



ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM BANCADA REDUZIDA DE DRENOS COM RECHEIO DE BRITA PARA REDUÇÃO DE ÁGUA LIVRE EM VAGÕES DE MINÉRIO

Marcella Guedes Vieira¹; Isabela Ferreira de Souza²; Arthur Dantas Rezende³; Luiz Felipe de Moraes da Costa Barros⁴; Álvaro Luiz Moreira Conrado⁵; Felipe Bertelli^{6,7}

¹Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica — Universidade Santa Cecília, Brasil

²Engenharia Química, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica — Universidade Santa Cecília, Brasil

³Graduando de Engenharia Mecânica — Universidade Santa Cecília, Brasil

⁴Graduando de Engenharia Química — Universidade Santa Cecília, Brasil

⁵Engenheiro Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica — Universidade Santa Cecília, Brasil

⁶Doutor, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica — Universidade Santa Cecília, Brasil e Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil.

RESUMO

O acúmulo de água de chuva em vagões do tipo gôndola a céu aberto impacta negativamente a logística de carregamento/descarregamento de minério. Soluções para aumentar a eficiência do sistema de drenagem envolvem mecanismos que inibem ou diminuem o entupimento dos drenos e o desperdício de carga. Este artigo apresenta estudos experimentais sobre o conceito de drenos recheados, utilizando como elemento de preenchimento pedra brita. A metodologia consistiu no uso de uma bancada de ensaios em escala reduzida para avaliar variáveis como o tipo e altura inicial de coluna de minério e a granulometria da brita (grossa e fina). Os resultados demonstraram que, para o *pellet feed*, a velocidade de drenagem foi alta, acompanhada de perda expressiva de minério por canal preferencial. Para o *sinter feed* com colunas maiores, a perda de massa foi desprezível (inferior a 1%), embora o escoamento tenha sido mais lento. O uso de brita fina permitiu uma perda mássica menor em toda as situações. O comportamento típico da drenagem foi de maior efetividade quando o dreno tende a ficar exposto à superfície da carga com a compactação, enquanto carregamentos com maiores alturas, o minério é fator determinante da manutenção de água livre. O *sinter feed* foi o minério que apresentou impossibilidade de drenagem para ambas as condições de brita, quanto a altura inicial atingindo 300 mm de carregamento.

Palavras-chave: Drenagem, Minério de ferro, Drenos recheados, Vagões gôndola.

1. INTRODUÇÃO

O uso de vagões do tipo gôndola, descobertos, embora facilite as operações de carregamento e descarregamento de minério de ferro, acarreta no acúmulo de água livre sobre a carga em períodos chuvosos (TABATA, 2025), gerando impactos logísticos e econômicos (FLORENCE, 2024).

Atualmente na Estrada de Ferro Carajás (EFC) e na Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), o *sinter feed* e o *pellet feed* são, respectivamente, os principais minérios transportados. O *pellet* pode ser descrito como um particulado fino com maior abundância de ferro, tendo granulometria menor e maior beneficiamento, enquanto o *sinter* é um material de granulometria e composição mais variada e inorgânica. Estas diferenças alteram significativamente os comportamentos de compactação, saturação e drenagem (FLORENCE et al., 2024).

Por não haver frota cativa nem entre trechos de uma mesma ferrovia, nem entre os minérios, os drenos utilizados em cada estrada de ferro visam a maior eficiência na



drenagem do minério predominante, de forma que na EFC utiliza-se drenos de superfície côncava com 1,2 mm de abertura de fresta e na EFVM drenos de superfície reta com 0,6 mm de abertura de fresta, ambos fabricados em poliuretano. Embora promovam a drenagem da água acumulada sobre o minério, os drenos com maior abertura de fresta acarretam uma perda mássica significativa em minérios de baixa granulometria, ao passo que os drenos com menor abertura são mais fáceis e rapidamente entupidos, necessitando de manutenção.

A fim de mitigar essa situação, os estudos de alternativas para drenagem da água retida envolvem pesquisas que compreendam os fenômenos envolvidos no processo a fim de propor alternativas que se estendam do aumento da efetividade e/ou vida útil dos drenos atualmente disponíveis em escala comercial para o desenvolvimento de propostas que possam ser empregados em uma variedade maior de cenários. Os principais aspectos que envolvem a drenagem de água no transporte por vagões em ferrovias são as características distintas de minérios em mesmo compartimento, alternadamente, intempéries, disposição de drenos no assoalho e cabeceira, efeitos da vibração e consequente compactação da carga (BOGSAN, 2022).

Por tratar-se de uma temática recente, a base para referencial teórico ainda se encontra em desenvolvimento, sendo a literatura específica sobre drenagem de vagões ferroviários usados para transporte de minério de ferro escassa, estando concentrada em grupos pesquisa, fomentados por parcerias empresas-universidades (FLORENCE et al., 2024, BOGSAN, 2022). Nestes, é possível observar que a drenagem pode ser conduzida de maneira mais efetiva se forem usados drenos com disposição de ...

O objetivo deste artigo é apresentar resultados experimentais preliminares a partir do conceito de drenos recheados, visando aumentar o tempo entre as paradas de limpeza de drenos aplicados na cabeceira de vagões gôndola, no sentido de mitigar o entupimento das frestas por deposição e aglutinação de minério, ao mesmo tempo que impeçam uma perda mássica substancial.

2. DESENVOLVIMENTO

Os ensaios descritos a seguir foram feitos em escala laboratorial, em uma bancada experimental desenvolvida na Universidade Santa Cecília, em parceria com a empresa VALE S.A., dentro do projeto Cátedra de Vagões. Parte dos resultados aqui foram apresentados em trabalhos prévios e, do ponto de vista comparativo entre os mecanismos propostos neste artigo, foram refeitos em condições semelhantes.

2.1. Bancada Experimental

O aparato experimental é composto por uma mesa com vibração, sobre a qual acoplam-se simultaneamente três torres de acrílico preenchidas com minério para ensaio. Abaixo da superfície desta mesa há um motor excêntrico, com pino de impacto centralizado e associado a um braço articulado, que ergue e solta em queda livre um contrapeso de 4,54 kg, massa estabelecida através de estudos empíricos como sendo o limite máximo de agitação do aparato para que não haja separação física entre as torres e a mesa de apoio. Na parte de baixo, béqueres retêm a água e o minério durante o ensaio de drenagem (FLORENCE et al., 2024). A Figura 1 apresenta uma representação gráfica em CAD (à esquerda), bem como detalhes do mecanismo de impacto descrito (à direita).



Figura 1. Desenho esquemático em CAD da Mesa de Vibração (à esquerda); Detalhes do mecanismo de impacto (à direita). (Adaptado de Florence, 2024)

As torres para ensaio foram construídas com acrílico transparente de 5 mm de espessura e seção quadrada de 80 mm e altura de 500 mm da base a topo. A saída da água se dá por uma abertura, também quadrada de 80 mm de lado, na lateral da torre tangente a face inferior, onde é fixado o sistema de drenagem. Este conjunto é composto por um dreno de acrílico de 5 mm de espessura com 20 frestas largas, cada qual medindo 5 mm por 36 mm, que sobrepõe à seção delimitada para saída de água da torre (Figura 2).

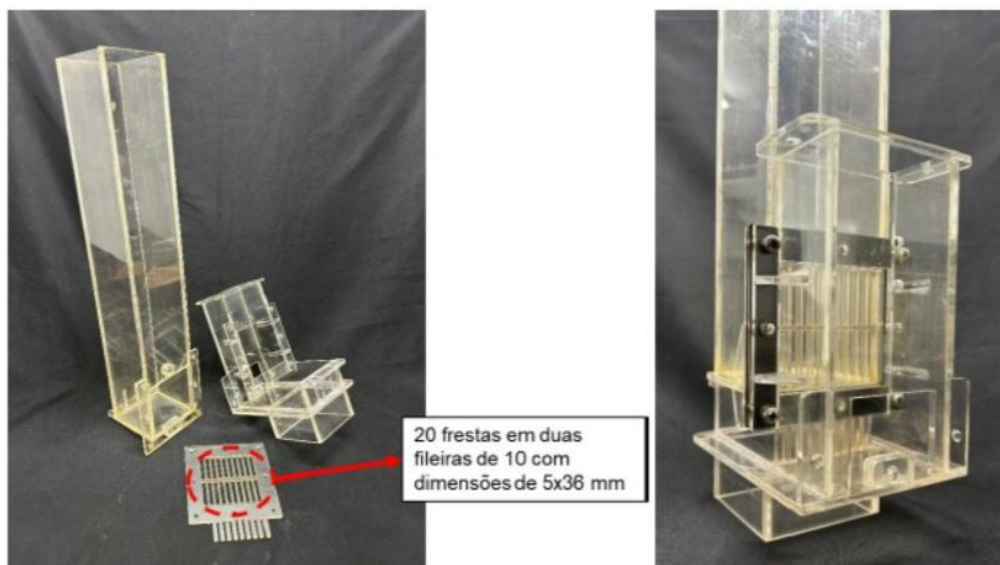


Figura 2. Componentes da torre de ensaio (à esquerda); Estrutura da torre montada (à direita). (Fonte: Florence, 2024).

2.2. Dreno recheado

Na Engenharia Civil, o termo “dreno recheado” normalmente refere-se a um dispositivo de drenagem de solo preenchido com material permeável, em geral brita ou areia, que possui como função principal coletar e conduzir a água subterrânea ou fluidos de dentro do solo para reduzir a pressão de poros e facilitar o escoamento, acelerando

processos como adensamento e estabilização e solos moles, de acordo com conceitos geotécnicos e princípios de mecânicas do solo (AZEVEDO, 2022).

Apesar da definição e aplicação consolidada, o protótipo aqui desenvolvido possui pouca semelhança com o homônimo da construção civil, sendo composto por uma porção de material de recheio, neste caso a própria brita, até aproximadamente 70% da capacidade deste. Seu objetivo é permitir um fluxo maior de drenagem através de frestas muito maiores que as convencionais entre 0,6 mm e 1,2 mm encontradas na EFC e EFVM, protegendo o dreno de entupimentos e evitando a perda de minério por arrasto por meio de partículas móveis.

Britas contendo duas granulometrias distintas foram comparadas: denominada de brita grossa, o diâmetro médio variou entre 9,5 mm e 25 mm, conhecida como brita 1 e 2 pelas normas de padronização (ABNT, 2020); denominada de brita fina, as britas grossas foram trituradas e peneiradas, sendo separadas para uso apenas de partículas entre 5 e 7 mm. A Figura 3, a seguir, apresenta comparativamente as dimensões das britas grossa e fina.



Figura 3. Brita fina, após processo de quebra e peneiramento (à esquerda) e brita grossa, (à direita).

2.3. Metodologia Experimental

A metodologia experimental seguiu ensaios em triplicata para cada uma das 16 combinações de variáveis possíveis e consistiu de uma sequência de passos aplicada a todas as repetições, sendo modificadas os seguintes aspectos: tipo de minério (*pellet feed* ou *sinter feed*), altura inicial da coluna de minério (100 mm, 150 mm, 200 mm ou 300 mm) e granulometria do elemento de recheio (brita fina ou brita grossa). Para os resultados foram considerados a média aritmética simples entre as três repetições de uma mesma condição.

Inicialmente, a saturação do minério com água foi padronizada como saturada (100% de umidade), partindo-se de um minério totalmente seco. Esta etapa é feita mantendo durante 24 horas, em uma estufa à 110°C, o minério espalhado em bandejas rasas de 50 mm, seguido de adição manual de água deionizada e agitação mecânica. Em



todos os testes, o estado inicial dos minérios foi saturado, motivado pela condição encontrada em pilhas de armazenamento a céu aberto, nas condições reais de carregamento de um vagão.

Em seguida, com as torres acomodadas na bancada experimental, o minério foi depositado até as alturas previamente estabelecidas de 100 mm, 150 mm, 200 mm ou 300 mm, por meio da abertura na parte superior. Com o auxílio de um dispositivo confeccionado para amortecer a queda de água, com uma distribuição uniforme e prevenida de formação de jato sobre a carga, 1 kg de água deionizada foi inserida para a formação de coluna de água livre sobre o minério. Por fim, o motor foi acionado, promovendo a vibração de todo o conjunto até o fim do experimento. Para considerar o término do experimento, a água livre sobre a carga deve ser totalmente drenada. Em alguns casos, este tempo foi demasiadamente amplo, ultrapassando uma hora sem alteração na altura da coluna de água livre, sendo interrompido e a drenagem considerada “ineficiente”.

Para determinar a quantidade de minério perdido na drenagem, o minério retido dentro da torre após o ensaio foi seco em estufa e pesado na condição seco. A diferença entre o minério antes da saturação para o ensaio e após o procedimento de drenagem, considerando a condição seca, refere-se ao percentual de perda a ser apresentado.

As Figuras 5 e 6, abaixo, apresentam as torres dispostas lado a lado, preenchidas com *pellet feed* (Figura 4) e *sinter feed* (Figura 5) para as diferentes alturas de coluna inicial de minério.



Figura 4. Torres com as quatro diferentes alturas de coluna inicial de *pellet feed* antes dos ensaios.

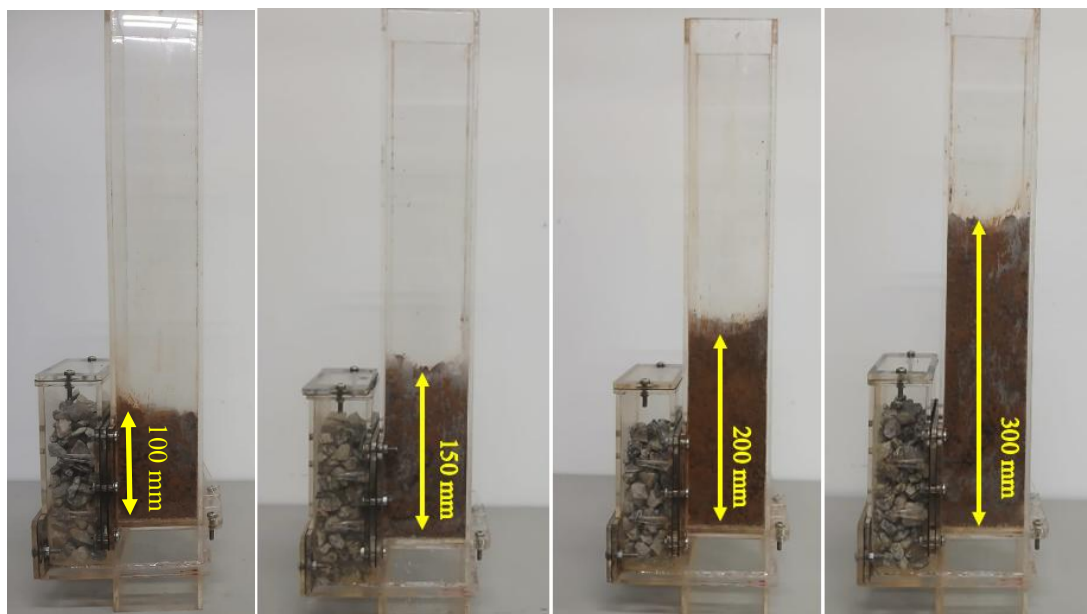


Figura 5. Torres com as quatro diferentes alturas de coluna inicial de *sinter feed* antes dos ensaios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esperava-se com os experimentos comparar a capacidade das diferentes granulometrias de brita de atuar como elemento de recheio, impedindo uma perda acentuada de minério por arrasto para frestas de 5 mm. Esta medida de abertura de fresta é aproximadamente 8 vezes maior do que a empregada em escala comercial na EFVM e 4 vezes maior em comparação com a EFC.

3.1. *Pellet Feed*

Para *Pellet Feed* os resultados tanto com o uso de brita fina quanto brita grossa foram satisfatórios no que diz respeito a velocidade de drenagem, mesmo que tenham promovido uma perda acentuada de minério devido ao arrasto e a formação de erosão e pela ocorrência de canais preferenciais. A Figura 6 ilustra o aspecto final do fenômeno descrito.

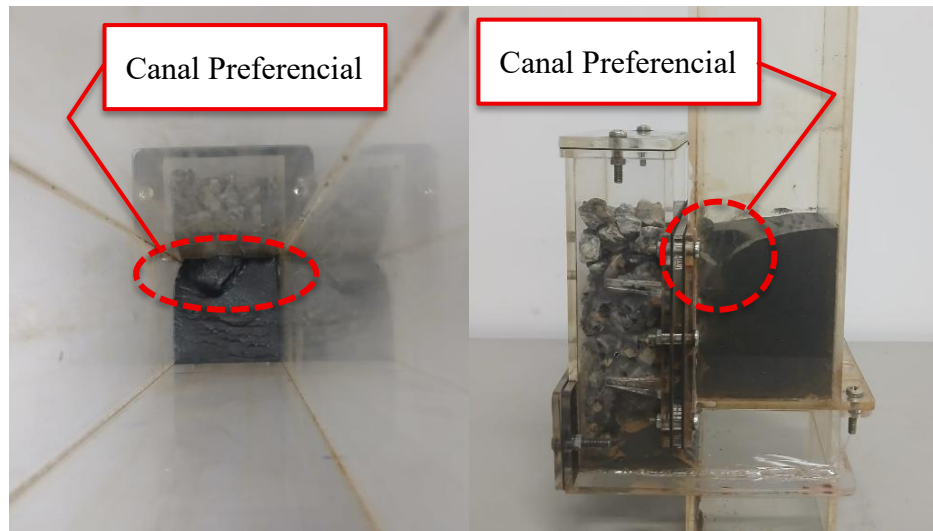


Figura 6. Formação de canal preferencial em um dos ensaios com *pellet feed*.

Quando comparados, para *pellet feed*, as médias dos resultados de perda mássica e tempo de drenagem entre as diferentes configurações testadas, obtém-se o que pode ser visualizado, respectivamente, nas Figuras 7 e 8. A brita fina, embora para o caso de 300 mm, tenha praticamente triplicado o tempo de escoamento, promoveu em todos os casos uma retenção de minério maior do respectivo arranjo em brita grossa, o que também pode ser visualizado na Figura 9, que apresenta a diferença nas colunas de minério após o ensaio de drenagem com compactação.

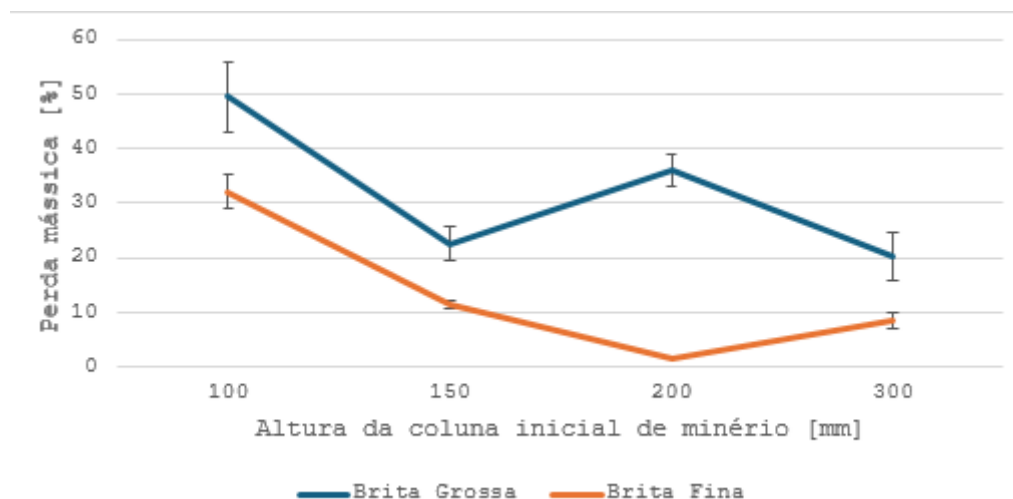


Figura 7. Comparativo da perda mássica nos ensaios realizados com *Pellet Feed*

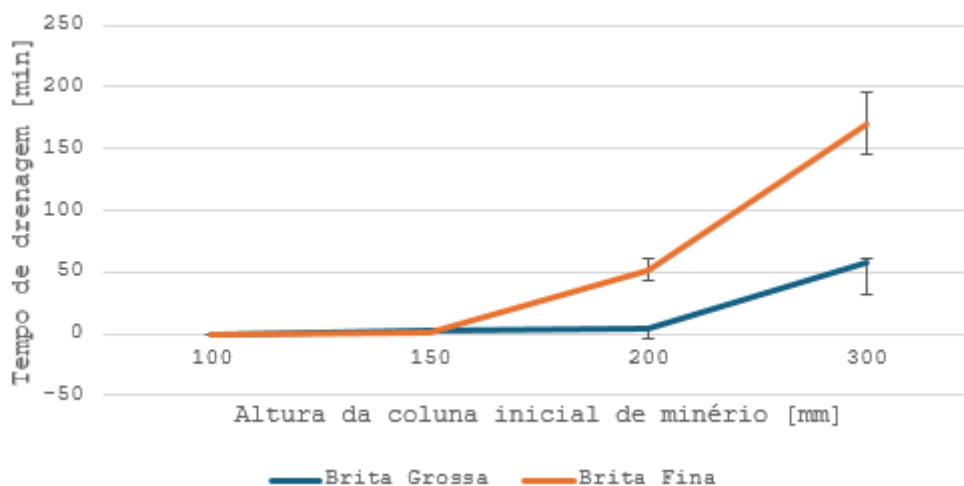


Figura 8. Comparativo do tempo de drenagem nos ensaios realizados com *Pellet Feed*

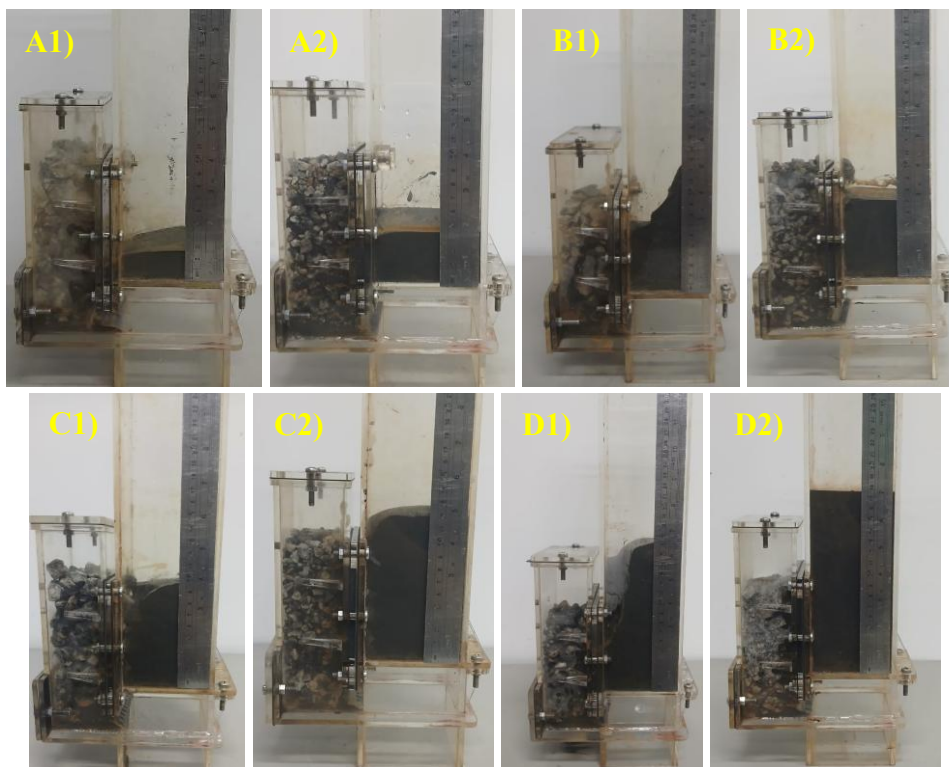


Figura 9. Comparação das colunas de minério finais de 100 mm (A), 150 mm (B), 200 mm (C) e 300 mm (D) para *pellet feed*, usando Brita Grossa (1) e Brita Fina (2) como elemento de recheio.

Quanto menor a altura de carregamento de minério, mais fácil será de a água livre atingir diretamente a abertura das frestas dos drenos, acelerando o processo de drenagem. Quanto maior a pilha, mais o minério tende a ficar retido, dificultando a percolação da água livre até a água atingir o dreno. Esse fenômeno é sempre observado e vem sendo investigado como promissor para a eliminação eficaz da água livre.

3.2. *Sínter Feed*



Para as alturas iniciais da coluna de minério, entre 100 e 200 mm, houve a formação de canais preferenciais na medida em que a água livre depositada sobre a carga conseguia percolar e ser drenada. Nos instantes iniciais do experimento houve uma drenagem rápida, em tempos inferiores a 2 minutos e com uma perda pequena de minério quando comparada ao *pellet feed*. Ficou evidente que, para o ensaio com altura inicial de 300 mm, após a compactação do minério e formação de uma polpa incompressível, houve manutenção da água livre sobre a coluna. Como uma polpa compacta, a água não tem capacidade de percolar até o dreno no caso do *sinter feed*, já evidenciado em outros artigos na literatura (BOGSAN et al. 2021, 2022). As Figuras 10 e 11 apresentam o comparativo entre o percentual médio de perda mássica de minério e o tempo de drenagem para o *sinter feed*.

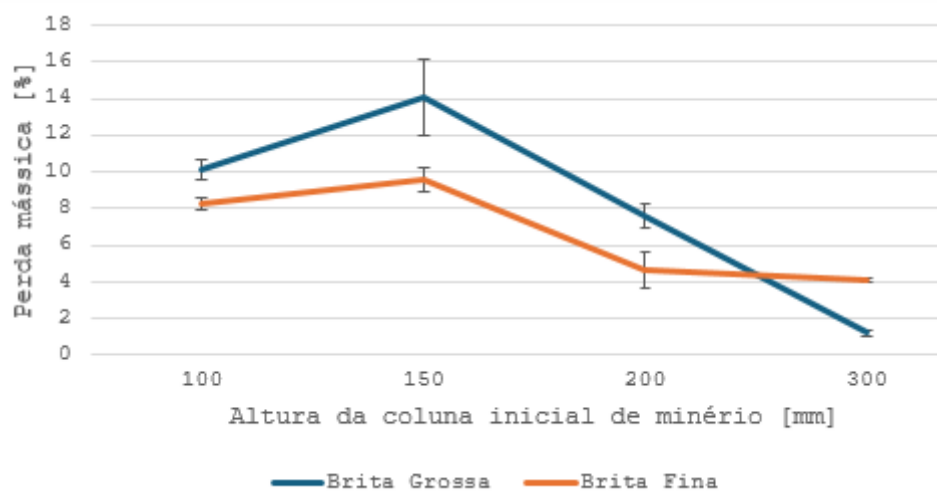


Figura 10. Comparativo da perda mássica nos ensaios realizados com *Sinter Feed*

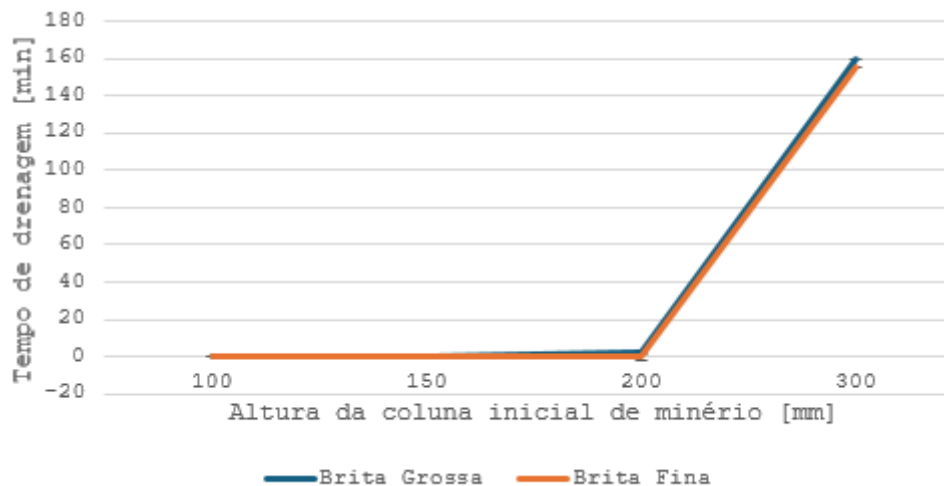


Figura 11. Comparativo do tempo de drenagem nos ensaios realizados com *Sinter Feed*

Novamente os drenos que utilizaram brita fina como elemento de recheio obtiveram uma perda mássica percentual menor do que aqueles que usaram brita grossa para a mesma condição de coluna inicial de coluna de minério. A Figura 12 permite visualizar a diferença nas alturas finais de coluna de minério para cada condição testada.

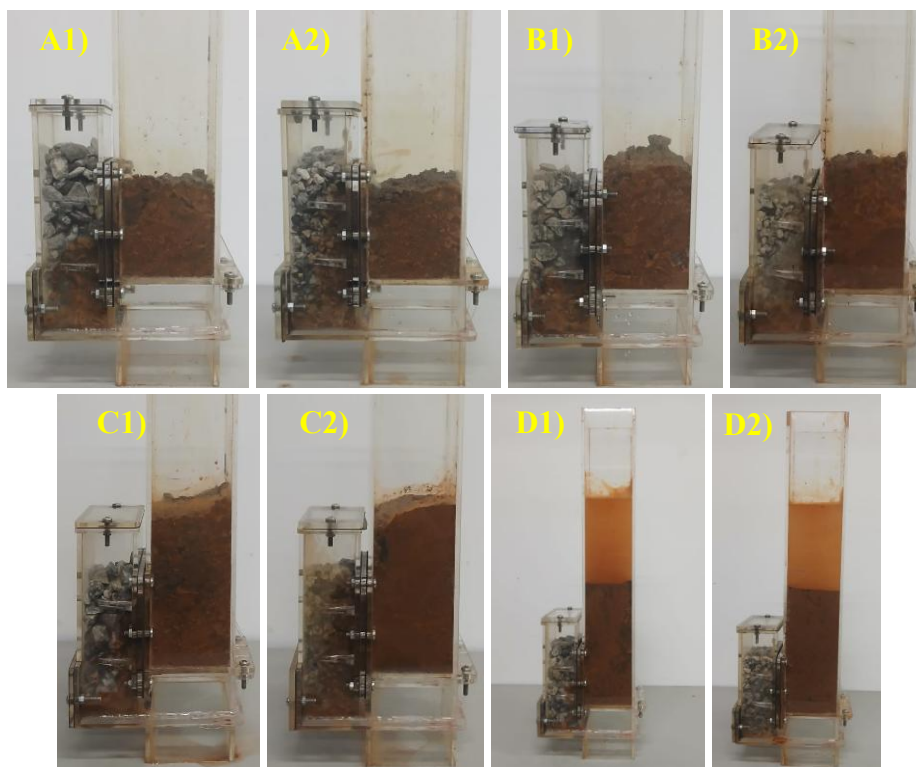


Figura 12. Comparação das colunas de minério finais de 100 mm (A), 150 mm (B), 200 mm (C) e 300 mm (D) para *sinter feed*, usando Brita Grossa (1) e Brita Fina (2) como elemento de recheio.

4. CONCLUSÃO

O uso de brita nas condições de granulometria propostas evidenciou uma leve diferença de perda mássica, sendo sempre menor quando se usa granulometria mais fina. Este fenômeno é associado à maior dificuldade de o minério permear as frestas entre partículas de brita durante a eliminação de água livre pela drenagem.

No caso do *sinter feed*, independentemente da granulometria, a coluna maior de minério é determinante na manutenção de água livre sem drenagem, pois a característica intrínseca do minério é a compactação em até o limite de formação de uma polpa incompressível, eliminando praticamente a possibilidade de percolação no tempo proposto de ensaio. Quando se tem carregamento menor, que permite compactação suficiente para que a água livre atinja a superfície do dreno após compactação, esta água tende a ser eliminada de forma rápida.

Já para o *pellet feed*, o resultado deve ser observado na ótica de que este percentual de perda reflete uma condição de massa de minério compatível com a carga de teste demasiadamente pequena em relação ao que seria observado em um vagão em escala real. Aqui, os resultados se traduzem em velocidade de percolação, que ocorre com leve diferença entre as condições de uso de brita fina e grossa. Em um caso prático, a eliminação de água livre do vagão tenderia a ser eficiente pela velocidade, antes que a água percole para dentro do carregamento.

5. AGRADECIMENTOS



Os autores agradecem à VALE S.A. pelo apoio financeiro ao projeto e pelas bolsas estudantis que fomentam o desenvolvimento das pesquisas relacionadas a drenagem de vagões, em parceria com a Universidade Santa Cecília, em Santos-SP.

6. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 4701:2020 - **Minérios de ferro e aglomerados — Determinação da distribuição granulométrica por peneiramento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

ANTF – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários. **O setor ferroviário de carga brasileiro**. Informações Gerais, 2024. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>.

AZEVÊDO, S. S.; BELLO, M. I. M. C. **Drenos verticais como solução para acelerar os recalques de um aterro sobre solo mole**. ForScience, Formiga, v. 10, n.1, e00952, 2022.

BOGSAN, Marcelo Augusto Valeriano; ANDRINI, Augusto Cesar; SANTOS, Vitor Palmarin Oliveira; MORAES JUNIOR, Deovaldo de; ROSA, Vitor da Silva; BERTELLI, Felipe. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE DO MINÉRIO DE FERRO SÍNTER FEED SOBRE O ESCOAMENTO DE ÁGUA EM TORRE DE BANCADA COM DRENAGEM VERTICAL**. *Encontro Nacional de Pós-Graduação (ENPG)*, Universidade Santa Cecília, Santos, 2021.

BOGSAN, Marcelo Augusto Valeriano. **Desenvolvimento de uma bancada experimental para estudos de percolação e drenagem de água em minérios**. Dissertação de mestrado, Unisanta, Santos, 2022. Disponível em: https://unisanta.br/wp-content/uploads/2025/04/Teses-Auditoria-Ambiental_14-2022-MARCELO-AUGUSTO-VALERIANO-BOGSAN.pdf. Acesso em: 25 fev. 2026.

BOGSAN, M. A. V.; MORAES, D. Júnior, ROSA, V. S.; et al. **Desenvolvimento de uma Bancada Experimental para Estudos de Percolação e Drenagem de Água em Minérios**. In: POMBO, J. (Ed.). *Proceedings of the Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*. Civil-Comp Press, Edinburgh, Reino Unido, Online volume: CCC 1, Paper 25.4, 2022. DOI: 10.4203/coc.1.25.4.

FLORENCE, João Batista Cyrino. **Estudo de mecanismos de drenagem de água livre para vagões de minério de ferro**. Dissertação de mestrado, Unisanta, Santos, 2024.

FLORENCE, J. B. C.; TABATÁ, G. A.; ALBUQUERQUE, L. H. F. de; et al. **Efeito da Intensidade de Vibração no Perfil de Compactação de Minério do tipo Pellet Feed**. ENPG 2024, Universidade Santa Cecília, 2024.

FLORENCE, João Batista Cyrino et al.. **Compactação de minério de ferro pellet feed em bancada experimental e agitador eletromagnético**. In: *Anais do VII Simpósio de Engenharia Ferroviária*. Anais...Campinas (SP) UNICAMP, 2024. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/vii-simposio-de-engenharia-ferroviaria->



410736/807440-COMPACTACAO-DE-MINERIO-DE-FERRO-PELLET-FEED-EM-BANCADA-EXPERIMENTAL-E-AGITADOR-ELETROMAGNETICO.

TABATA, G. A. **Influência da umidade dos minérios de ferro do tipo pellet feed e sinter feed no comportamento de compactação e adesão em diferentes geometrias.** UNISANTA, Santos, 2025.

EXPERIMENTAL REDUCED-SCALE TEST BENCH TRIALS OF CRUSHED STONE-FILLED DRAINS FOR FREE WATER REDUCTION IN RAILWAY ORE WAGONS

ABSTRACT

The accumulation of rainwater in open-air gondola-type wagons negatively impacts the logistics of loading/unloading ore. Solutions to increase the efficiency of the drainage system involve mechanisms that inhibit or reduce drain clogging and ore waste. This paper presents experimental studies on the concept of packed drains, using crushed stone as a filling element. The methodology consisted of using a reduced-scale test bench to evaluate variables such as the type and initial height of the ore column and the particle size distribution of the crushed stone (coarse and fine). The results demonstrated that, for pellet feed, the drainage velocity was high, accompanied by significant ore loss through preferential channels. For sinter feed with taller columns, the mass loss was negligible (less than 1%), although the flow was slower. The use of fine crushed stones allowed for less mass loss in all situations. The typical drainage behavior was more effective when the drain tended to be exposed to the surface of the load with compaction, while with higher load heights, the ore was a determining factor in maintaining free water. Sinter feed was the ore that showed no possibility of drainage for both crushed stone conditions when the initial load height reached 300mm.

Keywords: Drainage, Iron ore, Packed drains, Gondola wagons.