



CIM Journal

ISSN: (Print) (Online) Página Principal do CIM Journal: <https://www.tandfonline.com/loi/ucim20>

Ganhos financeiros obtidos através da implementação do sistema de varredura de volume de carga em caminhões de mineração subterrânea

P. Knights e M. Reuter

Para citar este artigo: P. Knights & M. Reuter (2023): Ganhos financeiros obtidos através da implementação do sistema de varredura de volume de carga em caminhões de mineração subterrânea, CIM Journal, DOI: 10.1080/19236026.2023.2186642

Para acessar o link deste artigo: <https://doi.org/10.1080/19236026.2023.2186642>




©2023 O(s) Autor(es). Publicado sob licença da Taylor & Francis Group, LLC.



Disponível online desde: 18 de Abril de 2023.



Envie o seu artigo para esta revista 



Quantidade de visualizações do artigo: 52



Consultar artigos relacionados 



Visualizar dados do Crossmark 

Ganhos financeiros obtidos através da implementação do sistema de varredura de volume de carga em caminhões de mineração subterrânea

P. Knights e M. Reuter

School of Mechanical and Mining Engineering, Universidade de Queensland, Brisbane, Austrália

ABSTRACT

This paper examines the economic benefits of employing a portal-mounted load volume scanner (LVS) system to manage payload and optimize fuel consumption of haul trucks. It does so through the analysis of LVS and fuel transaction data collected over a seven-month period from a Central Queensland gold mine. A high incidence of carry back (62% of all cycles) was detected in trucks entering the mine portal. The mean carry back was 0.24 m³ or approximately 0.4 tonnes (t) per cycle. Possibly as a result of carry back, truck load volumes were skewed to the high side: 9.4% of loads exceeded +10% of the mean. The total carry back was estimated at 1,780 t of ore worth \$370k (Australian dollars). Assuming a gold grade of 2.5 g/t and an all-in mining cost of \$1,400/oz, this equates to an opportunity cost of slightly more than \$300k/year: \$290k in lost production plus \$12k in additional fuel costs.

KEYWORDS

Carry back, Payload, Underground truck, Volume scanning

INTRODUÇÃO

Em operações de mineração subterrânea, é uma prática usual a utilização de caminhões articulados apropriados para aplicações de baixo perfil, com a finalidade de efetuar o transporte de minério e rejeitos advindos das galerias. Ainda que opções movidas a bateria e trole estejam começando a surgir como alternativas no mercado, a tecnologia predominante nas frotas de caminhões em operação ainda é a dos motores a diesel de combustão interna. O transporte por meio de caminhões, não somente acarreta um custo significativo para as operações de mineração subterrânea, mas também se manifesta como um fator crucial no consumo de energia, além de ser um contribuinte para o aumento das emissões de gases de efeito estufa. À medida que a atenção se volta para a descarbonização no transporte por caminhões, torna-se imprescindível garantir que as operações realizadas por esses veículos, sejam conduzidas com a máxima eficiência possível.

A determinação da eficiência dos sistemas de transporte por caminhões, é realizada pela relação entre a carga útil média transportada e o tempo de ciclo. A determinação dos tempos de ciclo se dá pela soma dos períodos relacionados a uma sequência de eventos. Primeiramente, o caminhão sem carga ingressa no portal do túnel e segue pela descida até o ponto de carregamento. O material fragmentado resultante do desmonte, é removido da área de escavação por uma carregadeira LHD e depositado no caminhão de transporte. Essa operação ocorre em ciclos, até que o caminhão alcance sua capacidade máxima. No desfecho da operação, o caminhão carregado retorna à superfície, subindo pela rampa e saindo pelo portal do túnel para efetuar a descarga do material no estoque empilhado de minério bruto

(Figura 1). Com o propósito de se alcançar a máxima eficiência, é essencial que as cargas dos caminhões não excedam 10% da carga nominal recomendada. Quando as caçambas estão sobrecarregadas, os caminhões tendem a descer mais lentamente, o que resulta em tempos de ciclo mais longos e aumento no consumo de combustível. A operação de caminhões subcarregados implica em um custo de oportunidade, devido ao carregamento inadequado, provocando assim um aumento nas emissões de CO₂ por tonelada (t). O material residual (também conhecido como material remanescente), que fica retido na caçamba após o descarregamento, é transportado de volta à mina em um ciclo subsequente de retorno. Tal circunstância, acaba provocando um aumento no consumo de combustível dos caminhões e intensificando o desgaste dos pneus, além de dar margem à possibilidade de superaquecimento dos freios de retardamento hidráulico.

A Loadscan é uma companhia de pequeno a médio porte, situada na Nova Zelândia, que se dedica à fabricação de equipamentos de escaneamento volumétrico a laser. A tecnologia é empregada em diversos setores, incluindo mineração, construção civil, pedreiras, extração de areia e cascalho, e também na produção de cascas de árvores e coberturas mortas. Por meio da sua subdivisão Loadscan, a Mine Payload Technologies emprega o Sistema de Varredura de Volume de Carga Útil™ para identificação de subcarregamentos, presença de material residual e carregamentos descentralizados, com o propósito de otimizar a eficiência, fortalecer a transparência e maximizar a lucratividade da operação.

Este estudo tem por finalidade analisar os ganhos financeiros obtidos decorrentes da implementação de um sistema de varredura de volume de carga útil (LVS) instalado em portal,



Figura 1. Foto de caminhão carregado saindo pelo portal do túnel, e o scanner de volume de carga montado na estrutura do portal.

com o propósito de gerenciar o carregamento e otimizar o consumo de combustível. Neste trabalho, é apresentada uma análise dos dados de escaneamento de volume de carga (LVS) e dos registros de consumo de combustível, coletados durante um período de sete meses em uma mina de ouro situada na região de Central Queensland, na Austrália. Este estudo não engloba a avaliação dos possíveis benefícios que podem ser obtidos em termos de tempo de operação da frota, resultantes de melhorias potenciais na durabilidade dos pneus, componentes, motor e freios de retardamento hidráulico, devido ao gerenciamento da carga útil.

SISTEMAS DE MEDIÇÃO VOLUMÉTRICA E MÁSSICA DA CARGA ÚTIL

Existem múltiplos métodos que podem ser adotados para se realizar a medição de massa e volume das cargas úteis transportadas nas caçambas dos caminhões utilizados na mineração subterrânea. Os sistemas de medição de carga útil disponíveis atualmente no mercado, podem ser agrupados em duas principais categorias: (1) aqueles que exigem contato físico para efetuar a medição das cargas (como balanças de pesagem e sistemas embarcados para monitoramento de carga útil) e (2) sistemas sem contato (baseados em visão computacional e medição a laser).

Balanças de Pesagem

Possivelmente o método mais convencional usado para a medição de cargas úteis envolve a utilização de balanças de pesagem para caminhões. Essas balanças podem ser instaladas de forma temporária ou permanente em um ponto específico da rota de transporte, fora do portal. O procedimento consiste na aferição do peso bruto do veículo e, em seguida, na dedução do peso do veículo vazio, possibilitando assim a obtenção do valor correspondente à massa da carga útil transportada. Nesse caso, para realizar a medição, é necessário o contato físico entre o caminhão e a balança de pesagem. Os valores de peso são obtidos por meio da medição da pressão do fluido hidráulico ou da deformação da longarina (esta

última, por meio de célula de carga — *strain gauge*). Esses sistemas são altamente eficazes em medir as variações na distribuição da carga útil. Por outro lado, os caminhões precisam parar para que sua carga seja pesada, o que pode implicar em um acréscimo de 30 segundos nos tempos de ciclo. A existência desse atraso configura um fator adicional que, de certa maneira, dificulta a realização do monitoramento do material remanescente nas caçambas, à medida que os caminhões vazios retornam à mina. Cabe ressaltar que instrumentos de medição de pressão e células de carga — *strain gauge*, necessitam de recalibrações periódicas. Como um último inconveniente a ser pontuado, ainda existe o custo operacional relacionado à manutenção das partes móveis do sistema.

Vaziri, Haas, Rothenburg e Haas (2013) desenvolveram uma balança de pesagem em movimento, para uso na indústria da construção, utilizando estruturas de concreto armado e células de carga baseadas na tecnologia *strain gauge*. O sistema é composto por um “conjunto de sensores e instrumentos que medem a força dinâmica exercida nos pneus, o espaçamento dos eixos, a velocidade, o tempo e a distância entre eixos, com o propósito de computar e exibir os dados sem a necessidade da interrupção do tráfego regular de veículos.”

Sistemas embarcados para monitoramento de carga útil

Os sistemas embarcados destinados ao monitoramento de carga útil, geralmente realizam a medição da pressão dos amortecedores hidráulicos dos veículos. No entanto, a estrutura do caminhão é concebida de forma que a caçamba se apoie nos batentes durante as etapas de carregamento e transporte. Somente durante a etapa de descarga do ciclo, é que a pressão do cilindro hidráulico de elevação corresponde à carga útil. Essa realidade implica em um cenário onde há somente um curto intervalo de tempo para efetuar as medições, além da necessidade de tratar adequadamente os transientes hidráulicos a fim de considerar suas influências na dinâmica do sistema de elevação. A Newtrax, empresa canadense adquirida recentemente pela Sandvik Mining and Rock Technologies, oferece um sistema de Telemetria para Equipamentos Móveis que pode ser integrado a um sistema personalizado de gerenciamento de carga útil para veículos de transporte, carregadoras e inclusive caminhões para mineração subterrânea. O sistema foi implantado em cinco caminhões na mina Matagami da Glencore, em Quebec, Canadá (Gleeson, 2019). As distâncias de transporte são relativamente extensas, totalizando aproximadamente 8 km. É fundamental que se otimize o carregamento para os 60 t nominais para se alcançar a máxima produtividade. Segundo Gleeson (2019), a mina obteve um(a):

- aumento de 4% a 6% na utilização de transporte de minério,
- uma melhoria de 4% na eficiência global dos equipamentos, e
- aumento de 5% no número de carregamentos por ciclo

Sistemas de Visão Computacional

Sistemas de medição de volume que utilizam imagens de câmera estereoscópica apresentam um grau menor de precisão em comparação com os sistemas LIDAR (detecção e

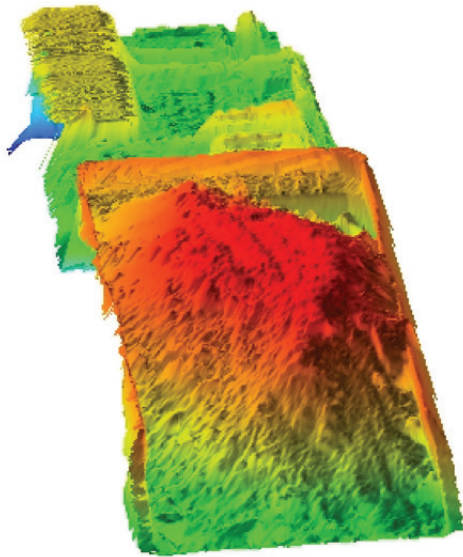


Figura 2. Imagem disponibilizada pela Loadscan, mostrando um caminhão de mineração subterrânea totalmente carregado; a região vermelha indica a parte mais elevada de escombros na caçamba; a área laranja demarca o perímetro da caçamba

varredura a laser). A presença de poeira é um dos principais inconvenientes associados a essa tecnologia, uma vez que acaba por deteriorar as imagens.

Sistemas de Medição a Laser

A aplicação da tecnologia de medição a laser em sistemas de varredura volumétrica de carga útil oferece uma solução de medição sem contato, ao mesmo tempo em que se apresenta como uma opção economicamente viável para o monitoramento das cargas. Tais tipos de sistemas de medição, estão associados a custos baixos em termos de suprimentos, instalação e manutenção. O sistema de medição LVS da Loadscan é uma solução que opera sem a necessidade de contato físico, realizando a medição conforme o caminhão atravessa o dispositivo, viabilizando a medição volumétrica de materiais a granel (International Mining, 2016). Uma das vantagens apresentadas por esse sistema, é que ele elimina a necessidade de quaisquer manutenções ou calibrações periódicas. Além disso, não é necessário se equipar individualmente cada caminhão da frota com sistemas de pesagem embarcados, tampouco a instalação de uma balança de pesagem fixa. Desta forma, basta que se tenha uma única instalação, e que não se exige grande trabalho de terraplanagem ou calibração. A atratividade do Sistema LVS é evidenciada pela sua completa automação custos operacionais reduzidos e exigências mínimas de manutenção (International Mining, 2016).

Os sensores LiDAR são capazes de medir o volume de carga transportado pelos caminhões basculantes em uma única passagem pela sua área, dispensando a necessidade de parar o veículo. O modelo 3D gerado a partir dos dados coletados (Figura 2) é utilizado como referência para calcular o volume

Tabela 1. Conjunto de equipamentos de mineração de uma mina de ouro situada em Central Queensland, Austrália

Tipo de Equipamento	Modelo	Quant.	Capacidade nominal (t)
Caminhões	Epiroc MT6020	3	60
	Epiroc MT65	1	65
Jumbos	Sandvik DD420-60	1	-
	Sandvik 422i Dual Control	1	-
Carregadeiras	Cat R2900G	2	17,2
	Cat R1700G	1	12,5
	Sandvik LH517i	2	17,0
Perfuratrizes	Epiroc H1257	2	-
	Epiroc S7D	1	-

Os hífen têm a finalidade de representar os dados de perfuração na unidade m/h (não disponíveis).

de carga. A estimativa da carga útil pode ser obtida ao se conhecer a densidade do material solto carregado *ex-situ*. Divergências observadas entre as medições de massa e volume, podem ser utilizadas para se efetuar correções na massa específica.

O Sistema de Varredura de Carga Útil da Loadscan, disponibiliza informações em tempo real, exibindo imagens 3D ao vivo para cada carregamento, possibilitando o acompanhamento dos fatores de enchimento, bem como a detecção de carregamentos incorretos. “O sistema fornece uma imagem com precisão de $\pm 1\%$ da quantidade de material em processo de extração/transporte, e a varredura dos caminhões em sua rota de retorno permitirá que as minas possam monitorar e gerenciar de maneira adequada os ciclos de transporte ineficazes, bem como o material residual” (International Mining, 2016).

ESTUDO DE CASO

Detalhes referentes à mina subterrânea

A mina de ouro subterrânea que forneceu as informações para a condução deste estudo está situada em Central Queensland, Austrália. Essa operação se caracteriza por ser uma mina de veia estreita, que compreende diversas jazidas de minério ao seu entorno, sendo que algumas delas estão localizadas a até 7 km da entrada do portal. A mina utiliza um método de lavra subterrânea fundamentado no conceito de Avoca modificado. A fim de suprir as necessidades da planta de lixiviação por cianeto, que exige 600 000 toneladas por ano, a mina precisa satisfazer uma produção diária em torno de 1600 toneladas, resultando em uma produção anual de ouro variando de 50 000 a 75 000 onças, dependendo do teor do minério. A frota operacional é composta por quatro caminhões, sendo três deles modelos Epiroc MT6020 com capacidade de 60 t e um modelo Epiroc MT65 com capacidade de 65 t (vide Tabela 1).

Em 2021, a mina implementou o sistema LVS da Loadscan. O sistema encontra-se instalado na parede do *box-cut*, logo acima da entrada principal da mina (Figura 1). Um painel de mensagens digital indica aos motoristas quando o LVS está “pronto para o escaneamento”. Para que o processo de escane-

amento seja efetuado de maneira eficaz, é necessário que o motorista reduza a velocidade do veículo para uma marcha mais lenta. Um segundo painel indica ao motorista se o escaneamento foi realizado com sucesso ou não. Os dados da Loadscan são unificados ao sistema de banco de dados do Underground Digital Terrain, possibilitando a vinculação entre as varreduras e os caminhões, operadores ou equipes.

Dados fornecidos

Foram disponibilizados pela mina os dados a seguir, abrangendo um período de sete meses:

- No período compreendido entre 21 de dezembro de 2021 e 22 de agosto de 2022, um total de 14531 registros do sistema LVS foi contabilizado para todos os caminhões.
- Ao longo do período de 21 de dezembro de 2021 a 22 de julho de 2022, foram contabilizadas 2133 transações de combustível de caminhões.

A mina dispõe de uma balança de pesagem instalada, entretanto, ela não funciona em serviço durante o período de estudo. Dessa forma, a determinação das densidades do material solto não pôde ser conduzida de maneira direta. Para contornar esse inconveniente, a mina disponibilizou uma variedade de densidades de material para o segundo semestre de 2021. A partir desses dados, foi adotada uma densidade de 1,82 t por metro cúbico para todo o material solto transportado.

Tratamento de dados

A análise preliminar dos "dados dos caminhões que ingressam no túnel", provenientes do LVS e apresentados na Tabela 2, evidencia que os erros do scanner corresponderam a 18,5% de todas as leituras. Esses erros são decorrentes de caminhões em movimento excessivamente rápido ou de maneira irregu-

lar, ou seja, circulando fora da área estipulada ou diagonalmente a ela.

Analisando as diferenças entre os horários de entrada e saída, é possível calcular os tempos de ciclo dos caminhões. Nesse sentido, ao se combinar os dados advindos do LVS, com os de consumo de combustível, permite-se que os seguintes parâmetros sejam determinados:

- Volume de material contido na caçamba do caminhão ao sair do túnel
- Volume de material contido na caçamba do caminhão ao entrar no túnel
- Volume de material entregue à usina de beneficiamento de minério
- Duração total do ciclo que o caminhão demanda para ingressar e sair da mina com uma carga
- Consumo semanal de combustível
- Consumo semanal de combustível por (tonelada × hora de operação) por ciclo

RESULTADOS

Indicadores de produção referentes ao caminhão de mineração subterrânea

Os indicadores de desempenho dos caminhões ao longo de um período de sete meses encontram-se disponíveis nas Tabelas 3 e 4. As falhas de leitura ocorridas pelo scanner foram substituídas pela média dos volumes de saída. Vale ressaltar que o modelo de caminhão MT65 possui um volume de caçamba maior em relação aos modelos MT6020. A quantidade total de diesel consumida pela frota de caminhões ao longo do período de um ano foi estimada em $1,1 \times 10^6$ litros.

Tabela 2. Síntese dos dados obtidos a partir do sistema de escaneamento do volume de carga, relativos aos "caminhões que ingressam no túnel", coletados dos quatro caminhões de transporte Epiroc ao longo de um período de sete meses

Variáveis	MT6020 1	MT6020 2	MT6020 3	MT65	Total ^a
Período (dias)	212	216	217	214	859
Total de leituras do scanner, para os "caminhões que ingressam no túnel"	1417	1974	1478	1746	6615
Total de medições do scanner	1117	1684	1216	1373	5390
Total de erros do scanner	300	290	262	373	1225
Quantidade de ciclos com presença de material residual	729	1259	1010	1126	4124
Percentual de ciclos com presença de material residual (%)	51	64	68	64	62

^aRepresenta o valor médio de ciclos com presença de material residual

Tabela 3. Volumes médios de produção referentes aos quatro caminhões de transporte Epiroc ao longo de um período de sete meses

Variáveis de Saída	MT6020 1	MT6020 2	MT6020 3	MT65	Average
Volume médio (m ³)	27,36	27,27	24,65	29,64	27,23
Tonelagem média	49,80	49,63	44,86	53,94	49,56

Tabela 4. Volumes totais de produção referentes aos quatro caminhões de transporte Epiroc ao longo de um período de sete meses

Variáveis de Saída	MT6020 1	MT6020 2	MT6020 3	MT65	Total
Volume total (m ³)	39 432	53 777	36 727	53 524	183 460
Tonelagem total	71 766	97 874	66 843	97 413	333 896
Consumo Total de Combustível (l)	156 467	183 980	140 374	173 237	654 058

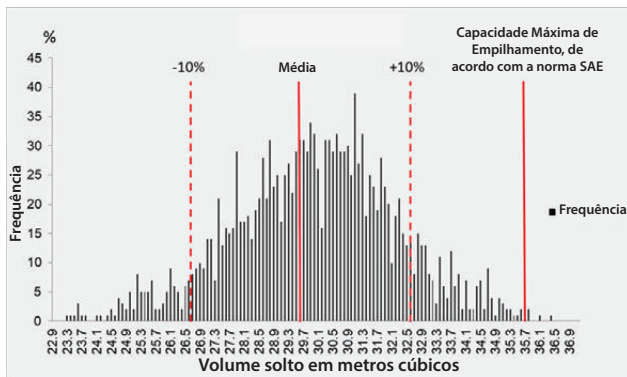


Figura 3. Representação da distribuição volumétrica para o caminhão de transporte Epiroc MT65, pertencente à classe de 65 toneladas.

Distribuição da Carga Útil

O volume médio de carregamento para o MT65, caminhão da classe de 65 t, foi de 29,6 m³, equivalente a 54 t (Figura 3). Esse valor é 17% inferior à capacidade máxima empilhada de 35,7 m³ estabelecida pela SAE International, a qual corresponde à carga total nominal de 65 t. Realizar o carregamento em três etapas com as carregadeiras maiores Cat 2900 G ou Sandvik LH517i resultaria em cargas úteis de 51–51,6 t, respectivamente, as quais se adequam melhor aos caminhões modelo MT6020 de 60 t. É possível que as carregadeiras precisassem efetuar carregamentos parciais a fim de atingir a capacidade máxima do modelo MT65, que é de 65 t. Ademais, é perceptível através da Figura 3 que 7,5% dos volumes de carga ficaram abaixo de -10% da média, enquanto 9,4% ultrapassaram +10% da média. Os volumes de carga demonstraram uma inclinação para o lado direito, possivelmente em decorrência da incidência significativa de material residual.

Sob essa perspectiva, existe oportunidade concreta para se maximizar a capacidade do caminhão modelo MT65, por meio do aumento de seu carregamento médio. Calcula-se que um aumento de 10% no volume médio de carregamento corresponda a cerca de \$0,9 milhões anuais (todos os montantes mencionados estão em dólares australianos) em incremento no lucro antes de impostos. No entanto, para que esse objetivo seja atingido, é essencial que se adote um controle mais eficaz na variação da carga. Por sua vez, essa variação é afetada pela distribuição dos fragmentos na pilha de escombros.

Material residual do caminhão

Um sistema LVS instalado na estrutura do portal oferece a vantagem de permitir a realização de varreduras nas caçambas vazias dos caminhões à medida que eles ingressam na mina. Essa prática pode ser empregada para identificar a presença de material residual, resultante da compactação e aderência de materiais na caçamba do veículo. (Confira o exemplo na Figura 4).

Constatou-se a presença de material residual em 62% de todos os ciclos de deslocamento (Tabela 2). Em declives

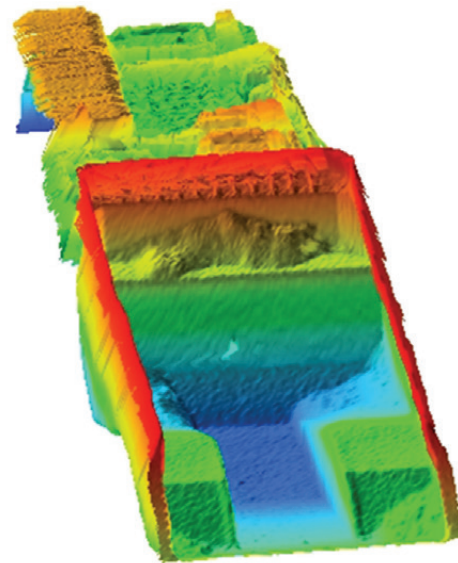


Figura 4. Imagem disponibilizada pela Loadscan, mostrando o material residual na caçamba do caminhão

acentuados, esse é um fator que pode contribuir para o superaquecimento dos freios de retardamento hidráulico. Na Figura 5, é possível observar a alta ocorrência de material residual registrada nos "dados dos caminhões que ingressam no túnel" para o caminhão MT65. Foram observados padrões semelhantes nos demais veículos. A quantidade de material entregue à usina também é impactada pela presença de material residual. No decurso do período de sete meses de estudo (Tabela 4), foram transportadas da mina um total de 333 898 toneladas, das quais 1784 toneladas (0,54%) foram reincorporadas ao sistema na forma de material residual. Isso se configura como um fator de discrepância entre as toneladas extraídas e as toneladas processadas. Todas leituras de carga reincorporadas que excederam 3 m³ foram consideradas como carregamentos intencionais, associados à manutenção das vias de acesso ou a práticas de reaterro. Esses dados foram descartados das análises subsequentes.

Foi considerado um fator de densidade de 1,82 t/m³ para converter os volumes em tonelagem. Admitindo-se um teor médio de ouro de 2,5 g/t e um valor do ouro de \$2580 por onça troy (\$83 mil/t), o prejuízo financeiro ao longo do período de sete meses foi estimado em \$370 mil (Tabela 5). Ao longo de um ano, estima-se que o prejuízo financeiro devido ao material residual seja um pouco mais de \$634 mil. Levando em conta uma estimativa conservadora para o custo total de produção de \$1400 por onça troy, o custo anual de oportunidade relacionado ao material residual totaliza \$290 mil em lucro antes dos impostos.

Consumo excessivo de combustível devido à presença de material residual

Por meio da adoção de estimativas para o consumo médio de combustível por metro cúbico de material solto, foi possível efetuar o cálculo do combustível gasto em decorrência da presença de material residual, e, nesse contexto, realizou-se a

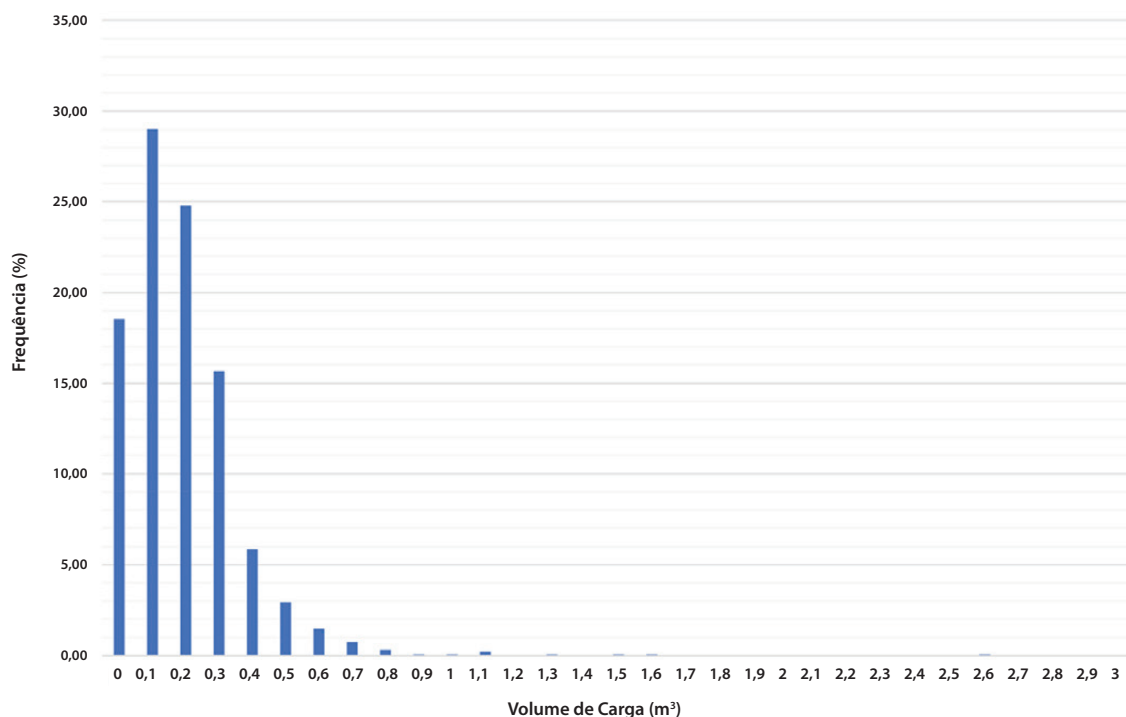


Figura 5. Distribuição das frequências das quantidades de carga que ingressam no portal, referentes ao caminhão de transporte Epiroc MT65

Tabela 5. Indicadores de material residual para os quatro caminhões Epiroc ao longo de um período de sete meses

Parâmetros do material residual	MT6020 1	MT6020 2	MT6020 3	MT65	Total ^a
Material Residual (m ³)	0,27	0,22	0,18	0,29	0,24
Volume Total (m ³)	199,43	276,07	181,16	323,36	980,01
Tonelagem	362,96	502,45	329,71	588,51	1783,63
Ouro @2,5 g/t	0,91	1,26	0,82	1,47	4,46
Prejuízo Financeiro (AUD)	75 315	104 258	68 414	122 116	370 103

^aO valor corresponde à média para o material residual.

Tabela 6. Consumo de combustível decorrente da presença de material residual para os quatro caminhões Epiroc ao longo de um período de sete meses

Ineficiências	MT6020 1	MT6020 2	MT6020 3	MT65	Total
Consumo de combustível decorrente da presença de material residual (l)	791	944	692	1047	3475
Custo do combustível (AUD)	\$1583	\$1889	\$1385	\$2093	\$6950

estimativa do consumo global de combustível, considerando um valor de \$2 por litro de diesel. Em termos proporcionais, o material residual representou cerca de 5400 litros de combustível por ano, culminando em um gasto de aproximadamente \$11800 (Tabela 6). Esse montante equivale a um pouco mais de 0,53% do consumo total de diesel da frota.

Redução do consumo de combustível por meio da otimização do transporte de carga útil

Visando alcançar um ponto ideal de carga útil para otimizar o consumo de combustível, analisou-se a relação entre o gasto semanal de combustível, expresso em litros (metros cúbicos soltos x tempo médio de ciclo), e a carga útil média. Neste contexto, o total acumulado (metros cúbicos soltos x horas de operação por ciclo) foi empregado como uma alternativa para

t-km, ou seja, o montante de trabalho realizado pelo caminhão ciclo a ciclo. Com a finalidade de minimizar as variações nas condições de carregamento subterrâneo, densidades de material e distâncias percorridas, optou-se por utilizar semanas como intervalos de dados. Optou-se por não considerar a primeira e a última semana de registros, haja vista que a quantidade de carregamentos não se mostrou suficiente para constituir dados com a precisão requerida.

Não foi constatada nenhuma correlação entre o consumo semanal de combustível, medido em litros por (metros cúbicos soltos x tempo médio de ciclo), e o volume médio de carga útil (Figura 6). O consumo médio de combustível se manteve praticamente constante, possivelmente devido às longas distâncias de transporte (ou seja, distâncias de ciclo completo de até 14 km), onde as variações de velocidade

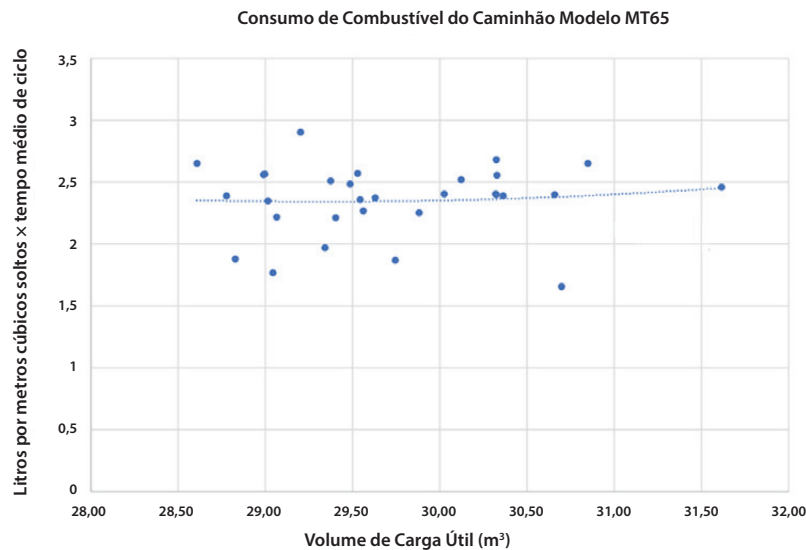


Figure 6. Consumo semanal de combustível do caminhão de transporte Epiroc MT65 em litros/(metros cúbicos soltos \times tempo médio de ciclo) em função do volume de carga útil transportada

decorrentes de alterações na carga útil, geraram apenas um impacto mínimo no tempo total de ciclo. Ademais, observou-se uma significativa oscilação no consumo semanal de combustível, provavelmente devido à variação na densidade do material solto.

CONCLUSÕES

Foi constatada uma alta ocorrência de material residual (62% de todos os ciclos) nos caminhões que passaram pelo portal da mina. O material residual correspondeu a um montante médio de $0,24\text{m}^3$ ou aproximadamente 0,4 toneladas por ciclo. Esse cenário pode ter resultado em um desequilíbrio nos volumes de carga na parte superior dos caminhões, com 9,4% das cargas excedendo +10% da média. O montante total de material residual foi estimado em 1780 toneladas de minério, com um valor correspondente de \$370 mil. Levando em consideração um teor de ouro de 2,5 g/t e um custo total de mineração de \$1400 por onça (oz), isso resulta em um custo de oportunidade um pouco acima de \$300 mil por ano, o que equivale a cerca de \$290 mil em perda de produção e \$12 mil em custos extras de combustível. O cálculo do material residual foi estimado com um erro de reconciliação de cerca de 0,54% entre as toneladas extraídas e as toneladas processadas.

Não foi constatada qualquer correlação entre o consumo de combustível e o volume de carga útil. Contar com informações precisas de carga útil por meio de uma balança de pesagem seria conveniente para viabilizar a redução das variações no volume de carga, bem como determinar um valor mínimo relativo para otimizar o consumo de combustível.

Com o incremento da carga média transportada, surge a possibilidade de otimizar a capacidade do caminhão MT65. No entanto, é imprescindível que se adote um controle mais rigoroso em relação à variação da carga, para que essa melhoria possa ser efetivamente alcançada. Recomenda-se que seja

conduzido um estudo para avaliar a distribuição atual do tamanho dos fragmentos presentes na pilha de escombros e, se aplicável, explorar abordagens adequadas para aprimorar essa distribuição.

Diante desse cenário, é recomendado que os responsáveis pela operação da mina considerem a possibilidade de utilizar os dados obtidos pelo sistema da Loadscan para implementar um alerta em tempo real, que tenha por objetivo identificar a presença de material residual de dimensões significativas ($> 0,3\text{m}^3$). A adoção de um sistema de jateamento de água de alta pressão ou equivalente poderia ser empregada para efetuar a remoção do material residual ao término de um turno ou sempre que necessário.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Superintendente de Engenharia da Mina e ao Engenheiro encarregado da Mina de ouro subterrânea de Central Queensland, por terem fornecido os dados necessários para a condução deste estudo.

DECLARAÇÃO DE DIVULGAÇÃO

Os autores deste documento não fazem referência a quaisquer possíveis conflitos de interesses.

SUBSÍDIO

O presente estudo foi conduzido com o respaldo financeiro da Loadscan Ltd, localizada em Hamilton, na Nova Zelândia.

INFORMAÇÕES SOBRE OS AUTORES

Peter Knights é Professor e Chefe da Disciplina de Mineração na School of Mechanical and Mining Engineering, na Universidade de Queensland, Brisbane, na Austrália. Ele possui

Bacharelado em Engenharia Mecânica pela University of Melbourne, Mestrado em Sistemas, pelo Royal Melbourne Institute of Technology e PhD pela McGill University, no Canadá. O foco de suas pesquisas está direcionado a sistemas de mineração-mecânica, com ênfase à segurança dos sistemas, manutenção e engenharia de confiabilidade. Atualmente, ele está à frente de um projeto que visa determinar experimentalmente os fatores de segurança associados ao deslocamento de pneus de caminhões de grande porte por meio de equipamentos de manuseio de pneus. *Maximillian Reuter* concluiu seu Bacharelado em Engenharia Mecânica pela University of Queensland, em 2022. Atualmente, ele atua como engenheiro de projetos na empresa empreiteira especializada em mineração, a Byrncut Services Pty Ltd. Esse projeto em particular foi conduzido como parte integrante de seu trabalho de conclusão de curso, o qual recebeu aprovação com distinção, durante sua graduação em Engenharia.

DECLARAÇÃO DE REVISÃO

Artigo revisado e aprovado para publicação pela Underground Mining Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gleeson, D. (2019). Canadian technology: Tapping the Tech. *International Mining*, 14(4), 77–85.
- International Mining*. (2016). Loadscan. Acessado em 25 de janeiro de 2023, em <https://im-mining.com/2016/09/14/loadscan-atminexpo/>
- Vaziri, S. H., Haas, C. T., Rothenburg, L., & Haas, R. C. (2013). Investigation of the effect of weight factor on performance of piezoelectric weigh-in-motion sensors. *Journal of Transportation Engineering*, 139(9), 913–922. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000561](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000561)