



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS

DOMINGOS SÁVIO OLIVEIRA TIMBÓ VASCONCELOS

**ACOMPANHAMENTO E ANÁLISE DAS OPERAÇÕES DE CARREGAMENTO E
TRANSPORTE NA LAVRA DE CALCÁRIO DA EMPRESA SM MINÉRIOS**

CRATEÚS-CE

2022

DOMINGOS SÁVIO OLIVEIRA TIMBÓ VASCONCELOS

ACOMPANHAMENTO E ANÁLISE DAS OPERAÇÕES DE CARREGAMENTO E
TRANSPORTE NA LAVRA DE CALCÁRIO DA EMPRESA SM MINÉRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
da Universidade Federal do Ceará, Campus de
Crateús, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Rafael Chagas Silva.

CRATEÚS-CE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- V45a Vasconcelos, Domingos Sávio Oliveira Timbó.
Acompanhamento e análise das operações de carregamento e transporte na lavra de calcário da empresa SM Minérios / Domingos Sávio Oliveira Timbó Vasconcelos. – 2022.
79 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2022.
Orientação: Prof. Me. Rafael Chagas Silva.
1. Mineração a céu aberto. 2. Carregamento e transporte. 3. Análise de operações. I. Título.
CDD 622
-

DOMINGOS SÁVIO OLIVEIRA TIMBÓ VASCONCELOS

ACOMPANHAMENTO E ANÁLISE DAS OPERAÇÕES DE CARREGAMENTO E
TRANSPORTE NA LAVRA DE CALCÁRIO DA EMPRESA SM MINÉRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
da Universidade Federal do Ceará, Campus de
Crateús, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovado em: ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Rafael Chagas Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Carlos Eduardo da Silva Araujo
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. de Minas Paulo Gildânio Ferreira Teixeira

A Deus.

Aos meus pais, Aloisio e Olímpia.

À minha irmã Lara e minha tia Aglaíce.

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu guia em todos os momentos.

Aos meus pais, Aloisio e Olímpia, e à minha tia Aglaíce, pelo suporte e incentivo.

À Universidade Federal do Ceará e aos professores do curso de Engenharia de Minas, pelo ensino de grande qualidade.

Ao Prof. Rafael Chagas Silva, pela orientação e pelo tempo dedicado.

Aos demais professores membros da banca examinadora, Prof. Carlos Eduardo da Silva Araujo e Prof. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira, pelas contribuições dadas ao trabalho.

Ao Eng. de Minas Paulo Gildânio Ferreira Teixeira, pela colaboração nas atividades desenvolvidas na SM Minérios e pela participação na banca examinadora.

À SM Minérios, por ter possibilitado a realização deste trabalho, e aos seus colaboradores, pelo compartilhamento de experiências.

Aos amigos que fiz no período de graduação, pelo companheirismo nesta jornada de grandes desafios. Em especial, Alberto, Éric, Alexander, Matheus, Vanessa, José Sales, Paulo Gildário, Wesley, Thiago, Eloisa e Rafael.

Aos amigos João Victor e Jandeilson, pela convivência e apoio, da escola de ensino médio à universidade.

RESUMO

Na mineração a céu aberto, o manuseio do material explotado é executado por operações de carregamento e transporte, em que os custos associados representam cerca de 60% das despesas totais da lavra. Para minimizar estes custos e garantir maior produtividade, é necessário que a operação se desenvolva de maneira eficiente, com condições de infraestrutura da mina que permitam um bom rendimento operacional, além do gerenciamento das atividades, de modo que melhorias e ajustes sejam feitos constantemente no processo produtivo. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo analisar o desenvolvimento das operações de carregamento e transporte de uma empresa produtora de calcário para identificar e discutir os fatores que podem influenciar na eficiência dos processos. Para tanto, três etapas foram executadas: primeiramente, foi realizado o reconhecimento do processo produtivo da empresa; em seguida, foram feitas coletas e análises de tempos de ciclo dos equipamentos; e por fim, realizou-se medições em rampas de acesso, juntamente com o mapeamento de vias de transporte. Os principais fatores que mostraram influência na eficiência da operação de carregamento, foram: ângulo de giro do equipamento e a resistência ao enchimento da concha na operação com escavadeiras; e o posicionamento da unidade de transporte para o recebimento da carga na operação com carregadeiras. Na operação de transporte, os fatores que mostraram influência na eficiência e no desenvolvimento das atividades estão relacionados a: condições de praças de carregamento, características mecânicas dos caminhões, rotas de transporte, inclinação de rampas de acesso, largura de vias de transporte e capacidade da planta de britagem. Todos estes fatores impactaram no tempo de ciclo dos equipamentos e, conseqüentemente, na produtividade das operações. Com base nisso, foi realizado um comparativo entre cenários operacionais de maior e menor eficiência a partir dos tempos coletados. Observou-se que uma redução de 1,44 minutos no ciclo dos caminhões proporcionaria um aumento de produção de 375 toneladas por turno. As considerações e recomendações contidas no trabalho levaram em conta a literatura consultada, as recomendações de fabricantes dos equipamentos e o porte do empreendimento. Sendo assim, espera-se que possíveis aplicações de recomendações feitas, mediante análise de pertinência e relevância, proporcionem redução de custos operacionais, além de ganhos de produtividade e segurança.

Palavras-chave: mineração a céu aberto; carregamento e transporte; análise de operações.

ABSTRACT

In open pit mining, the handling of exploited material is carried out by loading and transport operations, in which the associated costs represent about 60% of the total mining expenses. To minimize these costs and ensure greater productivity, the operation must be developed efficiently, with mine infrastructure conditions that allow for good operating performance, in addition to managing activities, so that improvements and adjustments are constantly made in the process. productive. Thus, this work aimed to analyze the development of loading and transport operations of a limestone company to identify and discuss the factors that can influence the efficiency of the processes. To this end, three steps were carried out: first, the recognition of the company's production process was carried out; then, collections and analysis of cycle times of the equipment were carried out; and finally, measurements were carried out on access ramps, together with the mapping of transport routes. The main factors that showed influence on the efficiency of the loading operation were: angle of rotation of the equipment and the resistance to the filling of the shell in the operation with excavators; and the positioning of the transport unit to receive the load in the operation with loaders. In the transport operation, the factors that showed an influence on the efficiency and development of activities are related to: conditions of loading plazas, mechanical characteristics of trucks, transport routes, inclination of access ramps, width of transport lanes and capacity of the crushing plant. All these factors impacted the cycle time of the equipment and, consequently, the productivity of operations. Based on this, a comparison was made between operational scenarios of greater and lesser efficiency from the times collected. It was observed that a reduction of 1.44 minutes in the truck cycle would provide a production increase of 375 tons per shift. The considerations and recommendations contained in the work took into account the literature consulted, the recommendations of equipment manufacturers and the size of the enterprise. Therefore, it is expected that possible applications of recommendations made, through analysis of relevance and relevance, provide a reduction in operating costs, in addition to gains in productivity and safety.

Keywords: open pit mining; loading and transporting; operations analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de etapas do desmonte de rochas com uso de explosivos.	17
Figura 2 – Desmonte mecânico com escavadeira.....	18
Figura 3 – Operação de carregamento: a) escavação; b) elevação; c) despejo.....	19
Figura 4 – Principais componentes de uma escavadeira: esteiras (1), cabine de comando (2), lança (3), braço (4) e caçamba ou concha (5).....	20
Figura 5 – Principais componentes de uma carregadeira: cabine de comando (1), braço (2), pistão hidráulico (3) e caçamba ou concha (4).	20
Figura 6 – <i>Shovel</i> a cabo (Caterpillar 7395).	21
Figura 7 – <i>Shovel</i> hidráulica (Liebherr R 9100B).	22
Figura 8 – Retroescavadeira hidráulica (Volvo EC950E).....	23
Figura 9 – <i>Dragline</i> (Liebherr HS 8300).....	24
Figura 10 – Carregadeira de rodas (Caterpillar 980L).	24
Figura 11 – Carregadeira de esteiras (Caterpillar 973K).....	25
Figura 12 – Operação de transporte por caminhões em mina a céu aberto.	26
Figura 13 – Caminhão basculante rodoviário (Volkswagen Constellation 32.360).	27
Figura 14 – Caminhão "fora de estrada" (Liebherr T284).....	28
Figura 15 – Caminhão articulado (Volvo A45G).....	28
Figura 16 – Fatores que geram a resistência ao rolamento.....	31
Figura 17 – Resistência de rampa.....	32
Figura 18 – Exemplo da relação entre a largura da estrada, número de faixas e largura do veículo	34
Figura 19 – GPS Garmin eTrex 10.	42
Figura 20 – Fita métrica Vonder.	44
Figura 21 – Medidor angular digital Minipa.	44
Figura 22 – Escavadeira hidráulica John Deere 350G.	46
Figura 23 – Escavadeira hidráulica Caterpillar 323A.	46
Figura 24 – Escavadeira hidráulica Caterpillar 323D.	47
Figura 25 – Pá carregadeira Caterpillar 950L.	48
Figura 26 – Pá carregadeira John Deere 644K.	48
Figura 27 – Pá carregadeira Caterpillar 938H.	48

Figura 28 – Caminhões Volkswagen Constellation 26.280 (em primeiro plano) e 31.320 (em segundo plano).....	49
Figura 29 – Caminhão Volvo VM 310.....	50
Figura 30 – Desenho representativo da pedreira com as principais rotas de transporte.....	51
Figura 31 – EH 01 posicionada sobre a pilha de material.	52
Figura 32 – Comparativo de tempos de ciclo da EH 01 nas coletas I e II.....	53
Figura 33 – Escavação a 180° do ponto de despejo.	54
Figura 34 – Escavação a 90° do ponto de despejo.	54
Figura 35 – Escavação a 45° do ponto de despejo.	55
Figura 36 – Indicação das zonas de escavação (A) e despejo (B).	55
Figura 37 – Operação de carregamento com carregadeira.	56
Figura 38 – Posicionamento de caminhão a 45° da pilha.....	57
Figura 39 – Manobra na praça de carregamento da cava 3 após ajustes.	58
Figura 40 – Comparativo dos tempos de manobra para carregamento em duas condições operacionais.....	58
Figura 41 – Comparativo dos tempos de transporte dos CBs 05 e 02 na rota 2.....	60
Figura 42 – Comparativo de velocidades médias de transporte nas rotas 1, 2, 3 e 4.	61
Figura 43 – Comparativo de tempos de transporte em rotas de diferentes DMTs.	61
Figura 44 – Caminhão em espera para passar por trecho de pequena largura.....	62
Figura 45 – Perfil atual (A) e perfil sugestivo (B) da rampa de acesso à cava 1.....	64
Figura 46 – Perfil atual (A) e perfil sugestivo (B) da rampa de acesso à cava 2.....	64
Figura 47 – Perfil atual (A) e perfil sugestivo (B) da rampa de acesso à cava 3.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator de resistência ao rolamento para diferentes tipos de superfície.....	31
Tabela 2 – Fator de conversão e empolamento de materiais.	37
Tabela 3 – Fator de eficiência de caçamba.	38
Tabela 4 – Informações das escavadeiras hidráulicas da empresa.	45
Tabela 5 – Informações das pás carregadeiras da empresa.....	47
Tabela 6 – Informações dos caminhões basculantes da empresa.	49
Tabela 7– Comparativo entre cenários operacionais.	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	Calcário	15
3.2	Operações mineiras	15
3.2.1	<i>Desmonte de rochas</i>	16
3.2.1.1	<i>Uso de explosivos</i>	16
3.2.1.2	<i>Desmonte mecânico</i>	17
3.2.2	<i>Carregamento</i>	18
3.2.2.1	<i>Equipamentos de carregamento</i>	19
3.2.2.1.1	Escavadeira de caçamba frontal (<i>shovel</i>)	21
3.2.2.1.2	Escavadeira de caçamba invertida (retroescavadeira)	22
3.2.2.1.3	Escavadeira com caçamba de arrasto (<i>dragline</i>)	23
3.2.2.1.4	Carregadeiras	24
3.2.3	<i>Transporte</i>	25
3.2.3.1	<i>Equipamentos de transporte</i>	26
3.3	Fatores que afetam a eficiência das operações de carregamento e transporte 29	
3.3.1	<i>Tempo de ciclo dos equipamentos</i>	29
3.3.2	<i>Características das vias de transporte</i>	30
3.3.2.1	<i>Resistência ao rolamento</i>	30
3.3.2.2	<i>Resistência de rampa</i>	31
3.3.2.3	<i>Largura das vias</i>	33
3.3.2.4	<i>Distância média de transporte (DMT)</i>	34
3.3.3	<i>Disponibilidade dos equipamentos</i>	34
3.3.4	<i>Produção dos equipamentos</i>	36
3.3.5	<i>Compatibilização e associação de equipamentos</i>	40
4	METODOLOGIA	42
4.1	Reconhecimento inicial	42
4.2	Coleta e análise de tempos de ciclo dos equipamentos	42

4.3	Mapeamento e medições de vias de transporte.....	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	Processo produtivo da SM Minérios.....	45
5.2	Operação de carregamento.....	52
5.2.1	<i>Carregamento com escavadeiras</i>	52
5.2.2	<i>Carregamento com carregadeiras</i>	56
5.3	Operação de transporte.....	57
5.3.1	<i>Condições da praça de carregamento</i>	57
5.3.2	<i>Características mecânicas dos caminhões</i>	59
5.3.3	<i>Rotas de transporte</i>	60
5.3.4	<i>Largura das vias de transporte</i>	62
5.3.5	<i>Inclinação de rampas de acesso</i>	63
5.3.5.1	<i>Rampa cava 1</i>	63
5.3.5.2	<i>Rampa cava 2</i>	64
5.3.5.3	<i>Rampa cava 3</i>	65
5.3.6	<i>Capacidade da planta de britagem</i>	65
5.4	Compatibilidade entre equipamentos.....	66
5.5	Aumento de produtividade com redução dos tempos de ciclo.....	68
6	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A – DADOS DAS COLETAS DE TEMPOS DE CICLO NA OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO	76
	APÊNDICE B – DADOS DAS COLETAS DE TEMPOS DE CICLO NA OPERAÇÃO DE TRANSPORTE	77

1 INTRODUÇÃO

A exploração de bens minerais ocorre por meio de um sistema produtivo, normalmente, composto por operações cíclicas de perfuração, desmonte de rochas, carregamento e transporte (HARTMAN, 1987). Os custos associados a este ciclo operacional são influenciados pela maneira que o mesmo é executado, o que torna necessário o monitoramento e a implementação de constantes mudanças e melhorias nas formas de execução das operações. Desta forma, os desafios das empresas de mineração estão relacionados à redução dos custos associada ao aumento da produtividade das atividades, que são fatores-chave para a vantagem competitiva no mercado (LISBÔA, 2019).

As operações de carregamento e transporte, dentre todas as atividades desenvolvidas na lavra, são as mais onerosas, representando, juntas, mais da metade dos custos operacionais de lavra (SILVA, 2011). De acordo com Çetin (2004, *apud* BORGES, 2013), este custo elevado deve-se ao grande investimento para a aquisição dos equipamentos, além de despesas correntes com pessoal, combustível e manutenção. Logo, o dimensionamento adequado e a utilização da frota de equipamentos em condições de eficiência se tornam muito relevantes.

Para a seleção dos equipamentos de carga e transporte, muitos aspectos devem ser levados em consideração, tendo como exemplos: produção requerida, capacidade manuseada, distância de transporte, topografia do terreno, infraestrutura disponível, interferências com o meio ambiente e economicidade (SILVA, 2011). Para que a operação seja executada em condições ótimas, além do correto dimensionamento dos equipamentos, características da estrutura da mina e detalhes vinculados ao processo operacional também devem ser considerados, por exemplo: a largura de acessos, a inclinação das rampas, as condições de superfície, o posicionamento dos equipamentos e os tempos de troca de turno e de abastecimento. Estes e outros aspectos devem ser gerenciados, propondo-se constantes melhorias e ajustes às estruturas e aos processos operacionais, de modo que se obtenha um sistema produtivo mais eficiente (LISBÔA, 2019).

Diante disso, considera-se que o acompanhamento, descrição e avaliação do sistema de carregamento e transporte de uma empresa é de grande importância para a melhor compreensão acerca do tema, que é muito relevante no campo de estudos da lavra de minas. Um estudo aplicado a um empreendimento mineiro de pequeno porte também se torna relevante, tendo em vista a predominância deste tipo de mina no Brasil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Acompanhar as atividades do sistema de carregamento e transporte da empresa SM Minérios para analisar os fatores que podem influenciar na eficiência das operações.

2.2 Objetivos específicos

- a) Descrever como o ciclo de operações de carregamento e transporte é desenvolvido na empresa;
- b) Identificar, por meio de tempos de ciclo dos equipamentos e de observações em campo, os fatores que podem influenciar na eficiência destas operações;
- c) Apresentar e discutir melhorias para as operações analisadas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, inicialmente, serão apresentados aspectos relacionados ao bem mineral calcário. Em seguida, serão descritas as operações mineiras realizadas em minas a céu aberto, com ênfase no carregamento e transporte, e nos fatores que influenciam nos seus rendimentos.

3.1 Calcário

O calcário é uma rocha de origem sedimentar constituída predominantemente de carbonato de cálcio. Em razão de variações na sua composição química ou estrutura, a rocha pode receber denominações variadas. Na classificação mineralógica de rochas calcárias, deve-se considerar as proporções dos minerais calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), além de outros componentes não carbonatados (PARAHYBA, 2008; SAMPAIO e ALMEIDA, 2005).

A utilização do calcário é bastante ampla, sendo um dos bens minerais com maior variedade de aplicações na indústria. Dentre as principais aplicações, estão: indústria do cimento, cal, agregados, indústria química, indústria de tintas e vidro, uso como refratário, fundente, abrasivo e na agricultura. A indústria agrícola é uma das principais consumidoras do calcário, a qual faz uso do bem mineral para correção de acidez dos solos. Os solos do Brasil são ácidos em sua maioria e o melhor desenvolvimento de plantas se dá em um ambiente de neutralidade. Isso faz com que o calcário seja muito aplicado como corretivo de solo (PARAHYBA, 2008; SAMPAIO e ALMEIDA, 2005).

A lavra do calcário acontece predominantemente a céu aberto, em pedreiras, denominação utilizada para os locais de exploração de bens minerais industriais e não metálicos de baixo valor agregado. As principais etapas da lavra de calcário a céu aberto incluem: remoção do capeamento, perfuração, desmonte de rochas com explosivos, carregamento e transporte até a usina de processamento (SAMPALIO e ALMEIDA, 2005).

3.2 Operações mineiras

O ciclo de produção de uma mina é composto por operações unitárias que normalmente são agrupadas com base em duas finalidades: fragmentação de rochas e manuseio de materiais. O desmonte de rochas é a operação responsável pela fragmentação, sendo

geralmente realizada por meio de etapas de perfuração e detonação de explosivos. Já o manuseio de materiais é caracterizado pelas operações de carregamento e transporte (HARTMAN, 1987).

3.2.1 *Desmonte de rochas*

Nesta seção serão abordados dois tipos de desmonte de rochas: desmonte com uso de explosivos e desmonte mecânico por equipamentos de escavação.

3.2.1.1 *Uso de explosivos*

Na maioria das vezes, o material a ser explotado se encontra na forma de rochas consolidadas. Para que o manuseio destas rochas seja realizado, faz-se uso de explosivos, que, ao serem detonados, fragmentam o maciço rochoso. A detonação visa a obtenção de um material com granulometria adequada às operações de carregamento e transporte, e às etapas iniciais do beneficiamento mineral (MENDES). Kennedy (1990) cita que em praticamente todas as formas de mineração, as rochas são fragmentadas com o uso de explosivos, sendo esta uma das operações mais importantes, pois, se não for realizada com sucesso, poderá comprometer a eficiência das operações subsequentes.

A Figura 1 mostra o ciclo de operações do desmonte de rochas com uso de explosivos em minas a céu aberto. Verifica-se que a primeira etapa realizada é o decapeamento ou limpeza da área que será desmontada; em seguida, os trabalhos de topografia realizam o levantamento altimétrico da frente de desmonte para alocação dos furos; posteriormente, inicia-se a perfuração, que tem como finalidade a abertura de furos no maciço rochoso com distribuição e geometria adequada para acondicionar os explosivos e acessórios iniciadores; e a detonação dos explosivos promove a formação de uma pilha de material fragmentado que será escavada e transportada até os locais de basculamento (JIMENO, 1987).

Figura 1 – Ciclo de etapas do desmonte de rochas com uso de explosivos.



Fonte: autoria própria.

Em relação aos fatores que influenciam nos resultados das detonações, Kennedy (1990) aponta: as propriedades dos explosivos utilizados, a distribuição dos furos em que os explosivos serão alocados, os aspectos geométricos do desmonte, a sequência de iniciação da detonação e as características do maciço rochoso. Atlas Copco (2006) cita a habilidade do operador dos equipamentos de perfuração e a experiência da equipe responsável pela detonação como aspectos práticos que também podem influenciar nos resultados obtidos.

3.2.1.2 Desmonte mecânico

A depender das características do maciço rochoso, o desmonte de rochas com explosivos pode passar a ser desnecessário. De acordo com Kennedy (1990), solos, materiais inconsolidados ou rochas com alto grau de intemperismo podem ser desmontados de forma mecânica por meio de escavadeiras, tratores de esteiras, pás carregadeiras e demais equipamentos de escavação.

O desmonte mecânico consiste na escavação do material em seu estado natural, visando desagregá-lo. Curi (2017) cita que, para romper a compacidade de um material como o solo, são empregadas ferramentas cortantes que compõem os equipamentos de escavação, tais como a lâmina de um trator de esteiras ou os dentes da caçamba de uma escavadeira (Figura 2).

Figura 2 – Desmonte mecânico com escavadeira.



Fonte: Mega Machines Channel (2021).

Mambo (2017) descreve as operações de desmonte em uma lavra de carvão, sendo estas realizadas mecanicamente ou por explosivos, dependendo do tipo, espessura e consistência do material. No caso apresentado, o desmonte mecânico ocorre por meio de escavadeiras, ou por tratores de esteiras quando a espessura da camada é relativamente pequena, o que torna o uso da escavadeira inviável.

3.2.2 Carregamento

O enchimento da caçamba de um caminhão ou a alimentação de correias transportadoras são exemplos da operação de carregamento, que é predominantemente caracterizada pela escavação do material fragmentado ou *in situ* (no caso de materiais brandos), elevação e despejo no equipamento que fará o transporte do material até o local de destino (Figura 3) (CURI, 2017; HARTMAN, 1987).

Figura 3 – Operação de carregamento: a) escavação; b) elevação; c) despejo.



Fonte: rocbolt.

As operações de manuseio de materiais, que incluem o carregamento, são caracterizadas e, às vezes, identificadas conforme o equipamento que as executa, sendo classificadas como contínuas ou cíclicas. Em minas a céu aberto, as operações contínuas são executadas por mineradores contínuos (ex.: *bucket wheel*) de grande capacidade de produção, utilizados principalmente na mineração de carvão, em que a escavação e o transporte de material ocorrem de modo ininterrupto. Já as operações cíclicas, que predominam na mineração, contam com equipamentos de escavação/carregamento que atuam em conjunto com equipamentos de transporte e realizam repetições de movimentos e deslocamentos que compõem ciclos (HARTMAN, 1987).

3.2.2.1 Equipamentos de carregamento

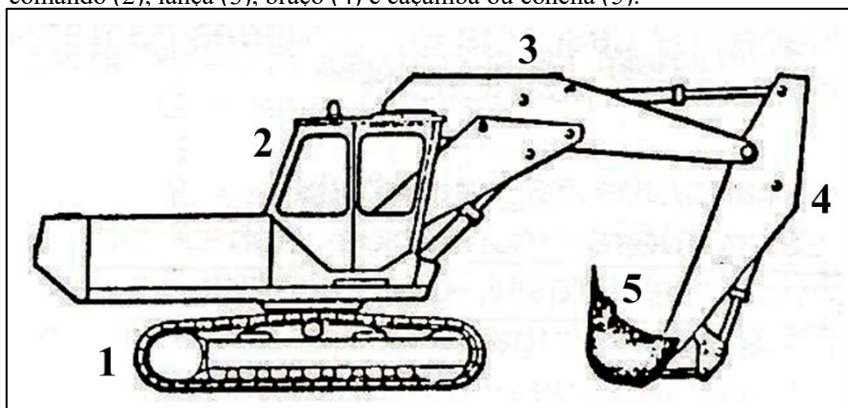
Há uma variedade de equipamentos de escavação/carregamento, na qual muitos são aplicados a finalidades específicas, possuindo configurações e porte adequados à sua utilização. Esta seção descreve os equipamentos de carregamento mais utilizados em minas a céu aberto e suas principais características.

Os equipamentos que realizam escavação e carregamento são denominados de unidades escavocarregadoras, representadas pelas escavadeiras e carregadeiras, que executam as mesmas operações, embora tenham características construtivas e operacionais distintas (RICARDO; CATALANI, 2007).

As escavadeiras, em geral, executam a escavação estacionadas, ou seja, permanecem em uma posição fixa enquanto a caçamba ou concha é carregada. A concha é

acoplada a um braço articulado sustentado por uma lança igualmente articulada, que é apoiada sobre a estrutura giratória do equipamento. O giro da estrutura em torno da sua base, que geralmente é composta por esteiras, permite que o material seja deslocado horizontalmente e descarregado em unidades de transporte (JAWORSKI, 1997). A Figura 4 mostra uma ilustração de uma escavadeira com a indicação dos seus respectivos componentes.

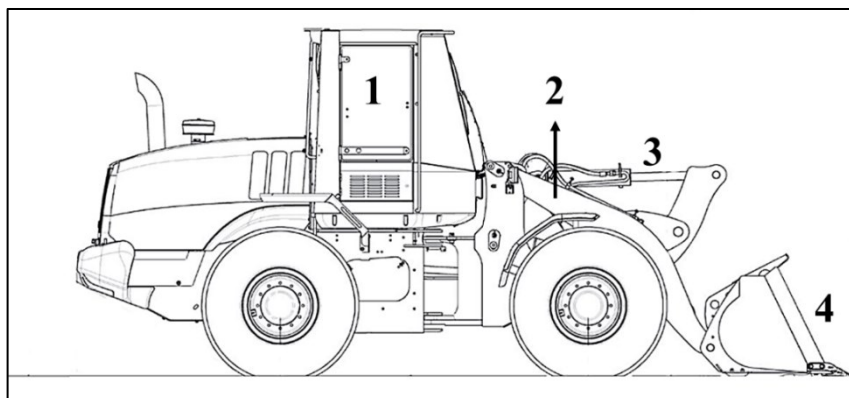
Figura 4 – Principais componentes de uma escavadeira: esteiras (1), cabine de comando (2), lança (3), braço (4) e caçamba ou concha (5).



Fonte: adaptado de Jaworski (1997).

Já as carregadeiras, também chamadas de pás carregadeiras, são equipadas com braços laterais acionados por pistões hidráulicos, que promovem o levantamento da caçamba frontal do equipamento (Figura 5). A carregadeira preenche a caçamba, desloca-se em direção à unidade de transporte e realiza o despejo do material (RICARDO; CATALANI, 2007).

Figura 5 – Principais componentes de uma carregadeira: cabine de comando (1), braço (2), pistão hidráulico (3) e caçamba ou concha (4).



Fonte: adaptado de Case (2019).

Read e Stacey (2009) destacam os tipos e variações de unidades escavocarregadoras mais usados: em grandes minas, destacam-se as escavadeiras a cabo e hidráulicas de pá frontal (tipo *shovel*); em empreendimentos mineiros de pequeno porte, predominam as retroescavadeiras hidráulicas e pás carregadeiras de rodas.

Nas subseções seguintes, serão descritos os principais tipos de escavadeiras, que possuem variações quanto aos seus componentes e a maneira de proceder a escavação. Além disso, serão apresentadas mais informações sobre as pás carregadeiras e seus tipos.

3.2.2.1.1 Escavadeira de caçamba frontal (*shovel*)

As escavadeiras tipo *shovel* podem ser hidráulicas ou a cabo, sendo que ambas as classes possuem uma caçamba frontal que escava no sentido ascendente e para frente, e que possui fundo articulado para a descarga do material (JAWORSKI, 1997).

A *shovel* a cabo (Figura 6) é uma máquina de grande porte, largamente utilizada em grandes minerações, pois possui maior vida útil, grande força de escavação e alta produtividade, podendo ser utilizada em bancadas de até 20 metros. O equipamento recebe esse nome por conter um sistema de roldanas acopladas a lanças, em que as forças de escavação e elevação são aplicadas por meio de cabos de aço (TEIXEIRA, 2016).

Figura 6 – *Shovel* a cabo (Caterpillar 7395).



Fonte: Caterpillar.

A *shovel* hidráulica (Figura 7) possui as mesmas características da *shovel* a cabo (grande porte e força de escavação, alta produtividade e grande vida útil), porém, devido a seu mecanismo hidráulico, realiza o despejo do material de forma mais controlada e apresenta maior flexibilidade de escavação, o que a permite realizar acabamentos em cristas de taludes, por exemplo (TEIXEIRA, 2016).

Figura 7 – *Shovel* hidráulica (Liebherr R 9100B).



Fonte: Liebherr.

3.2.2.1.2 Escavadeira de caçamba invertida (retroescavadeira)

A retroescavadeira possui uma caçamba na posição inversa a da escavadeira tipo *shovel*, e realiza a escavação no sentido da cabine do equipamento. Obtém-se maior eficiência na operação quando a retroescavadeira escava em um nível inferior ao da sua base de apoio (Figura 8). O carregamento e a descarga são feitos pelo basculamento da caçamba, diferentemente da *shovel*, que possui caçamba com fundo móvel para descarga (JAWORSKI, 1997).

Figura 8 – Retroscavadeira hidráulica (Volvo EC950E).



Fonte: Volvo.

3.2.2.1.3 Escavadeira com caçamba de arrasto (*dragline*)

As escavadeiras do tipo *dragline* (Figura 9) possuem um mecanismo de escavação baseado em uma estrutura composta por uma treliça metálica, com polias acopladas em sua extremidade, por onde passam cabos de aço que movimentam a caçamba. A escavação ocorre pelo arrastamento da caçamba, posicionada de modo a formar um ângulo de ataque favorável entre seus dentes e o material. Todo o movimento é feito pela ação dos cabos, inclusive o despejo, no qual, por meio de um cabo de controle, a caçamba é posicionada na vertical e o material é despejado. A *dragline* possui o maior raio de alcance entre os equipamentos de escavação e, assim como as retroscavadeiras hidráulicas, se destina a escavar em níveis abaixo da sua base de apoio (RICARDO; CATALANI, 2007).

Figura 9 – *Dragline* (Liebherr HS 8300).



Fonte: Liebherr.

3.2.2.1.4 Carregadeiras

As carregadeiras podem ser: equipadas com rodas ou esteiras (Figuras 10 e 11); de chassi rígido ou com estrutura articulada. As esteiras proporcionam maior força de escavação ao equipamento, enquanto as rodas e a estrutura articulada proporcionam maior mobilidade (JAWORSKI, 1997).

Figura 10 – Carregadeira de rodas (Caterpillar 980L).



Fonte: Caterpillar.

Figura 11 – Carregadeira de esteiras (Caterpillar 973K).



Fonte: Caterpillar.

A mobilidade das carregadeiras de rodas é a característica que as fazem serem mais utilizadas. No entanto, há desvantagens quanto aos altos custos de operação e manutenção, e quanto a limitações relacionadas às condições do piso da frente escavada, que deve ser firme e plano. Em minerações de grande porte, pode-se encontrar carregadeiras de rodas atuando em conjunto com escavadeiras nas frentes de lavra (TEIXEIRA, 2016).

3.2.3 Transporte

Na mineração, o deslocamento de material do local em que foi explorado até o respectivo local de destino é realizado por meio das operações de transporte (CURI, 2007). Segundo Hustrulid, Kuchta e Martin (2013), os custos de transporte podem representar 50% dos custos operacionais de lavra. Em minas a céu aberto, as operações de transporte de minério/estéril são realizadas por meio de caminhões (Figura 12) ou em menor proporção por correias transportadoras e scraper/motscraper, sendo este último menos utilizado (HARTMAN, 1987).

Figura 12 – Operação de transporte por caminhões em mina a céu aberto.



Fonte: magnusvk.

Quevedo (2009) descreve o ciclo das operações de transporte com caminhões, que tem como primeira etapa o enchimento da caçamba do caminhão pelo equipamento de carregamento. Os caminhões carregados transportam o material até um ponto de descarga (pilha de estéril, pilha de homogeneização ou britador), despejam o material e retornam para a frente de lavra, onde será realizado um novo carregamento, repetindo o processo de forma cíclica. Conforme Hartman (1987), o ciclo de operações de transporte por caminhões é dividido em quatro etapas: carregamento, transporte com carga, despejo e transporte vazio.

3.2.3.1 Equipamentos de transporte

De acordo com Lopes (2010), os caminhões são os equipamentos de transporte mais utilizados no mundo e estão à frente de correias transportadoras e de outros equipamentos que também são utilizados para transporte em minas a céu aberto. Jaworski (1997) classifica os caminhões como comuns, que possuem permissão para trafegar em rodovias, estradas e vias urbanas; e como especiais, que inclui o tipo “fora de estrada”, largamente empregado na mineração.

Os caminhões basculantes comuns (Figura 13) possuem chassi mais curto e reforçado em relação a caminhões de carroceria fixa convencionais, e são equipados com uma caçamba que contém uma tampa traseira articulada. A tampa abre com o levantamento da

caçamba por um sistema hidráulico, e fecha após o despejo do material. Geralmente, as caçambas possuem os cantos internos arredondados para evitar o acúmulo de material argiloso úmido no seu interior, o que poderia reduzir a capacidade de transporte e provocaria corrosão metálica ao passar do tempo. Outra parte característica da caçamba é o protetor de cabine, que garante a segurança do operador do caminhão contra possíveis erros de direcionamento do material durante o carregamento (JAWORSKI, 1997).

Figura 13 – Caminhão basculante rodoviário (Volkswagen Constellation 32.360).



Fonte: Ribeiro (2019).

Para movimentação de grandes quantidades de material, são utilizados os caminhões “fora de estrada” (Figura 14), que recebem esse nome devido ao fato de não trafegarem em vias de rodagem normais por conta de suas grandes dimensões. Os caminhões “fora de estrada” podem trafegar com velocidades de até 60 km/h e possuem freios potentes acionados a ar comprimido em virtude das elevadas cargas transportadas. A caçamba não contém tampa e, em alguns modelos, possui fundo em forma de “V”, com a finalidade de rebaixar o centro de gravidade do conjunto de carga-caminhão e reduzir o impacto durante o carregamento (JAWORSKI, 1997). Segundo Pereira (2019), no mercado há diferentes modelos de caminhões desta classe, com capacidades que podem variar de 20 a 450 toneladas, aproximadamente, e com diferentes tipos de pneus e básculas.

Figura 14 – Caminhão "fora de estrada" (Liebherr T284).



Fonte: Liebherr.

Um terceiro tipo de equipamento de transporte que pode ser destacado é o caminhão articulado (Figura 15). Estes veículos possuem uma articulação central que oferece liberdade de movimento entre os chassis dianteiro e traseiro. Mesmo em traçados que possuem deformidades e irregularidades, os pneus estão sempre em contato com o solo, favorecendo que o caminhão se mantenha em condições de tração (ALMEIDA, 2016; VOLVO CE, 2020).

Figura 15 – Caminhão articulado (Volvo A45G).



Fonte: Volvo CE.

3.3 Fatores que afetam a eficiência das operações de carregamento e transporte

Os custos associados às operações de carregamento e transporte, em conjunto, representam mais da metade dos custos totais de lavra, correspondendo a cerca de 60% (CATERPILLAR, 2013 *apud* TEIXEIRA, 2016). Devido a isso, busca-se aumentar a eficiência destas operações para que se obtenha maior controle dos custos e aumento de produtividade.

Nesta seção, serão abordados conceitos sobre alguns fatores relacionados ao rendimento das operações cíclicas de carregamento e transporte por caminhões.

3.3.1 Tempo de ciclo dos equipamentos

As operações conjugadas, que envolvem mais de um equipamento, ocorrem de forma cíclica, na qual os equipamentos realizam repetições de movimentos e/ou deslocamentos ao longo do tempo. Um ciclo produtivo caracteriza-se por um conjunto de operações que um equipamento executa em um determinado intervalo de tempo, voltando, em seguida, à posição inicial para recomeçá-las (RICARDO; CATALANI, 2007).

Silva (2011), apresenta o ciclo básico dos principais tipos de equipamentos:

- a) carregadeiras: avanço até a frente, carga da caçamba, manobra, avanço até a unidade de transporte, descarga, retorno vazio e manobra;
- b) escavadeiras: carga da caçamba, giro carregado, descarga e giro vazio;
- c) caminhões: carga da unidade, transporte carregado, manobra, descarga, retorno vazio e posicionamento para uma nova carga.

Os tempos decorridos em cada operação elementar do ciclo podem ser classificados em fixos ou variáveis. Os tempos que se mantêm constantes para uma determinada operação elementar são considerados fixos (ex.: tempos de carga, descarga e manobra), enquanto os tempos que variam de acordo com distâncias percorridas, por exemplo, são considerados variáveis (ex.: tempos de transporte carregado e vazio). Assim sendo, o tempo de ciclo completo de um equipamento consiste na soma dos tempos variáveis e fixos da operação, também podendo ser definido como o intervalo decorrido entre duas passagens consecutivas da máquina por qualquer ponto do ciclo (RICARDO; CATALANI, 2007).

Os tempos fixos podem ser obtidos por meio de tabelas fornecidas pelos fabricantes de equipamentos. Estas tabelas apresentam os tempos gastos em condições normais de trabalho e auxiliam na elaboração de estimativas de produção. Para obtenção do tempo variável, o ideal

é que sejam registrados em campo os tempos médios gastos em condições reais de serviço (JAWORSKI, 1997).

3.3.2 Características das vias de transporte

As características dos acessos por onde acontece o transporte, em relação a parâmetros geométricos e condições de superfície, também influenciam no rendimento e nos custos da operação. Como exemplo prático da influência destas características, pode-se citar o trabalho de Carmo *et al.* (2017), onde os autores descrevem as medidas executadas para melhorar as vias de uma mina a céu aberto, que apresentavam grande quantidade de material solto, além de subidas e descidas acentuadas que impactavam na velocidade de deslocamento. A camada de material solto ocultava pontos de desnivelamento da estrada e encobria fragmentos de rochas, fatores estes que são prejudiciais à operação de equipamentos com pneus. Algumas das medidas adotadas foram: adição de uma nova camada (forro) de material estéril extraído da própria mina, que garantiu melhorias na interação pneu-solo; e eliminação do desnivelamento e de inclinações que possuíam gradiente maior que 10%, por meio de cortes e aterros. As mudanças permitiram que o limite de velocidade fosse aumentado em 10 km/h, proporcionando ganhos de produtividade.

Nas próximas subseções, serão apresentados conceitos e formas de quantificação de fatores relacionados às condições de superfície, inclinação, largura e extensão das vias de transporte.

3.3.2.1 Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento é um parâmetro ligado à condição de superfície do terreno, sendo definida como a força paralela à superfície que se opõe ao rolamento das rodas de um equipamento. Esta resistência é gerada pelo atrito interno dos rolamentos dos eixos do equipamento, associada à flexão e penetração dos pneus no solo (Figura 16) (JAWORSKI, 1997).

Figura 16 – Fatores que geram a resistência ao rolamento.



Fonte: adaptado de Silva (2011).

Conforme Jaworski (1997), para quantificar a resistência ao rolamento, multiplica-se o fator de resistência ao rolamento, extraído da Tabela 1, pelo peso do equipamento em toneladas. O resultado é dado em quilogramas-força ou, de acordo com Silva (2011), em porcentagem em relação ao peso do equipamento.

Tabela 1 – Fator de resistência ao rolamento para diferentes tipos de superfície.

Tipos de superfície	Fator (kgf/t)
Material compactado, pavimento de concreto ou macadame betuminoso	20
Macadame hidráulico (piso sob o pneu cede levemente)	30
Material estabilizado (penetração dos pneus de 2 a 3 cm)	50
Material não estabilizado (penetração dos pneus de 10 a 15 cm)	75
Material solto, barrento ou arenoso	150

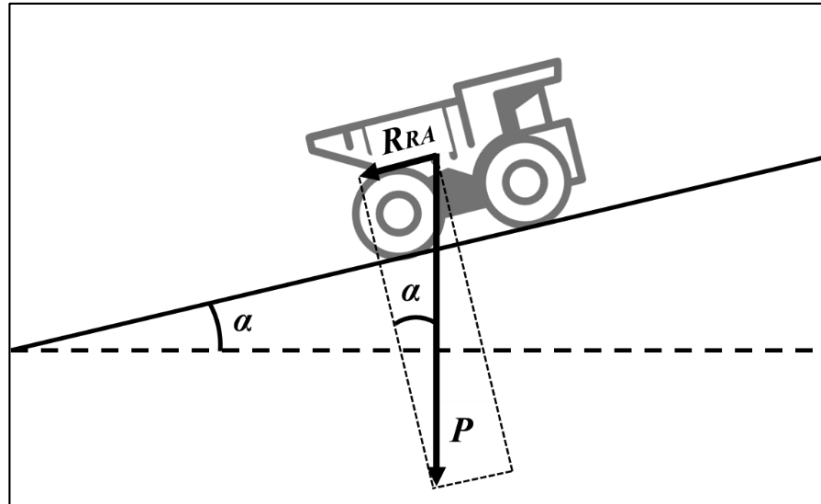
Fonte: adaptado de Jaworski (1997).

3.3.2.2 Resistência de rampa

Para que uma máquina se desloque sobre uma rampa com uma determinada inclinação, é necessário que ela supere a resistência de rampa, que é uma medida da força presente em aclives devido a uma componente do próprio peso do equipamento que atua no sentido contrário do movimento. Em declives, esta componente atua no sentido do movimento, e é denominada como assistência de rampa (SILVA, 2011).

Para o cálculo da resistência de rampa, tem-se a equação 1. Em rampas com inclinações menores do que 20%, a equação 2 se aplica (RICARDO; CATALANI, 2007). Os parâmetros das equações estão representados na Figura 17.

Figura 17 – Resistência de rampa.



Fonte: autoria própria.

$$R_{RA} = P \times \text{sen } \alpha \quad (1)$$

$$R_{RA} = P \times \text{tg } \alpha = P \times \frac{i}{100} \quad (2)$$

Onde:

R_{RA} = resistência de rampa;

P = peso do equipamento;

α = ângulo de inclinação da rampa;

i = gradiente de inclinação (%).

Segundo Hustrulid, Kuchta e Martin (2013), muitas minas possuem rampas com inclinação de 10%, no entanto, um gradiente de 8% é preferível, desde que não cause acréscimo de decapeamento ou complicações no layout da mina. Hartman (1987), por sua vez, cita que 8 graus (14%) é o gradiente médio utilizado para o transporte com caminhões, sendo 12 graus (21%) o gradiente máximo.

Percebe-se que não há uma inclinação ideal que atenda a todas as minas. Logo, para a escolha do gradiente, deve-se considerar o tipo de equipamento utilizado e o seu respectivo desempenho, recursos disponíveis, características geométricas da mina, dentre outros fatores. (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

3.3.2.3 *Largura das vias*

A largura das vias é outro parâmetro geométrico importante a ser considerado, pois também influencia diretamente no desenvolvimento das operações, em relação a condições de tráfego e segurança. Vias muito estreitas podem fazer com que o operador direcione o equipamento próximo aos limites laterais das estradas ao passar por outro veículo. Esta é uma condição desfavorável que pode reduzir a vida útil de pneus, por exemplo, visto que nos limites das estradas, geralmente a superfície é mais irregular. Problemas também são gerados quando caminhões de maior porte são adicionados na frota, mas não é feita a adequação das vias. O tamanho do veículo é o parâmetro usado como base para a definição da largura ideal da estrada (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

De acordo com a norma regulamentadora das atividades de mineração no Brasil, a NR-22, a largura mínima das vias de trânsito deve ser duas vezes maior que a largura do maior veículo utilizado, no caso de vias de faixa de tráfego única, e três vezes, para vias de faixa dupla (BRASIL, 1978).

Tannant e Regensburg (2001) apresentam a equação 3 para a determinação da largura ideal da estrada com base no tamanho do veículo e no número de faixas. A Figura 18 mostra um exemplo da relação entre a largura da estrada e o número de faixas de tráfego com distâncias em metros, considerando um caminhão de 4 metros de largura.

$$W = (1,5L + 0,5)X \quad (3)$$

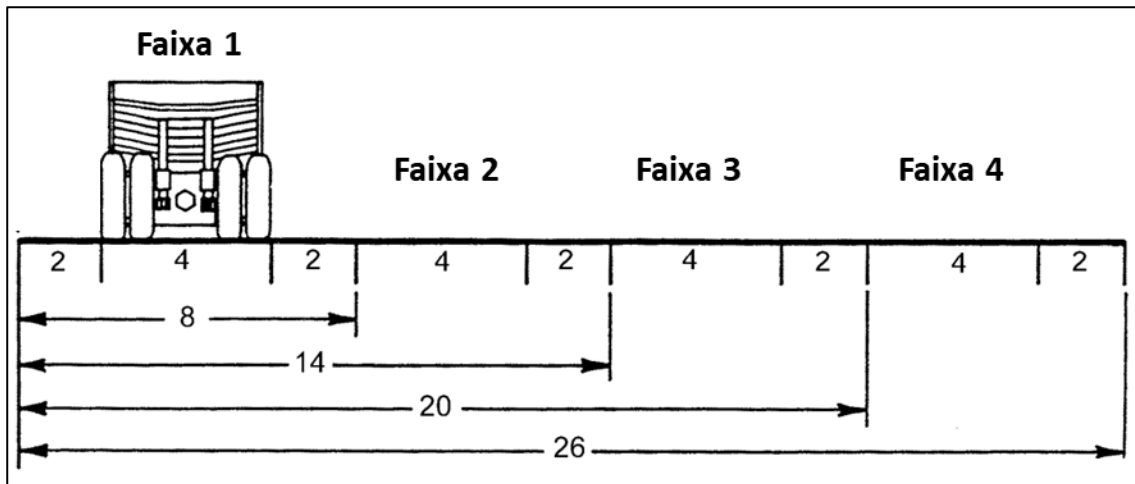
Onde:

W = largura da estrada;

L = número de faixas;

X = largura do maior veículo de transporte.

Figura 18 – Exemplo da relação entre a largura da estrada, número de faixas e largura do veículo.



Fonte: adaptado de Tannant e Regensburg (2001).

3.3.2.4 Distância média de transporte (DMT)

A distância média percorrida pelo equipamento no transporte de minério ou estéril depende da distribuição das vias de acesso ao longo da mina, sendo um fator importante a ser considerado. A produtividade da frota de transporte e seu custo associado são fortemente impactados pela DMT, em que, quanto menor a distância de transporte, maior a produtividade e menor o custo. Para expressar o custo, geralmente utiliza-se a relação “R\$ / (ton x km)”, obtendo-se o gasto com transporte em função da distância e da massa de material transportado (FELSCH JUNIOR *et al.*, 2018).

No trabalho de Felsch Junior *et al.* (2018), foram aplicadas melhorias nos principais traçados dos acessos e em geometrias de pilhas de estéril de uma determinada mina, visando, inclusive, a diminuição da DMT. As mudanças proporcionaram ganhos de produção e de segurança, visto que alguns acessos passaram a ser mais retilíneos e perfis de rampas foram melhorados.

3.3.3 Disponibilidade dos equipamentos

Ocasionalmente, equipamentos mecânicos podem não estar disponíveis para o trabalho. Essa indisponibilidade geralmente está associada a paradas para manutenção dos equipamentos. Ricardo e Catalani (2007) definem a manutenção como processos que visam

garantir condições para o pleno funcionamento dos equipamentos, resultando em maior produtividade e prolongamento de sua vida útil.

Pode-se destacar três tipos de manutenção: corretiva, preventiva e preditiva. Estes tipos de manutenção foram descritos por Moro e Auras (2007):

- a) manutenção corretiva: é uma manutenção não planejada, pois tem por objetivo localizar e corrigir falhas que ocorrem de maneira inesperada, que podem ser um reparo simples, como a troca de um parafuso, ou maiores reparos, como a troca de um sistema elétrico. Este tipo de manutenção implica custos altos, pois geralmente os danos aos equipamentos são maiores em casos de defeitos inesperados, além de causar perdas de produção;
- b) manutenção preventiva: é feita de forma planejada, estabelecendo paradas para a execução de reparos periódicos. Esses reparos são programados e tem como finalidade assegurar o funcionamento perfeito dos equipamentos por um tempo predeterminado, prevenindo o surgimento de falhas inesperadas;
- c) manutenção preditiva: baseia-se no monitoramento das condições de operação do equipamento, em que observa-se, por exemplo, o desgaste de peças. Havendo mudanças nas condições de operação, pode-se inferir sobre o estado de funcionamento do equipamento, permitindo que sejam feitos reparos que garantirão sua operação contínua por mais tempo.

Para que a disponibilidade dos equipamentos seja quantificada, o gasto de tempo com manutenção e demais paradas de operação são considerados. De acordo com Silva (2011), a disponibilidade do equipamento se divide em disponibilidade mecânica e disponibilidade física.

Para determinação da disponibilidade mecânica utiliza-se a equação 4 (SILVA, 2011):

$$DM = \frac{HT - (MP + MC + TP)}{HT} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

DM = disponibilidade mecânica;

HT = horas teóricas possíveis por ano;

MP = horas de manutenção preventiva, compreendendo todo o serviço programado;

MC = horas de manutenção corretiva;

TP = tempo perdido devido à parada de operação da máquina por motivos de desmonte de rochas ou intervalos do operador (almoço, troca de turno, dentre outros).

Já a disponibilidade física pode ser determinada pela equação 5 (SILVA, 2011):

$$DF = \frac{HP - HO}{HP} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

DF = disponibilidade física (porcentagem do tempo que o equipamento fica à disposição para produção);

HP = horas possíveis por ano, já levando em consideração a disponibilidade mecânica;

HO = horas de reparos, incluindo a falta de peças no estoque ou de equipamentos auxiliares.

3.3.4 *Produção dos equipamentos*

Convencionalmente, a produção de um equipamento é expressa por uma relação do volume (em m³) ou massa (em toneladas) movimentada em uma hora de trabalho. Para cada equipamento, essa relação recebe fatores de correção que proporcionam resultados mais exatos. Dessa forma, cada equipamento possui fórmulas próprias de produção horária, que contêm os fatores de correção correspondentes à sua operação (JAWORSKI, 1997).

Jaworski (1997) descreve alguns fatores que podem ser considerados no cálculo de produção horária das unidades:

- a) empolamento: aumento aparente de volume que o material apresenta depois de ser fragmentado ou descompactado. Expresso em porcentagem, o empolamento pode ser determinado pela equação 6.

$$e = \frac{V_s - V}{V} \times 100 \quad (6)$$

Em que:

e = empolamento;

V_s = volume do material solto;

V = volume do material natural.

O fator de conversão f , obtido por meio da equação 7, é usado para converter o volume de material solto para o estado de compactação natural e vice-versa.

$$f = \frac{V}{V_s} \quad (7)$$

Este fator também pode ser expresso em função do empolamento (equação 8):

$$f = \frac{100}{100 + e} \quad (8)$$

A Tabela 1 apresenta dados de fator de conversão e empolamento de alguns tipos de materiais.

Tabela 2 – Fator de conversão e empolamento de materiais.

Materiais	f	e (%)
Argila natural	0,82	21
Argila seca	0,80	25
Argila úmida	0,80	25
Solo úmido	0,79	26
Solo seco	0,79	26
Arenito	0,59	69
Areia seca solta	0,88	13
Areia úmida	0,88	13
Rocha britada	0,60	66
Solo úmido (50%) e rocha (50%)	0,75	33
Rochas soltas (<i>top size</i> de 20 cm)	0,50	100

Fonte: adaptado de Jaworski (1997).

- b) eficiência de trabalho: também chamada de “fator de eficiência”, é representada pela notação “*E*”, e expressa a fração de tempo dedicado ao serviço durante uma hora (equação 9), considerando as perdas de tempo devido a reparos em equipamentos, espera de unidades auxiliares, recebimento ou transmissão de instruções, dentre outros motivos.

$$E = \frac{\text{Número médio de minutos trabalhados em uma hora}}{60 \text{ minutos}} \quad (9)$$

- c) eficiência da caçamba: fator associado aos equipamentos de carregamento, que relaciona o tipo de material com o enchimento da caçamba. A Tabela 2 apresenta alguns valores do fator de eficiência da caçamba (*K*) associados ao tipo de material, para a escavadeira tipo *shovel*, aplicando-se também às retroescavadeiras.

Tabela 3 – Fator de eficiência de caçamba.

Materiais	Fator <i>K</i>
Material macio, solto, que permite cargas controladas (areia seca, cascalho miúdo, argila arenosa)	0,95
Material mais duro e que não exige emprego de explosivos, mas provoca vazios na caçamba (argila úmida, cascalho graúdo)	0,85
Material bem fragmentado por explosivos	0,70
Material fragmentado por explosivos, que deixa grandes vazios na caçamba	0,50

Fonte: adaptado de Jaworski (1997).

As equações para a determinação da produção horária dos equipamentos também foram apresentadas por Jaworski (1997), levando em consideração os fatores de correção descritos anteriormente. Por meio das equações, a produção horária é dada em relação ao volume de material natural (*in situ*) movimentado a cada hora.

A produção horária das escavadeiras é calculada por meio da equação 10.

$$P_h = \frac{3600 \times Q \times f \times E \times K}{T_c} \quad (10)$$

Sendo:

P_h = produção horária em m³/h;

Q = capacidade rasa da caçamba;

f = fator de conversão (Tabela 2);

E = fator de eficiência de trabalho (adota-se 0,5 para escavadeiras);

K = fator de eficiência da caçamba (Tabela 3);

T_c = tempo de ciclo em segundos.

Para a determinação da produção horária das pás carregadeiras, utiliza-se a equação 11, cujos parâmetros são semelhantes aos da equação anterior.

$$P_h = \frac{60 \times C \times E \times f}{T_c} \quad (11)$$

Sendo:

P_h = produção horária em m³/h;

C = capacidade coroada da caçamba (m³);

f = fator de empolamento (Tabela 2);

E = fator de eficiência de trabalho (adota-se 0,7 para pás de rodas e 0,8 para pás de esteiras);

T_c = tempo de ciclo em minutos.

A produção horária dos caminhões, de qualquer tipo, também pode ser obtida pela equação 11, utilizando-se os dados referentes à sua capacidade e tempo de ciclo. Para os caminhões, o ideal é que o fator de eficiência seja determinado no local de trabalho, entretanto, caso não seja possível, pode-se adotar E igual a 0,7 ou 70% (JAWORSKI, 1997).

3.3.5 *Compatibilização e associação de equipamentos*

Em operações como carregamento e transporte, que são executadas por equipamentos que trabalham de forma conjugada, é necessário que seja selecionado, além do tipo, o porte dos equipamentos, visando uma maior eficiência do sistema produtivo (SILVA, 2011).

De acordo com Silva (2011), a compatibilização dos equipamentos baseia-se em algumas restrições físicas, inicialmente, e deve atender também a fatores que afetam diretamente a eficiência das operações. Alguns exemplos destas restrições e fatores foram listados pelo mesmo autor.

Como restrições físicas, tem-se:

- a) A altura da bancada, condicionando o porte do equipamento de carga;
- b) O alcance da descarga do equipamento de carga, condicionando o porte do equipamento de transporte.

Outros fatores que afetam a eficiência das operações:

- a) O número de passes (caçambadas) do equipamento de carga para encher o equipamento de transporte. Uma quantidade de passes entre 3 e 5 é considerada ideal. Um número abaixo de 3 também poderia ser satisfatório, desde que:
 - o tamanho da caçamba do equipamento de transporte não seja muito pequeno em relação à caçamba do equipamento de carregamento. Tal condição poderia resultar em impactos na estrutura e suspensão do veículo e em perda de carga por derramamento;
 - o tempo de carregamento não seja tão curto a ponto de causar ociosidade da unidade de carregamento pela demora da chegada da unidade de transporte seguinte.
- b) O número de unidades de transporte para cada unidade de carregamento. Um número pequeno pode gerar ociosidade da unidade de carregamento, enquanto um número muito grande pode ocasionar a geração de filas de equipamentos de transporte;
- c) O número excessivo de unidades da frota. Um número de equipamentos maior que o necessário ocasionaria dificuldades de tráfego e de realização de manutenções, por exemplo.

Ainda em relação ao número de passes, Caterpillar (2006) apresenta a faixa ideal para operações com diferentes tipos de equipamentos de carregamento, sendo: 3 a 5 passes para *shovels* a cabo; e 4 a 6 passes para *shovels* hidráulicas, carregadeiras e retroescavadeiras.

A incompatibilidade do porte dos equipamentos e da quantidade de unidades na operação resulta em ineficiência e, conseqüentemente, em maiores custos. Esta informação é enfatizada por Jaworski (1997), que apresenta a equação 12 para a determinação do número adequado de unidades de transporte para uma unidade de carregamento, considerando uma operação com eficiência de 100%.

$$N^{\circ} \text{ de caminhões} = \frac{\text{Tempo de ciclo do caminhão}}{\text{Tempo de carregamento}} \text{ (eficiência de 100\%)} \quad (12)$$

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no trabalho baseou-se em um reconhecimento inicial da pedreira e das operações de carregamento e transporte, na coleta e análise de tempos de ciclo dos equipamentos e no mapeamento e medições de vias de transporte.

4.1 Reconhecimento inicial

Inicialmente, foi realizado o acompanhamento do processo produtivo da empresa, juntamente com a listagem das operações executadas e suas principais características. Quanto às operações de carregamento e transporte, foi feito um levantamento dos equipamentos utilizados e suas especificações, juntamente com observações sobre a forma em que eram alocados e as suas respectivas funções no processo.

4.2 Coleta e análise de tempos de ciclo dos equipamentos

Os tempos de ciclo dos equipamentos foram coletados manualmente com o uso da função cronômetro de um GPS Garmin eTrex 10 (Figura 19). Os dados foram dispostos em planilhas no software Microsoft Office Excel e realizou-se uma análise estatística básica. Foram calculados a média amostral e o intervalo de confiança (IC) com coeficiente de confiança de 95% para a média populacional de cada um dos conjuntos de dados. Na obtenção dos intervalos de confiança, utilizou-se a distribuição *t* de Student, recomendada para casos em que a variância populacional é desconhecida e o tamanho da amostra é pequeno ($n < 40$), conforme Montgomery e Runger (2009).

Figura 19 – GPS Garmin eTrex 10.



Fonte: autoria própria.

Em relação à operação de carregamento, foram realizadas, em períodos distintos, duas coletas de tempos de ciclo da escavadeira nas frentes de lavra. Na primeira coleta foram cronometrados 142 ciclos e na segunda, 101. Cada conjunto de dados foi obtido em um determinado cenário operacional, o que permitiu a realização de um comparativo entre os valores médios de tempo de ciclo obtidos, correlacionando-os com as condições operacionais de cada situação. Não foram coletados tempos de ciclo das carregadeiras, apenas observou-se o modo de operação dos equipamentos, visando a identificação de pontos de melhoria com base em boas práticas operacionais.

Na operação de transporte, as medições foram feitas com o acompanhamento de todo o trajeto na cabine dos caminhões. Dentre as coletas realizadas, sete foram utilizadas para as análises do trabalho, e em cada uma das coletas foram cronometrados, em média, 12 ciclos. As tomadas de tempo foram realizadas em diferentes cenários operacionais, que possuíam variações quanto a: pontos de carregamento e basculamento, rota de transporte, motorista e tipo de equipamento. Foram realizados comparativos dos tempos de cada operação elementar (carregamento; transporte carregado; manobra e basculamento; transporte vazio; e manobra para carregamento) levando em conta as diferentes condições e identificou-se os fatores que afetaram a eficiência da operação a partir do aumento ou redução do tempo a depender do cenário operacional.

Com os dados de tempos coletados na operação de transporte, também foi realizado um comparativo entre a produtividade obtida em dois cenários operacionais simulados de carregamento e transporte. No primeiro cenário, foram considerados os menores tempos de operações elementares obtidos nas coletas de dados, ou seja, quando a operação se desenvolveu de forma mais eficiente. Já no segundo cenário, foram considerados tempos elementares obtidos em uma mesma coleta, com exceção do tempo de manobra para carregamento, visando obter um cenário próximo do real, contendo as possíveis ineficiências existentes.

4.3 Mapeamento e medições de vias de transporte

Para obter informações sobre a distribuição das vias de transporte, bem como sobre as distâncias percorridas pelos caminhões, foi realizado um mapeamento das principais estradas da pedreira, também com o uso do GPS Garmin eTrex 10 (Figura 19).

Ainda visando caracterizar geometricamente as vias de transporte, realizou-se medições de largura dos acessos e foram traçados perfis longitudinais das principais rampas.

Para as medições de largura, utilizou-se uma fita métrica Vonder de 50 metros (Figura 20). Para a construção dos perfis, as rampas foram divididas em trechos e mediu-se o comprimento e a inclinação de cada trecho, utilizando a fita métrica e um medidor angular digital Minipa (Figura 21). Com as medidas obtidas, os perfis foram traçados com o uso do software AutoCAD.

Figura 20 – Fita métrica Vonder.



Fonte: autoria própria.

Figura 21 – Medidor angular digital Minipa.



Fonte: autoria própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, na seção inicial, serão apresentadas as principais características do processo produtivo da empresa e informações sobre a forma de desenvolvimento das operações de carregamento e transporte. Nas duas seções seguintes, os fatores que afetam a eficiência destas operações serão apresentados e discutidos. Já nas duas últimas seções, serão discutidas questões relacionadas à compatibilidade entre os equipamentos e à produtividade das operações.

5.1 Processo produtivo da SM Minérios

O processo produtivo da SM Minérios, que é uma mineradora de pequeno porte, apresenta as seguintes características principais:

- a) a lavra ocorre em três cavas a céu aberto, alternadamente;
- b) a fragmentação das rochas é realizada por meio de detonações com explosivos;
- c) as operações de carregamento e transporte são realizadas com escavadeiras hidráulicas de caçamba invertida (retroescavadeiras), pás carregadeiras e caminhões basculantes rodoviários;
- d) o material extraído é processado em três plantas de beneficiamento, sendo duas plantas de britagem e uma de moagem;
- e) o minério beneficiado é comercializado em três granulometrias distintas, sendo destinado às indústrias agrícola e siderúrgica.

A frota de carregamento e transporte é composta por quatro escavadeiras hidráulicas (EHs), quatro pás carregadeiras (PCs) e seis caminhões basculantes (CBs). A Tabela 4 apresenta informações relativas às escavadeiras hidráulicas.

Tabela 4 – Informações das escavadeiras hidráulicas da empresa.

Escavadeiras hidráulicas			
Equipamento	Fabricante	Modelo	Capacidade
EH 01	John Deere	350G	2,30 m ³
EH 02	Caterpillar	323A	1,56 m ³
EH 03	Caterpillar	323D	1,56 m ³
EH 04	Caterpillar	323D	1,56 m ³

Fonte: autoria própria.

O carregamento nas frentes de lavra é executado pela EH 01, enquanto a EH 02 é destinada às atividades de limpeza e decapeamento. Já as EHs 03 e 04 são equipamentos reservas. As Figuras 22, 23 e 24 mostram os modelos das EHs da empresa.

Figura 22 – Escavadeira hidráulica John Deere 350G.



Fonte: autoria própria.

Figura 23 – Escavadeira hidráulica Caterpillar 323A.



Fonte: autoria própria.

Figura 24 – Escavadeira hidráulica Caterpillar 323D.



Fonte: autoria própria.

Na Tabela 5, estão contidas as informações das pás carregadeiras, cujas principais atividades desenvolvidas, são: retomada de material de pilhas para carregamento de caminhões e alimentação de moegas.

Tabela 5 – Informações das pás carregadeiras da empresa.

Pás carregadeiras			
Equipamento	Fabricante	Modelo	Capacidade
PC 01	Caterpillar	950L	2,9 m ³
PC 02	John Deere	644K	3,3 m ³
PC 03	John Deere	644K	3,3 m ³
PC 04	Caterpillar	938H	2,8 m ³

Fonte: autoria própria.

A PC 01 tem como função o carregamento de carretas na expedição do calcário produzido. Já a PC 02, é destinada ao abastecimento de moegas de alimentação da planta de moagem. A PC 03, por sua vez, realiza carregamento de caminhões com minério e rejeito em uma das plantas de britagem. A PC 04 é um equipamento reserva. As Figuras 25, 26 e 27 apresentam os modelos das PCs.

Figura 25 – Pá carregadeira Caterpillar 950L.



Fonte: autoria própria.

Figura 26 – Pá carregadeira John Deere 644K.



Fonte: autoria própria.

Figura 27 – Pá carregadeira Caterpillar 938H.



Fonte: autoria própria.

A Tabela 6 apresenta as informações dos seis caminhões basculantes. Geralmente, dois caminhões realizam o transporte de minério para britagem, um ou dois caminhões transportam estéril proveniente das atividades de decapeamento, e um caminhão transporta material britado de uma das plantas de britagem para a planta de moagem. Dessa forma, há sempre um ou dois caminhões como equipamentos reserva ou em manutenção.

Tabela 6 – Informações dos caminhões basculantes da empresa.

Caminhões basculantes			
Equipamento	Fabricante	Modelo	Capacidade
CB 01	Volkswagen	Constellation 31.320	16 m ³ /20 t
CB 02	Volkswagen	Constellation 31.320	16 m ³ /20 t
CB 03	Volkswagen	Constellation 31.320	16 m ³ /20 t
CB 04	Volkswagen	Constellation 31.320	16 m ³ /20 t
CB 05	Volkswagen	Constellation 26.280	16 m ³ /20 t
CB 06	Volvo	VM 310	16 m ³ /20 t

Fonte: autoria própria.

O CB 06 realiza exclusivamente o transporte material para alimentação da planta de moagem, enquanto os demais caminhões são alocados em qualquer atividade. As Figuras 28 e 29 apresentam os modelos dos caminhões.

Figura 28 – Caminhões Volkswagen Constellation 26.280 (em primeiro plano) e 31.320 (em segundo plano).



Fonte: autoria própria.

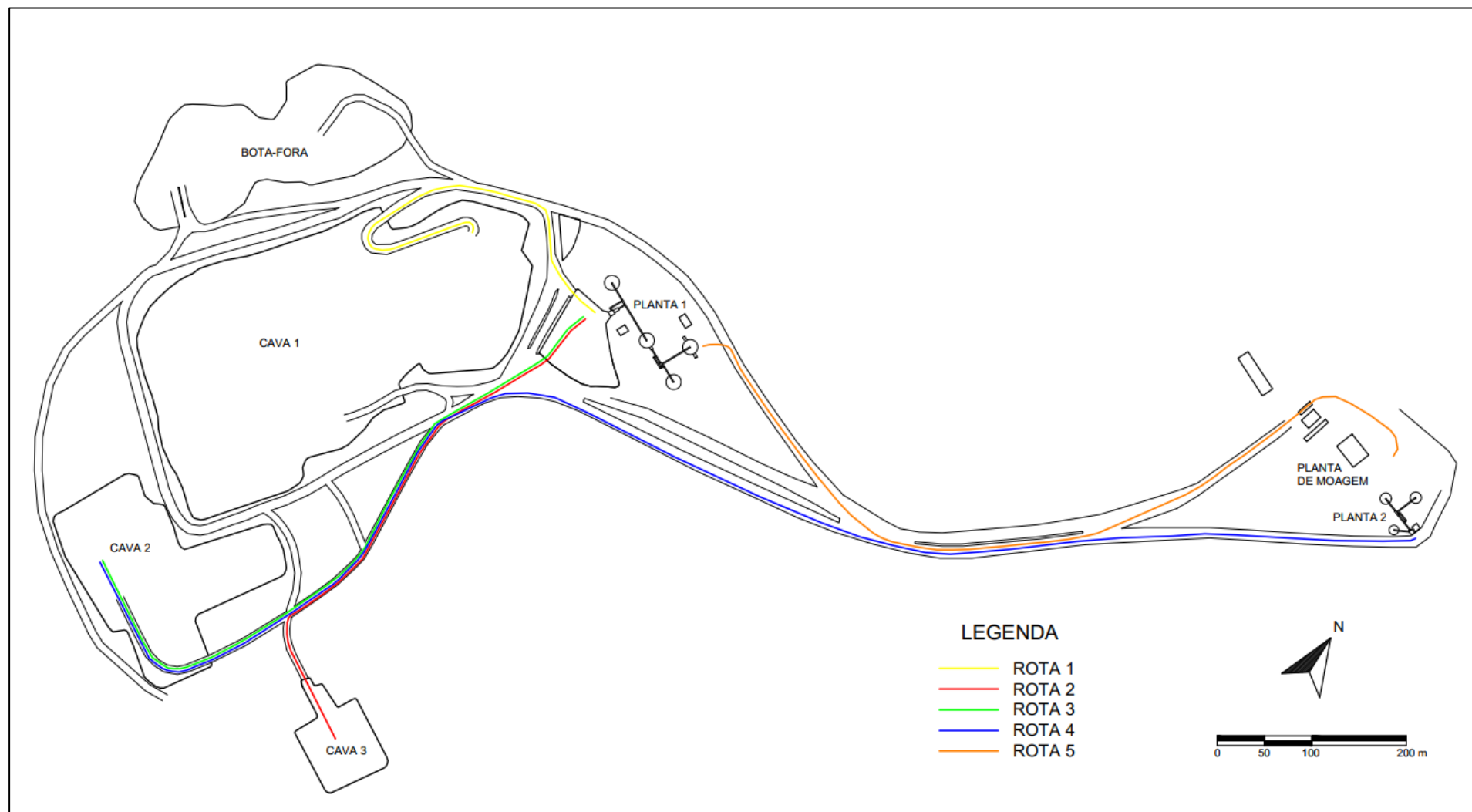
Figura 29 – Caminhão Volvo VM 310.



Fonte: autoria própria.

A Figura 30 mostra um desenho representativo da pedreira, que indica as principais rotas de transporte e os principais pontos de carga e descarga de material, que são: plantas de britagem e moagem, cavas e bota-fora.

Figura 30 – Desenho representativo da pedreira com as principais rotas de transporte.



Fonte: autoria própria.

5.2 Operação de carregamento

A operação de carregamento é realizada por dois tipos de equipamentos: escavadeiras e carregadeiras. As próximas seções apresentam as considerações a respeito do desenvolvimento da operação por estes dois tipos de equipamentos.

5.2.1 Carregamento com escavadeiras

As escavadeiras destinam-se às atividades de carregamento de calcário nas frentes de lavra e de material estéril nas áreas de decapeamento. As análises do trabalho foram feitas com foco no carregamento nas frentes de lavra.

A partir do acompanhamento da EH 01 em operação, observou-se que além das operações elementares convencionais que compõem o ciclo de uma escavadeira (carga da concha, giro carregado, descarga e giro vazio), é necessário que o equipamento execute, ao início e durante a operação, outras atividades a fim de garantir o posicionamento adequado para a realização dos ciclos de carregamento.

Primeiramente, a escavadeira prepara uma plataforma com o material fragmentado, de modo que possa posicionar-se sobre ela e realizar a escavação abaixo do nível das esteiras e de maneira estável, conforme a Figura 31. À medida que o material é removido, o equipamento se reposiciona, faz ajustes na pilha sobre a qual está posicionado e remove fragmentos da área onde os caminhões irão estacionar para receber a carga. Geralmente, a altura pilha de material era de aproximadamente um metro. Pilhas baixas não mostraram-se favoráveis ao enchimento da concha do equipamento, porém, são favoráveis às atividades de remoção de fragmentos das áreas de manobra dos caminhões, segundo relatos de operadores.

Figura 31 – EH 01 executando escavação posicionada sobre a pilha de material.

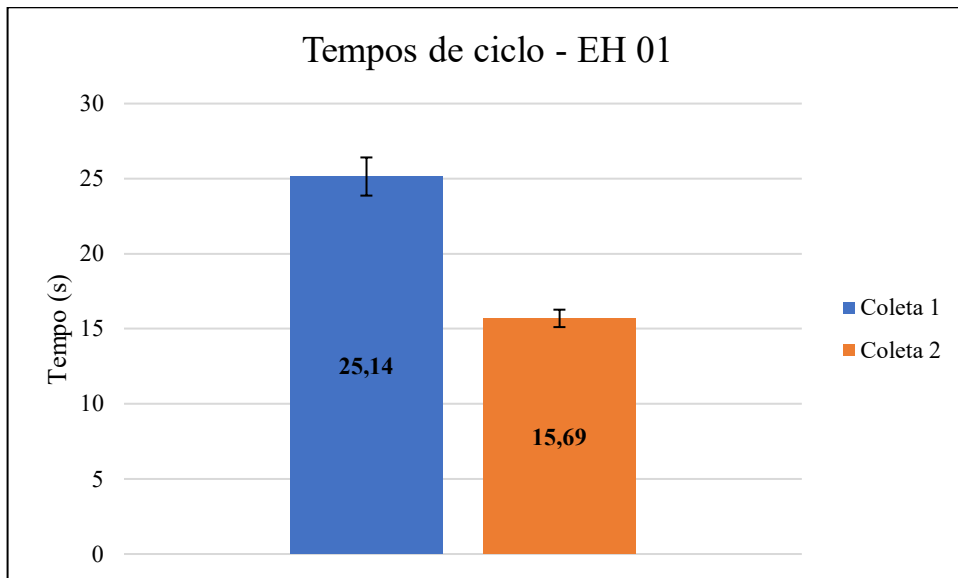


Fonte: autoria própria.

Foi observada a ociosidade da escavadeira nos intervalos entre carregamentos, que eram de aproximadamente dois minutos. Nestes intervalos, realizava-se os reposicionamentos da máquina e da pilha material, fazendo com que acréscimos nos tempos de carregamento fossem evitados.

Os dados referentes à coleta de tempos de ciclo e de intervalos na operação de carregamento estão no Apêndice A. O gráfico da Figura 32 mostra um comparativo de tempos de ciclo da EH 01 em duas coletas realizadas em diferentes condições operacionais.

Figura 32 – Comparativo de tempos de ciclo da EH 01 nas coletas 1 e 2.



Fonte: autoria própria.

O tempo de ciclo médio da EH 01 na coleta 2 foi cerca de 38% menor do que na coleta 1. Isso se deve a dois principais fatores: ângulo de giro da escavadeira e granulometria do material. A coleta de dados 1 foi realizada em um intervalo de tempo no qual a escavadeira, predominantemente, executou o despejo do material após realizar um giro de cerca de 180° do ponto de enchimento da concha; o material escavado limitou-se a fragmentos de rocha de tamanho uniforme, grande parte proveniente de fragmentação com rompedor hidráulico, o que torna o enchimento da concha mais lento. Já na coleta 2, o giro executado era de aproximadamente 90°, com escavação de material com grande presença de finos, facilitando o enchimento da concha. Vale ressaltar que embora a grande presença de material fino seja fator positivo para a escavação, esta condição não é preferível no processo de beneficiamento do

calcário. As Figuras 33 e 34 mostram a forma de operação dos equipamentos durante as coletas de dados 1 e 2, respectivamente.

Figura 33 – Escavação a 180° do ponto de despejo.



Fonte: autoria própria.

Figura 34 – Escavação a 90° do ponto de despejo.



Fonte: autoria própria.

Quanto aos pontos observados, pode-se citar algumas condições operacionais que proporcionam maior eficiência para a operação de carregamento com escavadeiras, sendo elas:

- a) a altura ideal da bancada ou pilha de material sobre a qual a escavadeira realiza a escavação é de 1,7 a 3 metros para escavadeiras série G da John Deere (JOHN DEERE BRASIL, 2020). Esta condição é favorável ao enchimento da concha e minimiza movimentos de elevação da lança;

- b) quando possível, o ângulo de giro deve ser minimizado. A direção de escavação de 45° em relação ao caminhão, a exemplo da Figura 35, é considerado ideal e proporciona a diminuição do tempo de ciclo da escavadeira (JOHN DEERE BRASIL, 2020; CATERPILLAR, 2019);

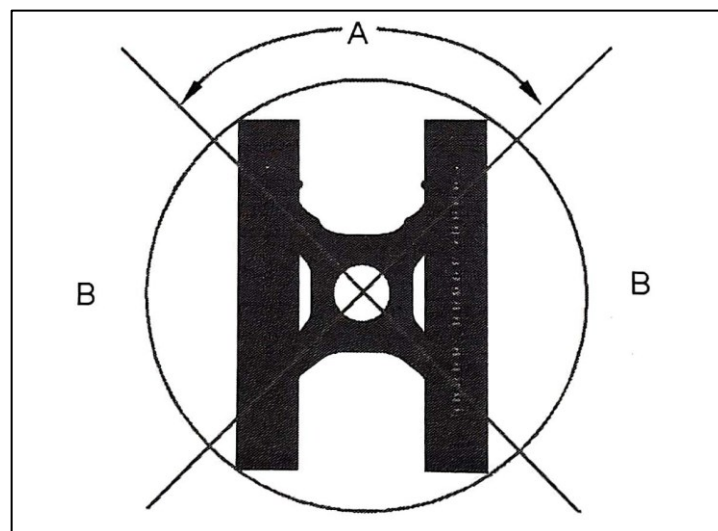
Figura 35 – Escavação a 45° do ponto de despejo.



Fonte: John Deere Brasil (2020).

- c) escavação na mesma direção das esteiras e com a roda motriz voltada para trás. Para maior estabilidade e segurança, recomenda-se que a operação seja realizada conforme indica a Figura 36.

Figura 36 – Indicação das zonas de escavação (A) e despejo (B).



Fonte: Caterpillar (2019).

5.2.2 Carregamento com carregadeiras

A atividade mais comum das carregadeiras na empresa é o carregamento de caminhões a partir da retomada de material de pilhas de minério e de rejeito. A carga dos caminhões é realizada com quatro passes da carregadeira, o que é considerado ideal. A Figura 37 mostra a PC 04 em operação executando o enchimento da concha na pilha de calcário britado para carregamento do CB 06.

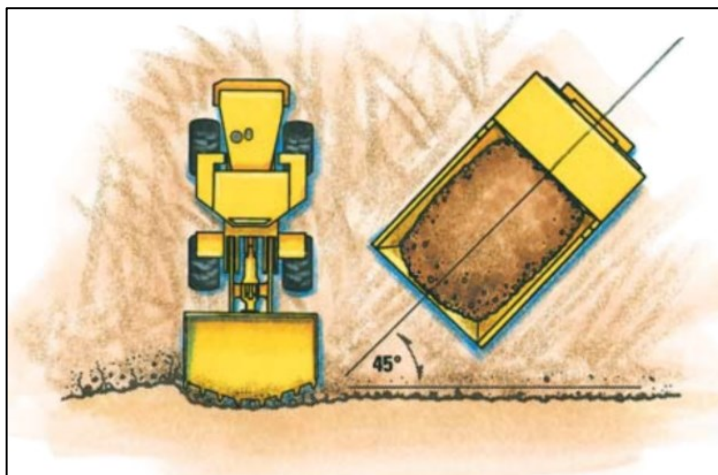
Figura 37 – Operação de carregamento com carregadeira.



Fonte: autoria própria.

Visando a obtenção de menores tempos de ciclo e maior eficiência na operação, as principais técnicas que poderiam ser aplicadas são relativas ao posicionamento do caminhão, que deve estar próximo à pilha e a 45° da mesma, conforme a Figura 38. Isso fará com que o deslocamento da carregadeira seja minimizado. Também é importante que a carregadeira realize o enchimento da concha estando alinhada, também conforme a Figura 38, e com o fundo da concha paralelo à superfície. Dessa forma, danos ao equipamento são evitados e obtém-se um maior fator de enchimento da concha.

Figura 38 – Posicionamento de caminhão a 45° da pilha.



Fonte: Caterpillar (2006).

5.3 Operação de transporte

Durante o acompanhamento das operações, foram identificados fatores que influenciaram na eficiência e na forma de desenvolvimento da operação de transporte, sendo estes relacionados a: condições da praça de carregamento; características mecânicas do caminhão; distância de transporte; largura das vias de transporte; inclinação de rampas de acesso; e capacidade da planta de britagem.

O Apêndice B apresenta, de forma completa, os dados referentes às sete coletas de tempos de ciclo realizadas na operação de transporte. Os dados obtidos a partir de coletas de tempos de ciclo e de medições em vias de transporte compõem os resultados e fundamentam as discussões realizadas nesta seção.

5.3.1 Condições da praça de carregamento

As condições da praça de carregamento, área onde os caminhões realizam manobras e estacionam para o recebimento da carga, são muito importantes para que cada ciclo seja executado em menor tempo, de forma segura e sem danos aos equipamentos. Por meio dos dados coletados, foi possível verificar a redução dos tempos de manobra para carregamento a partir de melhorias no piso e ampliação da área de manobra dos caminhões na cava 3.

A cava 3 apresentava-se em estágio de desenvolvimento inicial. Logo, devido às suas pequenas dimensões, havia pouco espaço disponível para manobra próximo à frente de

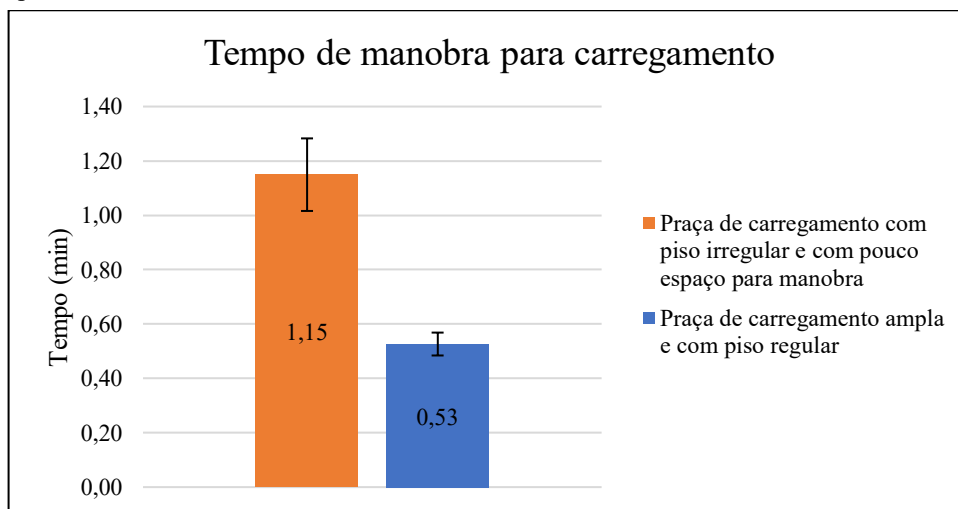
lavra. Em razão disso, os caminhões realizavam a manobra a aproximadamente 30 metros da frente de lavra, distância esta que era percorrida em marcha ré em direção ao ponto de carregamento. À medida que o material foi removido, tornou-se possível realizar a ampliação da praça de carregamento, possibilitando que os caminhões realizassem manobras de retorno, ficando preposicionados para o carregamento e deslocando-se em marcha ré em uma curta distância. Também foram realizadas melhorias no piso, com a adição de uma camada de material britado, tornando-o mais nivelado e compacto, o que favoreceu as condições de tração dos caminhões. A Figura 39 mostra a praça de carregamento da cava 3 após os ajustes. O gráfico da Figura 40 contém os tempos de manobra para carregamento nas duas condições citadas.

Figura 39 – Manobra na praça de carregamento da cava 3 após ajustes.



Fonte: autoria própria.

Figura 40 – Comparativo dos tempos de manobra para carregamento em duas condições operacionais.



Fonte: autoria própria.

Comparando as duas coletas de dados realizadas, observou-se que houve uma redução de 54% (37 segundos) no tempo de manobra para carregamento. Além da redução do tempo de manobra, a ampliação da praça também pode proporcionar uma maior celeridade na troca de caminhões para o recebimento da carga devido a possibilidade de, em eventuais filas, o caminhão ser posicionado próximo ao ponto de carregamento. O nivelamento e a compactação do piso proporcionaram melhores condições de tração aos caminhões, reduzindo a resistência ao rolamento, tendendo também a minimizar danos causados ao equipamento.

Entretanto, mesmo considerando potenciais benefícios, os ajustes nas praças não eram executados de forma constante, considerando que fatores físicos, como disponibilidade de espaço, e operacionais, relacionados à disponibilidade de operadores ou de equipamentos como carregadeiras, fazem com que não seja possível realizar uma preparação minuciosa das praças de carregamento. Assim sendo, o ideal é que sejam executados limpezas, nivelamentos e ampliação das áreas de manobra conforme a exequibilidade destas ações.

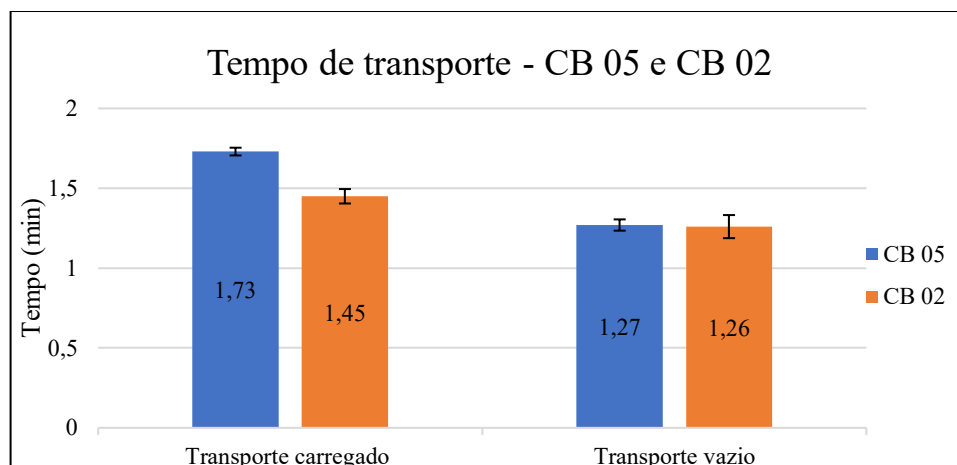
5.3.2 Características mecânicas dos caminhões

A frota de transporte da empresa é composta por seis caminhões, conforme mostrado na Tabela 6, dos quais dois apresentam características mecânicas diferentes dos demais, o que influencia no desempenho operacional e a forma em que são alocados.

O CB 06, caminhão VM 310 Volvo, possui configuração 6x2, ou seja, possui tração em apenas um dos eixos traseiros. Em virtude desta característica, o equipamento é destinado a realizar transporte de material da planta de britagem 1 para a planta de moagem por meio das vias de transporte principais (rota 5), que apresentam melhores condições de superfície e não possuem trechos em rampa, o que exigiria maior força de tração ao equipamento.

Já o CB 05 é um caminhão Constellation 26.280 Volkswagen, enquanto os CBs 01, 02, 03 e 04 são do modelo Constellation 31.320. Por meio dos dados de tempo de ciclo, foi observada uma diferença de desempenho entre os dois modelos de caminhão Constellation. O gráfico da Figura 41, apresenta um comparativo entre os tempos de transporte dos CBs 05 e 02 na rota 2.

Figura 41 – Comparativo dos tempos de transporte dos CBs 05 e 02 na rota 2.



Fonte: autoria própria.

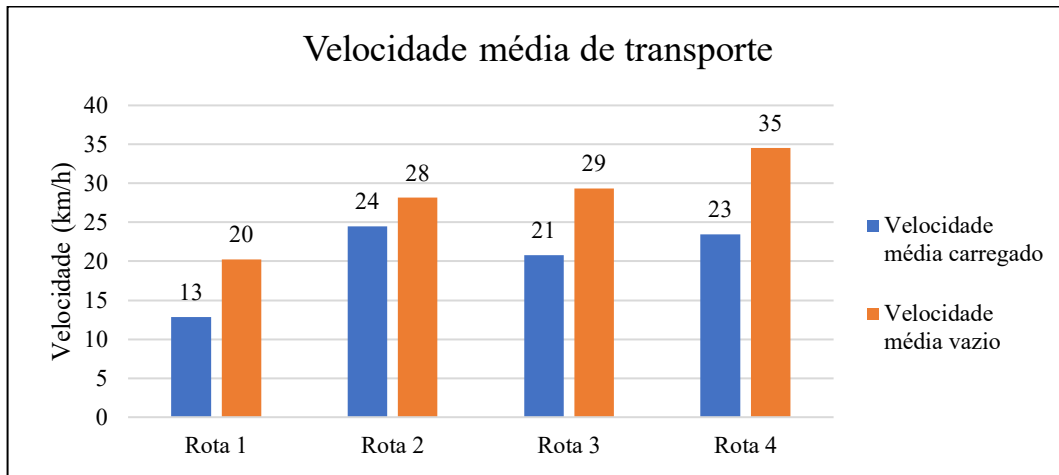
Observou-se que o tempo de transporte carregado do CB 02 foi menor que o do CB 05. A diferença nos tempos é observada no transporte carregado devido aos trechos de subida de rampa exigirem mais do equipamento, evidenciando o contraste de desempenho devido às características mecânicas. O CB 02 (Constellation 31.320) possui maior potência e torque do motor, equivalentes a 320cv e 1288Nm, respectivamente. Já o motor do CB 05 (Constellation 26.280) possui potência igual a 275cv e 1050Nm de torque.

Os dados da Figura 41 foram coletados com motoristas distintos operando os CBs 02 e 05. No entanto, considera-se que, para este caso, o motorista não tem influência significativa na velocidade de percurso dos caminhões, visto que os tempos de transporte vazio são muito próximos, além de ambos os motoristas possuírem experiência considerável. Isso reforça que o motivo da diferença nos tempos é o trecho em aclive, onde caminhões com maior potência e torque apresentam melhor desempenho. Como no transporte vazio não há condições que exigem maior desempenho dos caminhões, a diferença não é observada.

5.3.3 Rotas de transporte

Algumas características das rotas de transporte apresentadas na Figura 30, como o comprimento, trechos com curvas e aclives mostraram grande influência na velocidade média de transporte e, conseqüentemente, nos tempos de deslocamento. O gráfico da Figura 42 mostra as velocidades médias de transporte nas rotas 1, 2, 3 e 4 obtidas a partir de coletas de tempos de ciclo dos CBs 01 e 02, que são do mesmo modelo.

Figura 42 – Comparativo de velocidades médias de transporte nas rotas 1, 2, 3 e 4.

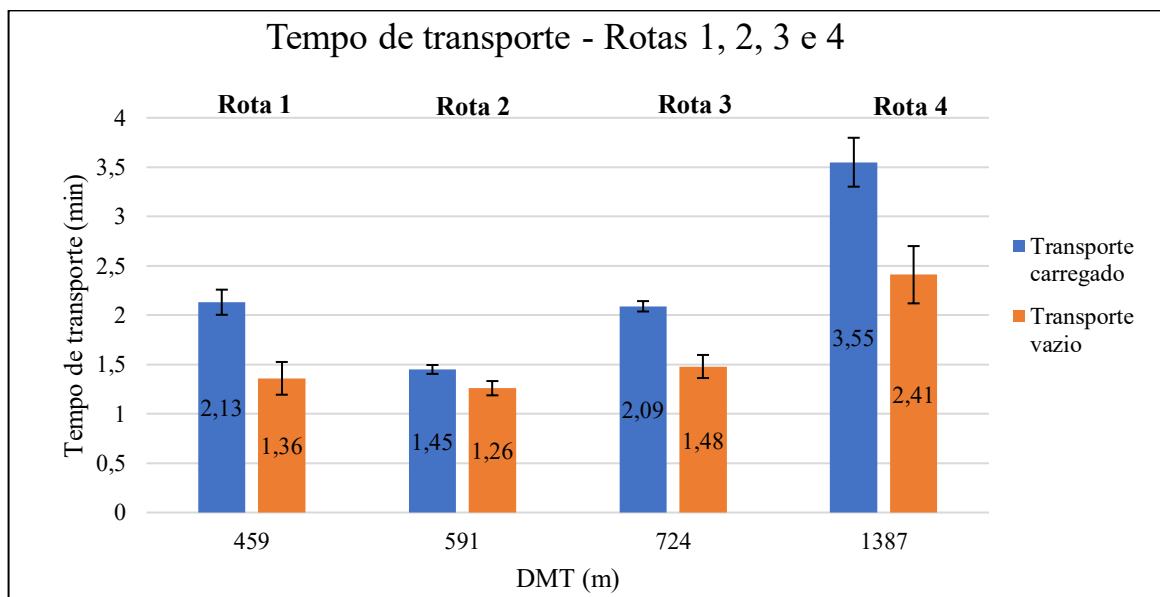


Fonte: autoria própria.

Maiores velocidades são alcançadas em trechos mais retilíneos e menos inclinados, o que justifica as variações apresentadas no gráfico da Figura 42, principalmente em relação ao transporte carregado, que sofre maior influência dos trechos com aclives.

Percebeu-se que a menor velocidade média, 13km/h, foi referente ao transporte carregado na rota 1. Nesta rota, grande parte do trajeto é composta por trechos inclinados e há maior presença de curvas em relação às demais rotas, conforme verificado na Figura 30. Isso faz com que o tempo de deslocamento na rota 1 seja maior do que em rotas que possuem maior DMT, como mostra o gráfico da Figura 43, que apresenta uma relação entre os tempos de transporte e as DMTs das rotas 1, 2, 3 e 4.

Figura 43 – Comparativo de tempos de transporte em rotas de diferentes DMTs.



Fonte: autoria própria.

Com exceção da rota 1, percebeu-se que há um maior tempo de deslocamento para maiores distâncias, evidenciando que a DMT também foi um fator que mostrou influência nos tempos de ciclo dos equipamentos de transporte.

5.3.4 Largura das vias de transporte

Considerando as recomendações da NR-22, as vias de transporte da pedreira deveriam ser de, no mínimo, 4,5 metros para estradas de faixa única e 9 metros para estradas de faixa dupla, de acordo com a largura dos caminhões utilizados, equivalente a 3 metros. Com as medições realizadas, observou-se que grande parte das vias de transporte estava de acordo com estes requisitos mínimos. A partir das medições de largura das vias, obteve-se:

- a) 9 a 11 metros em vias principais (faixa dupla);
- b) 5 a 10 metros em rampas de acesso às cavas (faixa única).

Alguns trechos das rampas possuíam largura suficiente para que fossem estabelecidas duas faixas de tráfego. Entretanto, a presença de trechos de menor largura não possibilitava o estabelecimento de duas faixas de tráfego ao longo de todo o comprimento da rampa, fazendo com que o deslocamento dos veículos nas rampas ocorresse em faixa única. Esta condição gerou tempos de espera quando dois veículos se cruzavam nos trechos menos largos, como mostra a Figura 44.

Figura 44 – Caminhão em espera para passar por trecho de pequena largura.



Fonte: autoria própria.

O ideal é que, quando as condições geométricas permitirem, as rampas sejam construídas com largura de, no mínimo, 9 metros. Dessa forma, o tráfego pode acontecer em duas faixas, aumentando a segurança e eliminando tempos de espera que resultam em perda de produtividade.

5.3.5 Inclinação de rampas de acesso

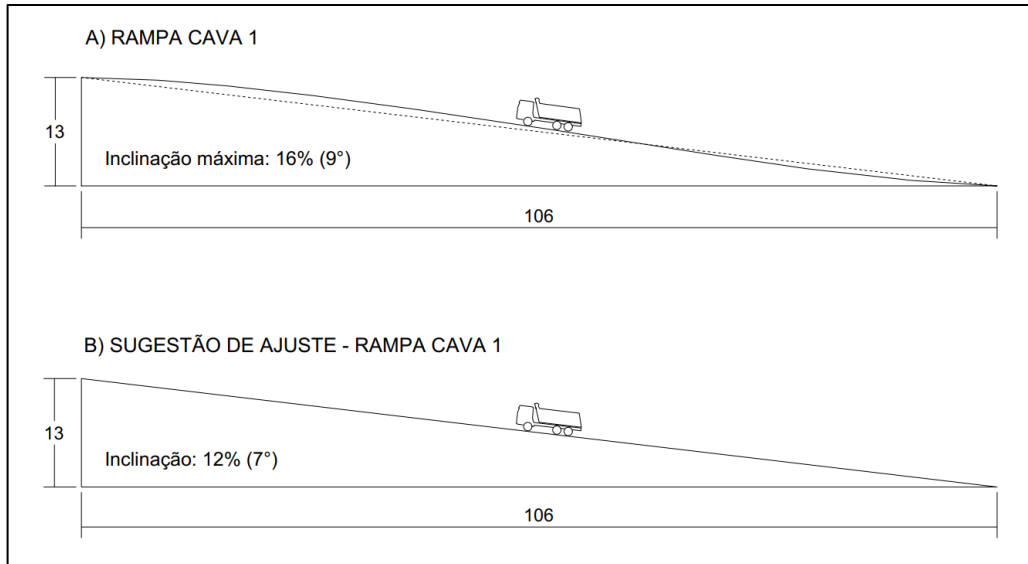
Como já evidenciado nas seções anteriores, as rampas de acesso apresentaram grande influência no desenvolvimento da operação de transporte. Observou-se que inclinações acentuadas e irregularidade na superfície são fatores que podem causar danos aos equipamentos e geram perdas de velocidade de deslocamento. Além disso, foi verificado por meio do contagem dos caminhões, que subidas íngremes geram maiores rotações do motor, o que acarreta maior consumo de combustível.

Por meio de perfis longitudinais traçados, foi possível observar a atual condição das principais rampas da pedreira e identificar pontos de melhoria. Com base nisso, foram traçados perfis sugestivos para uma possível adequação das rampas. A partir de recomendações da literatura e considerando as características geométricas da pedreira, definiu-se uma inclinação máxima ideal de 14% para as rampas. As informações acerca das rampas analisadas estão nas próximas subseções.

5.3.5.1 Rampa cava 1

A cava 1 possui duas rampas, no entanto, apenas a rampa da parede sudeste da cava foi analisada. Percebe-se, por meio da Figura 45a, que a rampa possui um trecho com inclinação de 16%, acima do gradiente ideal de 14%. Para adequação, é necessária uma mudança no perfil da rampa, visando tornar constante a sua inclinação, o que resulta em um gradiente de 12% (Figura 45b). Nesse caso, não se torna necessário um aumento do comprimento da rampa para a suavização do gradiente.

Figura 45 – Perfil atual (A) e perfil sugestivo (B) da rampa de acesso à cava 1.

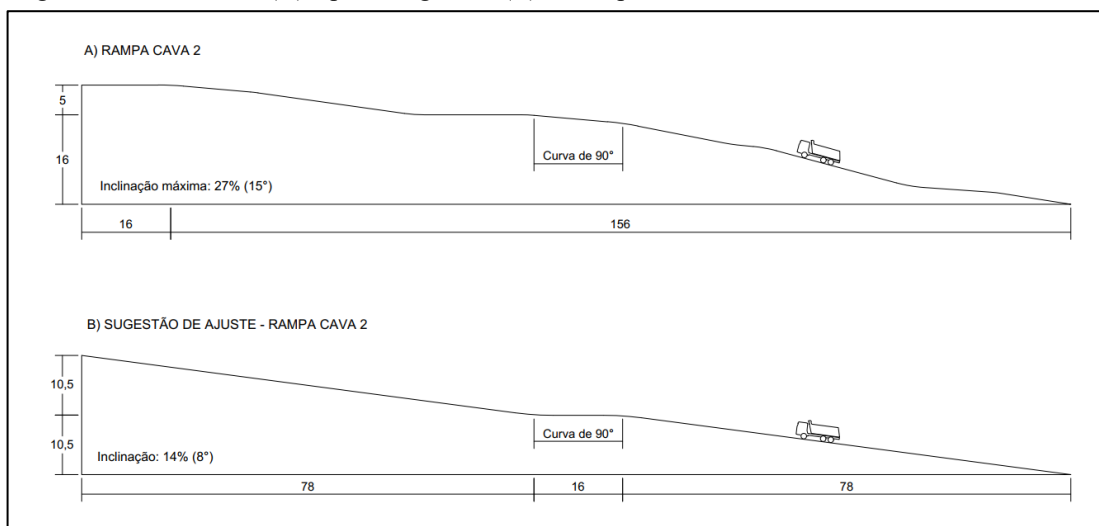


Fonte: autoria própria.

5.3.5.2 Rampa cava 2

A rampa da cava 2 (Figura 46a) registrou a maior extensão dentre as rampas da pedreira, com aproximadamente 157 metros. Há muitas variações de inclinação ao longo da rampa e um trecho com curva de 90 graus. No perfil de ajuste sugerido (Figura 46b), o trecho da curva passou a ser totalmente horizontal, visando o aumento da segurança da operação. Definiu-se inclinação de 14% para os demais trechos, o que torna necessário um aumento de 16 metros no comprimento da rampa.

Figura 46 – Perfil atual (A) e perfil sugestivo (B) da rampa de acesso à cava 2.

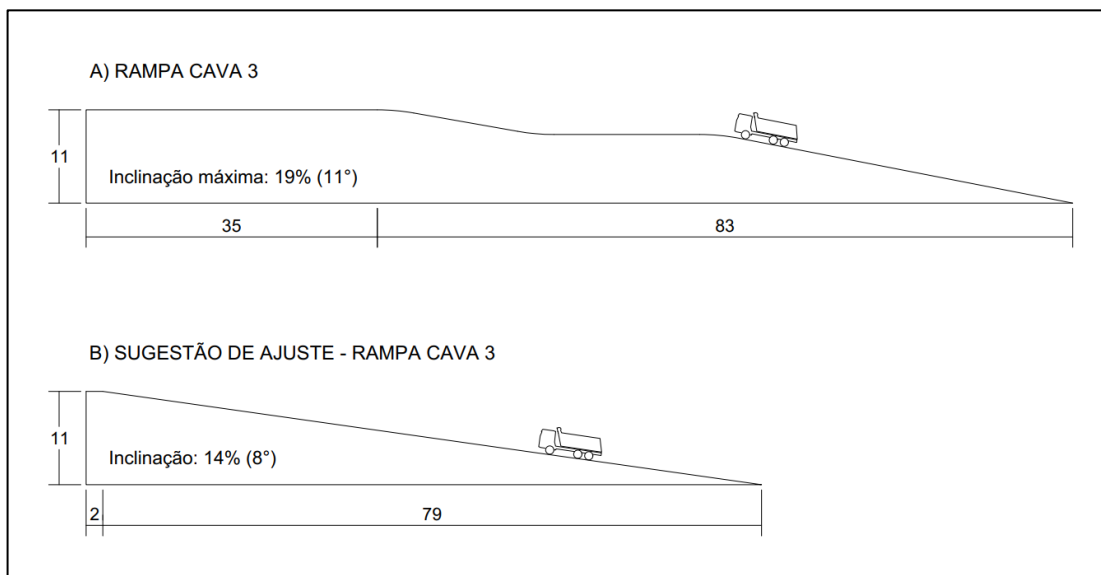


Fonte: autoria própria.

5.3.5.3 Rampa cava 3

A rampa da cava 3 foi construída de modo provisório e apresentou inclinação máxima de 19% (Figura 47a). O trecho inicial da rampa foi feito sobre o minério, fazendo com que fosse necessário o redimensionamento da rampa posteriormente, visto que este material seria removido. Logo, no perfil de ajuste, definiu-se um novo ponto de início da rampa e um comprimento de 79 metros para que a inclinação de 14% seja alcançada (Figura 47b).

Figura 47 – Perfil atual (A) e perfil sugestivo (B) da rampa de acesso à cava 3.



Fonte: autoria própria.

5.3.6 Capacidade da planta de britagem

Dependendo do local a ser realizado o basculamento, este poderia ser executado imediatamente após a chegada do caminhão no local (ex.: bota-fora) ou somente após receber a liberação para o despejo do material, no caso de basculamento de calcário para britagem.

Como a planta de britagem 2 possui menor capacidade, há um maior tempo de espera dos caminhões para o basculamento devido ao controle da vazão de alimentação do britador e em razão de frequentes pausas para desobstrução do mesmo. De acordo com as medições, as médias de tempo de “manobra e basculamento” na planta de britagem 1 foram de 1,28 a 1,79 minutos, enquanto na planta de britagem 2, foram de 3,63 a 4,98 minutos.

Tempos de espera para basculamento geram ociosidade dos equipamentos de transporte, representando redução de produtividade. Isso mostra que o dimensionamento dos equipamentos de processamento mineral também influencia no ciclo de carregamento e transporte, assim como a granulometria do material pode reduzir a eficiência da britagem e consequentemente das demais operações, o que ressalta a interdependência existente entre as operações unitárias de produção mineral.

Para a empresa, as condições da planta de britagem 2 não representam um problema a ser solucionado, visto que sua utilização é condicionada a paradas de produção na planta 1, que opera prioritariamente.

5.4 Compatibilidade entre equipamentos

De acordo com as informações apresentadas na seção 5.1, Tabelas 4 e 6, os equipamentos de carregamento e transporte utilizados na lavra de calcário da empresa, são:

- a) EH 01 (capacidade da concha de 2,3 m³);
- b) CBs 01, 02, 03, 04 e 05 (capacidade de 16 m³/20 t).

O número de passes da EH 01 para o carregamento dos caminhões é seis, considerando que a concha esteja totalmente cheia em cada passe. Este número está dentro do intervalo ideal apresentado por Caterpillar (2006) e não torna o tempo de carregamento longo a ponto de ocasionar filas de espera. Além disso, seis passes resultam em uma carga total de 18 a 20 toneladas, o que está de acordo com a capacidade dos caminhões.

Dois caminhões realizam o transporte do calcário das frentes de lavra até o britador primário. Este número de caminhões atende à produção requerida na pedreira, embora haja um intervalo entre carregamentos de aproximadamente dois minutos, o que gera ociosidade da escavadeira em alguns momentos. Por meio da Equação 12, foi calculado o número ideal de caminhões para a operação, de acordo com tempos de ciclo referentes a três diferentes cenários.

$$N^{\circ} \text{ de caminhões} = \frac{\text{Tempo de ciclo do caminhão}}{\text{Tempo de carregamento}} \quad (12)$$

$$\text{Cenário 1: } \frac{7,28}{2,34} = 3,11 = 3 \text{ caminhões}$$

$$\text{Cenário 2: } \frac{6,67}{1,96} = 3,4 = 3 \text{ caminhões}$$

$$\text{Cenário 3: } \frac{7,33}{1,73} = 4,24 = 4 \text{ caminhões}$$

Os resultados mostraram que o número ideal de caminhões seria três ou quatro, a depender das variações de tempo de ciclo e do tempo de carregamento. No entanto, observou-se em campo que mais de dois caminhões em operação aumentaria a possibilidade de geração de filas de espera. Isso se deve, principalmente, à manobra para carregamento, que somente poderia ser realizada quando não houvesse outro caminhão recebendo a carga. Logo, a Equação 12 não se aplica para este caso, pois ela fornece uma estimativa considerando uma eficiência de 100% para as operações.

Revista M&T (2019) considera que, para o cálculo da quantidade ideal de caminhões, deve-se dividir o tempo de ciclo do caminhão pelo tempo que o caminhão leva para manobrar e ser carregado. Dessa forma, utilizou-se a Equação 13 para o cálculo da quantidade de caminhões, pois esta se mostrou mais coerente com a operação em questão.

$$N^{\circ} \text{ de caminhões} = \frac{\text{Tempo de ciclo do caminhão}}{\text{Tempo de carregamento} + \text{Tempo de manobra}} \quad (13)$$

Com a utilização da Equação 13, tem-se:

$$\text{Cenário 1: } \frac{7,28}{2,34 + 0,54} = 2,53 = 2 \text{ caminhões}$$

$$\text{Cenário 2: } \frac{6,67}{1,96 + 0,55} = 2,66 = 3 \text{ caminhões}$$

$$\text{Cenário 3: } \frac{7,33}{1,73 + 0,75} = 2,95 = 3 \text{ caminhões}$$

Nota-se que o número ideal de caminhões pode variar conforme a variação dos tempos de ciclo. De acordo com os dados utilizados, o número ideal de caminhões para a operação seria dois ou três, a depender do cenário. Percebe-se também que os valores obtidos não são inteiros, logo, pode-se optar por um número de caminhões imediatamente inferior ou superior ao valor obtido. Caso seja adotado um número imediatamente inferior, tempos de espera da unidade de carregamento serão gerados, como acontece na operação da empresa em

questão, fazendo com que a produção seja governada pela operação de transporte. Já no caso de escolha de um número imediatamente superior, tempos de espera das unidades de transporte poderão ser gerados, fazendo com que a produção esteja em função da operação de carregamento (RICARDO; CATALANI, 2007).

O uso de três caminhões se torna uma alternativa para um possível cenário de aumento da produção requerida ou de aumento dos tempos de ciclo em razão do avanço da lavra e do conseqüente aumento da DMT. Entretanto, isso exigiria mais sincronismo à operação devido ao aumento da possibilidade de geração de filas de caminhões. Estes tempos de espera poderiam ser minimizados com a redução no tempo de carga e ampliação de praças de carregamento e largura de estradas.

5.5 Aumento de produtividade com redução dos tempos de ciclo

Nas seções 5.2 e 5.3, discutiu-se sobre fatores que contribuem para a redução dos tempos de ciclo dos equipamentos. Buscam-se menores tempos de ciclo, pois isso resulta uma maior produtividade. A Tabela 7 mostra os resultados referentes ao comparativo entre cenários operacionais simulados, que relaciona tempos de ciclo com a produtividade. Nos dois cenários, os dados são relativos à operação na rota 2. Para os cálculos de produtividade, foi considerada uma carga média de 19 toneladas transportada pelos caminhões.

Tabela 7 – Comparativo entre cenários operacionais.

	Maior eficiência	Menor eficiência	Diferença
Carregamento (min)	1,79	1,98	0,19
Transporte carregado (min)	1,45	1,73	0,28
Manobra e basculamento (min)	1,45	1,79	0,34
Transporte vazio (min)	1,26	1,27	0,01
Manobra para carregamento (min)	0,53	1,15	0,62
Tempo de ciclo (min)	6,48	7,92	1,44
Produtividade (t/h)	175,93	143,94	31,98

Fonte: autoria própria.

Verificou-se que pequenas reduções nos tempos de execução de cada operação elementar do ciclo poderiam resultar em ganhos consideráveis de produtividade. A redução de

1,44 minutos por ciclo resultaria em um ganho de aproximadamente 32 toneladas por caminhão em uma hora ininterrupta de trabalho. Considerando os dois caminhões utilizados e um rendimento de 80% para a operação, estima-se que a diferença de produção entre os dois cenários seja equivalente a 375 toneladas em um turno de 7,33 horas.

6 CONCLUSÃO

Por meio da coleta de tempos de ciclo e do acompanhamento dos equipamentos em operação, foram identificados alguns fatores que afetaram a eficiência das operações de carregamento e transporte da empresa. Com a identificação destes fatores, foram levantadas alternativas para melhorias nos pontos passíveis de alteração.

Na operação de carregamento com escavadeira hidráulica, os principais fatores identificados foram o ângulo de giro do equipamento e a resistência ao enchimento da concha. Observou-se que a diminuição do ângulo de giro somado a um enchimento mais rápido da concha pode gerar diminuição no tempo de ciclo da escavadeira. Como geralmente o material movimentado na pedreira não é favorável ao enchimento da concha, uma maior eficiência poderia ser obtida com o aumento da altura da pilha sobre a qual a escavadeira se posiciona.

No carregamento com carregadeiras, o principal fator observado relacionou-se com a posição do caminhão para o recebimento da carga. O ideal é que o caminhão fosse posicionado a 45° do ponto de enchimento da concha da carregadeira, visando reduzir deslocamentos excessivos da unidade de carregamento a cada ciclo.

Dentre os fatores que apresentaram influência na operação de transporte, pode-se destacar: inclinação e largura de estradas; condição de superfície e tamanho das áreas de manobra para carregamento. Inclinações acentuadas e superfícies irregulares implicaram em reduções de velocidade de tráfego, além de serem possíveis causadoras de falhas mecânicas, tornando necessárias paradas para manutenção corretiva nos equipamentos. Identificou-se que estradas com pequena largura também promoveram redução de velocidade nos caminhões ou até mesmo tempos de espera em trechos de faixa única, o que ocasionou aumento dos tempos de ciclo. Como sugestão, calculou-se a largura ideal de estradas com base nas recomendações da NR-22 e foram traçados perfis longitudinais para adequação das principais rampas, considerando um gradiente ideal máximo de 14%.

A pequena capacidade de uma das plantas de britagem e as diferentes características mecânicas dos alguns caminhões da frota foram outros fatores identificados como influentes na operação de transporte. A pequena capacidade na britagem ocasionou tempos de espera na operação de basculamento, enquanto que a diferença de características mecânicas entre os caminhões influenciou no tipo de atividade empregada e nas velocidades de deslocamento.

Também constatou-se a compatibilidade entre os equipamentos de carregamento e transporte em relação às suas capacidades. O número de caminhões que operaram em conjunto

com a escavadeira que atuou nas frentes de lavra também foi adequado para o cenário avaliado na pedreira. No entanto, tendo em vista o avanço da lavra e o conseqüente aumento dos tempos de ciclo no transporte, sugere-se a avaliação do uso de três caminhões.

Caso dois caminhões sejam mantidos operando com acréscimo nos tempos de ciclo, a produtividade do conjunto será reduzida, pois a produtividade é inversamente proporcional ao tempo de ciclo. Isso foi evidenciado no comparativo realizado entre os cenários operacionais simulados que continham diferentes tempos de ciclo. De acordo com os dados utilizados, com um tempo reduzido em 1,44 minutos, a produção dos caminhões aumentaria em, aproximadamente, 375 toneladas por turno de trabalho.

Ressalta-se que as considerações contidas neste trabalho, relativas às operações da empresa, foram feitas tendo em vista a literatura consultada, recomendações de fabricantes dos equipamentos e o porte do empreendimento. O estudo foi encaminhado ao setor de produção da empresa para avaliação da relevância e pertinência das análises e sugestões apresentadas. Espera-se que o estudo seja um ponto de partida para outras discussões e avaliações a respeito do tema na empresa e que as possíveis aplicações de medidas recomendadas proporcionem ganhos de produtividade e segurança, bem como redução de custos operacionais.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Tamires. **O que é um caminhão articulado?** Indústria Hoje. 2016. Disponível em: <<https://industriaohoje.com.br/o-que-e-um-caminhao-articulado>>. Acesso em: 03 ago. 2021.

ATLAS COPCO. **Surface Drilling in Quarry and Construction**. 3rd ed. 2006.

BORGES, T. C. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3411>>. Acesso em: 15 jul. 2021.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **NR 22 - Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Brasília, 1978. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-22-atualizada-2022.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

CARMO, F. A. R., *et al.* **Aumento de produtividade da frota de transporte da mina oeste**. p. 143-150. *In*: 18º Simpósio de Mineração, São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/aumento-de-produtividade-da-frota-de-transporte-da-mina-oeste>>. Acesso em: 05 ago. 2021.

CASE CONSTRUCTION. **Pá Carregadeira 621E**. Disponível em: <<https://assets.cnhindustrial.com/casece/latam/assets/Brochures/Products/Wheel-Loaders/Full-Size-Wheel-Loaders/621E/case-construction-pacarregadeira-621E-PO.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2021.

CATERPILLAR. **A Reference Guide to Mining Machine Applications**. 2006.

CATERPILLAR. **Carregadeira de esteiras 973K**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/track-loaders/track-loaders/1000033102.html>. Acesso em: 21 ago. 2021.

CATERPILLAR. **Carregadeira de rodas 980L**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/wheel-loaders/medium-wheel-loaders/1000027523.html>. Acesso em: 28 ago. 2021.

CATERPILLAR. **Escavadeira a cabo 7395**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/electric-rope-shovels/electric-rope-shovels/18295903.html> Acesso em: 03 ago. 2021.

CATERPILLAR. **Manual de Operação e Manutenção: 320, 323 Escavadeira**. 2019.

CURI, Adilson. **Lavra de minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

FELSCH JUNIOR, W. S., *et al.* **Melhorias operacionais – inclusive em DMT – impactam**

nos custos de produção. 20º Prêmio de Excelência da Indústria Minero-metalúrgica Brasileira, p. 13-14. Minérios & Minerales, 2018. Disponível em: <https://issuu.com/revistaoempreiteiro1/docs/mm394_120>. Acesso em: 06 ago. 2021.

HARTMAN, Haward L. **Introductory Mining Engineering.** John Wiley & Sons, 1987.

HUSTRULID, W.; KUTCHA, M.; MARTIN, R. **Open pit mine planing & design.** 3 ed. Taylor & Francis Group, 2013.

JAWORSKI, Tadeo. **Manual de Equipamentos para Escavação – Compactação e Transporte.** Revisão e digitalização por Prof. Camilo Borges Neto, Ms.C.Eng. Civil. 1997.

JIMENO, E. L.; JIMENO, C. L.; LLERA, J. M. P.; URBINA, F.P. O. **Manual de Perforación y Voladura de Rocas.** Série Geotecnica, Instituto Geologico y Minero de España. Madrid, 1987.

JOHN DEERE BRASIL. **Escavadeira Série G – Dicas do Especialista.** 2020. Disponível em: <https://youtu.be/_oy5lzM3bXo>. Acesso em: 03 dez. 2021.

KENNEDY, Bruce A. **Surface Mining.** 2nd ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1990.

LIEBHERR. **HS 8300 Dragline de mineração.** Disponível em: <<https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/equipamento-de-mineracao/mining-dragline/details/dragline-de-minera%C3%A7%C3%A3o-hs-8300.html>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

LIEBHERR. **Liebherr R 9100B.** Disponível em: <<https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/equipamento-de-mineracao/escavadoras-de-mineracao/details/r9100.html>>. Acesso em 26 ago. 2021.

LIEBHERR. **Liebherr T284.** Disponível em: <<https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/equipamento-de-mineracao/caminhoes-de-mineracao/details/t284.html>>. Acesso em: 28 ago. 2021.

LISBÔA, Rodrigo César de Oliveira. **Influência dos tempos fixos na produtividade da frota de transporte.** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/197177>>. Acesso em: 04 ago. 2021.

LOPES, J. R. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com o uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto propelido.** 2010. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2665>>. Acesso em: 15 jul. 2021.

MAGNUSVK. **Mining Trucks.** Disponível em: <<https://search.creativecommons.org/photos/a1135253-dd60-41a1-bc96-3ace2c5b4f07>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

MAMBO, Ivo Fernando. **Simulação da operação de carregamento e transporte numa mina a céu aberto de carvão**. 2017. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/7691>>. Acesso em: 21 jul. 2021.

MEGA MACHINES CHANNEL. **Hitachi Zaxis 670LC Excavator Loading Trucks – Operator Anogiatis**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ZogBEK0ieHM>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

MENDES, Marcelo Lopes. **Curso de Desmonte de Rochas por Explosivos – Formação de Blaster**. Disponível em: <https://www.academia.edu/10183750/CURSO_DE_DESMONTE_DE_ROCHAS_POR_EXPLOSIVOS_FORMA%C3%87%C3%83O_DE_BLAZER_Instrutor_Marcelo_Lopes_Mendes_Engenheiro_de_Minas_CREA_MG_73_235_D>. Acesso em: 25 jul. 2021.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**; tradução Verônica Calado. 2a ed., Editora LTC, Rio de Janeiro, 2009.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Introdução à gestão de manutenção**. Gerência Educacional de Metal Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

PARAHYBA, R. E. **Calcário Agrícola**. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2008. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-1-2013-calcario-agricola>>. Acesso em: 31 mai. 2022.

PEREIRA, G. A. **Seleção e dimensionamento de equipamentos de perfuração, carregamento e transporte de minas a céu aberto**. 2021. 77 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Cachoeiro de Itapemirim. Cachoeiro de Itapemirim, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/828>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

QUEVEDO, J. M. G. **Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

READ, John; STACEY, Peter. **Guidelines for open pit slope design**. CRC Press, 2009.

REVISTA M&T – MANUTENÇÃO & TECNOLOGIA. **Escavadeiras: o diferencial da precisão**. Nº 238, out. 2019. Disponível em: <https://revistamt.com.br/Arquivos/Edicoes/MT_238.pdf>. Acesso em 07 jan. 2022.

RIBEIRO, R. **Impressões: este caminhão de mineração aguenta tanto peso que é “ilegal”**. Quatro Rodas. 2019. Disponível em: <<https://quatrorodas.abril.com.br/testes/impressoes-este-caminhao-de-mineracao-aguenta-tanto-peso-que-e-ilegal/>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual prático de escavação - terraplenagem e escavação de rocha**. 3ª edição. São Paulo: PINI, 2007.

ROCBOLT. **Cresson Mine Hitachi EX5500 Hydraulic Shovel and a Cat 834 Wheel Dozer**. Disponível em: <<https://search.creativecommons.org/photos/b04e1430-b4c5-47aa-b4d6-e8dee98024c4>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

ROCBOLT. **Cresson Mine Hitachi EX5500 Hydraulic Shovel, Cat 793D Truck and a Cat 834 Wheel Dozer**. Disponível em: <<https://search.creativecommons.org/photos/668c1758-9142-4b6a-ba1f-f5e9a91087f9>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

ROCBOLT. **Cresson Mine Hitachi EX5500 Hydraulic Shovel, Cat 793D Truck and a Cat 834 Wheel Dozer**. Disponível em: <<https://search.creativecommons.org/photos/aa66e4e8-c208-4456-9555-512bfb055187>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Calcário e dolomito**. In: Rochas & minerais industriais: usos e especificação. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. Parte II. Cap. 15. p.327-350. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1051>>. Acesso em: 31 mai. 2022.

SILVA, V. C. **Carregamento e transporte de rochas**. Apostila, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

TANNANT, D. D.; REGENSBURG, B. **Guidelines for mine haul road design**. School of Mining and Petroleum Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. Alberta: University of Canada, 2001. 108 p.

TEIXEIRA, L. A. C.; **Caracterização de payloads via telemetria**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/157749>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT. **Dicas de Operação: Caminhão Articulado | Volvo CE**. 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=P5o07OPUvUY&list=LL&index=1>>. Acesso em: 03 ago. 2021.

VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT. **Volvo A45G**. Disponível em: <<https://www.volvoce.com/brasil/pt-br/products/articulated-haulers/a45g/>>. Acesso em: 03 ago. 2021.

VOLVO CONSTRUCTION EQUIPMENT. **Volvo EC950E**. Disponível em: <<https://www.volvoce.com/brasil/pt-br/products/excavators/ec950e/>>. Acesso em: 03 ago. 2021.

**APÊNDICE A – DADOS DAS COLETAS DE TEMPOS DE CICLO NA OPERAÇÃO
DE CARREGAMENTO**

		Tempo de ciclo (seg)	Intervalo entre carregamentos (min)
Coleta 1	Média	25,14	1,94
	IC	[23,87; 26,41]	[1,35; 2,53]
Coleta 2	Média	15,69	2,01
	IC	[15,11; 16,27]	[1,62; 2,40]

**APÊNDICE B – DADOS DAS COLETAS DE TEMPOS DE CICLO NA OPERAÇÃO
DE TRANSPORTE**

Coleta 1	Rota		Motorista		Caminhão	
	3		3		CB 02	
		Carregamento	Transporte carregado	Manobra e basculamento	Transporte vazio	Manobra para carregamento
	Média (min)	1,73	2,09	1,28	1,48	0,75
	IC	[1,63; 1,80]	[2,04; 2,14]	[1,37; 1,19]	[1,36; 1,60]	[0,64; 0,86]
	Tempo de ciclo médio (min)					
	7,33					
Coleta 2	Rota		Motorista		Caminhão	
	4		1		CB 02	
		Carregamento	Transporte carregado	Manobra e basculamento	Transporte vazio	Manobra para carregamento
	Média (min)	3,22	3,29	4,98	2,31	0,80
	IC	[2,51; 3,93]	[2,88; 3,70]	[2,38; 7,58]	[2,06; 2,56]	[0,02; 1,58]
	Tempo de ciclo médio (min)					
	13,59					
Coleta 3	Rota		Motorista		Caminhão	
	4		1		CB 05	
		Carregamento	Transporte carregado	Manobra e basculamento	Transporte vazio	Manobra para carregamento
	Média (min)	3,17	3,55	2,25	2,41	1,59
	IC	[2,60; 2,74]	[3,30; 3,80]	[1,35; 3,15]	[2,12; 2,70]	[0,75; 2,43]
	Tempo de ciclo médio (min)					
	12,97					

Coleta 4	Rota	Motorista		Caminhão		
	2	1		CB 05		
		Carregamento	Transporte carregado	Manobra e basculamento	Transporte vazio	Manobra para carregamento
	Média (min)	1,79	1,48	1,48	1,12	1,15
	IC	[1,67; 1,91]	[1,42; 1,54]	[1,20; 1,76]	[0,98; 1,26]	[1,02; 1,28]
	Tempo de ciclo médio (min)					
7,02						
Coleta 5	Rota	Motorista		Caminhão		
	2	1		CB 05		
		Carregamento	Transporte carregado	Manobra e basculamento	Transporte vazio	Manobra para carregamento
	Média (min)	1,98	1,73	1,79	1,27	0,53
	IC	[1,85; 2,11]	[1,71; 1,75]	[1,32; 2,26]	[1,24; 1,30]	[0,49; 0,57]
	Tempo de ciclo médio (min)					
7,29						
Coleta 6	Rota	Motorista		Caminhão		
	2	2		CB 02		
		Carregamento	Transporte carregado	Manobra e basculamento	Transporte vazio	Manobra para carregamento
	Média (min)	1,96	1,45	1,45	1,26	0,55
	IC	[1,74; 2,18]	[1,41; 1,49]	[1,15; 1,75]	[1,19; 1,33]	[0,44; 0,66]
	Tempo de ciclo médio (min)					
6,67						
Coleta 7	Rota	Motorista		Caminhão		
	1	2		CB 01		
		Carregamento	Transporte carregado	Manobra e basculamento	Transporte vazio	Manobra para carregamento
	Média (min)	2,34	2,13	0,90	1,36	0,54
	IC	[1,89; 2,79]	[2,00; 2,26]	[0,76; 1,04]	[1,19; 1,53]	[0,47; 0,61]
	Tempo de ciclo médio (min)					
7,28						