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/COBRAMSEG2026.1/26

Avaliação Técnica de um Caminhão Sobre Esteiras na Descaracterização de Barragens com Rejeito Saturado

Adriana Pereira
Engenheira Sênior, Vale, Belo Horizonte, Brasil, adriana.pereira2@vale.com

Luana Araújo
Engenheira Master, Vale, Belo Horizonte, Brasil, luana.araujo@vale.com

Kênia de Oliveira
Instrutora de Capacitação Técnica, Vale, Belo Horizonte, Brasil, kenia.mara@vale.com

RESUMO: A descaracterização de barragens construídas a montante enfrenta desafios operacionais, especialmente relacionados à trafegabilidade de equipamentos em rejeito saturado. Este estudo apresenta os resultados dos testes de campo com um caminhão sobre esteiras, realizados em uma mina de Minas Gerais. O equipamento foi avaliado em dois cenários: (i) operação tripulada em rejeito não compactado e (ii) operação tripulada e não tripulada em pista experimental com solo compactado. Os testes analisaram trafegabilidade, produtividade, disponibilidade física e tempo de manobra. O caminhão demonstrou capacidade de trafegar em materiais com até 44% de umidade sobre base compactada, superando os limites dos caminhões convencionais (até 15%). A operação não tripulada apresentou melhor desempenho, com maior agilidade e antecipação de comandos, embora ainda exija melhorias em segurança. Apesar do bom desempenho técnico, a baixa produtividade e o alto custo por metro cúbico removido comprometem sua aplicação em larga escala. Conclui-se que o caminhão sobre esteiras é viável apenas para operações específicas, como retomada pós-chuva e transporte em zonas críticas. Sua adoção como solução principal requer suporte técnico nacional, capacitação de equipes e análise econômica detalhada.

PALAVRAS-CHAVE: Descaracterização de barragens; rejeito saturado; trafegabilidade.

ABSTRACT: The decommissioning of upstream tailings presents significant operational challenges, particularly regarding equipment mobility over saturated tailings. This study reports the results of field tests conducted with a rubber-tracked truck at a mine site in Minas Gerais, Brazil. The equipment was evaluated under two scenarios: (i) manned operation over uncompacted tailings and (ii) manned and unmanned operation on a compacted test track. The tests assessed indicators such as mobility, productivity, physical availability, and maneuvering time. The tracked truck demonstrated the ability to operate on materials with up to 44% moisture content over compacted subgrade, significantly outperforming conventional trucks, which are limited to 15%. The unmanned operation showed better performance, with increased maneuverability and command responsiveness, although safety and remote cockpit integration still require improvements. Despite its technical capabilities, the equipment's low productivity and high cost per cubic meter removed limit its feasibility for large-scale operations. It is concluded that the tracked truck is technically suitable for specific tasks, such as post-rain recovery, sump cleaning, and transport in high-risk areas. However, its adoption as a primary solution requires national technical support, workforce training, and a detailed cost-benefit analysis.

KEYWORDS: Dam decharacterization; saturated tailings; mobility.

1 INTRODUÇÃO

A descaracterização de barragens de rejeitos de minério de ferro impõe desafios significativos, especialmente quanto à trafegabilidade de equipamentos sobre materiais saturados, com baixa capacidade de suporte e elevada umidade. Para viabilizar a remoção de material nessas condições, recorre-se com frequência à execução de aterros de conquista, com consequente aumento de custo, prazo e interferências operacionais. Como alternativa, caminhões sobre esteiras de borracha, que possuem baixa pressão de contato com a superfície de tráfego, tornam-se uma opção para atividades de apoio em frentes de descaracterização.

Com o objetivo de validar parâmetros operacionais e limites de emprego de um caminhão sobre esteiras em ambientes representativos de obras de descaracterização, foram conduzidos testes de campo em uma mina localizada em Barão de Cocais (MG). O plano contemplou duas etapas de até 100 h cada: a primeira, tripulada, em área de cava, com apoio à disposição de rejeitos e execução de drenos; e a segunda em pista experimental preparada para avaliar trafegabilidade em diferentes condições de umidade e espessura de camada, alternando operação tripulada e não tripulada. A coleta sistemática de dados diários buscou monitorar trafegabilidade, estabilidade, comportamento estrutural e eficiência operacional em solo saturado e de baixa capacidade de suporte.

Este artigo busca contextualizar e discutir o desempenho do caminhão sobre esteiras em solos com alta umidade e baixa capacidade de suporte, apresentando implicações práticas para planejamento de acesso, gestão do risco de atolamento, configuração de camadas de apoio e integração de modos tripulado e não tripulado, com vistas a ampliar janelas operacionais em ambientes críticos.

2 METODOLOGIA

2.1 Características do Equipamento

A Tabela 1 apresenta as características técnicas do caminhão sobre esteiras utilizado nos testes de campo.

Tabela 1. Características Técnicas do Caminhão sobre Esteiras

Categoria	Descrição
Ambiente de Trabalho	Regiões úmidas, bosques, campos e canteiro de obras
Superfície de Trabalho	Lama seca / molhada e neve
Comprimento Total	8.141 mm
Largura	2.980 mm
Altura	2.869 mm
Distância do Solo	502 mm
Peso Operacional	18.397kg
Carga Útil	15.195kg
Velocidade Máxima	13km/h
Motor	300Hp Tier 4
Sistema de Tração	Hidrostático - Esteira de Borracha
Pressão Média no Solo Carregado	0,5 kg/cm²
Inclinação de Trabalho Máxima - Longitudinal	31°
Inclinação de Trabalho Máxima - Lateral	22°

2.2 Fluxograma de Testes

Conforme sintetizado na Figura 1, a metodologia do estudo foi estruturada em um fluxo sequencial que inicia com a definição do procedimento operacional específico, acordado previamente para padronizar variáveis, critérios de medição e formas de registro. Em seguida, estabeleceu-se uma rotina de coleta de dados pela equipe de campo para as Etapas 01 e 02, contemplando indicadores de desempenho operacional (tempos

de carregamento, deslocamento carregado e vazio, manobras, ciclos por hora e produtividade) e as condições de trafegabilidade (teor de umidade do material, condição de suporte/compactação da base e espessura das camadas). Em ambas as fases, a distância média de transporte (DMT) de referência foi estabelecida conforme critérios contratuais, a fim de permitir comparações diretas com equipamentos da frota em operação.

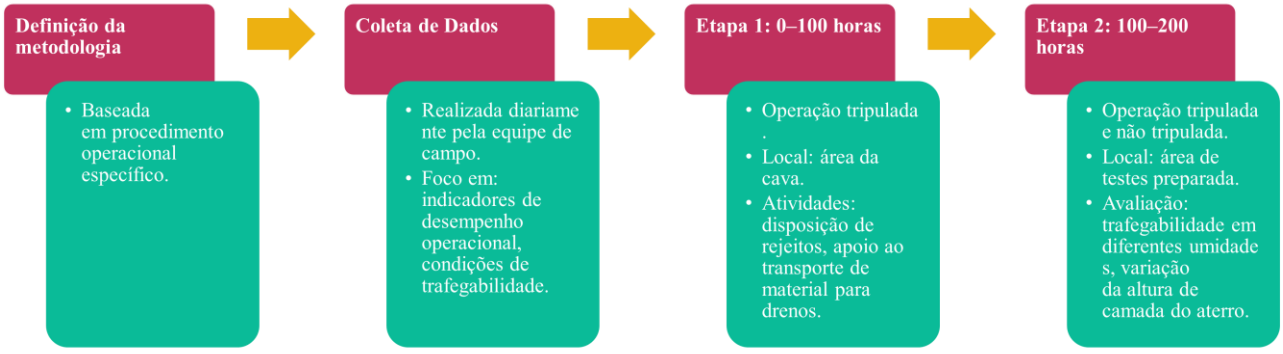


Figura 1. Etapas da Metodologia Adotada

2.3 Coleta de Dados

A coleta foi diária, realizada pela equipe de campo, usando formulários de apontamento operacional, checklists e relatórios de turno previstos nos anexos dos documentos-base. Para cada turno/ensaio registraram-se: (i) condições ambientais (chuva, temperatura, incidência de água livre); (ii) umidade do rejeito (ensaiada/estimada conforme procedimento local); (iii) condição de base e espessura de camada; (iv) tempos de carregamento, deslocamento (carregado e vazio) e manobra; (v) ciclos/hora e volume transportado; (vi) ocorrências (atolamentos, reboques, alarmes); (vii) paradas e suas causas para cálculo de DF.

Os dados foram consolidados por fase e normalizados para o DMT de referência, permitindo comparação direta entre as condições ensaiadas e com os benchmarks da frota atual. Para cada combinação de condição de base × faixa de umidade × modo de operação, calcularam-se médias e dispersões (p.ex., desvio-padrão) de produtividade, ciclos/h, tempos médios e DF. Registros com interrupções extraordinárias (p. ex., paradas por causas alheias ao equipamento, bloqueios de via, incidentes externos) foram marcados e analisados em separado para não enviesar as métricas de desempenho intrínseco. Os limiares de trafegabilidade foram estabelecidos como a maior faixa de umidade em que o caminhão sobre esteiras completou ciclos sucessivos sem ocorrência de atolamento e com aderência/manobra dentro dos padrões de segurança.

2.4 Testes em Campo – Etapas 01 e 02

A Etapa 1 foi executada em ambiente operacional real, com operação tripulada na área da cava, e teve como foco o apoio direto à disposição de rejeitos e ao transporte de material para execução de drenos. Nessa fase, o caminhão sobre esteiras trafegou sobre rejeito sem controle de compactação, reproduzindo as restrições típicas de frentes de descaracterização: elevada umidade, baixa capacidade de suporte e variabilidade espacial do terreno. O método permitiu observar, em escala operacional, a trafegabilidade, a aderência e a estabilidade em manobras em setores onde caminhões rodoviários usualmente não trafegam, além de mapear o risco de atolamento em diferentes condições de umidade natural. Sempre que necessário, procedeu-se a umectação pontual para explorar limites operacionais de trafegabilidade, mantendo os registros diários de tempos de ciclo (carregado e vazio), tempos de manobra, ciclos por hora, volumes transportados e ocorrências. Por se tratar de cenário real, a fase esteve sujeita a interferências operacionais (formação de filas, tráfego cruzado e janelas de espera), as quais foram registradas para posterior tratamento analítico a fim de não enviesar as métricas de desempenho do equipamento.



Figura 2. Área dos Testes Fase 1

A Etapa 2 foi conduzida em pista de testes preparada, com base previamente compactada e aplicação de camadas de rejeito com espessura ajustável (até 90 cm), de modo a modular de forma controlada as variáveis críticas. Alternaram-se operação tripulada e não tripulada (controle remoto em linha de visada), mantendo-se o protocolo de registro de dados da Etapa 1 para garantir comparabilidade. O teor de umidade foi elevado progressivamente mediante umectação por meio do uso de caminhão-pipa, e os percursos de deslocamento, pontos de manobra e DMT de referência foram padronizados para isolar o efeito da rigidez de apoio e da espessura de camada nos resultados de trafegabilidade, aderência e produtividade. A operação remota foi avaliada quanto à resposta aos comandos, eventuais latências e requisitos de segurança, registrando-se as condições em que o posicionamento à distância trouxe ganhos de precisão em manobras e redução de exposição do operador.



Figura 3. Área dos Testes Fase 2

2.5 Indicadores de Desempenho

Os indicadores de desempenho contemplaram:

- Trafegabilidade: capacidade de deslocamento sem atolar dentro de uma faixa de umidade e condição de base definida, incluindo aderência em aceleração/frenagem e capacidade de giro/manobra.
- Produtividade (m³/h): obtida a partir de ciclos por hora, tempo de manobra, velocidade média (carregado e vazio), capacidade útil e fator de carga; os valores foram normalizados para o DMT de referência.
- Disponibilidade física (DF, %): tempo disponível/tempo total programado, computando-se paradas para ajustes, manutenções e intervenções corretivas.
- Segurança operacional: registros de eventos de risco e conformidade com procedimentos.

- Manutenibilidade: tempo e recursos necessários para intervenções, ajustes e troca de componentes.

As métricas do caminhão sobre esteiras foram comparadas a equipamentos de referência da frota (caminhões rodoviários e articulados) operando com DMT e premissas contratuais equivalentes. Esses comparativos foram limitados às métricas objetivas (m³/h, tempo de manobra, ciclos/h) e às condições de contorno documentadas, evitando extrapolações fora do escopo dos testes.

3 RESULTADOS

Os resultados obtidos ao longo das duas etapas de ensaio demonstram que o desempenho do caminhão sobre esteiras é condicionado pela capacidade de suporte da base e pelo teor de umidade do material. Na Etapa 1, realizada em ambiente operacional real sobre rejeito sem controle de compactação, observou-se que a trafegabilidade se manteve estável até valores próximos de 25% de teor de umidade. Acima desse valor, houve registro de episódios de atolamento e perda de tração, o que caracterizou o limiar operacional para a condição se manteve preparada. Na Etapa 2, conduzida em pista de testes com base previamente compactada e camada de rejeito ajustada até 90cm, o equipamento preservou aderência e capacidade de manobra em teores de umidade próximos de 44%.

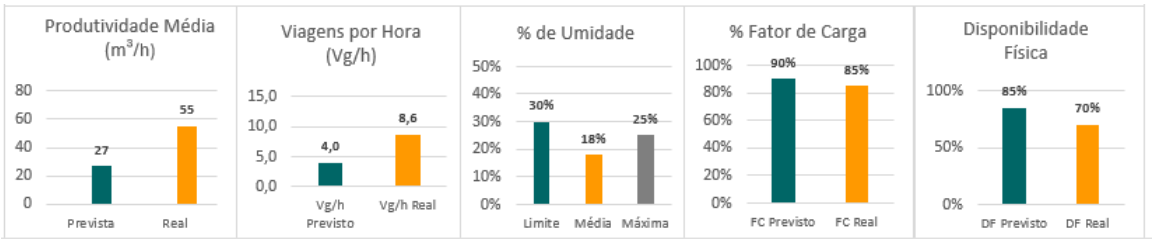


Figura 4. Resultados da Etapa 1 (não tripulado)

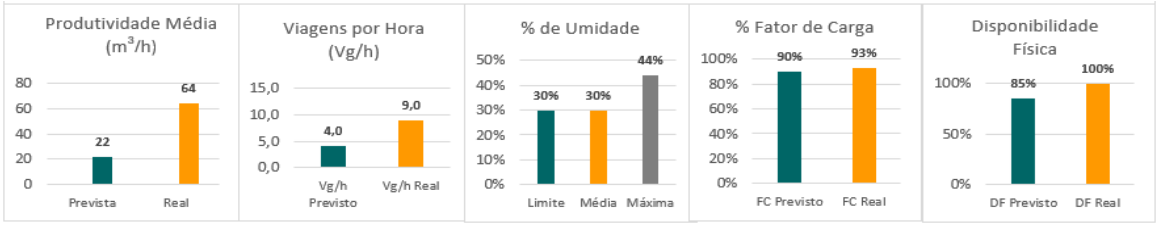


Figura 5. Resultados da Etapa 2 (tripulado)

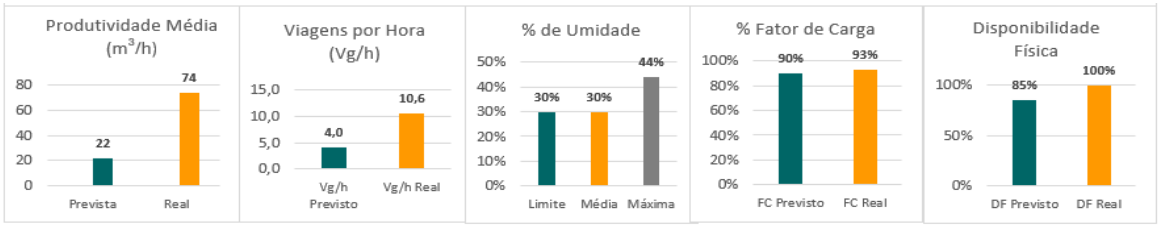


Figura 6. Resultados da Etapa 2 (não tripulado)

A comparação direta entre as etapas evidencia que a melhoria da capacidade de suporte da pista amplia a janela de operação para maiores teores de umidade e reduz a suscetibilidade ao atolamento. Em termos comparativos com a frota convencional, os registros de campo indicam que caminhões rodoviários não tripulados usualmente encontram limite de trafegabilidade em torno de 15% de teor de umidade, enquanto caminhões articulados operam até cerca de 23%. Dessa forma, o caminhão sobre esteiras expandiu os limites de operação em relação ao teor de umidade, tanto na condição de base não compactada quanto na condição

com base compactada, confirmando o efeito da baixa pressão de contato do sistema de esteiras na redução de tensões transmitidas à pista de tráfego.

O desempenho operacional refletiu a mesma sensibilidade às condições de contorno. Em cenário de testes com interferências minimizadas e frentes segregadas, foram observadas produtividades elevadas, situadas de 55 a 74 m³/h, sustentadas por tempos de manobra curtos e boa repetibilidade de ciclos. Quando os resultados são transpostos para a realidade operacional com formação de filas, interações entre equipamentos e redução de velocidade média, a produtividade consolidada cai para valores próximos de 30,6 m³/h, mantendo o percurso de referência. Essas perdas estão associadas ao aumento do tempo de ciclo em função de esperas, cruzamentos e necessidade de reposicionamentos. A análise de séries operacionais apontou produtividade média de 24 m³/h. Ainda que a capacidade de carga do caminhão sobre esteiras seja inferior à dos caminhões rodoviários e articulados, o tempo de manobra reduzido e a possibilidade de manter deslocamentos em vias de menor preparo contribuíram para elevar o número de ciclos por hora. Foram registrados tempos médios de manobra próximos de 45 segundos e velocidades médias próximas de 10 km/h na combinação carregado e vazio, resultando em aproximadamente 3,6 ciclos por hora nos ensaios controlados.

A disponibilidade física medida na fase inicial de operação atingiu 70%. Esse valor foi impactado por intervenções decorrentes de um deslocamento de esteira e pela necessidade de desenvolver e validar procedimento seguro de manutenção para um equipamento com características distintas da frota atual. À medida que os procedimentos foram consolidados e as equipes ganharam familiaridade, observou-se redução do tempo de intervenção, embora a amostragem de horas ainda não permita afirmar que o indicador esteja estabilizado. Devido ao fato de o equipamento ser importado, é necessário criar um estoque estratégico de componentes e capacitação específica, o que influencia diretamente o tempo de retorno após falhas.

Tabela 2. Comparação entre Caminhões da Frota

Atividade	Unidade	Caminhão Basculante 6x4	Caminhão sobre Esteiras - Fase 1	Caminhão sobre Esteiras - Fase 2
DMT	km	0,70	0,70	0,35
Velocidade Ida	km/h	10	10	10
Velocidade Volta	km/h	10	10	10
Tempo Rodagem	min	8,4	8,4	4,2
Capacidade CB	t	25,0	15,0	15,0
Densidade in-situ Rejeito	t/m³	2,0	2,0	2,0
Utilização EQ	%	90,0	90,0	90,0
Capacidade	m³	11	7	7
Produtividade de Carga	m³/h	100	100	100
Tempo Manobra	min	1	1	1
Tempo Espera	min	3	3	3
Carga	min	7	3	3
Tempo Descarga	min	2	1	1
Tempo Ciclo	min	22,2	17,5	13,3
Ciclos/hora	unid.	2,7	3,4	4,5
Produtividade	m³/h	30,5	23,2	30,6

A avaliação da operação remota trouxe resultados consistentes quanto à resposta do equipamento aos comandos e à precisão de posicionamento para carregamento e descarga. Em pista preparada, a alternância entre modo tripulado e não tripulado mostrou ganhos de fluidez nas manobras, principalmente pela possibilidade de o operador escolher pontos de observação que reduzem os efeitos de pontos cegos característicos de máquinas sobre esteiras. Não foram registradas falhas relevantes de comunicação durante os ciclos monitorados. Ainda assim, a ausência de alguns recursos de segurança foi registrada como requisito a ser atendido para adoção ampla em frentes operacionais, com destaque para a partida remota integrada a cockpit, em casos de operação não tripulada, e soluções de monitoramento que permitam alertas em tempo real de risco de tombamento lateral em terrenos com ressaltos e facões. Em condições saturadas, o comportamento em curvas mostrou-se favorável, com deslizamento controlado das esteiras. Em material mais

seco houve incremento da resistência ao giro, o que demandou condução mais progressiva para evitar esforço excessivo.

A análise integrada das 2 etapas confirma que o ganho de desempenho do caminhão sobre esteiras está associado à conformação da base e ao controle da umidade do material de apoio. Quando o rejeito é lançado sobre base compactada e a espessura de camada é mantida dentro do intervalo ensaiado, a janela de trafegabilidade aumenta de modo expressivo e a variabilidade do tempo de ciclo diminui. Quando a operação ocorre sobre rejeito sem controle de compactação, o risco de atolamento se torna o fator limitante. A convergência entre esses achados e as medições consolidadas no business case reforça a leitura de que o equipamento é tecnicamente apto a operar em áreas críticas de alta saturação e baixa capacidade de suporte, mas apresenta produtividade média inferior às opções convencionais quando submetido ao conjunto completo de restrições operacionais e sazonais.

4 CONCLUSÃO

Com base nos testes operacionais realizados, pode-se concluir que o equipamento apresentou um bom desempenho operacional em áreas com baixa capacidade de suporte e elevada umidade, proporcionando viabilidade de operação em condições em que caminhões rodoviários convencionais não trafegam.

Para aplicação como equipamento de produção, faz-se necessária a realização de uma análise de viabilidade econômica da operação em escala. Isso se deve ao fato de que seu custo de aquisição é significativamente superior ao de caminhões convencionais. Embora o equipamento proporcione vantagens operacionais, como a redução da necessidade de execução de aterros de conquista, sua menor produtividade compromete a produção líquida final, o que pode inviabilizar economicamente sua utilização.

O motor a combustão, homologado na norma de emissões Tier 4 (EPA), representa um avanço tecnológico em relação às normas atualmente vigentes no Brasil. No entanto, essa característica impõe desafios adicionais à operação e manutenção, tendo em vista a necessidade de suporte técnico especializado, e a obrigatoriedade de procedimentos específicos para intervenções no sistema de pós-tratamento de gases.

Em relação ao aspecto de manutenção, ressalta-se a importância da capacitação técnica da equipe local, visando a execução adequada das manutenções preventivas e corretivas, sendo necessário a formação de um estoque estratégico de peças de reposição, com foco na mitigação de riscos relacionados à indisponibilidade prolongada.

Por fim, conclui-se que a sua aplicação nas atividades de descaracterização de barragens mostrou-se limitada a serviços auxiliares e de apoio, não contemplando diretamente as operações de remoção de rejeito. Em função de seu alto custo de investimento, além da necessidade de estruturação de recursos adicionais para assegurar sua performance e eficiência, recomenda-se análise de viabilidade abrangente antes de considerar o uso desse tipo de equipamento em cenários semelhantes aos testados no escopo desse estudo.