XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8487

Avaliação do transporte de cloretos em argamassas com rejeito da mineração do nióbio

Evaluation of chloride transport in mortar containing niobium mining tailings

Laura Viana de Melo
UFMG |Belo Horizonte| Brasil| lauravianademelo03@gmail.com
Leonardo Braga Passos
PI Engenharia Diagnóstica | Belo Horizonte | Brasil | pi@piengenharia.com
Fernando do Couto Rosa Almeida
UFMG| Belo Horizonte | Brasil | fernando@demc.ufmg.br

Resumo

A utilização de rejeitos da mineração como material alternativo na construção civil é uma maneira de mitigar o impacto negativo ao meio ambiente causado por essas indústrias. O nióbio é um minério relevante para o Brasil, que é o maior exportador mundial. Neste trabalho, foram utilizados os rejeitos da separação magnética e por densidade oriundos da mineração do nióbio. O objetivo foi avaliar o impacto da substituição parcial do filer e do agregado pelos concentrados de barita e ferro, respectivamente, em matrizes cimentícias. Foram realizados os ensaios de penetração de cloretos (28, 56 e 90 dias) e migração de cloretos. Os resultados demonstraram que a penetração de cloretos foi menor nos traços com 50 e 75% de substituição, se comparado à referência (0%) e 25%. Além disso, o início da penetração de cloretos foi mais tardio nas duas maiores substituições, uma vez que só houve detecção aos 56 dias, enquanto os demais foram aos 28 dias. Para a migração de cloretos, o coeficiente obtido esteve dentro da mesma média para os traços de referência, 25 e 50% de substituição. Para o 75%, obteve-se um coeficiente maior que os demais. Dessa forma, a utilização dos rejeitos da mineração do nióbio em teores com até 50% de substituição levou a bons ganhos de resistência ao transporte de cloretos.

Palavras-chave: Rejeito de mineração. Nióbio. Cloretos. Durabilidade.

Abstract

The use of mining waste as an alternative material in the construction industry represents an effective strategy to mitigate the environmental impacts associated with mining activities. Niobium is a strategically important mineral for Brazil, which is the world's largest producer and exporter. In this study, waste materials generated from the magnetic and density separation processes of niobium mining were used. The objective was to evaluate the effect of partially replacing the filler and aggregate with barite and iron concentrates, respectively, on the chloride transport properties of cementitious matrices. Chloride penetration tests were performed at 28, 56, and 90 days, in addition to chloride migration tests. The results showed that chloride penetration was lower in the mixtures containing 50% and 75% replacement compared with the reference mixture (0%) and the 25% replacement mixture. Furthermore, the onset of chloride penetration was delayed in the mixtures with the two highest replacement levels, with chloride being detected only after 56 days, whereas penetration was observed at 28 days in the remaining mixtures. Regarding chloride migration, the migration coefficient remained within the same range for the reference, 25%, and 50% replacement mixtures. In contrast, the mixture containing 75% replacement exhibited a higher migration coefficient than the other mixtures. Overall, the incorporation of niobium mining waste at replacement levels of up to 50% resulted in improved resistance to chloride transport.

Keywords: Mining tailings. Niobium. Chlorides. Durability.

Como citar:
MELO, L.V. et al. Avaliação do transporte de cloretos em argamassas com rejeito da mineração do nióbio. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8487

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável da indústria da mineração e da construção civil é um desafio para o Brasil. Atrelar a sustentabilidade ao desenvolvimento da economia é um dos objetivos da Agenda 2030 da ONU. Para isso, deve haver o fomento a cidades e comunidades sustentáveis, consumo e produção responsáveis e desenvolvimento da indústria, inovação e infraestrutura [1].

O setor da construção civil é responsável por cerca de 6% do PIB do Brasil [2]. Entretanto, a demanda por recursos naturais pode chegar de 40 a 75% de toda matéria-prima extraída do planeta [3].

Para a mineração, o impacto econômico também é relevante, com a geração de empregos e bilhões em impostos arrecadados [4]. Negativamente, os rejeitos da produção e beneficiamento do minério são um risco social e ambiental, especialmente em seu armazenamento. Os acidentes ocorridos nas barragens de Mariana e Brumadinho são exemplos da necessidade de reincorporar os rejeitos à economia produtiva ([5]; [4]).

Especialmente para a mineração do nióbio, o Brasil de destaca sendo o maior exportador do mundo, com 98% das reservas mundiais e 89% da demanda mundial [6]. Os principais rejeitos gerados são na separação magnética e por densidade, sendo concentrados de magnetita e barita [6].

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) pontua que o fomento a ações que “potencializem o uso racional de energia” em suas atividades é uma das alternativas para mitigar os impactos da construção civil no Brasil [7]. Assim, a melhor utilização de matérias-primas naturais é uma das maneiras de promover o desenvolvimento sustentável da construção civil [8].

Entretanto, há uma carência de dados relacionados às propriedades de matrizes cimentícias com utilização de rejeitos da mineração do nióbio. Especialmente para conhecimento da durabilidade, é necessário o desenvolvimento de trabalhos para determinação do seu comportamento. Nesse sentido, uma das principais formas de avaliar a durabilidade de matrizes é a resistência ao transporte de cloretos no interior dos elementos [9].

Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da incorporação dos rejeitos da mineração do nióbio em matrizes cimentícias. Especialmente para este estudo, a resistência à penetração e à migração de cloretos foram ensaiadas em argamassas, o que contribui para a compreensão do desempenho dessas matrizes em ambientes agressivos e sua viabilidade para aplicações estruturais.

METODOLOGIA

MATERIAIS E MOLDAGEM

Os materiais utilizados para este trabalho foram: cimento CP V-ARI, areia padronizada do IPT, filer de gnaisse, rejeito de ferro, concentrado de barita, água e aditivo superplastificante (Figura 1). Os rejeitos da mineração do nióbio (de ferro e concentrado de barita) foram fornecidos pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), provenientes da exploração do material em Araxá (MG).

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8487

Figura 1: Materiais utilizados

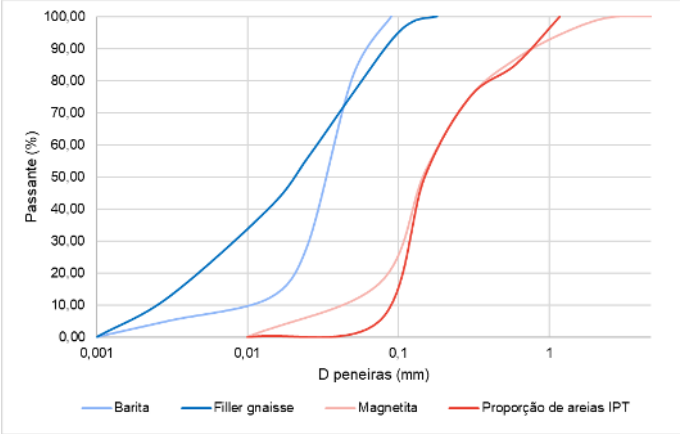


Fonte: os autores

O rejeito de ferro foi utilizado como substituto parcial da areia padronizada do IPT, sendo quatro frações granulométricas diferentes. Os percentuais de cada areia foram de 15, 10, 25 e 50%, para as areias número 16, 30, 50 e 100, respectivamente. O concentrado de barita foi aplicado como substituto parcial do filer gnaisse.

As substituições dos materiais tradicionais pelo alternativos foi baseada na granulometria que possuem. O gráfico da figura 2 ilustra as curvas granulométricas da composição das areias, do filer de gnaisse e dos concentrados de barita e de ferro. É possível observar que a curva da areia está próxima à do rejeito de ferro, enquanto a do filer de gnaisse está próxima a do concentrado de barita.

Figura 2: Curvas granulométricas



O traço utilizado foi na proporção em massa de 1:0,5:3,0 (cimento:filer:agregado miúdo), com relação água/cimento foi de 0,5. O teor de aditivo plastificante foi determinado a partir de ensaios de consistência na Flow table (195 ± 10 mm).

As substituições do agregado miúdo e do filer foram parciais de 25%, 50% e 75%, pelos rejeitos. Foi realizado também um traço referência sem substituições.

O consumo dos materiais (em kg/m³) está listado na Tabela 1.

Tabela 1: Traços das argamassas utilizadas

Traço	Cimento (kg/m³)	Filer (kg/m³)	Concentrado de barita (kg/m³)	Areia IPT (kg/m³)	Concentrado de ferro (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)
TR	509,90	254,95	0,00	1529,71	0,00	254,95	2,91
T25	509,90	191,21	104,96	1147,28	706,77	254,95	4,18
T50	509,90	127,48	209,92	764,86	1413,55	254,95	5,61
T75	509,90	63,74	314,88	382,43	2120,32	254,95	11,22

Fonte: os autores

A moldagem foi realizada por argamassadeira, conforme NBR 7215 (ABNT, 2019) [10]. Tendo em vista as propriedades do rejeito na argamassa fresca, o método de mistura foi modificado. Todos os traços seguiram a mesma padronização definida. A sequência de mistura consistiu na mistura dos materiais secos, seguido da adição de metade da água, de todo aditivo, da segunda metade da água e mistura em 5 minutos em velocidade baixa e 10 minutos em velocidade alta.

Os corpos de prova utilizados foram cilíndricos e permaneceram em cura imersa em água saturada com cal por 28 dias. Os cilindros para a penetração de cloretos foram de dimensões 5x10 cm e para migração de cloretos, de 10x20 cm. A Tabela 2 contém um resumo das principais informações dos corpos de prova.

Tabela 2: Corpos de prova para os ensaios

Ensaio	Corpo de prova	Tempo de cura	Idades de ensaio
Penetração de cloretos	Cilíndrico (5x10 cm)	28 dias	28, 56 e 90 dias
Migração de cloretos	Cilíndrico (10x20 cm)	28 dias	28 dias

Fonte: o autor

ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios realizados neste estudo foram relacionados à movimentação dos cloretos pela estrutura das argamassas, sendo eles: penetração e migração. Antes de iniciar os ensaios, os corpos de prova foram submetidos a um período de 28 dias de cura.

A determinação da presença de cloretos foi baseada, para ambos os ensaios, na aspersão de solução de nitrato de prata com concentração 0,01N. Essa metodologia é chamada de método colorimétrico de MOHR, sendo um método qualitativo [11].

A equação abaixo ilustra o fenômeno da titulação, em que a solução de nitrato de prata ($AgNO_3$) reage com os íons cloretos livres (Cl^-). Isso leva à formação dos produtos cloreto de prata ($AgCl$), precipitado sólido branco e nitrato (NO_3), em forma gasosa. Para os locais em que há cloretos, a equação abaixo rege o fenômeno químico, em que o precipitado branco gerado indica a presença de cloretos.

$$AgNO_3 + Cl^- \rightarrow AgCl + NO_3^-$$

Para a penetração de cloretos, o ensaio será feito com a submersão total dos corpos de prova em solução de NaCl a 3,5% de concentração. As idades finais para retirada da solução de NaCl serão de 28, 56 e 90 dias. Os corpos de prova utilizados foram cilíndricos, de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Ao fim do tempo de ensaio, o corpo

de prova foi retirado e rompido ao meio, seguido da aspersão do nitrato de prata. A frente de cloretos identificada é medida com o paquímetro e registrada.

Para a migração de cloretos, foi utilizado como referência a NT BUILD 492 [12], com base na migração em estado não estacionário, com um “campo elétrico externo” atuante. Para realização do ensaio, é aplicado um potencial elétrico entre os lados da amostra. Uma face do disco estará em contato com solução de NaCl a 10% de concentração (cátodo) e a outra, com solução de NaOH a 0,3N (ânodo). A laterais do corpo de prova serão vedadas com silicone e isoladas com borracha.

Os corpos de prova utilizados nesse ensaio foram de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Foi extraído um disco de 5 cm de espessura de cada corpo de prova, que foi submetido ao circuito do ensaio (Figura 4). Após o tempo do ensaio no circuito, o disco foi quebrado ao meio e aspergido solução de nitrato de prata. A figura 5 ilustra os corpos de prova e a realização do ensaio.

O aspecto final do corpo de prova de cada traço após o ensaio está representado na Figura 6. A visualização do precipitado formado da reação com a solução de Nitrato de Prata 0,1N foi melhor do que a obtida no ensaio de penetração de cloretos.

As amostras após serem submetidas aos ensaios tiveram o aspecto apresentado na Figura 3.

Figura 3: Amostras após os ensaios



Nota: Ensaio de penetração de cloretos e ensaio de migração de cloretos, respectivamente.
Fonte: o autor.

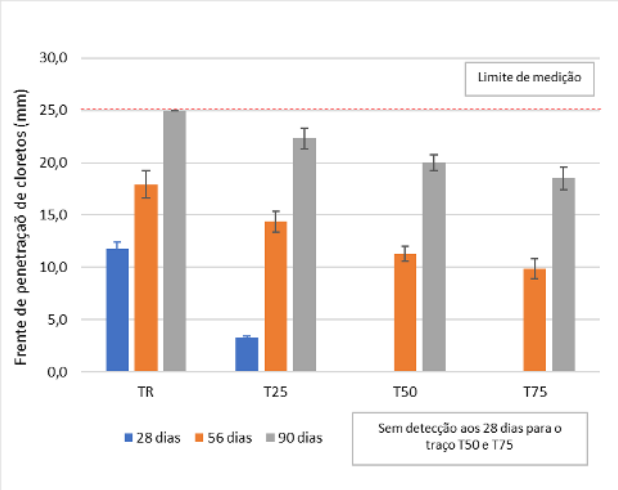
RESULTADOS

Os resultados obtidos para os ensaios de penetração e migração de cloretos estão relacionados nesta seção.

PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Os resultados encontrados para a penetração de cloretos estão relacionados da figura 4.

Figura 3: Frente de penetração de cloretos



Fonte: Autora

Aos 28 dias de submersão em solução de NaCl, os traços “T50” e “T75” não tiveram penetração de cloretos registrada. O traço “TR” teve a maior penetração registrada, 11,7 mm e o “T25” teve uma frente de 3,3 mm.

Aos 56 dias de submersão, as frentes de penetração de cloretos foram decrescentes na sequência dos traços. O “TR” teve a maior frente, com 17,9 mm, seguido do “T25”, com 14,4 mm, do “T50”, com 11,3 mm e “T75”, com 9,9 mm.

Para os 90 dias de submersão, a mesma ordem foi mantida, em que o alcance dos cloretos foi decrescente. No traço “TR”, a penetração de cloretos foi superior à metade do corpo de prova, não sendo possível sua medição exata. Nos demais traços, as medições foram de 22,3, 20,0 e 18,5 mm, para os traços “T25”, “T50” e “T75”.

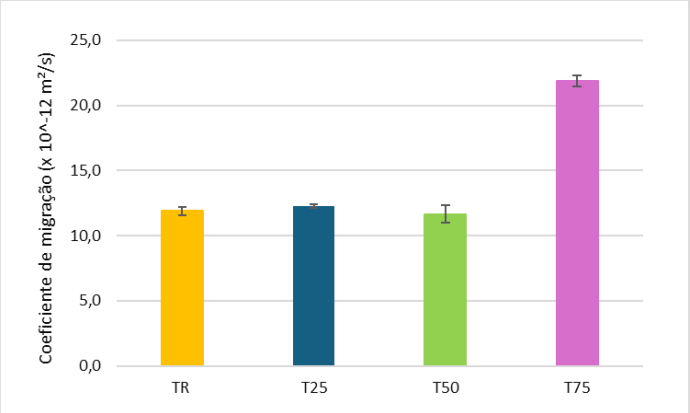
Dessa forma, notou-se que quando maior o teor de rejeitos substituídos nos traços, menor foi a penetração de cloretos registrada. Os traços com 50 e 75% de substituição tiveram a penetração de cloretos com início mais tardio (não detectado no período inicial de 28 dias) e uma frente de penetração total menor do que os demais. Já o “T25”, mostrou-se intermediário, com desempenho melhor que o referência, mas inferior ao “T50” e “T75”.

A redução da penetração de cloretos pode estar relacionada ao efeito fíler, que é promovido pelos rejeitos empregados. A presença de materiais mais finos favorece o melhor empacotamento das partículas, por causa da otimização da granulometria [13;14]. Como consequência, ocorre a maior resistência ao transporte de agentes agressivos, como cloretos. Além disso, a menor interconectividade entre os poros dificulta a progressão da frente de penetração, justificando o atraso observado para os traços T50 e T75.

MIGRAÇÃO DE CLORETOS

Os resultados encontrados para a migração de cloretos estão relacionados da Figura 4.

Figura 4: Frente de migração de cloretos



Fonte: Autora

O coeficiente de migração de cloretos médio foi de, respectivamente, 11,9, 12,3, 11,6 e 21,9 ($10^{-12}\ m/s$), para os traços “TR”, “T25”, “T50” e “T75”. Com os coeficientes obtidos, os traços “TR”, “T25” e “T50” não diferiram entre si, enquanto o “T75” teve um resultado superior aos demais.

O resultado do coeficiente é obtido com base na equação da norma (NT BUILD 492). Dentre as variáveis que compõem a equação, as que mais diferiram entre os traços foram a profundidade de penetração de cloretos e a corrente ajustada.

A corrente ajustada aplicada ao circuito do ensaio mostrou que para o traço “TR” foi registrada a menor corrente, seguido em ordem crescente do “T25”, “T50” e “T75”. As médias foram respectivamente de 62, 63, 64 e 73 mA, o que indicou relação direta com os coeficientes de migração obtidos.

Para a profundidade média, foi registrado 13,16 mm, 13,85 mm, 11,24 mm e 15,68 mm, respectivamente para os traços “TR”, “T25”, “T50” e “T75”.

Dessa forma, a presença dos rejeitos não alterou a migração de cloretos para até 50% de substituição dos agregados convencionais. Para o teor acima deste valor, houve um incentivo à migração dos íons, o que pode prejudicar a durabilidade da armadura.

A diferença entre os resultados obtidos está relacionada com o tipo de transporte que o cloreto tem em cada um. O ensaio de penetração em solução de NaCl representa o transporte por difusão, que ocorre por conta do gradiente de concentração dos íons, que se locomovem em função da estrutura dos poros da matriz. Essa movimentação ocorre da solução para o interior dos corpos de prova.

Já o ensaio de migração, acelera o transporte por meio da aplicação de um potencial elétrico, sendo influenciado não apenas pela estrutura de poros, mas também pela condutividade elétrica da solução dos poros e pelas características mineralógicas dos materiais incorporados. Para as argamassas com os rejeitos, esse comportamento está relacionado com a presença dos íons de ferro, que tende a facilitar a passagem da corrente elétrica.

CONCLUSÕES

Para o ensaio da penetração de cloretos, observou-se que a influência da substituição dos agregados pelos rejeitos foi diretamente relacionada com uma menor frente detectada. Os traços com maiores percentuais de rejeitos (“T50” e “T75”) apresentaram início da frente de cloretos mais tardio (a partir de 56 dias) e uma

penetração final menor, o que indica maior resistência ao transporte de cloretos por difusão.

Para a migração de cloretos, a presença da corrente no circuito elétrico fez com que o traço T75, com maior percentual de rejeito de ferro tivesse um pior resultado. Entretanto, os traços com 25 e 50% de substituição tiveram desempenho semelhante ao traço referência, o que indica que a incorporação dos rejeitos nesses teores não compromete o transporte iônico sob migração acelerada. Além disso, a metodologia para visualização de cloretos com base na migração permitiu melhor visualização da frente de cloretos, se comparado aos resultados obtidos da penetração de cloretos.

Diante dos resultados analisados, foi possível identificar que para ambos os ensaios o traço "T50" apresentou resultados melhores ou semelhantes ao traço referência. Dessa maneira, a substituição de 50% do agregado e do filer por rejeitos de mineração mostrou-se tecnicamente viável, promovendo melhorias na resistência à penetração de cloretos, sem comprometer o desempenho sob condições de migração iônica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (400901/2025-0) e FAPEMIG (APQ-04155-23, APQ-06746-24, PCE-00169-26) pelo apoio financeiro e à PI Engenharia Diagnóstica pelo apoio na realização dos ensaios.

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] Organização das Nações Unidas. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sd. Acesso em: 15/04/2026.
[2] BANCO DE DADOS CBIC. Disponível em: http://www.cbicdados.com.br/menu/indicadores-economicos-gerais/boletim-estatistico. Acesso em: 16/03/2025.
[3] UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA (UFILA). Construções sustentáveis exigem preocupação com materiais e processos. Disponível em: https://portal.unila.edu.br/noticias/construcoes-sustentaveis. Acesso em: 16/03/2025.
[4] INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Gestão e manejo de rejeitos da mineração. Disponível em: Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf. Acesso em: 16/03/2025.
[5] BBC NEWS BRASIL. Disponível em: Brumadinho: Brasil tem mais de 300 barragens de mineração que ainda não foram fiscalizadas e 200 com alto potencial de estrago - BBC News Brasil. Acesso em: 16/03/2025.
[6] COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO (CBMG). O que é o nióbio?. Disponível em: https://cbmm.com/pt/niobio?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAiaCBhBEEiwAjY99qNLD8cHTThMhDfN2xRZasy2ZpnclXxxwGza0bFpT-izkWohSG4NV-hoC1rYQAvD_BwE. Acesso em: 16/03/2025
[7] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Construção Sustentável. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/planejamento-ambiental-e-

territorial-urbano/urbanismo-sustentavel/constru%C3%A7%C3%A3o-sustent%C3%A1vel.html. Acesso em: 16/03/2025.

[8] PEREIRA, F.R., PINHEIRO, E.C.N.M., ALVES, R.B. Materiais de construção alternativos. Brazilian Journal of Development, v.7, n.11, p. 109965-109981, nov. 2021.

[9] NEVILLE, A.M. Propriedades do concreto. 5ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2016.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

[11] MEDEIROS, M.H.F., RÉUS, G.C., PONTES, C.V. Nitrato de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica. 3° Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, p. 186-197, 2018.

[12] NORDTEST. NT BUILD 492: Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials, Chloride Migration Coefficient from Non-Steady State Migration Experiments. NORDTEST. Esbo, Finland, 1999.

[13] LOTHENBACH, B., SCRIVENER, K. e HOOTON, R.D. Suplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research, v.41, 1244-1256. Out., 2010.

[14] SCRIVENER, K.L., MATSCHEI, T., GEORGET, F., JUILLAND, P., MOHAMED, A.K. Advances in hydration and thermodynamics of cementitious systems. Cement and Concrete Research, v. 174 (2023).