na amostra. De acordo com Dermatas (1995), o efeito deletério dos íons sulfato sobre a resistência de solos estabilizados com cimento ou cal já havia sido demonstrado por Mehta *et al.* (1955) e Sherwood (1962). Esses autores verificaram a ocorrência de perda de resistência e desintegração do material quando solos estabilizados com cimento eram imersos em soluções sulfatadas ou quando solos ricos em sulfatos, estabilizados com cimento Portland, eram submersos em água.

Ao comparar o ataque por sulfatos em sistemas solo-cimento e em concretos, Gordon (1962), conforme citado por Dermatas (1995), sugere que as diferenças na cinética das reações podem estar relacionadas à densidade da matriz solo-cimento. A menor densidade desse material permite que a difusão de soluções sulfatadas ou de água ocorra de forma mais rápida do que no concreto. Conforme discutido na Seção 4.1, mesmo após o processo de melhoria, as concentrações de sulfatos no EL_03 permaneceram elevadas, variando entre 1600 mg/L e 2000 mg/L.

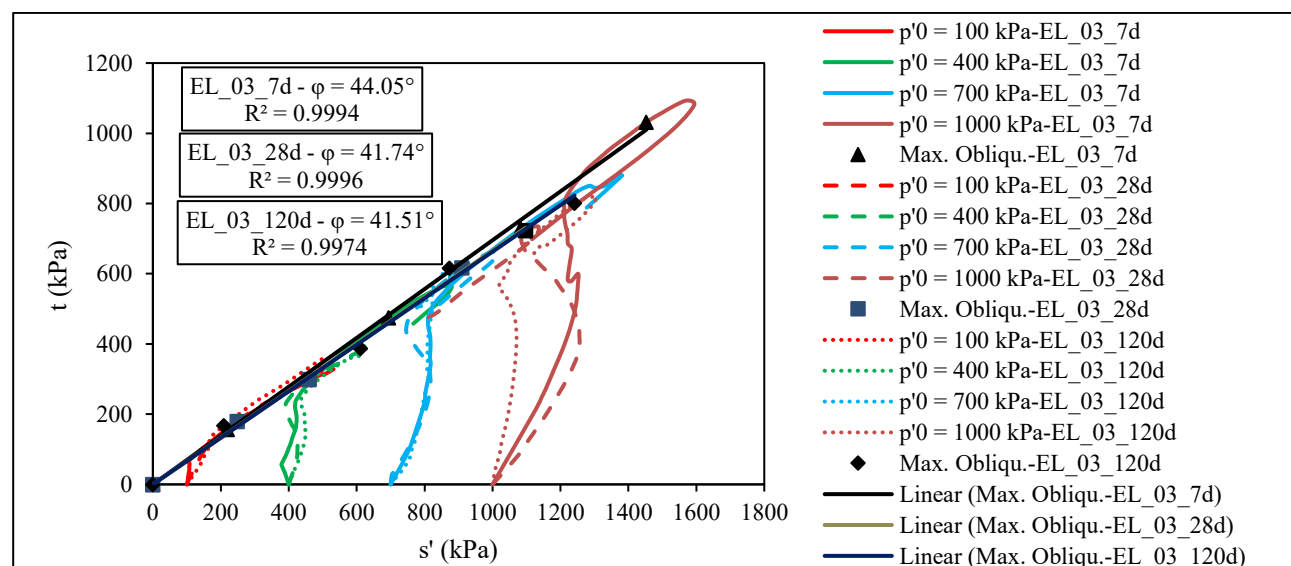


Figura 15 – Comparativo entre diferentes trajetórias de tensões de RIZMC com diferentes tempos cura de Fonte: Autores (2025).

5. Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo analisar o comportamento do RIZMC e do RIZFC, bem como compará-los quanto à incorporação de ligantes químicos (cimento Portland CP III e cal virgem), ao índice de vazios e ao tempo de cura. Com base nos ensaios realizados em amostras coletadas em aterros experimentais, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

A incorporação de ligantes químicos promoveu a redução do tempo de secagem do RIZ. Esse comportamento é atribuído aos processos de hidratação da cal virgem e do cimento Portland, que transformam a água livre em água ligada por meio da formação de compostos estáveis. Adicionalmente, as reações exotérmicas associadas à hidratação desses ligantes elevam a temperatura do material, favorecendo a evaporação de parte da água livre. De modo geral, a utilização de ligantes químicos possibilitou uma redução de aproximadamente 40% no tempo de secagem do RIZ;

A adoção de tendas infláveis como estratégia de proteção contra a umidade e de controle dos materiais durante períodos chuvosos mostrou-se eficaz. Contudo, observou-se que essas estruturas mantiveram elevados níveis de umidade relativa do ar, o que dificultou parcialmente o processo de secagem evaporativa do material. Dessa forma, a aplicação dessa alternativa requer avaliação criteriosa quando utilizada em processos de disposição de resíduos e/ou gestão de rejeitos de mineração;

Os ligantes químicos mostraram-se eficazes na redução das concentrações de determinados contaminantes (cádmio, chumbo e manganês) para valores inferiores ao MPV, possivelmente em razão de um efeito de encapsulamento decorrente

da ação combinada da cal virgem e do cimento Portland, bem como do aumento do pH, que proporcionou um ambiente alcalino ($\text{pH} > 7$);

Embora as modificações químicas não tenham alterado a classificação de periculosidade do RIZ de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), observou-se uma redução significativa nas concentrações de contaminantes perigosos, o que é relevante para a minimização do potencial de contaminação de estruturas de disposição de resíduos industriais;

Os ensaios triaxiais CIU indicaram que as amostras de RIZMC e RIZFC apresentaram comportamento volumétrico predominantemente contrativo, caracterizado pela geração de pressões neutras positivas. Esse comportamento pode estar associado ao elevado teor de finos do material, os quais não se encontravam completamente cimentados e dependiam, majoritariamente, do atrito intergranular. Observou-se, ainda, que a rigidez de ambos os materiais aumentou com o incremento da tensão média efetiva de confinamento (p');

O RIZMC compactado apresentou resistência ao cisalhamento superior à do RIZFC. Embora os ligantes químicos tenham contribuído para a aceleração do processo de secagem e para o aumento do teor de finos da mistura, é provável que também tenham favorecido a formação de compostos hidratados estáveis sob condições residuais após a compactação. O CFRIZ apresentou ângulos de atrito efetivo entre 38° e 39° , enquanto o RIZMC apresentou valores variando entre $38,8^\circ$ e $44,1^\circ$, em função do índice de vazios, do tempo de cura e do pH.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio à pesquisa no Brasil.

Referências

ABNT. NBR 6473: Cal virgem e cal hidratada. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. NBR 10005: Lixiviação de resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. NBR 10006: Solubilização de resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. NBR 10157: Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. NBR 13028: Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2025

ABNT. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ALONSO, C.; FERNANDEZ, L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of Materials Science*, v. 39, p. 3015-3024, 2004.

ASTM. C511: Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. West Conshohocken, 2021.

ASTM. D698-12: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). West Conshohocken, 2021.

ASTM. D854: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method. West Conshohocken, 2014.

ASTM. D2216-19: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. West Conshohocken, 2019.

ASTM. D2487-18: Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, 2020.

ASTM. D3282: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. West Conshohocken, 2024.

ASTM. D4318-17e1: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, 2017.

ASTM. D4767-11: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. West Conshohocken, 2020.

-
- CARVALHO, J. V. de A. *et al.* Evaluation of Strength Parameters for Application in Cemented Iron Ore Tailings Stacks. *Soils and Rocks*, v. 53, p. 775-788, 2023.
- CHEN, T. T.; DUTRIZAC, J. E. A mineralogical study of jarofix products for the stabilization of jarosite for disposal. *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, p. 917-933, 2000.
- CONAMA. Resolução nº 313: Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Brasília, 2002.
- CONSOLI, N. C. *et al.* Behaviour of compacted filtered iron ore tailings–Portland cement blends: New Brazilian trend for tailings disposal by stacking. *Applied Sciences*, v. 12, p. 1-18, 2022.
- CONSOLI, N. C.; TOMASI, L. F.; MARQUES, S. F. V. Cement-enhancing mechanical behavior of tailings behind upstream tailings dam for safe decommissioning. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 35, n. 5, 2023.
- CRAIG, R. F. *Craig's Soil Mechanics*. 7. ed. London; New York: Spon Press, 2004. 447 p.
- DERMATAS, D. Ettringite-Induced Swelling in Soils: State-of-the-Art. *Applied Mechanics Reviews*, v. 48, n. 10, p. 659–673, 1995.
- HAN, J. *Principles and Practice of Ground Improvement*. New York: John Wiley and Sons, 2015. 418 p.
- INGLES, O. G.; METCALF, J. B. *Soil Stabilization: Principle and Practice*. New York: John Wiley and Sons, 1973. 373 p.
- KRAMER, S. L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 672 p.
- LAMBE, W. T.; WITHMANN, R. V. *Soil Mechanics*. New York: John Wiley and Sons, 1969. 548 p.
- MAFESSOLI, M. *et al.* Response of Artificially Cemented Iron Ore Tailings for Dry Stacking Disposal over a Wide Range of Stresses. *Indian Geotechnical Journal*, v. 53, p. 904–915, 2023.
- MEHTA, S. R.; CHADDA, L. R.; KAPUR, R. N. Role of detrimental salts in soil stabilization with and without cement: Effect of sodium sulphate. *Indian Concrete Journal*, v. 33, n. 7, p. 336-337, 1955.
- PAPPU, A.; MOHINI, S.; SHYAM, R. A. Recycling hazardous jarosite waste using coal combustion residues. *Materials Characterization*, v. 61, n. 12, p. 1342–1355, 2010.
- RISSOLI, A. L. C. *et al.* Dry Stacking of Filtered Iron Ore Tailings: Comparing On-Field Performance of Two Drying Methods. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 42, p. 2937–2948, 2023.
- ROTTA, G. V. *et al.* Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress. *Géotechnique*, v. 53, n. 5, p. 493-501, 2003.
- SEYER, S.; CHEN, T. T.; DUTRIZAC, J. E. Jarofix: addressing iron disposal in the zinc industry. *Journal of Mineralogy*, v. 53, n. 12, p. 32–35, 2001.
- SHERWOOD, P. T. Effect of sulfates on cement-and lime-stabilized soils. *Highway Research Board Bulletin*, n. 353, 1962.
- SINHA, A. K.; HAVANAGI, V. G.; MATHUR, S. Design, construction and evaluation of jarofix embankment and sub grade layers. *International Journal of Environment Engineering Research*, v. 1, n. 3, p. 97–103, 2012.
- SINHA, A. K.; HAVANAGI, V. G.; SHAHU, J. T. Characterisation of jarofix for use in geotechnical projects. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, v. 171, n. 5, p. 439–450, 2018.
- SINHA, A. K.; HAVANAGI, V. G.; SHAHU, J. T. Stabilised jarofix waste material for road construction. *International Journal of Pavement Engineering*, s/v, s/n, p. 1-14, 2019.

SINHA, A. K.; HAVANAGI, V. G.; SHAHU, J. T. Construction and performance of jarofix waste material embankment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials*, v. 175, n. 2, p. 49–64, 2022.

USBR. U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation. Design Standards No. 13 – Embankment Dams - Chapter 4: Static Stability Analysis. Washington, DC, 2011. 159 p.