

ANÁLISE DE QUALIDADE DE ESTRADAS DE MINERAÇÃO UTILIZANDO INDICADORES DE VELOCIDADE

Alfredo Emílio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
alfredoesilva@yahoo.com.br

Rodrigo de Lemos Peroni – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
peroni@ufrgs.br

RESUMO

As estradas de mineração são constituídas principalmente por vias não pavimentadas e representam um dos grandes desafios para a operação de uma mina. Sua confecção, quando não seguida pelos padrões de qualidade e principais elementos geométricos, podem não suportar o tráfego constante dos equipamentos. Uma das formas de analisar indiretamente a qualidade dessas estradas é por meio da coleta de dados que os próprios caminhões fornecem à medida que passam por elas. Para esse estudo, foram levantados os perfis de transporte das estradas para identificação de defeitos geométricos, além de avaliação da variação da velocidade teórica dos equipamentos e posteriormente proposição de melhorias. Os levantamentos e avaliações realizados mostraram oportunidades para aperfeiçoamento das condições das estradas, bem como no aumento da velocidade dos caminhões.

Palavras-chave: Estrada não pavimentada; Projetos de estradas; sistema de monitoramento de equipamentos

ABSTRACT

Mining roads consist mainly of unpaved roads and represent one of the major challenges for operating a mine. Its built, when not followed by quality standards and main geometric elements, may not withstand constant equipment traffic. One way to indirectly analyze the quality of these roads is by collecting data that the trucks themselves provide as they pass over them. For this study, the transport profiles of the roads were mapped to identify geometrical problems, in addition to identify the variation in the theoretical speed of the equipment and later proposing improvements. The surveys and evaluations carried out showed opportunities to improve road conditions, as well as increase the speed of trucks.

Keywords: Unpaved road; Road design; Equipment monitoring system

INTRODUÇÃO

Estradas não pavimentadas na mineração representam um dos grandes desafios para a operação de uma mina, já que por elas é escoada toda a produção de uma unidade de extração mineral. Essas vias podem apresentar ausência de projetos, problemas na execução das projeções geométricas, deficiência em suas estruturas, revestimentos mal selecionados, compactação com deficiência em suas camadas e a falta de gerenciamento para sua conservação. Thompson (2018) [01] salienta que o transporte representa um dos maiores elementos de custo, especialmente para operações em cavas profundas e extensas. Estimativas mostram o custo de mineração, entre 50%, podendo alcançar a 80% Mohutsiwa e Musiwini (2015) [02], está associado com carregamento e transporte de materiais em tais cavas. Isso se traduz em uma significativa oportunidade em melhorar o aproveitamento de recursos considerando a redução em custo através da adequação das estradas de transporte.

Em um levantamento realizado por Thompson (2009) [03], cerca de metade dos acidentes nas estradas de mina surgem de deficiências de projeto originado por fatores funcionais. Thompson e Visser (1999) [04], Thompson e Visser (2000) [05] e Dotto (2014) [06] definem que o projeto funcional da rodovia é centrado na seleção de um material ou um conjunto de materiais mais apropriado para o revestimento da estrada. Tratando-se das características estruturais, Thompson e Visser (2006) [07] e Thompson (2011) [08] definem que o objetivo de um projeto estrutural é construir uma estrada de transporte que possa suportar as cargas impostas ao longo do tempo de vida da estrada sem a necessidade de manutenções excessivas.

A maioria das grandes minas no país possuem uma vasta rede de coleta de dados em diversas fases do processo produtivo, não diferente na mina, os dados coletados durante a operação dos caminhões se mostram uma importante base de dados para análises e auxílio na tomada de decisões. Os estudos realizados por Park, Popov, Cole (2004) [09]; Hugo (2005) [10] e Ngwangwa e Heyns (2014) [11] propõem procedimentos para utilizar respostas medidas em um veículo para reconstruir perfis de estradas e seus defeitos. A identificação de defeitos em estradas uma vez associados com o posicionamento geográfico dos equipamentos, à medida que eles se deslocam pelas vias, demonstram ser uma solução adequada para o gerenciamento de manutenção das estradas.

O entendimento do comportamento e tendências de defeitos ao longo da estrada e como elas respondem aos caminhões que as utilizam, seja pelas suas extensões, severidade e frequência de surgimento, resultam no aumento da resistência ao rolamento. O primeiro passo para otimizar o direcionamento de recursos. Sendo assim, o objetivo do trabalho é analisar e modelar a velocidade teórica dos caminhões fora de estrada durante seu deslocamento carregados e descarregados de forma a indicar locais ou regiões com problemas geométrico, identificar melhoria nas estradas para ganho de tempo de ciclo e redução de desgaste de pneus e componentes através de indicadores operacionais que forneçam indícios sobre a qualidade das estradas de mineração

METODOLOGIA

Para ilustrar a metodologia adotada, foi conduzido um estudo de caso na Mina do Sapo pertencente ao complexo Minas-Rio, localizado no município de Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais. Nessa mina, foram escolhidas três estradas principais, conforme destacado na Figura 1, com o objetivo de realizar primeiramente um diagnóstico e posteriormente uma avaliação de oportunidades de melhorias na geometria dos acessos em que trafegam caminhões de grande porte, modelo 830E-AC da Komatsu. Essas estradas possuem alta

relevância por serem vias principais, permanentes, de alto volume de tráfego e que possuirá uma vida operacional longa. Suas características geométricas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características geométricas dos acessos

Características geométricas dos acessos				
Estrada	Comprimento (m)	Largura de Pista (m)	Altura de Berma (m)	Área (m ²)
Britador	1.580	35	2,2	58.381
Step3	3.222	30-33	2,1	105.611
Fase4	2.781	40	2,0	88.019

O controle e monitoramento dessas vias são fundamentais para reduzir impactos diretos no desempenho dos equipamentos. Uma boa estratégia de monitoramento da qualidade e manutenção desses acessos trazem consigo a expectativa de redução nos tempos de ciclo, redução de desgastes dos componentes do caminhão e aumento de segurança durante o tráfego.

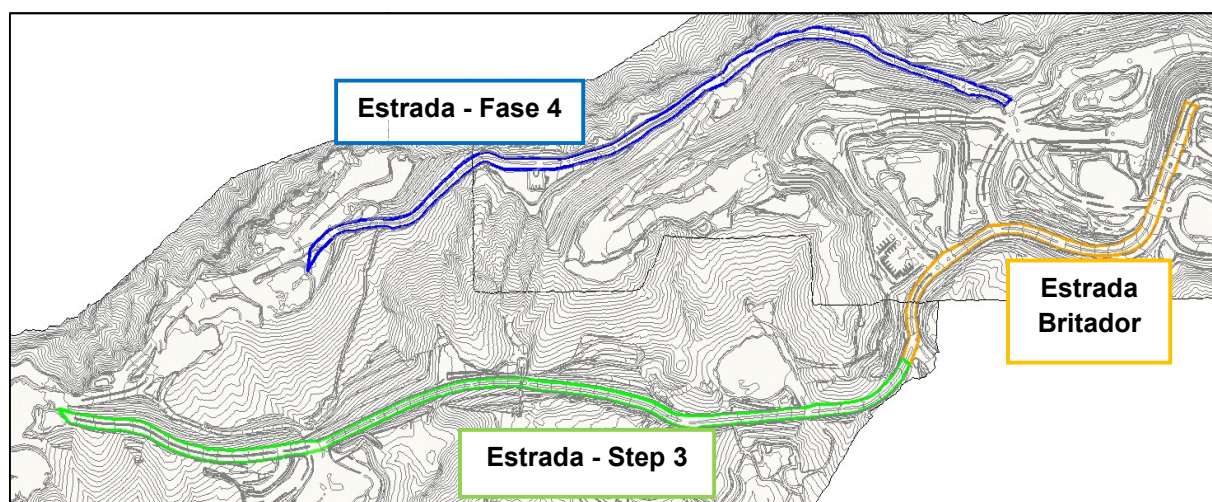


Figura 1 - Estradas permanentes selecionadas para avaliação

Uma vez definidas as estradas de interesse para o estudo, por meio de levantamentos topográficos, foram demarcados pontos a cada 50 metros ao longo do eixo dos acessos, contendo suas coordenadas UTM (x, y e z). Esses pontos foram utilizados para calcular a velocidade trecho a trecho, possibilitando a avaliação do comportamento do deslocamento dos caminhões com mais detalhes, considerando o estado de conservação existente nas estradas. O sentido de transporte de material para cada estrada pode ser visto na Figura 2.

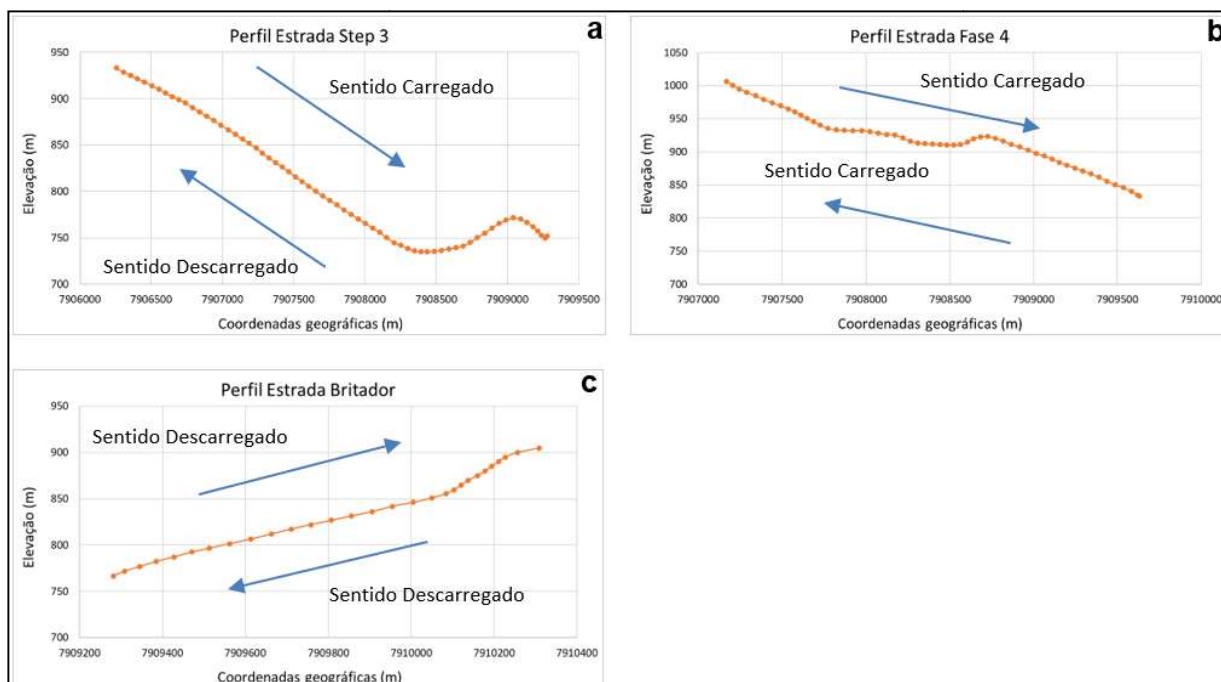


Figura 2 - Perfil da estrada (Pontos a cada 50m) permanente Step 3 (a), Fase 4 (b) Britador (c)

Para calcular o desempenho dos caminhões nas condições atuais das estradas, foi utilizado o software TALPAC da fornecedora RungePincokMinarco. Para isso, foi necessário importar os perfis das três vias, determinar a resistência ao rolamento de cada estrada e carga média dos caminhões. Destaca-se que na mina, a velocidade máxima permitida para caminhões fora de estrada são de 40km/h.

Um parâmetro importante para simular a velocidade teórica dos equipamentos é a resistência ao rolamento que as vias apresentavam no momento que o estudo estava sendo realizado. Esse levantamento foi feito a partir da aplicação do protocolo de inspeção visual que permite uma avaliação qualitativa, gerando uma estimativa de resistência ao rolamento. Esse procedimento possibilitou pontuar cada uma das três estradas quanto ao nível de severidade e extensão dos defeitos ao longo de trechos dentro de cada um dos acessos e que estão relacionados à resistência ao rolamento. Os itens avaliados e que apresentam correlação direta à resistência ao rolamento foram: Deformações, Corrugações, Trilha de rodas, Material solto, Caráter pedregoso.

A fim de verificar se a velocidade teórica calculada para cada estrada representava a realidade da mina, foi realizado o comparativo com a velocidade praticada nas estradas da mina. Essas velocidades, juntamente com suas coordenadas geográficas foram coletadas utilizando o sistema de despacho durante o período de estudo à medida que o caminhão se deslocava pelas estradas.

É importante entender o impacto que pequenas alterações constantes nas camadas de revestimento podem implicar na velocidade das estradas. Após a análise e verificação de problemas nos perfis reais levantados, foram propostas correções geométricas nas cotas dos perfis reais, cortes e aterros, de forma a restabelecer as condições originais de projeto. Considerando que o critério para realizar as alterações foi adotar a menor necessidade de movimentação de material possível para ajustar a inclinação longitudinal ao projeto conceitual dessas estradas.

DISCUSSÃO E RESULTADOS

O levantamento feito em campo para identificação dos defeitos em acesso identificou 5 principais causas para o aumento da resistência ao rolamento das estradas não pavimentadas. Esses defeitos aumentam fortemente a rolagem livre do veículo.

As deformações e trilha de rodas foram os problemas mais severos e mais frequentes encontrados nos acessos da mina, o que sugere uma necessidade de revisar o projeto estrutural dessas vias. As corrugações, material solto na pista e o caráter pedregoso das estradas foram identificados com menor grau de severidade e extensão nos acessos. Na Tabela 2, podem ser vistos alguns registros fotográficos dos defeitos encontrados durante a inspeção visual das estradas.

Tabela 2 - Defeitos identificados e avaliados nas estradas

Defeito	Deformações	Material solto na pista	Corrugações	Trilha de pneus
Análise Visual				

Considerando-se uma velocidade média de 25km/h nessas vias, a resistência ao rolamento que essas estradas oferecem aos equipamentos é de aproximadamente 3,5% e representam aproximadamente 55% de toda extensão das estradas estudadas. Na Figura 4 é possível observar que em determinados trechos, destacados em vermelho, apresentam uma resistência ao rolamento superior a 4.1%, principalmente na estrada da Fase 4. Na estrada do britador, apresenta uma pequena extensão de resistência ao rolamento fora dos valores recomendados. Esse trecho tem forte impacto devido ao grande fluxo de caminhões vindo da estrada do Step3, estrada da Fase 4 e retomada de minério dos estoques em direção ao britador. No geral, esses trechos representam 9,2% de toda extensão de estrada analisada. Finalmente, destacam-se em verde alguns trechos em que a resistência ao rolamento apresenta valores próximos ao ideal para estradas não pavimentadas, em torno de 2.5% a 3%, representando 35.9% de toda extensão de estrada.

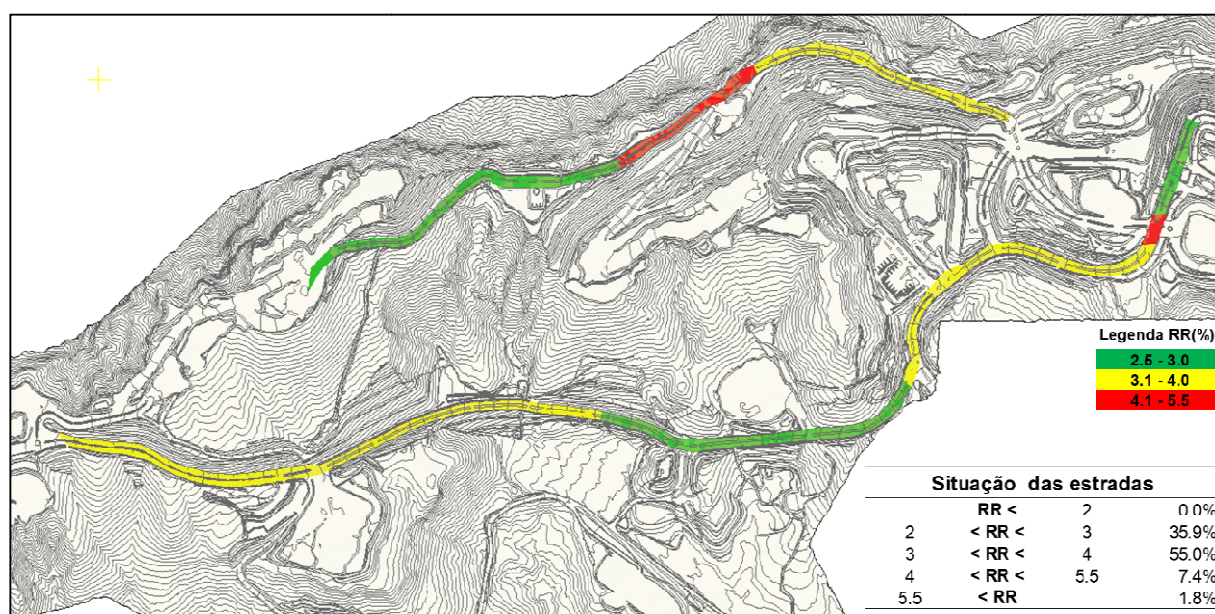


Figura 3 - Situação da resistência ao rolamento das estradas

Os dados coletados durante a fase de estudo mostraram que para a estrada da Fase 4, no trecho 2, a curva teórica proposta não está representando a velocidade real desenvolvida pelos caminhões carregados. Esse trecho apresenta uma variação na inclinação muito alta em seus 500 metros de extensão, forçando os caminhões a manterem a velocidade abaixo do valor esperado (curva azul). Para os demais trechos dessa estrada, a curva teórica apresentou um deslocamento da velocidade carregado, conforme pode ser observado na Figura 5, em aproximadamente 3km/h a menor, enquanto para o trecho de volta, com os caminhões descarregados, os dados estão relativamente aderentes à curva teórica estimada de velocidades esperadas.

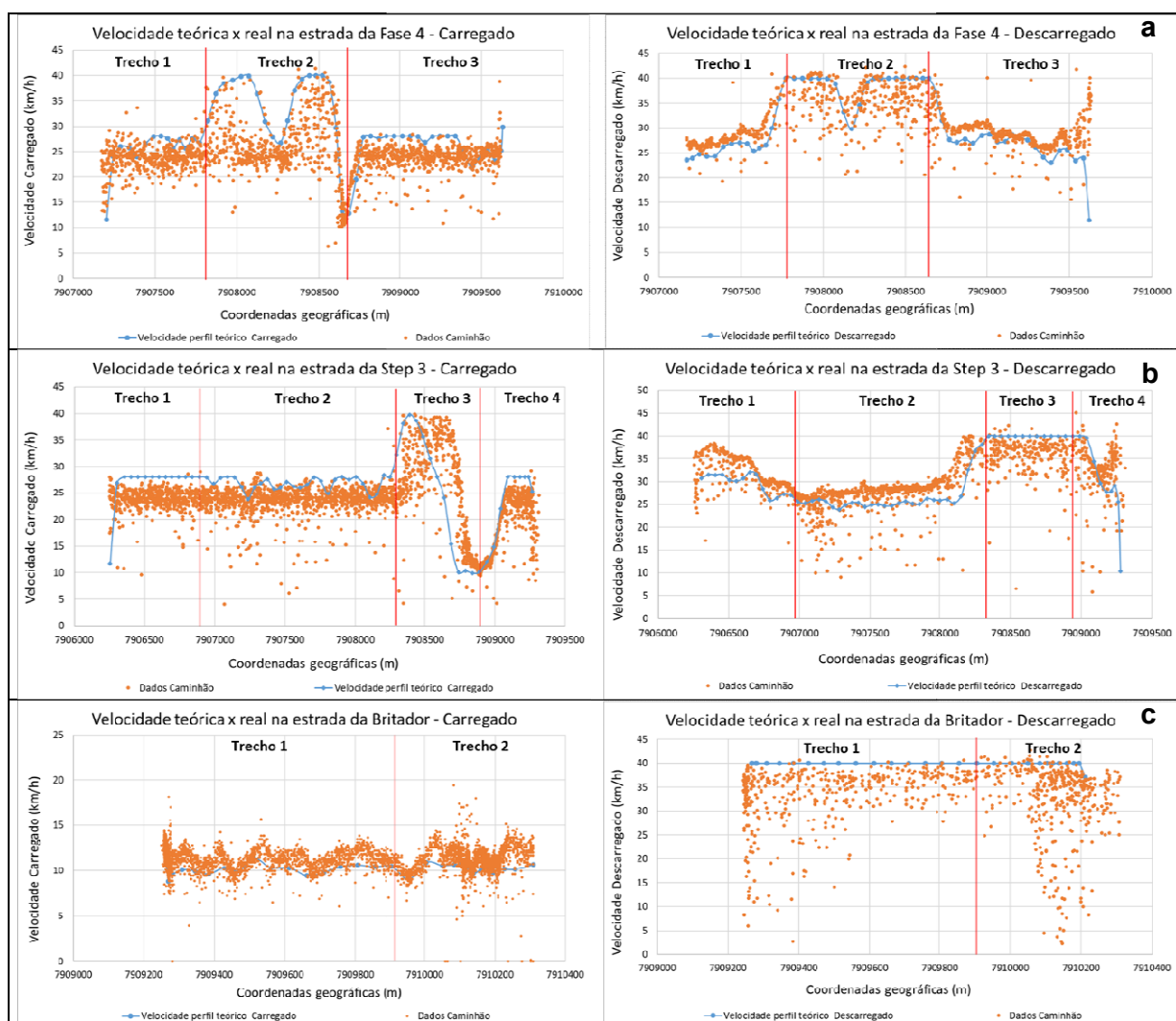


Figura 4 - Comparativo da curva de velocidade teórica com os dados de campo da estrada Step 3 (a) estrada Fase 4 (b) estrada Britador (c) para os caminhões carregados e descarregados

A velocidade ponto a ponto dos caminhões em cada estrada, obtida pelo *software* de dimensionamento, mostra que, através da análise dos dados de velocidade, pequenas variações na declividade ou de resistência ao rolamento ao longo do acesso influenciam negativamente na manutenção de uma velocidade de deslocamento contínua dos caminhões sobre essas vias. Para o perfil de velocidade da estrada do Step 3, visto na Figura 6, observa-se que em aproximadamente 1.5 km de pista no trecho 2, a variação na inclinação faz com que os caminhões precisem constantemente alternar entre frenagem e aceleração para se adequarem às condições de inclinação. Essa variação é mais perceptível quando os caminhões estão trafegando com carga. A análise do perfil de velocidade dos caminhões quando descarregados mostram impactos menores na velocidade ocasionados por esses defeitos.

Após realizadas as correções geométricas nas cotas dos perfis reais, avaliando-se a estrada do Step 3, houve um incremento na velocidade de aproximadamente 3,60% para o trecho 2 (Figura 6(a)) com maior variação na inclinação. A velocidade do caminhão carregado simulada para o trecho destacado são de 26,8km/h, após os ajustes da inclinação essa velocidade teórica subiu para 27,8km/h. Quando analisado o trecho de volta, descarregado, o ajuste feito no acesso manteve praticamente a velocidade simulada da via atual de 26,1km/h, Figura 6(b). Demais trechos da estrada, não apresentaram ganhos ou perdas significativas na velocidade simulada no perfil atual.

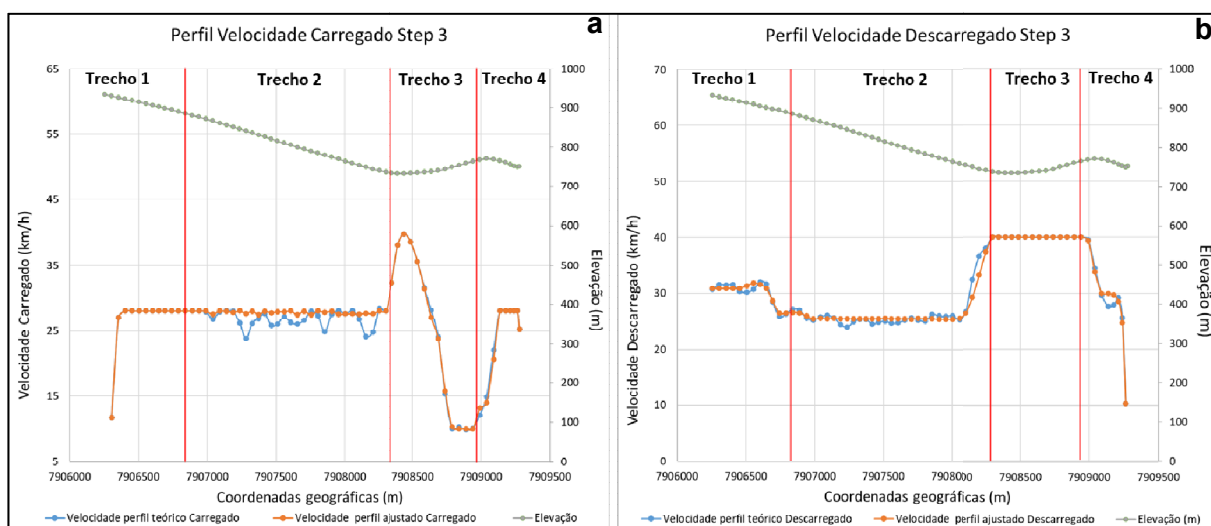


Figura 5 – Perfil de velocidade ajustado para a estrada do Step 3 Carregado (a) Descarregado (b)

A estrada da Fase 4 obteve uma melhoria na velocidade nos trechos 1 e 3. Em relação ao perfil teórico simulado, essa melhoria foi de aproximadamente 4.1% e 6,9% para sentido carregado, Figura 7Figura 6(a), e 1.55% e 4.66% para descarregado, Figura 7Figura 6(b).

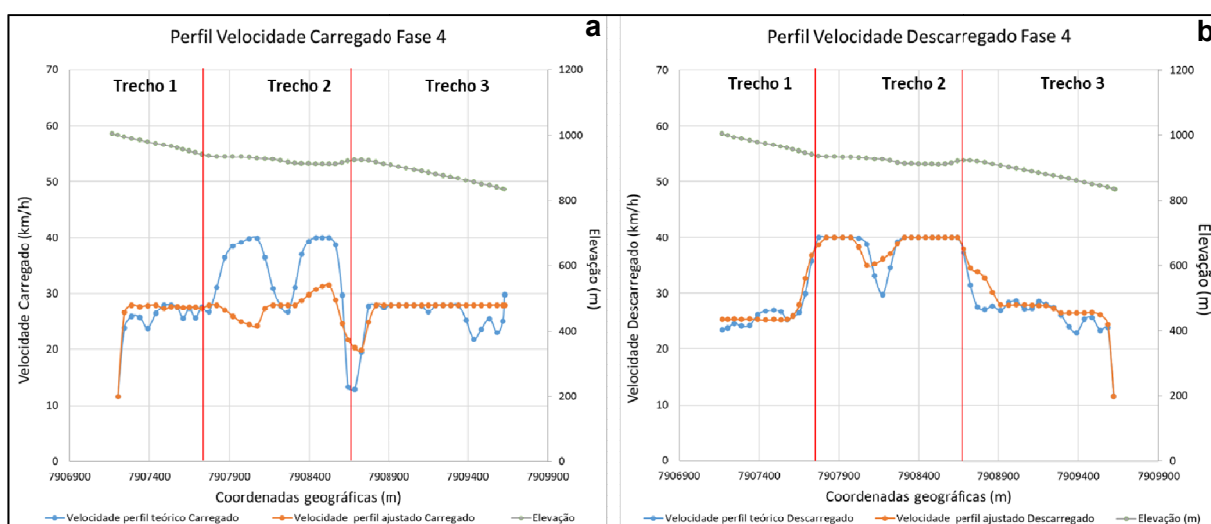


Figura 6 - Perfil de velocidade ajustado para a estrada do Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)

O perfil de velocidade carregado da estrada do Britador, Figura 8(a), foi o que apresentou variação em todos os dois trechos, totalizando 1650 m, isso mostra as constantes frenagens e necessidade de aceleração que os caminhões precisam fazer quando carregados. Essas mudanças de marchas contribuem para redução na qualidade de condução, aumento do desgaste da camada de revestimento, danos nos pneus e perda de produtividade. Ao

observar o perfil de velocidade na **Erro! Fonte de referência não encontrada**. Figura 8(b), quando descarregados, o caminhão não precisa mudar de marcha constantemente, podendo manter a velocidade constante ao longo da via. A velocidade calculada para a estrada do Britador quando os caminhões trafegam com carga são de 10,87km/h e 36,61km/h quando esses estão descarregados. A estrada do britador não obteve, em termos de velocidade, ganhos significativos tanto para a velocidade do caminhão carregado e descarregado. A velocidade média do caminhão carregado ficou em aproximadamente 10,2km/h e 36,6km/h quando descarregado, velocidades que se mantiveram praticamente inalteradas antes e após o ajuste geométrico nas cotas dos perfis reais. Mesmo não havendo ganhos significativos na velocidade média da estrada do britador, o ajuste geométrico pode permitir ganhos relacionados a redução no desgaste da camada de revestimento, uma vez que acelerações e frenagens constantes tem impacto direto na camada de revestimento da via.

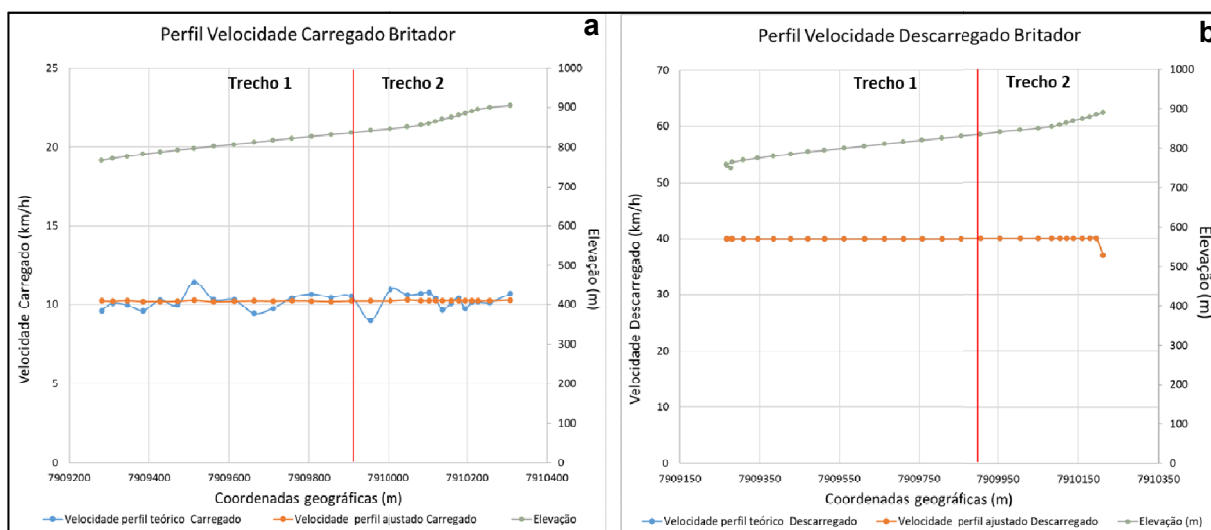


Figura 7 - Perfil de velocidade ajustado para a estrada Britador Carregado (a) Descarregado (b)

Na tabela 3 é possível observar as variações das velocidades em cada trecho das estradas estudadas. Essas velocidades refletem a velocidade teórica das estradas na data do estudo e o resultado obtido após os ajustes geométricos nas cotas dos perfis reais ao longo da estrada.

Tabela 3 - Quadro resumo de correção geométrica das estradas - Caminhão Carregado e Descarregado

Estrada - Carregado	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Estrada - Descarregado	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4
Step 3 Teórico	25,2	26,8	19,7	19,5	Step 3 Teórico	29,6	26,1	40,0	27,3
Step 3 Ajustado	25,2	27,8	19,7	19,4	Step 3 Ajustado	29,7	26,1	40,0	27,5
Fase 4 Teórico	24,2	32,3	25,1		Fase 4 Teórico	26,3	38,6	25,5	
Fase 4 Ajustado	25,2	27,3	27,0		Fase 4 Ajustado	26,7	38,9	26,7	
Britador Teórico	10,2	10,2			Britador Teórico	40,0	39,9		
Britador Ajustado	10,2	10,3			Britador Ajustado	40,0	39,9		

CONCLUSÃO

Os resultados apresentados na seção de validação da resistência ao rolamento da mina mostram o quanto importante é a manutenção e conservação das vias para garantir o melhor tráfego dos caminhões. As deformações e trilhas, presentes em maior número no

levantamento dos defeitos elevaram consideravelmente o resultado da resistência que a estrada oferece ao caminhão. Esse aumento sugere a necessidade da revisão dos projetos estruturais das estradas para que os defeitos sejam corrigidos de forma permanente.

Quando observado os valores das velocidades teóricas calculadas, essa métrica demonstrou ser válida para identificação de defeitos das estradas. Conforme visto nas análises de defeitos a partir da variação da velocidade no perfil de transporte, esses estão em sua maioria relacionados a inadequações dos projetos geométricos definidos para essas estradas. A constante variação nas inclinações das vias, ocorrida pela não aderência ao projeto inicial na sua fase de construção ou mesmo por manutenções realizadas sem o estabelecimento de um protocolo ou procedimento operacional padrão de verificação geométrica após manutenções, mostram que elas podem ocasionar em até quase 8% de variação na velocidade em determinados trechos da estrada.

Durante o comparativo da velocidade teórica das vias e os registros de velocidade dos caminhões vindos do sistema de controle, mostrou uma boa relação das variáveis utilizadas para compor a velocidade teórica em cada estrada estudada. No entanto, ainda que exista uma boa aderência entre a curva teórica e os registros, obstruções não identificadas no levantamento visual ou até mesmo restrições impostas pelo sistema de controle de velocidade ou receio dos operadores em trabalhar em velocidades próximas ao limite de segurança mostraram como possíveis impactos no alcance da velocidade teórica simulada. Para a equipe de planejamento de lavra, essas variáveis passam a ser importantes durante a fase de dimensionamento dos caminhões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] THOMPSON, R. J. (2018), Using Big Data to Predict Haul Road Performance. Engineering and Mining Journal, p. 34-37.
- [02] MOHUTSIWA, M; MUSINGWINI, C. (2015), Parametric estimation of capital costs for establishing a coal mine: South Africa case study. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Journal, p. 789-797.
- [03] THOMPSON, R.J. (2009), Haul Road Design Considerations Recognizing, managing and eliminating safety critical defects on mine haul roads. Engineering & Mining Journal, p. 36-43.
- [04] THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. (1999), Designing and managing unpaved opencast mine haul roads for optimum performance, SME Annual Meeting, p. 1-9.
- [05] THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. (2000), The functional design of surface mine haul roads. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, p.169-180.
- [06] DOTTO, M.S. Impact of hauler scale in mine planning. (2014), University of Alberta. Edmonton, 92 páginas.
- [07] THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. (2006), Selection and maintenance of mine haul road wearing course materials. Mining Technology: IMM Transactions section A, p. 123-128.
- [08] THOMPSON, R.J. (2011), Building Better Haul Roads - Higher payloads and autonomous operations need roads designed for structural strength, Engineering & Mining Journal, p.48-53.
- [09] PARK, S.; POPOV, A.A.; COLE, D.J. (2004), Influence of soil deformation on off-road heavy vehicle suspension vibration, Journal of Terramechanics, p.41-68.
- [10] HUGO D. (2005), Haul road defect identification and condition assessment using measured truck response, University of Pretoria, 119 páginas.
- [11] NGWANGWA, H.M.; HEYNS, P.S. (2014), Application of an ANN-based methodology for road surface condition identification on mining vehicles and roads, Journal of Terramechanics, p. 59-74.