v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

INFRAESTRUTURA, TEMPO DE CICLO E FILAS NO TRANSPORTE POR CAMINHÕES DE 70 t EM MINA DE MINÉRIO DE FERRO

INFRASTRUCTURE, CYCLE TIME AND QUEUES IN 70-t TRUCK HAULAGE IN AN IRON ORE MINE

INFRAESTRUCTURA, TIEMPO DE CICLO Y COLAS EN EL TRANSPORTE CON CAMIONES DE 70 t EN UNA MINA DE HIERRO

Ramon da Silva Gomes[1], Leandro de Vilhena Costa[2]

e7119567
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9567

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

O transporte por caminhões concentra a maior parcela do custo operacional em minas a céu aberto. Este trabalho avalia os tempos do ciclo e a produtividade de uma frota de caminhões rígidos de 70 t em uma mina de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero (MG), antes e depois de intervenções implantadas até abril de 2026: segregação dos acessos em relação às vias da comunidade, adequação de acessos e praças, premissas geométricas para caminhões *wide-body*, telemetria e plano para o período chuvoso. Foram analisados 46.267 ciclos do sistema de despacho, com regressão com efeito fixo de rota. Nas mesmas rotas, o carregamento caiu 21,6%, associado principalmente a escavadeiras de maior porte, e as manobras, cerca de 55%, reduzindo em 9,5% o ciclo sem filas. As filas, porém, aumentaram 2,8 minutos por ciclo com a expansão da frota, e a produtividade por caminhão permaneceu estável. O fator de compatibilidade abaixo de 1 em todos os meses indica que as filas se associam à sincronização entre carga e transporte, e não à falta de capacidade de carga. Eliminar esse acréscimo representaria um potencial teórico de 11,6% de produtividade.

PALAVRAS-CHAVE: Vias de transporte. Tempo de ciclo. Filas. Fator de compatibilidade. Planejamento de lavra.

ABSTRACT

Truck haulage accounts for the largest share of operating costs in open-pit mines. This study evaluates cycle times and productivity of a fleet of 70-t rigid trucks in an iron ore mine in the Iron Quadrangle, Brazil, before and after interventions completed by April 2026: segregation of mine roads from community roads, upgrading of roads and working areas, geometric design criteria for wide-body trucks, telemetry and a rainy-season plan. A total of 46,267 dispatch cycles were analysed using regression with route fixed effects. On the same routes, loading time fell by 21.6%, mainly associated with larger excavators, and manoeuvring times by about 55%, reducing the cycle time excluding queues by 9.5%. Queues, however, increased by 2.8 minutes per cycle as the fleet expanded, and productivity per truck remained stable. A match factor below 1 in every month indicates that queues are associated with loading–hauling synchronisation rather than lack of loading capacity. Removing the additional queuing would represent a theoretical productivity potential of 11.6%.

KEYWORDS: Haul roads. Cycle time. Queues. Match factor. Mine planning.

[1] Engenheiro de Produção, especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho e especializando em Lavra e Planejamento de Mina pela Universidade Federal de Catalão (UFCat), com atuação em operações de mina a céu aberto.
[2] Doutor em Engenharia Mineral pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e professor da Universidade Federal de Catalão (UFCat) na área de Lavra e Planejamento de Mina.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

RESUMEN
El transporte con camiones concentra la mayor parte del costo operativo en minas a cielo abierto. Este trabajo evalúa los tiempos del ciclo y la productividad de una flota de camiones rígidos de 70 t en una mina de hierro del Cuadrilátero Ferrífero, Brasil, antes y después de intervenciones implementadas hasta abril de 2026: segregación de los accesos respecto de las vías de la comunidad, adecuación de accesos y áreas de trabajo, criterios geométricos para camiones wide-body, telemetría y plan para la temporada de lluvias. Se analizaron 46.267 ciclos del sistema de despacho mediante regresión con efecto fijo de ruta. En las mismas rutas, el carguío se redujo un 21,6%, asociado principalmente a excavadoras de mayor tamaño, y las maniobras cerca de un 55%, con una reducción del 9,5% del ciclo sin colas. Sin embargo, las colas aumentaron 2,8 minutos por ciclo con la expansión de la flota, y la productividad por camión se mantuvo estable. Un factor de compatibilidad inferior a 1 en todos los meses indica que las colas se asocian a la sincronización entre carguío y transporte y no a la falta de capacidad de carguío. Eliminar ese aumento representaría un potencial teórico del 11,6% de productividad.

PALABRAS CLAVE: *Vías de acarreo. Tiempo de ciclo. Colas. Factor de compatibilidad. Planificación minera.*

INTRODUÇÃO

Na operação analisada, decidiu-se mobilizar caminhões com capacidade de transporte de 70 t em razão da implantação de uma nova planta de beneficiamento, cuja demanda de alimentação pode chegar a 2.100 t/h. Preparar uma mina para operar com frota de grande porte exige considerar, no planejamento de lavra, aberturas maiores, acessos com largura conforme a norma e praças de carregamento e de basculamento com raio de manobra adequado e espaço operacional que suporte o volume de movimentação previsto para o período e o porte dos equipamentos de transporte, visando ganho de produtividade e segurança operacional.

A mobilização dessa frota teve início em janeiro de 2026 e, no decorrer da operação, observou-se a necessidade de realizar adequações na mina para suportar esse porte de equipamento. Avaliar os efeitos dessa transição sobre o ciclo e a produtividade permite orientar decisões de infraestrutura e de dimensionamento da frota.

Em minas a céu aberto, o transporte por caminhões responde por cerca de 50% do custo operacional (ALARIE; GAMACHE, 2002) e limita o ritmo de lavra (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013). Sua produtividade depende do equipamento e também da geometria e da condição das vias, do dimensionamento das praças, da compatibilidade entre carga e transporte e da gestão da frota (THOMPSON; PERONI; VISSER, 2019).

O deslocamento é governado pela resistência total ao movimento, soma da inclinação da rampa e da resistência ao rolamento (KAUFMAN; AULT, 1977; TANNANT; REGENSBURG, 2001); os tempos fixos dependem do porte das escavadeiras e das praças; e as filas, do equilíbrio

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

entre carga e transporte (BURT; CACCETTA, 2014). Como ganhos em uma parcela podem ser anulados por perdas em outra, o ciclo deve ser analisado de forma decomposta.

Somam-se a isso o período chuvoso do Quadrilátero Ferrífero, que degrada as vias e impõe paradas (BENEVENUTI; PERONI, 2021), e a obrigação de separar o tráfego de caminhões fora de estrada das vias públicas. Sistemas de despacho e telemetria permitem medir essas parcelas (OLIVEIRA; FONTES; FELSCH JUNIOR, 2023).

Diante disso, o problema que orienta este trabalho é: a infraestrutura existente na operação teria condições de suportar equipamentos de dimensões superiores às dos que operavam no local? Acrescem-se ainda os impactos da interação com a comunidade, que reduzem a velocidade média em trechos por onde passa grande parte das viagens de estéril e de minério bruto (*run-of-mine*, ROM): nesses pontos, a velocidade é limitada a 10 km/h em dois trechos de 0,3 km cada (o túnel e a travessia da via da comunidade), o que quebra o ciclo e forma uma espécie de transporte em bateladas.

Nessa linha, este trabalho tem como objetivo geral avaliar os tempos que compõem o ciclo e a produtividade de uma frota de caminhões rígidos de 70 t em uma mina de minério de ferro, antes e depois de um conjunto de intervenções no planejamento de lavra e na infraestrutura da mina. Como objetivos específicos, buscou-se: (i) decompor o ciclo em seus componentes nas mesmas rotas; (ii) separar o efeito da mudança nos equipamentos de carga; (iii) avaliar as filas por meio do fator de compatibilidade; e (iv) descrever a associação entre precipitação e desempenho da frota.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Vias de transporte e velocidade

A velocidade em rampa é limitada pela força de tração frente à resistência total ao movimento, soma da resistência ao rolamento e da resistência de rampa (Figura 1; Equações 1 e 2) (CATERPILLAR, 2019; TANNANT; REGENSBURG, 2001):

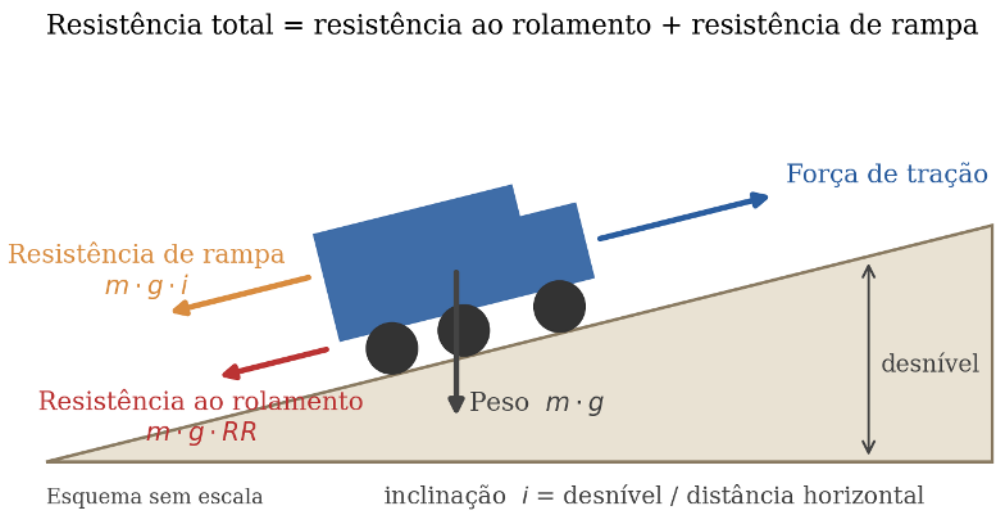
$$R_T = RR + i \quad (1)$$

$$F_R = m \cdot g \cdot (RR + i) \quad (2)$$

em que R_T é a resistência total (%), RR a resistência ao rolamento (%), i a inclinação (%), F_R a força resistente (N), m a massa bruta (kg) e g a aceleração da gravidade (m/s²).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Forças atuantes em um caminhão carregado em rampa ascendente



Fonte: elaborado pelos autores.

A resistência ao rolamento varia de 1,5% em superfícies duras a 20% em vias lamacentas (Tabela 1) (CATERPILLAR, [202-]); cada ponto percentual adicional equivale a uma rampa um ponto mais inclinada.

Tabela 1. Valores de referência de resistência ao rolamento por condição da via

Condição da via	Penetração do pneu	Resistência ao rolamento
Dura e lisa (concreto ou asfalto)	nenhuma	1,5%
Firme e lisa, com leve flexão sob carga	leve flexão	3,0%
Terra sulcada, manutenção leve	25 mm	4,0%
Terra sulcada, pouca manutenção	50 mm	5,0%
Terra mole e sulcada	100 mm	8,0%
Cascalho solto	150 mm ou mais	10,0%
Terra muito mole e sulcada	200 mm	14,0%
Lamacenta e muito sulcada	300 mm	20,0%

Fonte: adaptado de Caterpillar ([202-]). Valores para pneus diagonais; para pneus radiais, as duas primeiras condições têm 1,2% e 2,5%.

Estudos de campo quantificam o efeito da condição da via (Tabela 2 e Figura 2): Silva *et al.* (2024), em cinco vias de minas de ferro com caminhões de 240 t, e Shakenov *et al.* (2026), em trechos antes e depois da manutenção.

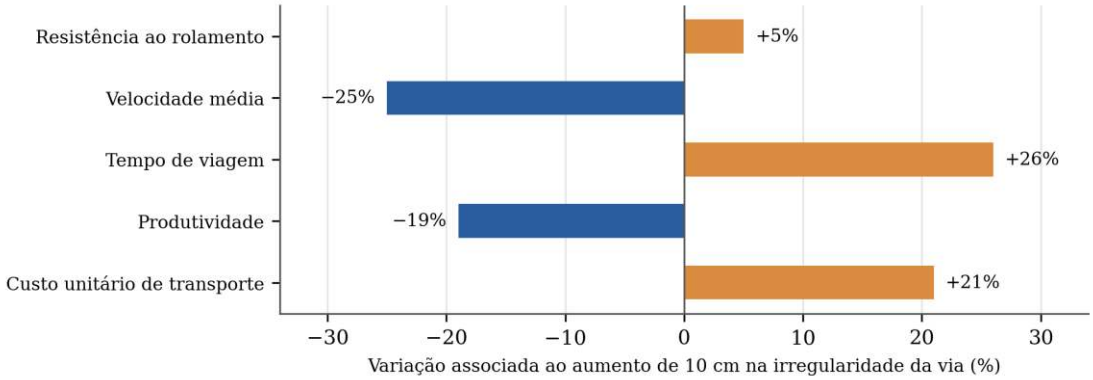
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Efeito da condição da via sobre o desempenho de caminhões, segundo a literatura

Estudo	Condição avaliada	Indicador	Variação
Silva *et al.* (2024)	Aumento de 10 cm na irregularidade da via	Resistência ao rolamento	até +5%
		Velocidade média	−25%
		Tempo de viagem	+26%
		Produtividade	−19%
		Custo unitário de transporte	+21%
Shakenov *et al.* (2026)	Após manutenção da via	Tempo de ciclo	−0,78 min
		Consumo de combustível	−10,6 L/ciclo

Fonte: elaborado pelos autores com dados de Silva *et al.* (2024) e Shakenov *et al.* (2026).

Figura 2. Variações associadas ao aumento de 10 cm na irregularidade da via em minas de ferro



Fonte: elaborado pelos autores com dados de Silva *et al.* (2024).

1.2. Parâmetros geométricos e requisitos normativos

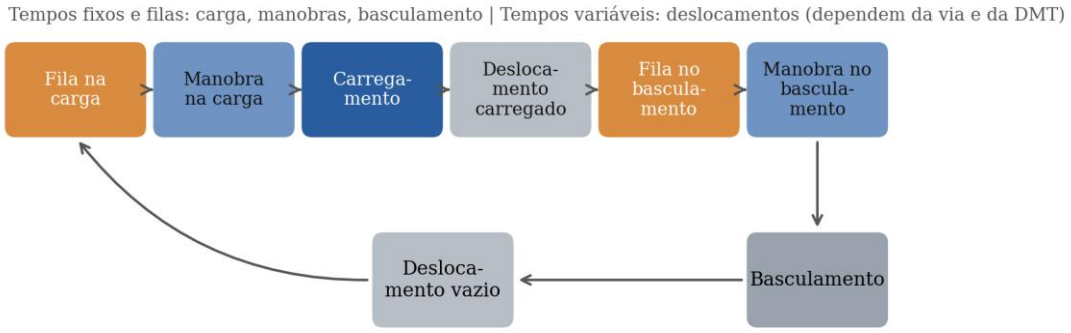
A NR-22 exige vias com largura mínima de duas vezes a do maior veículo em pista simples e três vezes em pista dupla, e leiras com altura de metade do diâmetro do maior pneu (BRASIL, 2026, item 22.7.6); a literatura recomenda ainda rampas constantes, raios amplos, superelevação e visibilidade compatível com a distância de parada (KAUFMAN; AULT, 1977; THOMPSON; PERONI; VISSER, 2019).

1.3. Ciclo de transporte, compatibilidade carga–transporte e filas

O ciclo compreende filas, manobras, carregamento, deslocamentos e basculamento (Figura 3); o carregamento depende da relação entre as capacidades da caçamba e do caminhão (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Etapas do ciclo de transporte analisadas



Fonte: elaborado pelos autores.

O equilíbrio entre carga e transporte é avaliado pelo fator de compatibilidade (*match factor*, MF), definido pela Equação 3 (BURT; CACCETTA, 2014):

$$MF = (N_c \cdot T_e) / (N_e \cdot T_c) \quad (3)$$

em que N_c é o número de caminhões, T_e o tempo de carregamento, N_e o número de escavadeiras e T_c o tempo de ciclo. MF inferior a 1 indica excesso de capacidade de carga e superior a 1, excesso de caminhões. Filas podem ocorrer mesmo com MF inferior a 1 quando há chegadas agrupadas ou indisponibilidade das escavadeiras (ERCELEBI; BASCETIN, 2009), e aumentos de frota sem sincronização tendem a elevá-las (MOHTASHAM *et al.*, 2021).

1.4. Telemetria, gestão da frota e riscos operacionais

Sistemas de despacho registram as etapas de cada ciclo (ALARIE; GAMACHE, 2002), e a telemetria monitora a condução, com ganhos de produtividade relatados por Oliveira, Fontes e Felsch Junior (2023); os riscos do período chuvoso podem ser geridos por matrizes de probabilidade e severidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018).

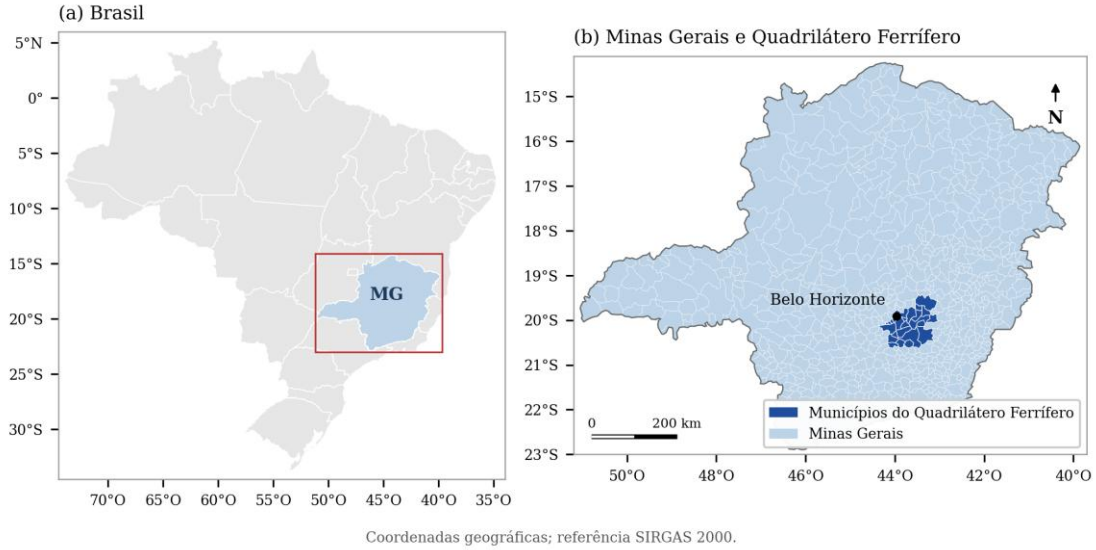
2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo, equipamentos e premissas geométricas

O estudo foi realizado em uma mina de minério de ferro a céu aberto na porção sul do Quadrilátero Ferrífero (Figura 4), com lavra por bancadas e transporte por caminhões. A empresa não é identificada, e origens e destinos são codificados.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 4. Localização do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais



Fonte: elaborado pelos autores com base na malha municipal do IBGE. Municípios do Quadrilátero Ferrífero em aproximação.

A frota é composta por caminhões rígidos *wide-body* 6×4 LGMG CMT106, de 530 hp (≈395 kW) e 70 t nominais (Figura 5), com peso vazio de 35 t, carga média apontada de 60 t e peso bruto de cerca de 95 t (5,6 hp/t). A média diária de caminhões em operação passou de 2,8 em fevereiro para 24,7 em setembro de 2026. O carregamento foi feito por escavadeiras de 35 t (CAT 336 e CAT 340), 75 t (CAT 374 e SANY 750) e 100 t (LGMG ME106) (Figura 6).

Figura 5. Caminhão rígido *wide-body* 6×4 CMT106 carregado em via de transporte



Fonte: acervo dos autores (2026).

Figura 6. Carregamento do CMT106 por escavadeira da classe de 75 t



Fonte: acervo dos autores (2026).

As premissas geométricas para a classe *wide-body* estão na Tabela 3.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 3. Premissas geométricas adotadas para caminhões *wide-body* 6×4

Parâmetro	Valor adotado
Carga nominal	60–75 t
Largura (espelho a espelho) / comprimento	4,6 m / 9,2 m
Rampa longitudinal máxima	8%
Velocidade de projeto	50 km/h (reta com leiras) / 40 km/h (demais)
Raio interno mínimo de curva	12 m, com sobrelargura
Inclinação transversal	2% (tangente) / 4% (curvas)
Largura de pista simples / dupla	9,2 m / 13,8 m
Largura de rampa (pista dupla + 2 leiras)	18,2 m
Leira (altura / base)	1,2 m / 2,2 m

Fonte: premissas da operação estudada, com base em BRASIL (2026) e Tannant e Regensburg (2001).

As premissas de dimensionamento para a produção com a frota de 70 t estimavam a produtividade e os tempos previstos para cada fase do ciclo, além das velocidades médias de deslocamento vazio e carregado. Outro fator importante para a produtividade é a carga média transportada por tipo de material, em razão da variação de densidade.

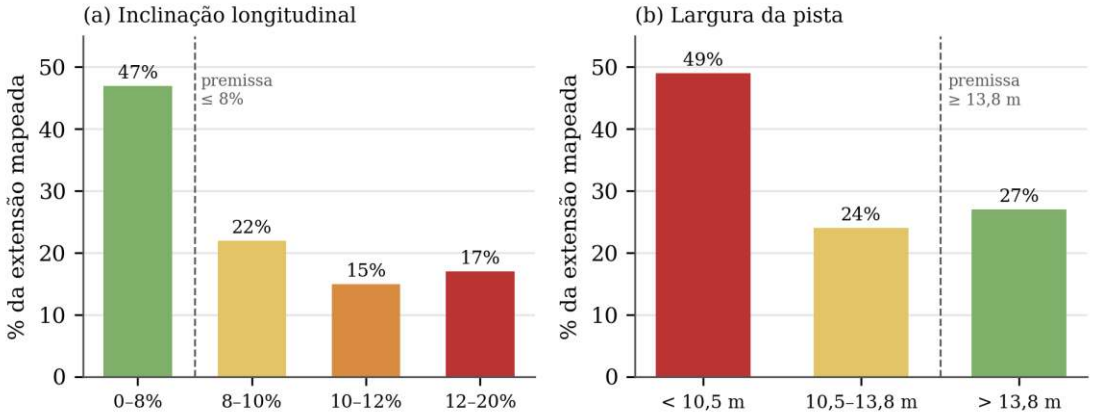
O dimensionamento da operação (maio de 2026) adotou carga média de 68 t para minério e 65 t para estéril, velocidades de 13,1 km/h carregado e 14,1 km/h vazio no período seco (fator 0,94 nos meses de transição), tempo fixo de 6,24 min e disponibilidade física de 80%, com ciclo calculado pela DMT e pela velocidade média, sem parcela de filas.

2.2. Condição das vias antes das intervenções e intervenções implantadas

A geometria das vias foi avaliada por levantamento por drone anterior às intervenções, com as faixas de inclinação e largura estimadas pelas cores dos mapas temáticos (Figura 7). Cerca de 53% da extensão tinha inclinação acima de 8%, e 73%, largura inferior a 13,8 m, mínimo para pista dupla.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

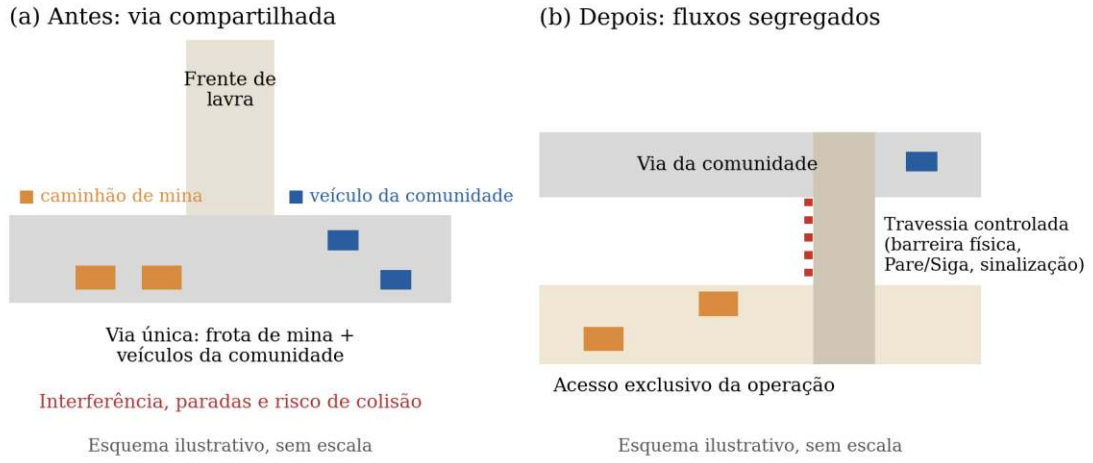
Figura 7. Distribuição da extensão mapeada dos acessos por faixa de (a) inclinação e (b) largura, antes das intervenções



Fonte: elaborado pelos autores a partir de levantamento por drone anterior às intervenções. Valores aproximados.

Como caminhões fora de estrada não podem circular em vias públicas, a operação exigiu a segregação de 100% dos acessos em relação às vias municipais, com travessia controlada por barreira física, sistema Pare/Siga e sinalização (Figura 8).

Figura 8. Esquema da segregação entre o tráfego da mina e o da comunidade: (a) antes; (b) depois



Fonte: elaborado pelos autores. Esquema ilustrativo, sem escala.

De janeiro a abril de 2026 foram realizados os trabalhos de segregação dos acessos em relação à comunidade. Nesse período, a frota ficou impedida de operar em alguns trechos, e foi

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

necessário operar com estoques intermediários de lavra, denominados transbordos: a movimentação ocorria em duas fases, a primeira da frente de lavra até o transbordo, com os caminhões de 70 t, e a segunda do transbordo até o destino final, com caminhões 8×4 de 42 t.

Até abril de 2026 foram implantadas: (i) a segregação dos acessos em relação às vias da comunidade; (ii) a adequação geométrica de acessos e praças, com redução de curvas, leiras centrais e melhoria de visibilidade; (iii) a formalização das premissas da Tabela 3, apresentadas ao planejamento, com as dimensões do equipamento, para a adequação dos acessos; (iv) a readequação da sinalização das vias, com indicação da velocidade e da marcha permitidas para o equipamento; (v) o monitoramento por telemetria, com sala de monitoramento em tempo real, *rankings*, *feedback* e reconhecimento dos operadores; (vi) a elaboração e execução de um plano de drenagem da mina, em março e abril de 2026; e (vii) o plano operacional para o período chuvoso, com matriz de risco, critérios de parada e protocolo de retomada.

As rampas acima de 8% não foram readequadas no período. Houve ainda expansão da frota e mudança nas escavadeiras, consideradas na análise.

2.3. Base de dados e tratamento

Foram usados os ciclos do sistema de despacho de fevereiro a setembro de 2026, excluindo-se ciclos deletados e aqueles com ciclo fora de 5 a 120 min, DMT fora de 0,1 a 9 km, velocidades fora de 3 a 60 km/h ou massa inferior a 50 t. No período posterior, excluíram-se os ciclos das escavadeiras de 35 t, por serem equipamentos de carga compatíveis com caminhões 8×4 de 42 t. A base final reuniu 46.267 ciclos, com massa apontada de forma nominal (58, 60 ou 65 t por material), sem pesagem.

Até abril, apenas cerca de um terço dos ciclos tinha manobras e filas registradas separadamente; a partir de maio, mais de 89%, coincidindo com a reciclagem dos motoristas e operadores para a realização correta dos apontamentos, com o objetivo de reduzir os erros e identificar oportunidades de melhoria operacional. Por isso, as análises por componente usaram apenas ciclos com segmentação completa. Os ciclos editados (18% a 24%) foram mantidos, pois as edições ocorrem quando há apontamento incorreto de material ou de destino, e as estimativas foram repetidas sem eles.

2.4. Indicadores e análise estatística

Os períodos foram: anterior (fevereiro e março), transição (abril) e posterior (maio a setembro). A comparação foi restrita às oito rotas com ao menos 30 ciclos em ambos os períodos, com modelos de mínimos quadrados com variável indicadora do período posterior e efeito fixo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de rota, tempos e velocidades em logaritmo (efeito = $e^{\beta} - 1$), filas e manobras em minutos, e erros-padrão agrupados por dia. O carregamento foi também estimado com efeito fixo de escavadeira.

A produtividade por caminhão e o potencial associado às filas foram calculados pelas Equações 4 e 5:

$$P = (60 \cdot Q) / T_c \quad (4)$$

$$\Delta P = T_{c,depois} / (T_{c,depois} - F_{depois} + F_{antes}) - 1 \quad (5)$$

em que Q é a carga (t), T_c o ciclo e F as filas (min). O MF foi calculado por dia, com N_e igual ao número efetivo de escavadeiras dedicadas à frota. Os dias de setembro foram classificados em secos (≤1 mm), com chuva moderada (1–10 mm) e intensa (>10 mm), e a perda foi estimada pela Equação 6:

$$\text{Perda} = \Sigma\, n_k \cdot (M_{seco} - M_k) \quad (6)$$

em que n_k é o número de dias da classe k e M a massa média diária. A velocidade limitada por potência foi estimada pela Equação 7, com $\eta = 0{,}80$ e P_m a potência do motor (W):

$$v = (3{,}6 \cdot \eta \cdot P_m) / [m \cdot g \cdot (i + RR)] \quad (7)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Equipamentos de carga e tempo de carregamento

No período anterior, a escavadeira de 35 t respondia por 36% dos carregamentos; no posterior, a de 100 t, por 45%, com o menor tempo entre as classes (Tabela 4). Controlando-se a classe de escavadeira, a redução do carregamento cai para 6,2% e deixa de ser significativa (Tabela 5): a maior parte da redução está associada ao porte das escavadeiras.

A entrada da escavadeira de 100 t foi percebida positivamente na operação, com redução dos tempos de ciclo e aumento do poder de escavação. Nos dados, o ganho aparece no carregamento, mas não no ciclo total, em razão das filas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 4. Participação e tempo médio de carregamento por escavadeira

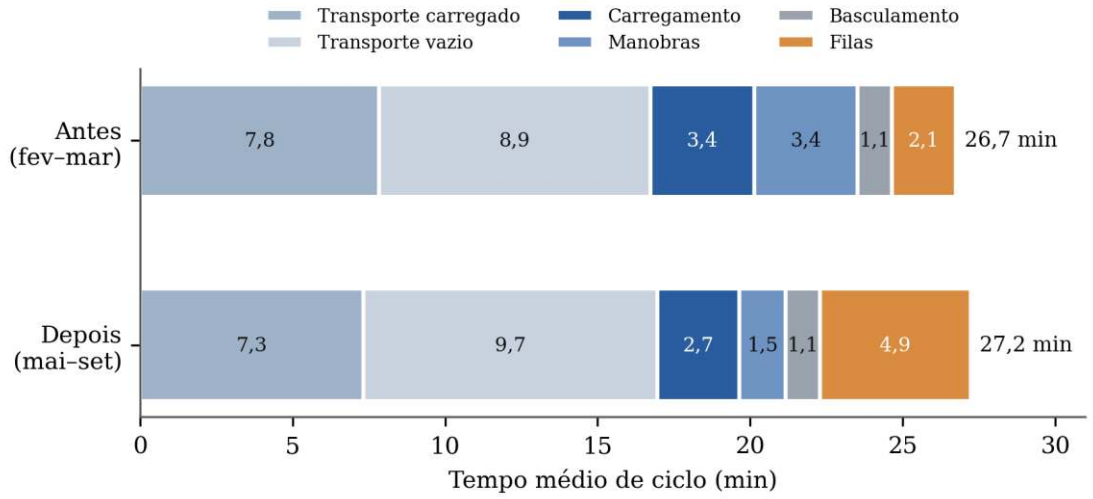
Escavadeira (classe)	Participação antes	Participação depois	Carregamento antes (min)	Carregamento depois (min)
CAT 336 (35 t)	36%	–	4,22	–
CAT 374 (75 t)	33%	35%	2,55	2,48
SANY 750 (75 t)	28%	20%	3,26	2,84
LGMG ME106 (100 t)	–	45%	–	2,11
Média da frota	–	–	3,36	2,41

Fonte: elaborado pelos autores com dados do sistema de despacho (2026). Participações em relação ao total de carregamentos; outros equipamentos (<4%) foram omitidos da tabela, de modo que as participações do período anterior somam 97%. A média da frota considera todos os equipamentos.

3.2. Decomposição do ciclo nas mesmas rotas

Nas oito rotas comuns (1.560 ciclos antes e 6.885 depois), as manobras passaram de 3,4 para 1,5 min e o carregamento de 3,4 para 2,7 min, reduzindo o ciclo sem filas de 24,6 para 22,3 min (−9,5%), enquanto as filas subiram de 2,1 para 4,9 min, mantendo o ciclo total estável (Figura 9).

Figura 9. Composição do tempo médio de ciclo nas mesmas rotas, antes e depois das intervenções



Fonte: elaborado pelos autores com dados do sistema de despacho (2026).

Nos modelos com efeito fixo de rota (Tabela 5), as reduções do ciclo sem filas (−11,8%) e das manobras (−1,7 min) e o aumento das filas (+3,0 min) foram significativos ($p < 0,001$); ciclo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

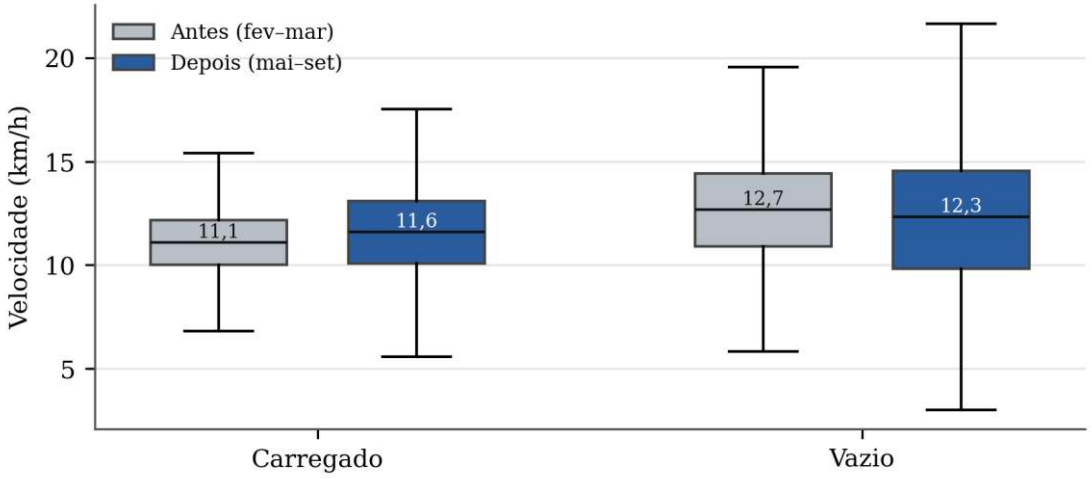
total, produtividade e velocidade do caminhão carregado não variaram, e a velocidade do caminhão vazio caiu 6,1% (Figura 10). Sem os ciclos editados, os resultados se mantiveram.

Tabela 5. Efeito do período posterior nos indicadores do ciclo (modelos com efeito fixo de rota)

Indicador	β	Efeito	IC 95%	p-valor	n
Carregamento (todas as escavadeiras)	−0,259	−22,8%	−29,9 a −14,9%	<0,001	11.689
Carregamento (CAT 374 e SANY, controle de escavadeira)	−0,064	−6,2%	−13,9 a +2,2%	0,143	8.674
Ciclo total	−0,002	−0,2%	−4,7 a +4,5%	0,932	11.689
Produtividade por hora de ciclo	−0,015	−1,5%	−6,0 a +3,2%	0,535	11.689
Ciclo sem filas*	−0,126	−11,8%	−15,3 a −8,2%	<0,001	8.445
Filas*	+3,01	+3,0 min	+2,4 a +3,6 min	<0,001	8.445
Manobras*	−1,68	−1,7 min	−1,9 a −1,4 min	<0,001	8.445
Velocidade do caminhão carregado*	−0,001	−0,1%	−2,5 a +2,5%	0,964	8.445
Velocidade do caminhão vazio*	−0,063	−6,1%	−9,0 a −3,1%	<0,001	8.445

Fonte: elaborado pelos autores. Erros-padrão agrupados por dia de produção (117 a 140 dias). *Somente ciclos com segmentação completa. Efeito = $e^{\beta} - 1$ para modelos em logaritmo; β em minutos para filas e manobras.

Figura 10. Distribuição das velocidades médias por ciclo nas mesmas rotas



Fonte: elaborado pelos autores com dados do sistema de despacho (2026). Caixas: quartis; linha: mediana; hastes: 1,5 × intervalo interquartil.

A redução das manobras está associada à ampliação das praças de carregamento e de basculamento. Como infraestrutura, equipamentos de carga, tamanho da frota e clima mudaram ao mesmo tempo, e os registros anteriores a maio eram incompletos quanto a filas e manobras,

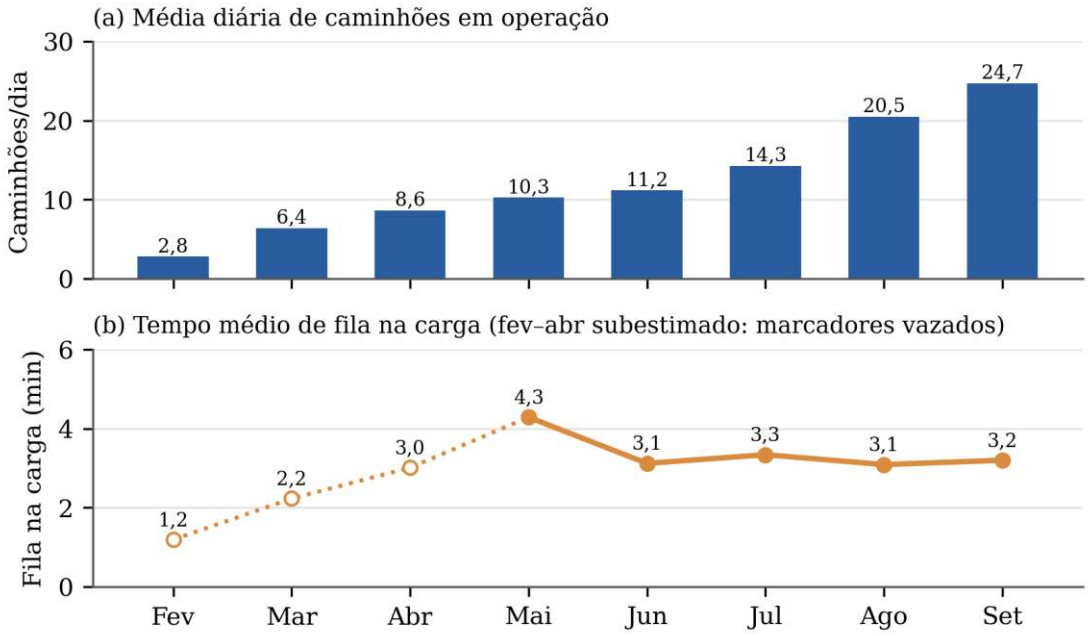
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

os resultados indicam associações entre períodos, e não efeitos causais atribuíveis a cada intervenção.

3.3. Filas e fator de compatibilidade

A frota cresceu continuamente, enquanto a fila na carga se estabilizou em torno de 3 min a partir de maio (Figura 11). O MF ficou entre 0,33 e 0,75 em todos os meses, e, no período posterior, a correlação diária entre fila e número de caminhões foi negativa (r = −0,29).

Figura 11. Evolução mensal (a) da média diária de caminhões em operação e (b) do tempo médio de fila na carga



Fonte: elaborado pelos autores com dados do sistema de despacho (2026). Fevereiro a abril com filas subestimadas pela segmentação incompleta do ciclo.

Esses resultados sugerem que as filas não estão associadas à falta de capacidade de carga, mas à sincronização entre chegadas e atendimento, aspecto que o MF médio não capta (ERCELEBI; BASCETIN, 2009). Os indicadores da operação são coerentes com essa interpretação: entre maio e setembro, a disponibilidade física das escavadeiras de 75 t e 100 t ficou entre 84% e 98%, acima da premissa de 80%, com utilização de 51% a 72%, ou seja, havia escavadeira disponível e ociosa. A gestão do despacho tende a ser, no curto prazo, a principal alavanca, sem investimento em equipamentos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Na percepção da operação, a chegada dos caminhões às frentes de lavra gera filas e, em outros momentos, horas ociosas da escavadeira aguardando caminhão, o que estaria associado à quebra do ciclo no sistema Pare/Siga e à redução de velocidade para 10 km/h. Atualmente, a análise do ciclo é realizada pelo técnico da sala de controle, considerando a capacidade produtiva da escavadeira e a da frota de transporte. Nessa visão, a redução da espera na carga passaria pela segregação de 100% dos acessos da mina, retirando o cruzamento com a comunidade.

Os dados disponíveis, contudo, não confirmam essa relação: as rotas comparadas entre períodos não passam pela travessia, e, entre julho e setembro, os ciclos que passaram por ela não tiveram fila maior na mesma frente e no mesmo dia ($p = 0,81$). Trata-se, portanto, de hipótese a ser verificada com a medição dos intervalos entre chegadas, e não de causa demonstrada.

3.4. Produtividade

Nas mesmas rotas, a produtividade (Equação 4, carga de 60 t) passou de 134,7 para 132,2 t/h, sem diferença significativa. Em todas as rotas, caiu de 133 para cerca de 80 t/h com o aumento da DMT de 1,5 para 3,6 km (Tabela 6).

Tabela 6. Indicadores mensais de produtividade da frota (todas as rotas)

Mês	DMT (km)	t/h por caminhão	t·km/h por caminhão	Massa diária da frota (t)
Fev	1,5	133	204	3.407
Mar	1,7	133	221	7.598
Abr	1,6	149	233	10.514
Mai	1,9	118	218	11.688
Jun	2,1	112	231	12.158
Jul	3,3	88	292	14.017
Ago	3,5	83	287	19.709
Set	3,6	79	282	18.983

Fonte: elaborado pelos autores com dados do sistema de despacho (2026). Produtividade por hora em ciclo; massa nominal apontada.

Se as filas voltassem ao nível anterior (2,09 min), o ciclo cairia de 27,23 para 24,39 min, e a produtividade subiria para 147,6 t/h, potencial teórico de 11,6% (Equação 5).

Em relação ao dimensionamento (Tabela 7), velocidades e tempo fixo ficaram próximos do previsto, enquanto as filas (5,1 min), não consideradas, responderam por cerca de 80% da diferença de ciclo (39,3 contra 33,0 min). A carga ficou 10% abaixo da prevista, mas reflete o fator nominal do despacho, e não a massa pesada.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 7. Premissas do dimensionamento e valores realizados pela frota de 70 t (maio a setembro de 2026, todas as rotas)

Indicador	Previsto	Realizado	Diferença
Carga média – minério (t)	68,0	60,2	−11%
Carga média – estéril (t)	65,0	59,4	−9%
Velocidade do caminhão carregado (km/h)	12,7[1]	12,4	−2%
Velocidade do caminhão vazio (km/h)	13,6[1]	13,4	−2%
Tempo fixo: carregamento, manobras e basculamento (min)	6,24	5,46	−0,78
Filas na carga e no basculamento (min)	não previstas	5,09	+5,09
Deslocamento (min)	26,7[2]	28,6	+1,9
Tempo de ciclo (min)	33,0[2]	39,3	+6,3
Produtividade por caminhão (t/h)	125[2]	94	−25%

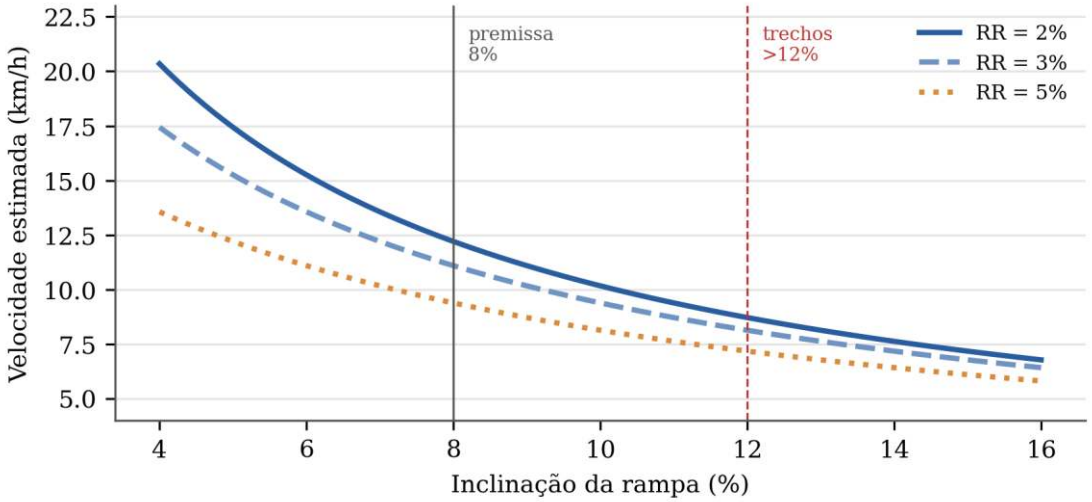
Fonte: elaborado pelos autores com dados do dimensionamento da operação (revisão de maio de 2026) e do sistema de despacho. [1]Média ponderada dos valores mensais previstos. [2]Calculado pela forma de cálculo do dimensionamento, com a DMT realizada. Velocidades, tempo fixo, filas e deslocamento realizados referem-se aos ciclos com segmentação completa; carga realizada nominal.

3.5. Velocidade e rampas

A velocidade do caminhão carregado não se alterou, coerente com a manutenção das rampas acima de 8%; os 10 a 13 km/h observados indicam operação limitada pela resistência em rampa (SILVA *et al.*, 2024). Pela Equação 7 (Figura 12), com RR de 2%, a velocidade do caminhão carregado passaria de 8,7 km/h em rampa de 12% para 12,2 km/h em 8%, cerca de 3 min a menos na subida de 1,5 km (estimativa teórica).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 12. Velocidade teórica do CMT106 carregado (peso bruto de 95 t) em função da inclinação, para diferentes resistências ao rolamento



Fonte: elaborado pelos autores com base na Equação 7. Estimativa teórica, sem considerar trocas de marcha.

Na operação, o caminhão carregado apresenta bom comportamento em subida, o que é compatível com as velocidades observadas, iguais ou superiores às estimadas.

3.6. Restrições remanescentes: túnel e travessia

Permanecem dois pontos de restrição, o túnel de pista única e a travessia com Pare/Siga, ambos a 10 km/h em 0,3 km, por onde passaram 41% e 36% dos ciclos entre julho e setembro; esse tempo não pôde ser isolado nos dados e não afeta as rotas comparadas.

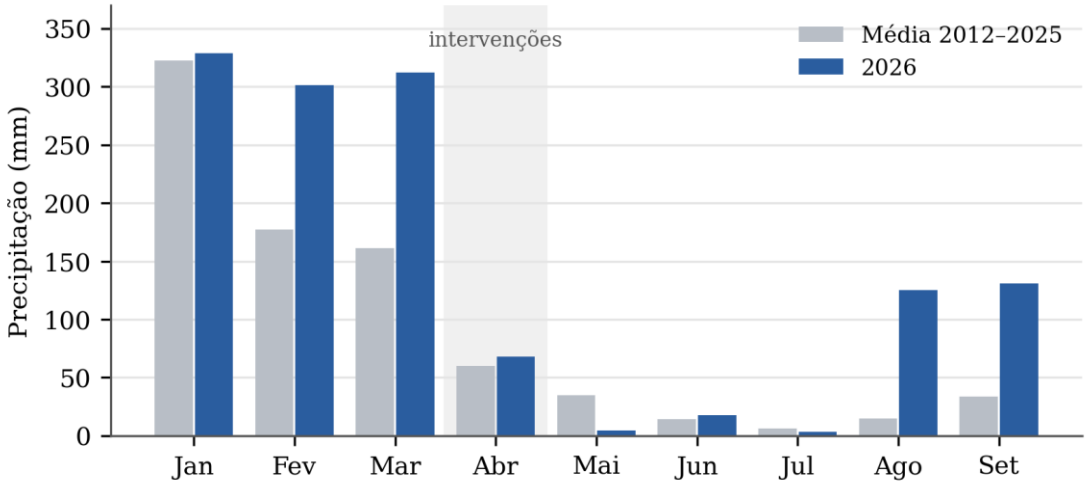
Na avaliação da operação, a quebra do ciclo no trecho de cruzamento com a comunidade seria o principal fator de impacto na produtividade horária dos caminhões, por reduzir a velocidade média da frota e favorecer a formação de filas na carga e na descarga; como discutido na Seção 3.3, essa percepção não foi confirmada pelos dados de despacho.

3.7. Precipitação e desempenho da frota

Março de 2026 foi o mês mais chuvoso da série, e agosto e setembro tiveram recordes para o período seco (Figura 13). Em setembro, os dias com mais de 10 mm transportaram 29% menos que os dias secos, sobretudo pela redução das horas em ciclo (−23%), com velocidade 8% menor (Tabela 8). Pela Equação 6, a perda soma cerca de 64,5 mil t (14,8% do período), associação observada em poucos dias.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 13. Precipitação mensal em 2026 e média de 2012–2025



Fonte: elaborado pelos autores com dados do pluviômetro da mina.

Tabela 8. Desempenho diário da frota por classe de precipitação (1 a 23 de setembro de 2026)

Classe de chuva	Dias	Viagens/dia	Massa/dia (kt)	Velocidade do caminhão carregado (km/h)	Horas em ciclo por caminhão
Seco (≤1 mm)	11	358	21,8	11,9	10,9
Moderada (1–10 mm)	8	279	16,8	11,7	8,7
Intensa (>10 mm)	4	259	15,6	10,9	8,4

Fonte: elaborado pelos autores com dados do pluviômetro da mina e do sistema de despacho.

Em março e abril de 2026, foi elaborado e executado um plano de drenagem da mina para controlar o fluxo das águas e agilizar a retomada da operação, com reflexo positivo. O plano operacional para o período chuvoso definiu o momento correto de retorno da operação e as inspeções necessárias para a retomada.

3.8. Limitações

São limitações a segmentação incompleta do ciclo até abril, a massa nominal, a geometria estimada por mapas, a disponibilidade mensal das escavadeiras, o tempo não mensurado no túnel e na travessia e os dados diários de chuva restritos a setembro.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resposta ao problema de pesquisa, a infraestrutura existente não comportava a frota de 70 t sem adequações: foram necessárias a segregação dos acessos, a ampliação de praças e acessos e premissas geométricas específicas para caminhões *wide-body*.

Após as intervenções, manobras (−55%) e carregamento (−21,6%, associado ao porte das escavadeiras) reduziram o ciclo sem filas em 9,5%, mas o aumento de 2,8 min nas filas manteve estáveis o ciclo e a produtividade. O MF abaixo de 1 e a disponibilidade das escavadeiras acima de 84% sugerem que as filas estão associadas à sincronização entre carga e transporte, e não à falta de capacidade de carga. A chuva associou-se a perdas de cerca de 15% em setembro. Como várias condições mudaram simultaneamente, esses resultados descrevem associações entre períodos, e não efeitos isolados de cada intervenção.

As principais alavancas são a sincronização entre carga e transporte (potencial teórico de 11,6%), a inclusão das filas no dimensionamento, a readequação das rampas a 8%, a eliminação do cruzamento com a comunidade, cujo efeito deve ser medido, e a manutenção da drenagem e da retomada no período chuvoso. Recomenda-se medir a passagem no túnel e na travessia, pesar a carga e avaliar economicamente as intervenções.

REFERÊNCIAS

ALARIE, S.; GAMACHE, M. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 16, n. 1, p. 59-76, 2002. DOI: 10.1076/ijsm.16.1.59.3408.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR ISO 31000*: gestão de riscos: diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BENEVENUTI, F. D.; PERONI, R. L. Detecting drainage pitfalls in open-pit mines and haul roads using UAV-photogrammetry. *DYNA*, v. 88, n. 216, p. 190-195, 2021. DOI: 10.15446/dyna.v88n216.90801.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *NR 22*: segurança e saúde ocupacional na mineração. Redação dada pela Portaria MTE nº 261, de 12 de fevereiro de 2026. Brasília: MTE, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-22-atualizada-2026.pdf. Acesso em: 15 out. 2026.

BURT, C. N.; CACCETTA, L. Equipment selection for surface mining: a review. *Interfaces*, v. 44, n. 2, p. 143-162, 2014. DOI: 10.1287/inte.2013.0732.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

CATERPILLAR. *Caterpillar performance handbook*. 49. ed. Peoria: Caterpillar Inc., 2019.

CATERPILLAR. *Rolling resistance factors*. [S. l.]: Caterpillar, [202-]. Disponível em: https://www.cat.com/en_US/articles/ci-articles/rolling-resistance-factors.html. Acesso em: 15 out. 2026.

ERCELEBI, S. G.; BASCETIN, A. Optimization of shovel-truck system for surface mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 109, n. 7, p. 433-439, 2009.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. *Introductory mining engineering*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.

HUSTRULID, W. A.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. *Open pit mine planning and design*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

KAUFMAN, W. W.; AULT, J. C. *Design of surface mine haulage roads*: a manual. Washington, DC: U.S. Bureau of Mines, 1977. (Information Circular, 8758).

MOHTASHAM, M.; MIRZAEI-NASIRABAD, H.; ASKARI-NASAB, H.; ALIZADEH, B. Truck fleet size selection in open-pit mines based on the match factor using a MINLP model. *Mining Technology*, v. 130, n. 3, p. 159-175, 2021. DOI: 10.1080/25726668.2021.1919374.

OLIVEIRA, P. T.; FONTES, M. P.; FELSCH JUNIOR, W. S. Aumento da produtividade da operação unitária de transporte através do uso de telemetria. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 20, e2665, 2023. DOI: 10.4322/2176-1523.20222665.

SHAKENOV, A. T.; UTEGENOVA, A. Y.; STOLPOVSKIKH, I. N.; ORUMBASSAROVA, A. B.; MALOZYOMOV, B. V.; MARTYUSHEV, N. V. Quasi-experimental field assessment of haul-road maintenance effects on fuel consumption, cycle time and mechanical loading of open-pit dump trucks. *Applied Sciences*, v. 16, n. 15, 7773, 2026. DOI: 10.3390/app16157773.

SILVA, P. G. C.; LIMA, H. M.; TORRES, V. F. N.; SILVEIRA, L. G. C.; SOUZA, F. R. Evaluation of road roughness and its influence on operating parameters in open-pit mines. *Concilium*, v. 24, n. 17, p. 654-670, 2024. DOI: 10.53660/CLM-3947-24R52.

TANNANT, D. D.; REGENSBURG, B. *Guidelines for mine haul road design*. Vancouver: University of British Columbia, 2001.

THOMPSON, R. J.; PERONI, R. L.; VISSER, A. T. *Mining haul roads*: theory and practice. Boca Raton: CRC Press, 2019.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.