v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

CONTROLE DE ACESSO DE VEÍCULOS LEVES EM ÁREA DE MINA AUTÔNOMA: ESTUDO DE CASO EM UMA MINA DE FERRO A CÉU ABERTO NO SUDESTE DO PARÁ

LIGHT VEHICLE ACCESS CONTROL IN AN AUTONOMOUS MINE AREA: A CASE STUDY IN AN OPEN-PIT IRON ORE MINE IN SOUTHEASTERN PARÁ

CONTROL DE ACCESO DE VEHÍCULOS LIVIANOS EN ÁREA DE MINA AUTÓNOMA: ESTUDIO DE CASO EN UNA MINA DE HIERRO A CIELO ABIERTO EN EL SURESTE DE PARÁ

Williams da Silva Queiroz[1], Leandro de Vilhena Costa[2]

e7119382
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9382

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

No sudeste do Pará, uma mina de ferro a céu aberto está em transição da operação tripulada de caminhões fora de estrada para a operação autônoma. Nesse contexto, identificou-se circulação de veículos leves em zonas operacionais críticas, criando oportunidades potenciais de interação com pessoas e equipamentos de grande porte. Este estudo avaliou os efeitos da redução do acesso de veículos leves à zona autônoma sobre o controle operacional e suas possíveis implicações para a exposição aos riscos. Realizou-se um estudo de caso com abordagens qualitativa e quantitativa, baseado em registros de acesso na entrada da mina e observações de campo. A intervenção reduziu o número de veículos autorizados de 315 para 64, uma diminuição de 251 veículos (79,68%). A medida foi associada à segregação de acessos e à adoção de um modelo de pool de veículos para atender às áreas de interface. Os resultados confirmam a redução da quantidade de veículos autorizados e sugerem menor oportunidade de interação entre veículos leves e equipamentos de mina. Contudo, os dados não permitem quantificar mudanças na circulação efetiva, na exposição aos riscos ou na frequência de incidentes e quase acidentes. Conclui-se que o controle físico e lógico dos acessos, integrado à gestão de riscos, é uma medida aplicável à gestão operacional em ambientes de mineração autônoma.

PALAVRAS-CHAVE: Mineração autônoma. Controle de acesso. Veículos leves. Segurança operacional. Melhoria contínua.

ABSTRACT

In southeastern Pará, Brazil, an open-pit iron ore mine is transitioning from manned haul truck operations to autonomous operation. Light-vehicle circulation in critical operational areas was identified as a potential source of interaction with personnel and large mining equipment. This study assessed how restricting light-vehicle access to the autonomous zone affected operational control and considered possible implications for risk exposure. A case study using qualitative and quantitative approaches was conducted based on mine-entry access records and field observations.

[1] Graduado em Engenharia de Minas pela Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), em 2022. Atua como engenheiro de minas na Vale, no Projeto S11D, com experiência em planejamento de minas, operações de mineração e pesquisa em metalurgia.

[2] Doutor em Engenharia Mineral pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Possui experiência nas áreas de perfuração e desmonte de rochas, operações de mineração, ventilação de minas e planejamento de minas a céu aberto e subterrâneas.

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

The intervention reduced the number of authorized light vehicles from 315 to 64, a decrease of 251 vehicles (79.68%). The measure was associated with access segregation and a vehicle-pooling model to serve interface areas. The findings confirm a reduction in authorized vehicles and suggest fewer opportunities for interaction between light vehicles and mining equipment. However, the available data do not quantify changes in actual traffic, risk exposure, or the frequency of incidents and near misses. The study concludes that physical and logical access control, integrated with risk management, is an applicable operational-management measure in autonomous mining environments.

KEYWORDS: *Autonomous mining. Access control. Light vehicles. Operational safety. Continuous improvement.*

RESUMEN
En el sureste de Pará, Brasil, una mina de hierro a cielo abierto está en transición de la operación tripulada de camiones fuera de carretera a la operación autónoma. Se identificó circulación de vehículos livianos en zonas operativas críticas, con oportunidades potenciales de interacción con personas y equipos mineros de gran porte. Este estudio evaluó los efectos de restringir el acceso de vehículos livianos a la zona autónoma sobre el control operacional y sus posibles implicaciones para la exposición a los riesgos. Se realizó un estudio de caso con enfoques cualitativo y cuantitativo, utilizando registros de acceso en la entrada de la mina y observaciones de campo. La intervención redujo los vehículos autorizados de 315 a 64, es decir, 251 vehículos menos (79,68%). La medida se vinculó con la segregación de accesos y un modelo de pool de vehículos para atender las áreas de interfaz. Los resultados confirman la reducción de vehículos autorizados y sugieren menos oportunidades de interacción con equipos mineros. Sin embargo, los datos no permiten cuantificar cambios en la circulación efectiva, la exposición a los riesgos ni la frecuencia de incidentes y casi accidentes. Se concluye que el control físico y lógico de accesos, integrado a la gestión de riesgos, es una medida aplicable en entornos de minería autónoma.

PALABRAS CLAVE*: Minería autónoma. Control de acceso. Vehículos livianos. Seguridad operacional. Mejora continua.*

INTRODUÇÃO

Cada vez mais a mineração a céu aberto vem introduzindo tecnologias de automação, monitoramento remoto e controle de zonas operacionais com o objetivo de aumentar a segurança, a previsibilidade e a produtividade. Em atividades com maior maturidade tecnológica, o controle de acesso não se traduz apenas em uma medida patrimonial e passa a atuar como barreira essencial de segurança operacional, especialmente quando há interação entre veículos leves e equipamentos de mina (NSW RESOURCES, 2020).

Essas orientações também reforçam que a implantação de sistemas autônomos requer uma abordagem proativa de gestão de riscos, comunicação contínua e definição de um modelo de governança estruturado (GOVERNMENT WESTERN AUSTRALIA, 2025).

Nesse âmbito, uma mina a céu aberto localizada no sudeste do Pará identificou elevada quantidade de veículos leves em circulação em áreas operacionais, contexto que eleva a

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.

exposição de trabalhadores a possíveis eventos, além de ampliar a interação com equipamentos móveis de grande porte. Como medida para garantir a segurança da operação autônoma dos caminhões fora de estrada, foi estruturado um plano de mitigação para assegurar a permanência apenas das áreas e dos veículos essenciais à entrada na mina, definidos a partir da real necessidade de acesso.

Nesse contexto, este estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: como a redução da quantidade de veículos leves autorizados, associada à segregação de acessos e ao controle por cancela, contribui para o controle operacional de uma zona autônoma em uma mina de ferro a céu aberto no sudeste do Pará, considerando suas possíveis implicações para a exposição aos riscos e a disciplina operacional?

O objetivo principal deste estudo foi avaliar os efeitos da redução da quantidade de veículos leves autorizados de 315 para 64 sobre o controle operacional e a rastreabilidade dos acessos à zona autônoma, discutindo suas possíveis implicações para a exposição aos riscos. Os objetivos específicos foram: analisar a contribuição da segregação física, das cancelas e do modelo de pool para o controle dos acessos; examinar a rastreabilidade dos registros de entrada e saída; e propor uma sistemática de melhoria contínua para a manutenção do controle operacional.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Operação autônoma

A operação de transporte em minas a céu aberto é uma das atividades mais críticas em termos de custos, produtividade e segurança. O sistema de carga e transporte pode representar entre 50% e 60% dos custos operacionais totais de uma mina, sendo os caminhões fora de estrada os principais equipamentos envolvidos nesse processo (LOTSU; FRIMPONG; RAZA, 2026). De acordo com Frimpong e Obosu (2026), a implementação de sistemas de transporte autônomo pode contribuir para a melhoria da segurança ocupacional e da eficiência operacional, com maior previsibilidade dos ciclos de transporte e potencial redução de custos operacionais. Apesar dos desafios associados à implementação, os autores destacam a automação do transporte como uma estratégia relevante para operações de mineração mais seguras e eficientes.

Os caminhões autônomos empregados em mineração dependem de sistemas embarcados de percepção capazes de identificar obstáculos, estimar distâncias, reconhecer o ambiente e apoiar decisões de navegação. Entre os sensores mais utilizados destacam-se o

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.

LiDAR, o radar de ondas milimétricas e as câmeras. O LiDAR fornece nuvens de pontos tridimensionais e permite identificar a geometria do terreno, veículos, barreiras e obstáculos, enquanto o radar apresenta maior robustez em condições de poeira, baixa visibilidade e iluminação reduzida, além de contribuir para a medição de distância e velocidade dos alvos. A integração desses sensores por meio de fusão multissensorial aumenta a redundância e a confiabilidade do sistema de percepção, aspecto essencial para caminhões não tripulados em minas a céu aberto, onde há vias não pavimentadas, partículas em suspensão e obstáculos irregulares (LIU et al., 2022), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Tecnologia embarcada em caminhões autônomos



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.2. Benefícios operacionais da operação autônoma

A implantação do sistema de transporte autônomo apresenta vantagens nos quesitos de produtividade e eficiência operacional, especialmente pela maior padronização e previsibilidade dos ciclos de transporte (FRIMPONG; OBOSU, 2026). Os caminhões autônomos são capazes de operar ininterruptamente, 24 horas por dia, sete dias por semana, proporcionando benefícios significativos em segurança, produtividade, confiabilidade e desempenho operacional (IBRAM, 2025).

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.

Frimpong e Obosu (2026) destacam como principais benefícios associados à adoção de caminhões autônomos:

• maior segurança ocupacional, com redução da exposição direta de trabalhadores às atividades de transporte;

• maior previsibilidade e consistência dos ciclos de transporte;

• potencial redução do consumo de combustível e dos custos de manutenção;

• aumento da eficiência e da produtividade operacional;

• maior confiabilidade do processo de transporte e possibilidade de operação contínua.

1.3. Eficiência operacional e utilização de equipamentos

A operação autônoma pode aumentar a utilização dos equipamentos ao proporcionar maior padronização dos ciclos, redução da variabilidade operacional e maior previsibilidade das atividades de transporte. Revisões recentes indicam que sistemas de transporte autônomo podem contribuir para ganhos de produtividade e eficiência, embora os resultados dependam das características da mina, da infraestrutura e do nível de maturidade da tecnologia (FRIMPONG; OBOSU, 2026; LOTSU; FRIMPONG; RAZA, 2026).

Em revisão sistemática sobre sistemas de transporte autônomo, Lotsu, Frimpong e Raza (2026) identificaram ganhos de produtividade entre 5% e 20% associados a melhorias na geometria e otimização das vias de transporte, ressaltando a importância da integração entre infraestrutura, segurança e desempenho operacional.

1.4. Controle de acesso em mineração autônoma

A diminuição da circulação de veículos leves e a definição de áreas e veículos essenciais para ingresso na mina contribuem para restringir oportunidades de exposição a eventos envolvendo equipamentos móveis de grande porte (BRASIL, 2024).

A adoção de um modelo de pool de veículos permite compartilhar as unidades entre diferentes turnos, finalidades e regiões da mina, desde que sejam estabelecidos critérios claros de reserva, prioridade, manutenção, rastreabilidade e responsabilidade pelo uso.

A mineração autônoma exige um modelo de governança estruturado, rigoroso e restritivo, garantindo a integração segura entre equipamentos e pessoas, por meio de uma infraestrutura adequada, procedimentos e comunicação. A segurança não depende unicamente do equipamento autônomo, mas da perfeita harmonização entre o layout da mina, as regras de circulação, as permissões de acesso e os mecanismos de atendimento a situações atípicas (GLOBAL MINING GUIDELINES GROUP, 2024).

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.

As barreiras físicas constituem medidas preventivas destinadas a restringir ou impedir o acesso de pessoas e veículos não autorizados a áreas com perigos identificados ou potenciais. Em uma operação de mina, a cancela pode desempenhar essa função ao bloquear o fluxo e permitir a entrada apenas de veículos previamente cadastrados e autorizados.

1.5. Gestão de riscos e barreiras de segurança em operações autônomas

A gestão de riscos em operações de mineração autônoma deve considerar a interação entre pessoas, equipamentos, infraestrutura, sistemas de controle e procedimentos operacionais. Embora a automação possa reduzir a exposição direta de trabalhadores às atividades de transporte, ela não elimina os perigos associados à circulação de equipamentos móveis nem dispensa controles destinados a prevenir interações não planejadas entre sistemas autônomos, veículos tripulados e pessoas.

O modelo de barreiras de segurança, frequentemente representado pelo modelo do “queijo suíço”, proposto por Reason (2000), contribui para compreender essa dinâmica. Nesse modelo, a prevenção de acidentes depende da combinação de diferentes camadas de proteção, cada uma sujeita a limitações ou falhas. Um evento perigoso pode ocorrer quando fragilidades de diferentes barreiras se alinham, permitindo que o perigo alcance pessoas, equipamentos ou instalações.

Aplicado à mineração autônoma, esse entendimento reforça que a segurança não deve depender exclusivamente dos sistemas embarcados dos caminhões. A segregação física de rotas, o controle de acesso, a definição de veículos autorizados, a comunicação operacional, a gestão de mudanças e os procedimentos de resposta a emergências podem funcionar como barreiras complementares. A combinação dessas medidas busca reduzir as oportunidades de exposição a situações perigosas, sem pressupor a eliminação completa do risco.

Nesse arranjo, o controle de acesso de veículos leves constitui uma barreira organizacional e operacional destinada a restringir a entrada de veículos não essenciais em áreas críticas. A redução da quantidade de veículos autorizados pode limitar as oportunidades potenciais de interação entre veículos leves e equipamentos autônomos. Entretanto, a efetividade dessa barreira depende do cumprimento das permissões estabelecidas, da integridade dos registros, da fiscalização das rotas e da revisão periódica dos critérios de acesso.

Além dos riscos associados à interação entre veículos leves e equipamentos autônomos, a operação desses sistemas pode envolver limitações na percepção de obstáculos sob condições ambientais adversas, falhas de comunicação, vulnerabilidades de cibersegurança e dificuldades de integração entre frotas autônomas e equipamentos tripulados. Condições

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.

dinâmicas das vias e alterações geotécnicas também podem afetar a previsibilidade operacional. Esses fatores reforçam a necessidade de uma abordagem sistêmica de gestão de riscos, combinando controles tecnológicos, físicos, administrativos e procedimentais. No escopo deste estudo, tais aspectos são considerados elementos de contexto da mineração autônoma, e não eventos cuja ocorrência ou frequência tenha sido investigada diretamente na mina analisada.

Assim, o controle de acesso deve ser compreendido como parte de um sistema integrado de gestão de riscos, e não como medida isolada. A avaliação de sua efetividade requer indicadores que permitam acompanhar tanto a conformidade das autorizações quanto a circulação efetiva, as situações de interação e os eventos de segurança. Essa distinção é especialmente importante para interpretar os resultados do presente estudo, que quantifica a redução dos veículos autorizados, mas não mensura diretamente a variação dos incidentes ou da exposição ao risco.

2. METODOLOGIA

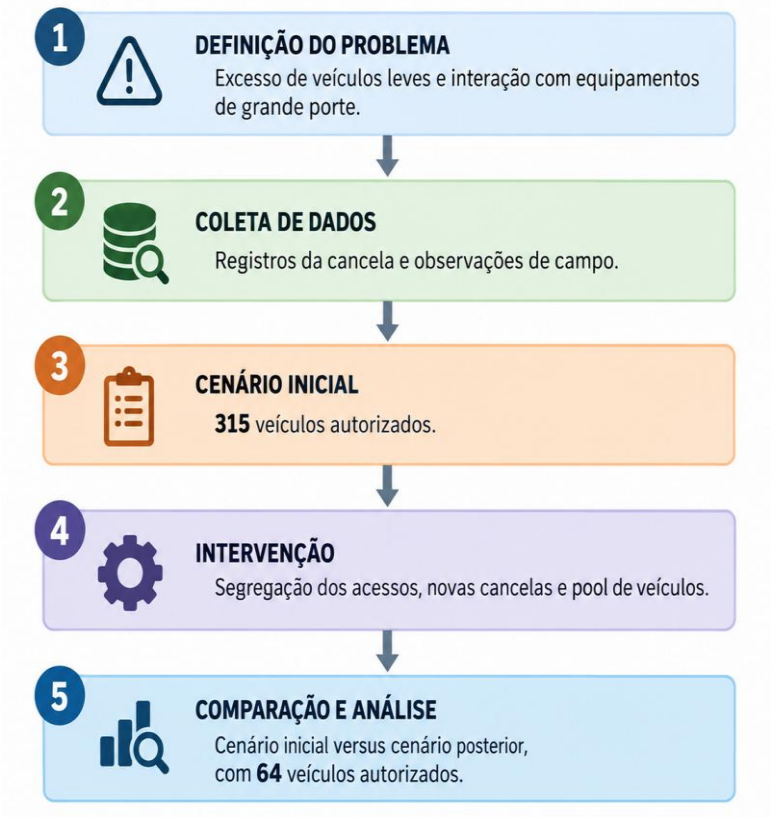
O estudo foi conduzido por meio de pesquisa aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, utilizando o método de estudo de caso em uma mina de ferro a céu aberto localizada no sudeste do Pará. A escolha do caso justificou-se pela necessidade de disciplinar o acesso de veículos leves em áreas operacionais críticas, caracterizadas por elevado fluxo e pela interação entre pessoas, equipamentos de apoio e equipamentos móveis de mina.

Os dados utilizados neste estudo foram fornecidos pela empresa terceirizada responsável pelo controle de registros e liberações da cancela, considerando o período de janeiro a junho de 2026. O banco analisado continha 61.396 registros de entradas, com média mensal de aproximadamente 10.233 registros. Considerando os 181 dias corridos do período, a média corresponde a cerca de 339 registros por dia, ou 14 por hora.

Os registros foram organizados por área e tipo de veículo. Para caracterizar a intervenção, foram considerados dois cenários de autorização: situação inicial, com cota de 315 veículos leves, e situação posterior, com cota de 64 veículos. Como a data exata da implementação não está informada, os registros mensais são utilizados para caracterizar o volume de acessos, não como uma comparação estatística pré e pós-intervenção. A análise distingue, portanto, a quantidade de veículos autorizados do número de passagens efetivamente registradas na cancela.

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 2. Fluxograma metodológico do estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

O fluxograma exposto na Figura 2 apresenta as principais etapas adotadas no desenvolvimento do estudo, desde a identificação do problema até a comparação entre os cenários anterior e posterior à intervenção.

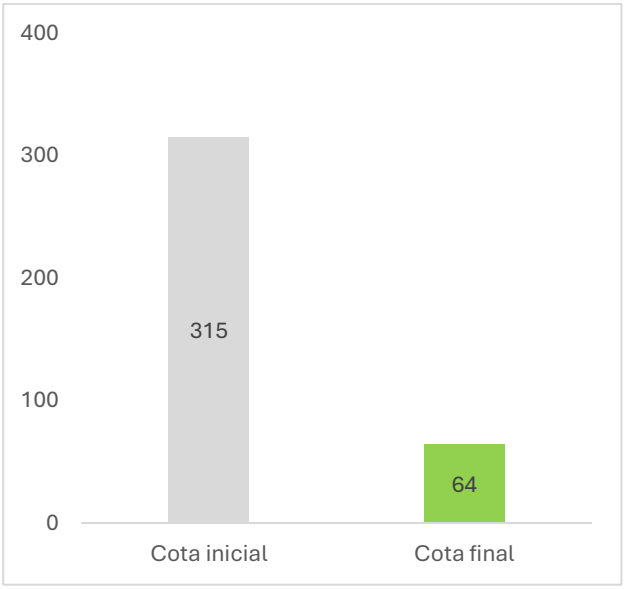
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Redução da frota autorizada

O principal resultado observado foi a redução expressiva da cota de veículos leves de 315 para 64. Em termos absolutos, houve diminuição de 251 veículos leves autorizados, o que corresponde a aproximadamente 79,68% no universo inicialmente admitido em área operacional tripulada, conforme observado na Figura 3 e na Tabela 1.

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. Quantidade de veículos leves autorizados (antes e depois)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1. Redução de veículos autorizados

Indicador	**Valor**
Cota inicial	315
Cota final	64
Redução absoluta	251
Redução percentual	79,68%
Percentual remanescente	20,32%

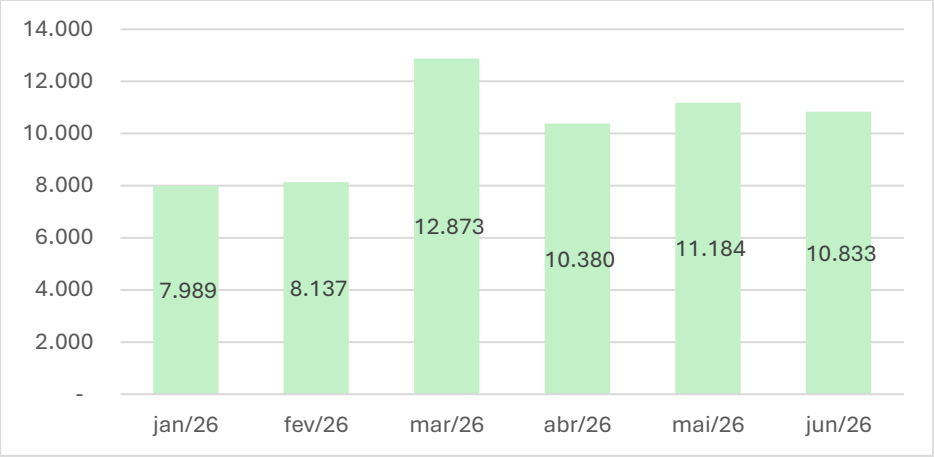
Fonte: Elaborado pelo autor.

A redução da quantidade de veículos autorizados de 315 para 64 corresponde a uma diminuição de 79,68% da cota inicial. Esse resultado demonstra uma restrição expressiva do conjunto de veículos habilitados a acessar a zona autônoma. Entretanto, a variação do número efetivo de passagens não pode ser deduzida diretamente dessa redução, pois depende da frequência de utilização dos veículos remanescentes. Sua quantificação requer a comparação dos registros de acesso em períodos equivalentes anteriores e posteriores à intervenção. A

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 apresenta a distribuição mensal das entradas registradas na cancela no período analisado.

Figura 4. Entradas registradas na cancela de acesso à mina



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos registros operacionais da cancela, 2026.

Conforme apresentado na Tabela 2, a redução das autorizações foi observada nas três macroáreas analisadas, com maior redução percentual na área de apoio (85,59%), seguida da manutenção (82,79%) e da operação (67,07%). Esses resultados demonstram a aplicação abrangente da medida de restrição de acesso. A redução do conjunto de veículos autorizados pode limitar as oportunidades potenciais de interação entre veículos leves e equipamentos de mina; entretanto, a magnitude desse efeito sobre a exposição ocupacional depende da circulação efetiva e não foi quantificada diretamente neste estudo.

Tabela 2. Redução de veículos leves por macroáreas

Macroárea	Veículos antes	Veículos depois	Redução absoluta	Redução percentual
Apoio	111	16	95	85,59%
Manutenção	122	21	101	82,79%
Operação	82	27	55	67,07%
Total	315	64	251	79,68%

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos registros operacionais da cancela, 2026.

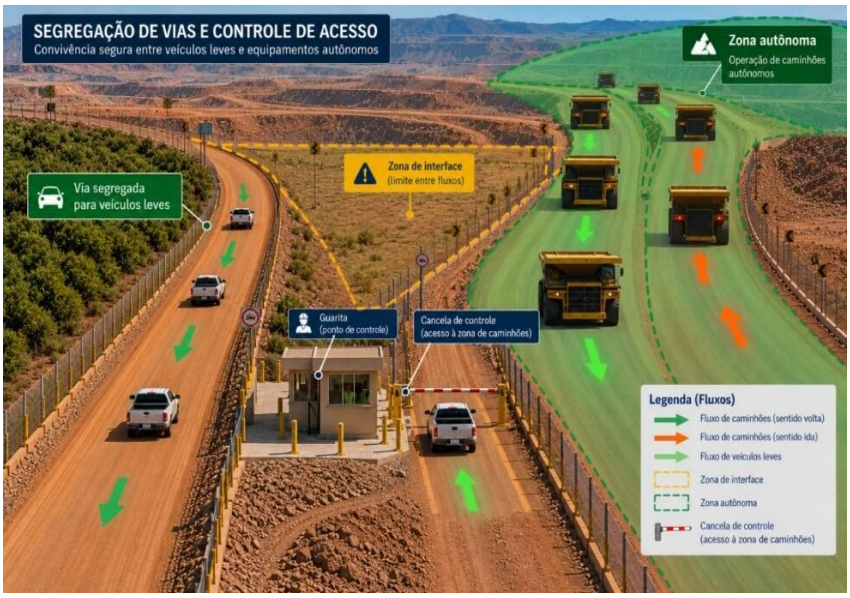
3.2. Efeito da segregação de acessos

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.

O controle de acesso de veículos leves pode ser compreendido como uma barreira preventiva destinada a restringir a entrada de veículos não autorizados em áreas de operação de equipamentos autônomos. No caso analisado, a redução da quantidade de veículos autorizados demonstra o fortalecimento da restrição de acesso. Sua contribuição para a redução efetiva da exposição aos riscos, entretanto, depende da conformidade das entradas, da circulação real e da integração com outras barreiras de segurança. Essa abordagem está alinhada às estratégias de gerenciamento de riscos discutidas por Moniri-Morad et al. (2024), que destacam a necessidade de barreiras para prevenir e mitigar perigos em operações de transporte mecanizado.

À luz do modelo de barreiras de segurança de Reason (2000), o controle de acesso pode ser compreendido como uma camada de proteção organizacional que complementa a segregação física de rotas, os procedimentos operacionais e os sistemas embarcados dos equipamentos autônomos. No caso analisado, a redução de 315 para 64 veículos autorizados demonstra o fortalecimento da restrição de acesso, mas não comprova, isoladamente, a redução da circulação efetiva ou da ocorrência de eventos de segurança. A contribuição potencial da medida reside em restringir as oportunidades de interação entre veículos leves e equipamentos de grande porte, devendo sua efetividade ser acompanhada por indicadores de circulação, conformidade e eventos operacionais.

Figura 5. Segregação dos acessos e controle por cancelas em zona autônoma



Fonte: Elaborado pelo autor.

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.

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática da configuração proposta para a segregação dos acessos na área de operação autônoma, não correspondendo a um mapa operacional da mina estudada. A separação entre a rota dos caminhões fora de estrada e a circulação dos veículos leves pode reduzir o cruzamento entre fluxos distintos e limitar a entrada de veículos não essenciais em zonas de maior risco operacional. A cancela funciona como barreira física e ponto formal de controle, permitindo verificar a autorização do veículo antes do ingresso na área restrita. Dessa forma, a segregação combina medidas de engenharia e de gestão, com potencial para reduzir interações não planejadas e melhorar a previsibilidade do tráfego; sua efetividade, contudo, deve ser acompanhada por indicadores operacionais e de segurança.

3.3. Uso da cancela e rastreabilidade operacional

A utilização da cancela introduziu um ponto formal de decisão para ingresso em áreas controladas. Com isso, os registros de passagem passaram a permitir leitura por área e por tipo de veículo, criando uma base objetiva para revisar permissões, horários de maior demanda, exceções operacionais e recorrência de acessos sem justificativa robusta.

3.4. Pool de veículos na mineração

A adoção de um modelo de pool de veículos constituiu uma alternativa para atender às áreas de interface que não dispõem de autonomia embarcada. Em vez de manter veículos exclusivos para cada setor, o modelo permite o compartilhamento de unidades conforme a demanda, os horários e a prioridade das atividades. Essa configuração reduz a quantidade de veículos permanentes na zona autônoma e contribui para diminuir a circulação ociosa, desde que sejam definidos critérios de reserva, disponibilidade, inspeção, rastreamento e responsabilidade pelo uso.

No caso analisado, o modelo de pool foi apresentado como alternativa para atender às áreas que necessitam de deslocamento, em articulação com a segregação de acessos e o controle por cancela, sem ampliar a cota permanente de veículos autorizados.

Apesar dos benefícios potenciais, o pool de veículos também pode produzir efeitos negativos quando não há planejamento adequado. A concentração da demanda em poucas unidades pode gerar filas, indisponibilidade, aumento do tempo de espera, conflitos de prioridade e deslocamentos não planejados. Por isso, sua implantação deve ser acompanhada por indicadores de utilização, tempo de atendimento, disponibilidade, taxa de ocupação,

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.

quilometragem, falhas e solicitações não atendidas. O pool deve ser dimensionado de modo a equilibrar a redução da frota com a continuidade operacional das áreas atendidas.

Esse tipo de controle é coerente com a necessidade de adoção de barreiras físicas, lógicas e procedimentais em ambientes de mineração autônoma ou em transição para maior autonomia (GLOBAL MINING GUIDELINES GROUP, 2024; NSW RESOURCES, 2020).

3.5. Implicações para a segurança operacional

A redução da quantidade de veículos autorizados apresenta possíveis implicações para a segurança operacional, especialmente por restringir o conjunto de veículos habilitados a ingressar em áreas críticas. Essas implicações devem ser interpretadas como potenciais, uma vez que o estudo não mensurou diretamente a variação da exposição aos riscos nem a frequência de incidentes ou quase acidentes.

a) Redução potencial da exposição de colaboradores ao risco, uma vez que a redução da quantidade de veículos autorizados pode restringir as oportunidades de circulação em áreas de maior criticidade operacional.

b) Redução potencial das oportunidades de interação entre veículos leves e equipamentos de grande porte, especialmente em situações associadas a pontos cegos, aproximações indevidas e conflitos de prioridade.

c) Potencial fortalecimento da conformidade operacional, condicionado ao cumprimento dos critérios de autorização, das rotas definidas e dos procedimentos de registro.

d) Apoio à investigação e à aprendizagem operacional, uma vez que os registros da cancela podem permitir identificar padrões de acesso e oportunidades de correção.

Essas implicações estão alinhadas aos códigos e às diretrizes internacionais, que enfatizam a gestão proativa de riscos, o controle de acesso em zonas autônomas, a comunicação e o planejamento operacional seguro.

3.6. Aplicação de melhoria contínua

A aplicação do ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act – planejar, executar, verificar e agir) pode apoiar a manutenção dos critérios de autorização, o acompanhamento da circulação de veículos leves, a rastreabilidade dos acessos e a identificação de desvios operacionais. A avaliação periódica dos indicadores permitirá verificar se as medidas implementadas contribuem para a melhoria do controle de acesso e para a gestão da exposição aos riscos na zona autônoma.

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 6. Ciclo PDCA aplicado ao controle de acesso



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como exemplo de rotina de melhoria contínua, a operação pode estabelecer revisão mensal das permissões, auditoria amostral de justificativas de acesso e análise de Pareto dos veículos com maior recorrência. Esse arranjo fortalece a sustentabilidade do controle e reduz o risco de retorno gradual ao cenário anterior de excesso de circulação.

3.7. Limitações do estudo

Os resultados demonstram a redução da quantidade de veículos autorizados e permitem discutir uma possível redução das oportunidades de interação. Entretanto, não permitem quantificar diretamente a variação da circulação efetiva, da exposição aos riscos ou da frequência de incidentes, quase acidentes e conflitos operacionais. A avaliação desses efeitos requer indicadores específicos e comparação entre períodos anteriores e posteriores à intervenção.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 demonstram que a quantidade de veículos leves autorizados para acesso à zona autônoma foi reduzida de 315 para 64, representando uma diminuição de 79,68% da cota inicial. Essa alteração evidencia o fortalecimento da restrição de acesso e pode contribuir para limitar as oportunidades potenciais de interação entre veículos leves e equipamentos autônomos.

A redução da quantidade de veículos autorizados pode também favorecer a simplificação da gestão dos acessos e a priorização de deslocamentos essenciais. Entretanto, os efeitos sobre a circulação efetiva, a exposição aos riscos, a frequência de incidentes e quase acidentes e os custos operacionais não foram quantificados neste estudo. Assim, esses aspectos devem ser tratados como possibilidades a serem verificadas por meio de indicadores específicos.

Conclui-se que o controle físico e lógico dos acessos, associado à segregação de rotas, à definição de veículos autorizados e à gestão de registros, constitui uma medida aplicável à organização operacional em ambientes de mineração autônoma. Sua efetividade deve ser acompanhada por indicadores de circulação, conformidade e segurança, integrados a um processo contínuo de avaliação e melhoria.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora n. 22**: segurança e saúde ocupacional na mineração. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2024.

FRIMPONG, S.; OBOSU, M. Automated Haulage Trucks: Impact on Workplace Safety and Efficiency in Surface Mining Systems. **Mining**, v. 6, n. 3, art. 61, 2026. DOI: 10.3390/mining6030061.

GLOBAL MINING GUIDELINES GROUP. **Guideline for the implementation of autonomous systems in mining**. Version 2. [S. l.]: Global Mining Guidelines Group, 2024.

GOVERNMENT WESTERN AUSTRALIA. **Safe mobile autonomous mining in Western Australia**: code of practice. Perth: WorkSafe Western Australia, 2025.

IBRAM. **Caminhões autônomos da Komatsu já transportaram 330 Mt de material**. Brasília: IBRAM, 2025.

LIU, Haitao; PAN, Wenbo; HU, Yunqing; LI, Cheng; YUAN, Xiwen; LONG, Teng. A detection and tracking method based on heterogeneous multi-sensor fusion for unmanned mining trucks. **Sensors**, Basel, v. 22, n. 16, art. 5989, 2022. DOI: 10.3390/s22165989.

LOTSU, J. S.; FRIMPONG, S.; RAZA, M. A. Geometric and Operational Design Principles for Autonomous Haulage Systems in Open-Pit Mining: A Systematic Review. **Mining**, v. 6, n. 3, art. 45, 2026. DOI: 10.3390/mining6030045.

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.

MONIRI-MORAD, A.; SHISHVAN, M. S.; AGUILAR, M.; GOLI, M.; SATTARVAND, J. Powered haulage safety, challenges, analysis, and solutions in the mining industry: a comprehensive review. **Results in Engineering**, v. 21, art. 101684, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101684.

NSW RESOURCES. **Autonomous mobile mining plant guideline**. Sydney: NSW Resources Regulator, 2020.

REASON, James. Human error: models and management. **BMJ**, v. 320, n. 7237, p. 768-770, 2000. DOI: 10.1136/bmj.320.7237.768.

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.