XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/54

Álcali-ativação de rejeito de fluorita e cinza volante pelo método "*One-Part*" para imobilização de metais na pavimentação

Tiago Luiz Costa da Silva
Mestrando, UFSC, Florianópolis, Brasil, tiagoluizcosta@mpf.mp.br

Helena Paula Nierwinski
Professora, UFSC, Joinville, Brasil, helena.paula@ufsc.br

Andres Maurício Lotero Caicedo
Professor, UIS, Bucaramanga, Colombia, amolotcai@uis.edu.co

Fernando Pinheiro Weber
Mestrando, UFSC, Porto Alegre, Brasil, fernandopw@vibraenergia.com.br

Nilo Cesar Consoli
Professor, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

RESUMO: O reuso de rejeitos representa uma estratégia relevante para o setor mineral, ao mesmo tempo em que a busca por materiais alternativos constitui uma demanda constante na engenharia de pavimentos. Nesse contexto, este estudo avalia a estabilização de rejeito de fluorita misturado a cinza volante para aplicação potencial em camadas de pavimentação por meio da técnica de álcali-ativação. Para essa finalidade, os materiais foram previamente caracterizados e utilizada uma dosagem contendo 40% de cinza volante ativada pelo método *One-Part*, adotando-se uma relação Na/Si de 2,5 e períodos de cura de 7 e 28 dias. O desempenho mecânico foi avaliado por meio de ensaios de resistência à compressão simples não confinada (RCS), comparando-se os resultados com os requisitos da NBR 12253, além da realização de ensaios de lixiviação para avaliação ambiental do material. Os resultados indicam que a mistura apresenta desempenho mecânico satisfatório, com valores de RCS aproximadamente 10 vezes superiores ao mínimo estabelecido pela norma. Entretanto, os ensaios de lixiviação evidenciaram aumento na liberação de metais em comparação ao rejeito original, indicando um potencial limitante para sua aplicação sem tratamentos adicionais. Assim, embora a técnica demonstre potencial para melhoria das propriedades mecânicas do material, aspectos ambientais associados à lixiviação devem ser considerados em avaliações futuras de viabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de fluorita, Álcali-ativação, *One-Part*, Pavimentação, Lixiviação de metais.

ABSTRACT: The reuse of mining tailings represents an important strategy for the mineral sector, while the search for alternative materials remains a key demand in pavement engineering. In this context, this study evaluates the stabilization of fluorite tailings mixed with fly ash for potential application in pavement layers using the alkali activation technique. The materials were initially characterized, and a mixture containing 40% fly ash activated by the One-Part method was prepared, adopting a Na/Si ratio of 2.5 and curing periods of 7 and 28 days. Mechanical performance was evaluated through unconfined compressive strength (UCS) tests, and the results were compared with the requirements of NBR 12253. In addition, leaching tests were conducted to assess the environmental behavior of the material. The results indicate that the mixture presents satisfactory mechanical performance, with UCS values approximately ten times higher than the minimum value required by the standard. However, leaching tests revealed increased metal release compared to the original tailings, indicating a potential environmental limitation for its application without additional treatment. Therefore, although the technique shows potential to improve the mechanical properties of the material, environmental aspects related to metal leaching should be considered in future feasibility assessments.

KEYWORDS: Fluorite tailings, Alkali activation, One-Part method, Pavimentation, Metal leaching.

1 INTRODUÇÃO

A matriz de transporte brasileira tem suas características fortemente alicerçadas no uso do modal rodoviário. No entanto, grande parte da malha viária apresenta condições que demandam melhorias, especialmente na região Sul do Brasil, onde aproximadamente 63,6% das rodovias encontram-se em estado regular ou pior, indicando amplo espaço para avanços no desenvolvimento e na melhoria dos pavimentos. Paralelamente, políticas voltadas à sustentabilidade, como as iniciativas de Produção mais Limpa (P+L) e os princípios ESG, têm impulsionado a busca por novos materiais e tecnologias construtivas, com destaque para o reuso de resíduos e rejeitos provenientes de outros processos industriais (CNT, 2025).

Alinhado a essa perspectiva, na região Sul do país, especialmente nos estados de Santa Catarina e Paraná, dois materiais apresentam potencial de reaproveitamento em função da necessidade de destinação ambientalmente adequada: o rejeito de fluorita e a cinza volante proveniente de usinas termoelétricas.

O rejeito de fluorita de grau ácido corresponde a um subproduto gerado no processo de concentração do fluoreto de cálcio (CaF_2), envolvendo etapas de britagem, separação granulométrica e concentração gravítica em meio denso. Esse material é normalmente depositado em pilhas próximas às cavas de mineração a céu aberto. Devido ao potencial risco ambiental associado à lixiviação de contaminantes, a busca por alternativas de reaproveitamento tem despertado crescente interesse.

De forma associada, as cinzas volantes de termoelétricas são geradas durante o processo de tratamento eletrostático dos gases de combustão, resultando no acúmulo de materiais finos conhecidos como cinza volante leve. Esses materiais são subprodutos da geração de energia elétrica e frequentemente demandam alternativas de reutilização. A cinza volante do tipo F apresenta elevado potencial de aplicação, pois possui características pozolânicas, com teores combinados de Al_2O_3, SiO_2 e Fe_2O_3 superiores a 70%, constituindo assim uma importante fonte de precursores aluminosilicatos (Alterary; Lterary; Marei, 2021).

Quando analisados isoladamente para aplicação em pavimentação, esses materiais apresentam limitações associadas às suas propriedades mecânicas relativamente baixas, reduzindo seu potencial de utilização direta. Nesse contexto, técnicas capazes de melhorar as propriedades desses materiais, especialmente quando utilizados de forma combinada, tornam-se relevantes. Entre essas técnicas destaca-se a álcali-ativação pelo método "*One-Part*".

O processo de álcali-ativação envolve uma sequência de fenômenos físico-químicos, conforme descrito por Fernández-Jiménez e Paolomo (2005). Nesse processo, um ativador alcalino promove a dissolução parcial das estruturas dos precursores aluminosilicatos, resultando na formação de novas fases cimentantes por meio de reações de precipitação e policondensação. Como consequência, ocorre a densificação da matriz e a reorganização estrutural do material, formando um sólido amorfo com elevada resistência mecânica.

Nesse contexto, a destinação de volumes significativos desses materiais para aplicações em pavimentação mostra-se não apenas viável, mas também desejável do ponto de vista ambiental. Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a estabilização do rejeito de fluorita misturado à cinza volante para aplicação potencial em camadas de pavimentação, utilizando a técnica de álcali-ativação pelo método *One-Part*, com foco na melhoria das propriedades mecânicas e na análise do comportamento quanto à lixiviação de metais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento da pesquisa, o primeiro passo correspondeu à caracterização do rejeito de fluorita e da cinza volante. Nos ensaios de caracterização física realizou-se a determinação dos limites de consistência, por meio dos ensaios de Limite de Liquidez (LL) conforme as diretrizes da NBR 6459 (ABNT, 2025a) e do Limite de Plasticidade (LP) segundo a NBR 7180 (ABNT, 2025b). Também foi determinada a massa específica real dos grãos, conforme a NBR 6458 (ABNT, 2025c).

A caracterização química foi realizada por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX), com o objetivo de quantificar as concentrações dos elementos químicos presentes nas amostras, expressas na forma de óxidos.

A caracterização mineralógica foi realizada por meio de Difração de Raios X (DRX), com preparação individual das amostras de rejeito e cinza volante. As análises foram conduzidas no equipamento LabX XRD-

6100 da Shimadzu, com interpretação inicial no software *Match3*, bem como em difratômetro de raios X modelo *X'Pert*, com posterior análise pelo software *TOPAS*, utilizando o método de *Rietveld*.

Para a composição adotada, contendo 40% de cinza volante em relação ao peso seco do material, foram realizados ensaios de compactação Proctor normal, conforme a NBR 7182 (ABNT, 2025d), bem como ensaios de CBR e expansão, de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 2025e).

A partir desses resultados foram definidas as duas variáveis principais da pesquisa: a variação da relação Si/Na e a avaliação da resistência à compressão simples (RCS) da mistura em comparação com os requisitos da NBR 12253 (ABNT, 2012).

Para a determinação da dosagem ideal, foram realizados ensaios de RCS em triplicata, utilizando corpos de prova cilíndricos de 5 × 10 cm. Foram adotadas duas relações Si/Na indicadas na literatura clássica proposta por Fernández-Jiménez e Palomo (2005), correspondentes a 0,118 e 1,23, além de uma relação adicional Si/Na = 2,5, baseada em estudos mais recentes da literatura internacional, visando avaliar níveis mais elevados de concentração de ativadores alcalinos.

A composição dos corpos de prova considerou a relação Si/Na adotada, teor de precursor de 40%, tempo de cura de 7 dias e temperatura de cura de 70 °C nas primeiras 48 horas, seguida de acondicionamento em sacos plásticos tipo *zip-lock* durante o período restante de cura. Foi adotada umidade de moldagem de 12% e peso específico seco de 1,35 g/cm³.

Para os ensaios de resistência à compressão simples, utilizou-se uma prensa eletrônica CBR/Marshall com capacidade de carga de 5 toneladas (50 kN), disponível no Laboratório de Engenharia Civil (LEC-ESUCRI). A moldagem dos corpos de prova foi realizada com velocidade aproximada de 30,0 mm/min, enquanto o ensaio de ruptura aos 7 dias foi conduzido na mesma prensa com velocidade de 1,14 mm/min, com leitura da carga em quilograma-força (kgf). Esse mesmo procedimento foi aplicado para a dosagem ótima de Si/Na, avaliando-se resistências aos 7 e 28 dias de cura.

Para a avaliação ambiental do material, foram realizados ensaios de lixiviação conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004). Foram analisados os elementos com maior representatividade identificados na FRX, incluindo alumínio (Al) e ferro (Fe), além do elemento característico do rejeito de fluorita, o flúor (F).

Quanto à origem dos materiais utilizados na pesquisa, o rejeito de fluorita foi obtido de uma mineradora localizada em Cerro Azul-PR, selecionado por apresentar características semelhantes às ocorrências encontradas em Santa Catarina, embora este último não estivesse disponível para análise nesta pesquisa. Esse material é proveniente do beneficiamento de fluorita para obtenção do grau ácido, envolvendo etapas de moagem, separação granulométrica e flotação, sendo posteriormente destinado à produção de briquetes. A amostragem foi realizada por caminhamento expedito no depósito de rejeitos, sendo o material acondicionado em sacos plásticos, quarteado antes do uso e seco em estufa a 100 ± 3 °C por 24 horas.

A cinza volante tipo F utilizada foi proveniente da queima do carvão CE-4500, empregado na geração de energia no complexo termoelétrico de Capivari de Baixo-SC. O processo de coleta, armazenamento e secagem foi realizado de forma semelhante ao adotado para o rejeito de fluorita.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na investigação experimental. Inicialmente são analisadas as características físicas, mineralógicas e químicas dos materiais, seguidas da avaliação do desempenho geotécnico da mistura por meio de ensaios de compactação, resistência mecânica e comportamento quanto à lixiviação.

3.1 Caracterização Física do rejeito e Cinza

A massa específica real dos grãos (g/cm³) do rejeito mostrou-se superior à observada para a cinza volante, apresentando valores de 2,774 e 2,071, respectivamente. Esse comportamento pode estar associado à maior concentração de ferro presente no rejeito, de forma semelhante ao observado no estudo de Gentil *et al.* (2020). Quanto aos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), ambos os materiais foram classificados como não plásticos, não sendo possível determinar valores para esses parâmetros.

A análise granulométrica (Figura 1) permitiu classificar o rejeito como areno-siltoso, com predominância de areia fina (63,60%), apresentando coloração marrom. Já a cinza volante foi classificada

como silto-arenosa, com predominância de silte (72,25%), seguida de 19,12% de areia fina, considerando a fração passante na peneira #200. Com base na classificação USCS (ASTM, 2025), o rejeito foi classificado como SM (areia siltosa) e a cinza volante como ML (silte de baixa plasticidade).

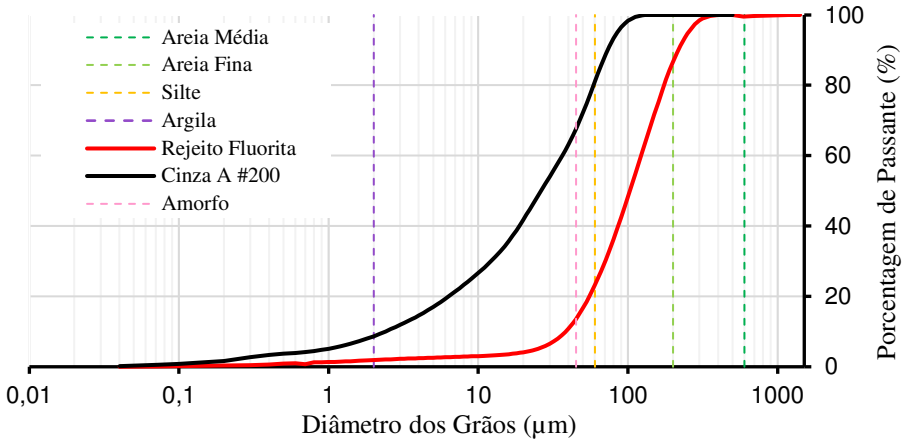


Figura 1. Curvas granulométricas do rejeito de fluorita e da cinza volante

3.2 Caracterização Mineralógica e Química

A análise mineralógica do rejeito de fluorita indicou picos de fases cristalinas de quartzo (SiO_2), muscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$), ferrosilita ($FeSiO_3$) e fluorita ($CaF_2$), conforme apresentado na Figura 2. Esses resultados são coerentes com os dados obtidos por FRX (Tabela 1), nos quais se observam maiores concentrações de Fe_2O_3 (32,27%) e SiO_2 (28,89%), confirmando os picos identificados no DRX. A presença de sílica está associada à ocorrência natural de minerais quartzosos no depósito de fluorita, enquanto o Al_2O_3 é típico de solos naturais associados a esse tipo de formação mineral (Lu *et al*., 2024).

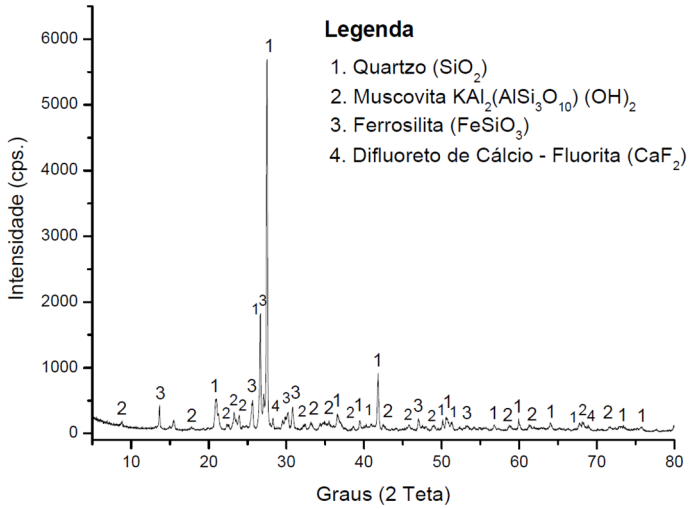


Figura 2. Difratograma de raios X do rejeito de fluorita.

Tabela 1 - Concentração de óxidos (>0,5%) obtida por FRX para o rejeito de fluorita e cinza volante.

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	SO_3
Rejeito de Fluorita (%)	28,89	9,77	32,27	8,28	5,04	1,07	-
Cinza Volante #200 (%)	60,82	23,08	6,18	3,78	2,44	1,32	0,57

Quando avaliada a estrutura mineralógica da cinza volante, verificou-se uma estrutura semicristalina, com índice de cristalinidade aproximado de 26%, indicando cerca de 74% de material amorfo, conforme

análise pelo método de Rietveld (Figura 3). Esse comportamento é compatível com o esperado para cinzas volantes, uma vez que estudos como Alterary, Lterary e Marei (2021) indicam fases cristalinas variando entre 5% e 50% da massa total.

Observou-se ainda predominância de mulita ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) e quartzo (SiO_2), além da presença de um halo amorfo entre aproximadamente 10° e 35°, característico de cinzas volantes leves, comportamento também observado por Costa *et al*. (2023).

Os resultados de FRX (Tabela 1) para a cinza volante indicaram predominância de SiO_2 (60,82%), seguida de Al_2O_3 (23,08%), além da presença de Fe_2O_3 (6,18%) e CaO (2,44%), o que permite classificá-la como cinza volante tipo F, caracterizada por elevado conteúdo de aluminossilicatos, favorável à formação de estruturas cimentantes.

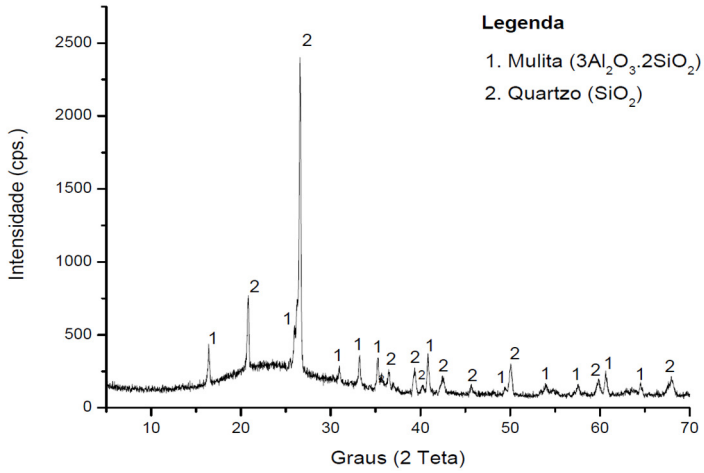


Figura 3. Difratograma de raios X da cinza volante.

3.3 Compactação

Os resultados do ensaio de compactação Proctor normal (Figura 4) indicaram que a adição de cinza volante promoveu redução da umidade ótima e da massa específica seca máxima, comportamento possivelmente associado ao aumento da fração fina da mistura, uma vez que não houve tempo suficiente para reações químicas durante a compactação, conforme observado também por Gentil *et al*. (2020). Considerando as condições favoráveis ao processo de álcali-ativação pelo método *One-Part*, que requer baixos teores de umidade, adotou-se massa específica seca de 1,35 g/cm³ e umidade de moldagem de 12%.

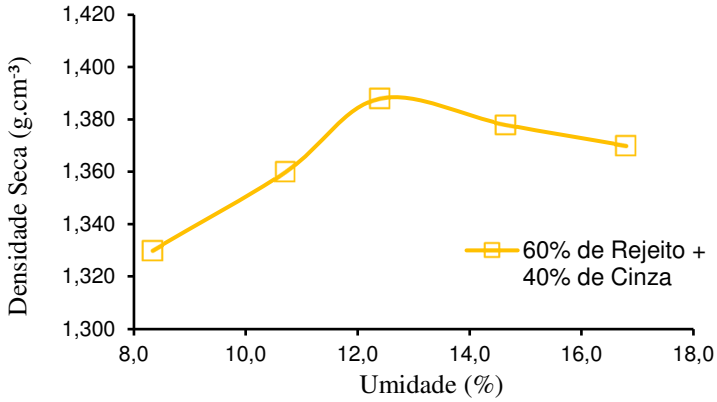


Figura 4. Curva de compactação obtida no ensaio Proctor normal.

3.4 Resistência a compressão simples não confinada (RCS)

Com base nos resultados de resistência à compressão simples (RCS), observou-se que a relação Si/Na = 2,5 apresentou o melhor desempenho para a mistura estudada. Conforme apresentado na Figura 5, essa

dosagem apresentou valores aproximadamente três vezes superiores aos obtidos para as demais relações avaliadas aos 7 dias de cura, possivelmente em decorrência da maior disponibilidade de silicato ativo para os processos de geopolimerização e formação de estruturas cimentantes. Esse comportamento indica que a relação Si/Na = 2,5 não ultrapassa o limite associado ao endurecimento rápido do gel cimentante, mantendo condições adequadas para o desenvolvimento da geopolimerização. Ao mesmo tempo, essa relação fornece quantidade suficiente de Na_2O para favorecer os processos de dissolução e policondensação, conforme discutido no estudo de Zhang *et al*. (2022).

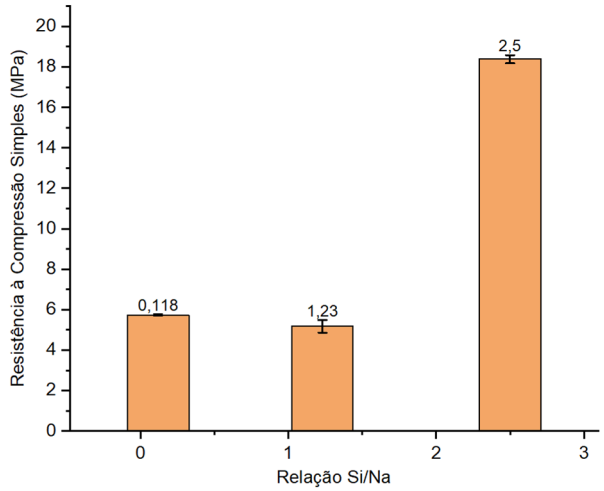


Figura 5. Resistência à compressão simples para diferentes relações Si/Na.

Partindo dessa relação e adotando o valor Si/Na = 2,5, observou-se ganho de resistência à compressão com o aumento do tempo de cura, passando de 18 MPa aos 7 dias para 21,66 MPa aos 28 dias (Figura 6). Esse comportamento é semelhante ao observado em estudos como o de Rivera *et al*. (2020), que também reportaram aumento progressivo da resistência em materiais geopoliméricos ao longo do tempo de cura.

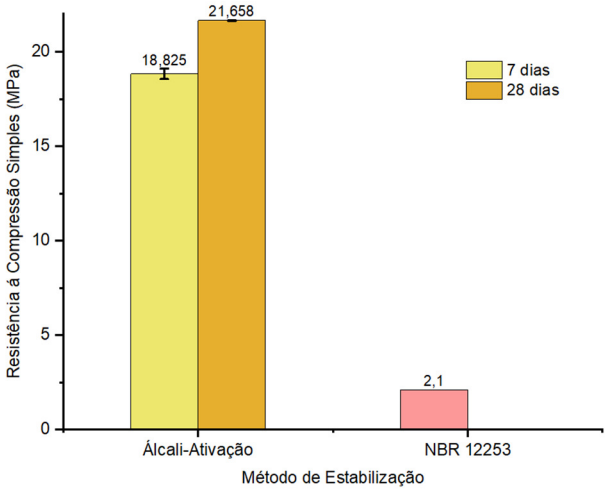


Figura 6. Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias comparada ao valor mínimo da NBR 12253.

Esse ganho de resistência está associado à ação dos ativadores alcalinos, como NaOH e Na_2SiO_3, que promovem a dissolução das estruturas de Si-O e Al-O presentes nos precursores aluminosilicatos. A hidrólise desses ativadores libera íons OH^-, responsáveis pela quebra das estruturas amorfas de SiO_2 e Al_2O_3, formando espécies reativas que posteriormente originam géis do tipo N-A-S-H (aluminato de sódio hidratado). Esses géis atuam como fase cimentante no material, promovendo densificação da matriz e aumento da resistência mecânica ao longo do processo de cura (Sun *et al*., 2020).

Os valores de resistência obtidos, tanto aos 7 quanto aos 28 dias, são significativamente superiores ao valor mínimo estabelecido para camadas de subleito, conforme indicado na NBR 12253 (ABNT, 2012), que estabelece valor mínimo de 2,1 MPa. Dessa forma, os resultados indicam que a mistura contendo 40% de cinza volante e relação Si/Na = 2,5 apresenta desempenho mecânico amplamente satisfatório para aplicação em pavimentação, demonstrando potencial para melhoria das propriedades estruturais do subleito e possível redução de patologias associadas ao pavimento ao longo da vida útil.

3.5 CBR e Expansão

Os ensaios de CBR e expansão da mistura contendo 40% de cinza volante apresentaram valores de 9,3% e 0,19%, respectivamente, na energia normal de compactação. Esses resultados indicam que o material pode ser aplicado como subleito, atendendo aos critérios de expansão e CBR para pavimentos flexíveis estabelecidos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006).

3.6 Lixiviação e liberação de elementos

Para os elementos Al, Fe e F, selecionados com base nos resultados de FRX e nas características do rejeito de fluorita, observou-se aumento significativo na concentração de metais lixiviados na mistura submetida à álcali-ativação. Foram observados valores 85,72; 7,28 e 40,08 vezes superiores para Al, Fe e F, respectivamente, em comparação ao rejeito sem tratamento.

Esse comportamento representa uma preocupação ambiental, uma vez que a liberação desses elementos pode ocorrer em condições de lixiviação decorrentes da infiltração de água da chuva, configurando um possível limitante para aplicação da técnica de estabilização One-Part em subleitos.

Esse fenômeno pode estar associado aos valores elevados de pH, que foram aproximadamente 12 para a mistura álcali-ativada e 9,23 para o rejeito sem tratamento. Em ambientes altamente alcalinos ocorre amplificação do comportamento anfótero dos metais, aumentando sua mobilidade devido à interação com íons OH^-, o que favorece processos de lixiviação (Xing *et al*., 2025).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, os resultados indicam que a álcali-ativação pelo método *One-Part* apresentou comportamento geomecânico satisfatório, com valores de resistência à compressão simples superiores aos requisitos mínimos normativos para aplicação em camadas de subleito de pavimentos. Assim, a mistura de rejeito de fluorita e cinza volante demonstra potencial como alternativa para reaproveitamento desses materiais em obras de pavimentação.

Entretanto, os resultados de lixiviação indicaram aumento na mobilização de elementos, configurando um fator limitante para a aplicação direta do material nas condições avaliadas. Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros investiguem o uso de agentes estabilizantes ou inibidores, como o hidróxido de cálcio, visando reduzir os efeitos de lixiviação sem comprometer os ganhos de resistência obtidos.

AGRADECIMENTOS

Pelo apoio nos ensaios realizados ao LDRX-UFSC, LEMA-UFSC e NANOTEC-UFSC, bem como Faculdade ESUCRI e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alterary, S.; Lterary, S.; Marei, N. (2021). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University* – Science, 33, 8 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 10005. *Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 12253 – Solo-cimento – Dosagem para emprego com camada de pavimento*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024). *NBR 10004-2. Resíduos Sólidos – Classificação, Parte 2: Sistema geral de classificação de resíduos (SGCR)*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025a). *NBR 6459. Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025b). *NBR 7180. Solo – Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025c). *NBR 6458: Solo – Determinação da massa específica dos sólidos, da amassa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025d). *NBR 7182. Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025e). NBR 9895. *Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.

ASTM - *American Society for Testing and Materials*. (2025). D2487. *Standard Practice for Classifications of Soil for Engineering Purposes (Unified Soil Classifications System)*. 2025, 10 p.

Confederação Nacional do Transporte. (2025). Síntese dos resultados da pesquisa CNT de Rodovias 2025 no Brasil. Brasília – DF: CNT, 33 p.

Costa, H. et al. (2023). Comportamento no estado fresco e no estado endurecido de pastas de cimentos álcali-ativados de cinza volante e de cinza pesada e suas características microestruturais. *Ambiente Construído*, 23, p. 203.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de pavimentação. 3.ed. Rio de Janeiro-RJ: IPR, 2006, 277 p.

Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, 35, p. 1984 – 1992.

Gentil, Gustavo *et al*. Estabilização química de rejeito de minério de ferro com Cimento Portland para aplicação em pavimentos. *In: COBRAMSEG*, 20, 2020, p. 629-635.

Lu, Q. *et al*. (2024). Preparation of high-purity fluorite and nanoscale calcium carbonate from low-grade fluorite. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 31 (6), p. 1198 – 1207.

Palomo, A. *et al.* (2007). Opc-fly ash cementitious systems: study of gel binders produced during alkaline hydration. *Journal of Materials Science*, 42 (9), p. 2958 – 2966.

Rivera, J. *et al*. (2020). Clayey soil stabilization using alkali-activated, cementitious materials. Materiales de Construcción, 12 p.

Sun, G. *et al*. (2020). Early activation of high fly ash by ternary activator and its activation mechanism. *Journal of Environmental Management*, 267, 14 p.

Xing, Y.; Wang, B.; Yu, H. (2025). Effect of alkali-activatn conditions on microstructure and heavy metal solidification of alkali-activated converter steel slag and municipal solid waste incineration fly ash. *Environmental research*, 267, 9 p.

Zhang, P. *et al*. (2022). Influence of SiO2 /Na2O molar ratio on mechanical properties and durability of metakaolin-fly ash blend alkali-activated sustainable mortar incorporating manufactured sand. *Journal of materials research and technology*, 18, p. 35533563.