

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Douglas Emerich Gonçalves Oliveira

**Planejamento de lavra com foco no sequenciamento operacional de um sistema de lavra
por correias em uma mina a céu aberto**

Orientador: Prof. Dr. Alizeibek Saleimen Nader

BELO HORIZONTE

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Douglas Emerich Gonçalves Oliveira

**“PLANEJAMENTO DE LAVRA COM FOCO NO SEQUENCIAMENTO
OPERACIONAL DE UM SISTEMA DE LAVRA POR CORREIAS EM UMA MINA A
CÉU ABERTO”**

Dissertação de Mestrado Profissional
apresentada ao Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas
da Universidade Federal de Minas Gerais como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Mestre em engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. Alizeibek Saleimen Nader

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2023

O48p Oliveira, Douglas Emerich Gonçalves.
Planejamento de lavra com foco no sequenciamento operacional de um sistema de lavra por correias em uma mina a céu aberto [recurso eletrônico] / Douglas Emerich Gonçalves Oliveira. – 2023.
1 recurso online (67 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Alizebeck Saleimen Nader.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 63-67.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Mina a céu aberto - Teses. 4. Lavra de minas - Teses. 5. Caminhões - Teses. 6. Transporte de materiais - Teses. I. Nader, Alizebeck Saleimen. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Roseli Alves de Oliveira CRB/6 2121
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

UF **m** G

PLANEJAMENTO DE LAVRA COM FOCO NO SEQUENCIAMENTO OPERACIONAL DE UM SISTEMA DE LAVRA POR CORREIAS EM UMA MINA A CÉU ABERTO

DOUGLAS EMERICH GONÇALVES OLIVEIRA

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 23 de junho de 2023 pela seguinte banca:

Prof. Dr. Alizeibek Saleimen Nader (UFMG)
Orientador

Documento assinado digitalmente

gov.br

ROBERTO GALERY
Data: 30/06/2023 08:14:59-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Roberto Galery (UFMG)

Documento assinado digitalmente

gov.br

RENAN COLLANTES CANDIA
Data: 29/06/2023 15:00:38-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Renan Candia (UFMG)

Aos meus pais, alicerces maiores da vida. À minha esposa Laila e meu filho Lucas. Aos meus familiares e amigos, além de todos com os quais pude aprender até o momento na minha carreira profissional.

"O futuro pertence àqueles que acreditam na
beleza de seus sonhos."

(Eleanor Roosevelt)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade da vida, estar presente nesse mundo e poder viver tantas coisas especiais. À minha família e amigos, pelo apoio e entendimento nos momentos nos quais precisei dedicar tempo e atenção a este trabalho.

Agradeço aos meus companheiros de Samarco, em especial ao Guilherme Zavaglia pelo apoio e incentivo ao estudo, evolução profissional e especialmente a esse trabalho de mestrado. Ao Eduardo Baeta por compartilhar seu conhecimento sobre o planejamento de lavra de longo prazo e à lavra por correias, sem o qual esse trabalho não teria sido desenvolvido com sucesso. A todos os outros companheiros da Gerência de Planejamento Integrado.

Gostaria de deixar um agradecimento especial a todos aqueles com quem trabalhei durante toda a minha trajetória profissional e que contribuíram das mais diversas formas para moldar o profissional e a pessoa que sou hoje.

Agradeço também aos meus professores, em especial ao meu orientador, Beck Nader pelos conselhos e ajuda em diversos momentos durante o mestrado.

RESUMO

O transporte de materiais utilizando caminhões fora-de-estrada em minas a céu aberto é largamente difundido no mundo, já que apresenta vantagens como ganho de escala pela alta capacidade e flexibilidade operacional. No entanto, algumas minas a céu aberto adotam sistemas de transportadores de correias durante a fase de lavra para o transporte de materiais entre as frentes de lavra e as plantas de processamento. Esse modal conhecido como lavra por correias foi utilizado no Brasil com pioneirismo pela Samarco nas minas do Complexo de Alegria, em Minas Gerais. A lavra por correias traz vantagens em relação à utilização de caminhões, dentre elas destacam-se menores custos operacionais e benefícios ambientais relacionados à descarbonização das operações, que são temas muito discutidos atualmente. Para que a lavra por correia seja viabilizada e maximizada nas operações é necessário que exista um detalhamento do planejamento de longo prazo com foco na lavra por correias, considerando o desenho do desenvolvimento e a evolução dos leitos de correias ao longo dos anos de forma a tornar viável sua execução. Com objetivo de maximizar a lavra por correias na Samarco, desenvolveu-se um plano de lavra de médio com um alto nível de detalhamento dos transportadores de correias e sua evolução durante os anos e calculou-se a partir dele a massa a ser lavrada por correias no período sequenciado, avaliando também a capacidade instalada dos sistemas. Os resultados mostraram que a maximização da lavra por correias no médio e longo prazo viabiliza a lavra de 45,9 milhões de toneladas pelo modal entre 2023 e 2027, atingindo participação de até 60% do ROM em alguns períodos. Os resultados, portanto, confirmam a importância de um planejamento de lavra focado em viabilizar seu aproveitamento e maximização.

Palavras-chave: mina a céu aberto, planejamento de lavra, caminhões fora-de-estrada, lavra por correias, transporte em minas.

ABSTRACT

The transportation of materials using off-highway trucks in open pit mines is widespread in the world, as it has advantages such as cost reduction through economies of scale and high operational flexibility. However, some open pit mines adopt belt conveyor systems during the mining phase to transport materials between the mining fronts and the processing plants. This modality, known as belt mining, was pioneered in Brazil by Samarco at the Alegria Complex mines in Minas Gerais. Conveyor belt mining has advantages over the use of trucks, among which are lower operating costs and environmental benefits related to the decarbonization of the operations, which are issues that are much discussed today. For the conveyor belt mining to be feasible and maximized in the operations it is necessary to have a detailed long-term planning focused on it, considering the development design and evolution of the conveyor belt beds over the years to make its execution feasible. With the objective of maximizing conveyor belt mining at Samarco, a medium-term mining plan was developed with a great level of detailing of the belt conveyors and their evolution over the years and based on this, the mass to be mined by belts was calculated for the scheduling taking in consideration the installed capacity of the systems. The results show that the maximization of belt mining in the medium and long term allows the mining of 45.9 million tons by this method between 2023 and 2027, reaching a share of up to 60% of the ROM in some periods. The results, therefore, confirm the importance of a mining planning focused on enabling its utilization and maximization.

Keywords: open pit mine, mine planning, off-highway trucks, conveyor belt mining, haulage in mines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Cadeia de valor mineral (Fonte: ADAPTADO DE NADER, 2013).	18
Figura 3.2 – Etapas do planejamento de lavra (Fonte: FONTOURA, 2017).	20
Figura 3.3 – Lavra a céu aberto por bancadas na Mina Bingham Canyon, nos Estados Unidos (Fonte: ISEEKPLANT.COM.AU, 2022).	26
Figura 3.4 – Lavra em meia encosta e cava (céu aberto) com etapa em fase subterrânea para aproveitamento da porção mais profunda do corpo mineral (FERREIRA, 2013).	26
Figura 3.5 – Aspectos relacionados ao dimensionamento e seleção de equipamentos de lavra em uma mina a céu aberto. (Fonte: ADAPTADO DE BOZORGEBRAHIMI et al., 2005).	29
Figura 3.6 – Caminhão fora de estrada CAT 793 realiza transporte de material em uma mina a céu aberto (Fonte: WWW.CAT.COM, 2023).	31
Figura 3.7 – Ciclo de operação de um caminhão fora de estrada em uma mina a céu aberto (Fonte: RESEARCHGATE.NET, 2022).	32
Figura 3.8 – Sistema de correias de bancada instaladas na mina da Samarco (Fonte: LOPES, 2010).	34
Figura 3.9 – Distribuição dos custos de mina, com destaque para elevada composição das etapas de carregamento e transporte (Fonte: MOHUTSIWA E MUSINGWINI, 2015).	35
Figura 3.10 – Sistema de lavra por correias de bancada em mina a céu aberto na Samarco Mineração (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	37
Figura 4.1 – Projeção de lavra em encosta e cava durante a evolução operacional da área de Alegria Centro, Mina de Alegria Norte, Samarco (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR). 40	
Figura 4.2 – Representação gráfica do conceito da lavra por correias de bancada na Samarco (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	41
Figura 4.3 – Lavra por correias na Samarco na Cava do Germano, no ano de 1989 (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	42
Figura 4.4 – Operação por meio da lavra por correias na Mina de Alegria Norte da Samarco em 2004 (Fonte: GOOGLE EARTH, 2023).	43
Figura 4.5 – Metodologia aplicada para o planejamento da lavra por correias (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	44
Figura 4.6 – Cava matemática da mina de Alegria Norte de 2027 (a) e versão operacionalizada pelo pit design com o desenho dos leitos das correias (b) (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR)	46

Figura 4.7 – <i>Pit design</i> das cavas de 2024 (a) e 2027 (b) retiradas do plano de longo prazo com o detalhamento dos desenhos dos leitos conceituais da mina de Alegria Sul (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	48
Figura 4.8 – Perfil esquemático de um transportador de correias de bancada para operação de lavra na Samarco (CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	50
Figura 4.9 – Planejamento de leitos de transportadores de correias no desenho de cava operacional para lavra na mina de Alegria Sul no 4º trimestre de 2024 (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	51
Figura 4.10 – Processo de delimitação dos sólidos lavrados com correia através da análise do modelo de blocos e do desenho dos leitos de correias de bancada (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	52
Figura 5.1 – Massa calculada através da metodologia para lavra por correia ao longo do plano de médio prazo (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	54
Figura 5.2 – Percentual do ROM de cada mina lavrado por correias ao longo dos semestres do plano de lavra (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Divisão das minas e regiões de lavra do Complexo Alegria da Samarco (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	39
Tabela 4.2 – Horizonte de períodos do sequenciamento de médio prazo (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	49
Tabela 4.3 – Parâmetros geométricos adotados no planejamento e desenho dos leitos e transportadores de correias na Samarco (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).....	50
Tabela 5.1 – Capacidades requeridas e instaladas nos sistemas de correias de Alegria Sul (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).	55
Tabela 5.2 – Capacidades requeridas e instaladas nos sistemas de correias de Alegria Norte (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).....	56

LISTA DE NOTAÇÕES

ANM – Agência Nacional de Mineração

CAPEX – Custo de Capital

CO₂ – Gás Carbônico

DMT – Distância média de transporte

IPCC – *In-pit Crushing and Conveying*

KPI – *Key Performance Indicator* ou Indicador Chave de Desempenho

kWh – Kilowatt hora

l - Litros

m – Metros

Mt – Milhões de Toneladas

Mtpa – Milhões de toneladas por ano

OPEX – Custo operacional

REM – Relação Estéril Minério

ROM – *Run of Mine*

t – Toneladas

TIR – Taxa Interna de Retorno

VPL – Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA.....	16
2	OBJETIVOS.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	CADEIA DE VALOR MINERAL.....	17
3.2	INDICADORES CHAVE DE DESEMPENHO.....	19
3.3	PLANEJAMENTO DE MINA.....	20
3.4	PROJETOS DE MINERAÇÃO	23
3.5	PRINCIPAIS MÉTODOS DE LAVRA A CÉU ABERTO	24
3.6	SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MINA	28
3.7	TRANSPORTE DE MATERIAIS	30
3.7.1	Transporte por caminhões.....	30
3.7.2	Correias transportadoras	33
3.7.3	Diferenças entre os modais.....	35
4	METODOLOGIA.....	39
4.1	ASPECTOS TÉCNICOS DA LAVRA NA SAMARCO	39
4.2	DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA.....	43
4.3	METODOLOGIA.....	45
4.3.1	Seleção das áreas de lavra por correias.....	45
4.3.2	Detalhamento do plano de médio prazo	48
4.3.3	Delimitação dos sólidos da lavra por correias	51
4.3.4	Avaliação da produção dos transportadores	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	MASSA LAVRADA PELO SISTEMA DE CORREIAS.....	54
5.2	PERCENTUAL DE MINÉRIO LAVRADO POR CORREIAS.....	56
5.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
6	CONCLUSÕES.....	60
6.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	62

REFERÊNCIAS63

1 INTRODUÇÃO

A utilização de caminhões ou correias de bancada para transporte de materiais em uma mina é um tema de bastante relevância na mineração atualmente e por isso vem sendo cada vez mais discutido. Enquanto transportadores de correias têm sido usados em grande escala para transportes de ROM ou outros materiais em longas distâncias, os caminhões de fora de estrada têm sido utilizados para realizar as movimentações de minas de grande porte, usualmente minas com quantidades anuais de produto beneficiado maior que 1.000.000 t (ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO, 2021). Apesar do uso de transportadores de correia serem bastante difundidos na mineração nas instalações de beneficiamento de minério, considerando desde a britagem até o modal de transporte logístico e portos, poucas minas no Brasil e no restante do mundo utilizam correias de bancada para o transporte de materiais na operação de mina para a lavra do minério ou estéril. No Brasil, as minas do Complexo Alegria operadas pela Samarco e o complexo S11D da Vale são exemplos de minas de grande porte a céu aberto que utilizam sistemas de correias de bancada ou semimóveis na fase de operação de lavra de minério de ferro.

Com a crescente preocupação das empresas com o controle de custos e busca por maior produtividade e eficiência operacional, além de fatores relacionados ao meio ambiente como reduções de emissões atmosféricas e segurança, muitas empresas passaram a adotar sistemas de transporte por correias, comumente considerados mais baratos para se operar, embora com maior investimento inicial. Os custos de carregamento e transporte são tidos como os mais altos na lavra, podendo chegar a representar até 60% do custo total da atividade (LAGES, 2018).

Com a grande importância que o processo decisório de definição entre lavra por correias ou caminhões tem sobre um projeto de mineração, é possível perceber ao pesquisar na literatura que esse é relativamente bem coberto mundialmente, porém a participação de transportadores de correias como modal de lavra é baixa em minas a céu aberto, comparado com o de caminhões fora de estrada e, um trabalho que mostre o planejamento focado no desenvolvimento das correias apresenta um valor adicional à literatura acadêmica do tema.

O presente trabalho utiliza um estudo de caso desenvolvido em uma mina a céu aberto de grande porte do quadrilátero ferrífero, da Samarco Mineração, que visou maximizar a quantidade de minério lavrado e transportado pelo sistema de correias de bancadas de mina, detalhando o sequenciamento da lavra focando na progressão e no desenvolvimento dos leitos de correias em um período de 5 anos, mostrando o processo na visão do planejamento de lavra. A mina apresentada no estudo de caso também possui caminhões para transporte de material na lavra, fator que possibilitou também a comparação de alguns aspectos entre os dois modais de

transporte, principalmente relacionados ao desenho de mina e ao sequenciamento de lavra. Os resultados e as conclusões são apresentados ao final do trabalho.

1.1 Relevância do tema

O tema está relacionado a operação de mina em geral, mais especificamente ao carregamento e transporte em minas a céu aberto e a sustentabilidade na mineração, principalmente sobre processos de descarbonização. Esses aspectos são extremamente discutidos atualmente na mineração considerando aspectos econômicos e ambientais.

Do ponto de vista econômico, as operações de mineração devem ser as mais eficientes possíveis para se manterem lucrativas em um ambiente de alta volatilidade de preços de commodities e em um cenário de elevada competitividade mundial. Já do ponto de vista ambiental, cada vez mais as empresas buscam soluções para reduzir suas emissões de carbono, e a lavra por correias se coloca como uma alternativa de eletrificação das operações, uma vez que não utiliza combustíveis fósseis no processo.

Nesse contexto, este trabalho é relevante pois mostra o processo de planejamento de lavra de uma mina lavrada com correias e caminhões, focando no processo de viabilização e busca da maximização da massa lavrada por esse modal em um cenário de sequenciamento de lavra e mostrando os aspectos técnicos e estratégicos envolvidos nesse processo.

O trabalho de maximização da lavra por correias leva à redução dos custos operacionais e à redução das emissões de gases de efeito estufa da empresa, além de apresentar à indústria da mineração uma alternativa de eletrificação do processo de transporte que pode ser considerado por outras empresas nos seus processos decisórios de escolha do modal de lavra.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar os aspectos técnicos compreendidos no processo de planejamento de lavra de uma mina onde utiliza-se correias transportadoras e caminhões fora-de-estrada para o transporte de material, através da apresentação de um estudo de caso realizado em uma mina a céu aberto de minério de ferro de grande porte, da Samarco Mineração. O trabalho discute aspectos importantes desses modais de transporte: sequenciamento e desenho de mina, características dos sistemas de correia, limitações físicas, aspectos econômicos, entre outros.

O planejamento de lavra apresentado nesse trabalho objetivou maximizar a massa lavrada por correias durante os anos de 2023 a 2027 nessa mina, através do desenvolvimento dos desenhos dos leitos dos transportadores de correias de bancada de acordo com sequenciamento de lavra do plano e do desenvolvimento de uma metodologia para determinação dessa massa. Além disso, buscou-se identificar áreas de potencial uso da lavra por correias após o ano de 2027, a serem detalhados no futuro.

Espera-se também poder contribuir com processos decisórios entre lavra por correias ou caminhões em futuros projetos de mineração onde os dois modais de lavra possam ser aplicados, de maneira exclusiva ou de forma híbrida com caminhões e correias, trazendo pontos relevantes referentes a vantagens e desvantagens comparativas entre eles e as condições ideais de planejamento de lavra para sua aplicação.

Por fim, espera-se com este trabalho contribuir com a divulgação do conhecimento em planejamento de mina com um sistema de lavra por correias para que outras minas também possam aplicar conceitos semelhantes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cadeia de valor mineral

A indústria mineral compreende atividades complexas de extração, beneficiamento e comercialização de minerais encontrados no seu estado natural, transformando-os em matéria prima para diversas indústrias de transformação. Por apresentar diversas particularidades em relação à outras indústrias, a cadeia de valor mineral é constantemente estudada por diversos autores como Nader (2013), com foco na proposição de integração e geração de valor entre os processos da indústria mineral. A mineração, como qualquer outra atividade econômica, gera valor para as partes interessadas e envolvidas no negócio, tais como investidores, trabalhadores, empresas de suporte, governos, sociedade, entre outros.

Nader (2013) discute a cadeia de valor na mineração, apresentando as características que a distinguem da cadeia de valor de uma empresa genérica. Segundo o autor, a cadeia de valor de uma empresa define-se como sua rede de atividades independentes, conectadas por ligações operacionais, que existem, quando a forma de execução de uma atividade influencia nos custos e na efetividade de outras, na cadeia de valor. Essa definição resulta na divisão das atividades de uma empresa em dois grupos:

- Atividades primárias: envolvidas na produção ou na criação de produtos, incluindo marketing, vendas e distribuição final para os consumidores;

- Atividades de suporte: são aquelas que fornecem o insumo e a infraestrutura necessárias para realização das atividades primárias.

De acordo com Nader (2013) a principal diferença entre a cadeia de valor genérica e a cadeia de valor mineral é que a única matéria prima da mineração é representada pelo minério, ou seja, não existe um fornecedor externo neste processo. Azevedo (2007) também cita essa natureza característica da cadeia de valor mineral como algo que limita enormemente a flexibilidade da escolha do “fornecedor” e do “local” a ser explorado. Segundo Azevedo (2007) a cadeia de valor mineral pode ser definida da seguinte forma:

- A sequência de atividades de exploração e produção – pesquisa, extração, transporte, estocagem, transformação, venda e logística de entrega. Aplicam-se os sistemas de rastreamento de informações.

- Contribuição intelectual deste processo – são as tomadas de decisão a respeito das diversas etapas sequenciais de produção. Aplicam-se os sistemas informatizados de planejamento.

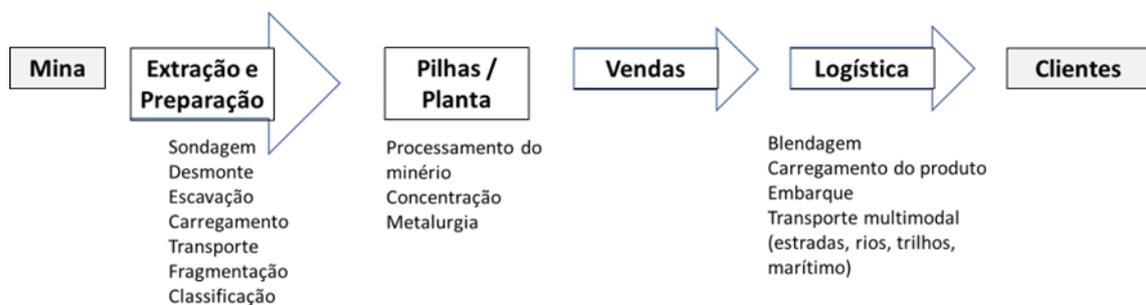


Figura 3.1 – Cadeia de valor mineral (Fonte: ADAPTADO DE NADER, 2013).

Um grande desafio dentro de um empreendimento mineiro é a integração dos processos dentro da cadeia de valor mineral, e de forma geral a literatura foca em recursos gerenciais aliados a sistemas de alta tecnologia, que podem ser utilizados para o controle dos processos em diversos cenários. Nader (2013), no entanto, acredita que essas abordagens omitem o tema dos indicadores chaves de desempenho, ou KPIs, fundamentais para a resolução desse problema. Para o autor a integração da cadeia de valor mineral permitirá a identificação imediata de todos os processos da cadeia produtiva mineral. Um exemplo disso é aplicado ao KPI de planejamento de lavra conhecido na indústria como reconciliação de lavra, onde o uso de novas tecnologias nos processos de lavra permite a consulta em tempo real de frentes de

lavra lavradas e seus teores, associados a lotes específicos de minérios, onde a comparação dos resultados efetivamente medidos com os previstos poderá ser realizada em tempo real obtendo resultados em níveis elevados.

3.2 Indicadores chave de desempenho

De acordo com Nader (2013), existem seis processos principais dos quais derivam os outros sub processos da cadeia de valor mineral. Esses processos são associados as atividades de pesquisa mineral, planejamento da produção, execução da lavra, eficiência da produção, desenvolvimento e melhorias de produção e melhorias e otimização dos processos desenvolvidos. Nesse contexto, alguns indicadores desempenham papel fundamental no gerenciamento e controle de eficiência dos processos e sub processos relacionados com cada etapa da cadeia de valor mineral. Os chamados KPIs (Key Performance Indicator) ou Indicadores Chave de Desempenho são variáveis que tem por objetivo permitir a medição de desempenho ao longo do tempo, possibilitando a análise comparativa de melhorias na eficiência e eficácia dos processos (NADER, 2013).

As etapas da cadeia de valor mineral mostradas neste estudo de caso possuem extrema importância dentro do processo produtivo da empresa, e como consequência são de fundamental importância para este trabalho. De acordo com Costa (2015) existem muitos KPIs disponíveis para análise e a decisão do que se medir deve ser guiada pelos objetivos da empresa. Este trabalho está relacionado à análise de indicadores chave de desempenho tanto da frota de transporte com caminhões quanto da lavra por correias. Dentre esses KPIs relacionados, é possível citar alguns KPIs como sendo chaves para a avaliação da eficiência da operação de lavra por caminhões e por correias. Esses indicadores são mostrados abaixo:

- Geologia de mina: Fator de reconciliação geológica dos modelos de curto e longo prazo, ganho real de reserva provada, ganho real de reserva provável.

- Planejamento de lavra: Inclinação máxima de rampas, fator de reconciliação de lavra, fator de diluição, índice de aderência ao planejamento, relação estéril/minério.

- Lavra por correias: Índice de utilização, disponibilidade física dos sistemas de correias, custo por tonelada produzida, custo de manutenção, custo da energia, custo de operação, custo de manutenção, taxa interna de retorno, consumo específico de energia, índice de consumo interno de energia, redução na emissão de gases de efeito estufa.

- Beneficiamento: Recuperação mássica, recuperação metalúrgica, garantia da qualidade dos produtos, eficiência geral dos equipamentos de britagem, índice de consumo interno de energia, custo de manutenção.
- Desempenho econômico: Valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR).

3.3 Planejamento de mina

O planejamento de mina compreende um conjunto de etapas de atividades que objetivam maximizar o retorno financeiro sobre um empreendimento mineiro. Fontoura (2017) define o planejamento de lavra como uma importante ferramenta de gerenciamento que visa o melhor aproveitamento dos recursos minerais. O processo contempla diversas etapas, sendo as principais citadas a definição dos limites econômicos da cava, a seleção dos materiais que podem ser lavrados gerando um benefício econômico, o sequenciamento de mina e planejamento da produção, dimensionamento dos equipamentos de lavra, a compreensão de todos os aspectos possíveis para viabilizar o empreendimento mineiro sejam eles econômicos, legais, ambientais, sociais, de projeto, geológicos, geotécnicos, entre outros. O planejamento de lavra também é uma área de suporte e orientação ao processo de operação de mina, para que essa área execute o plano da melhor forma possível.



Figura 3.2 – Etapas do planejamento de lavra (Fonte: FONTOURA, 2017).

Na indústria mineral é de comum prática tratar o planejamento de lavra de acordo com os horizontes de tempo analisados, sendo cada horizonte com uma técnica, objetivo e resultados diferentes. Mandarino (2018) cita que o planejamento de lavra é compreendido em três

diferentes níveis de estruturação de acordo com os objetivos e com os prazos envolvidos, sendo de longo, médio e curto prazo. Segundo o autor o planejamento de longo prazo é responsável pelos estudos de cava final, disposição de estéril, desenvolvimento de produtos e acessos, além de inserir o processo de geologia de longo prazo.

Fontoura (2017) também apresenta as definições de todos os horizontes de sequenciamento padrões na indústria mineral. Segundo o autor, é no curto prazo que as considerações operacionais são observadas com maior detalhe, considerando períodos em níveis mensais, semanais e até diários com alocação da frota para as frentes de lavra necessárias durante determinados períodos. Do planejamento de curto prazo obtêm-se as atividades necessárias na mina para realizar a produção prevista a médio e longo prazo. Blom et al. (2018) afirmam que na literatura acadêmica, os tópicos do planejamento de lavra de curto prazo de minas a céu aberto não foram tão abordados quanto os de médio ou longo prazos. Ainda segundo Blom et al. (2018), o termo planejamento de curto prazo pode ser usado para uma variedade de atividades. Os períodos de turno a turno ou dia a dia envolvem decisões como o número de carregamentos realizados em uma frente de lavra ou para qual britador o material será enviado, objetivando alcançar a massa e qualidade diária. Já no horizonte mensal, o planejador define os blocos que serão lavrados em horizontes semanais e suas destinações para atender às massas e qualidades.

O sequenciamento de médio prazo, segundo Fontoura (2017) constitui o horizonte máximo de cinco anos, onde ocorre detalhamento de orientações já consideradas no plano de longo prazo. Este plano é um bom guia para orçamentos já que a partir dele é possível calcular os insumos necessários para a produção além dos investimentos necessários de serem realizados nos próximos anos e o desdobramento operacional da mina. O plano de médio prazo possui extrema importância para fazer a conexão entre os planos estratégicos de longo prazo, que ditam o direcionamento macro da mina, com os planos de curto prazo, mais focados no detalhamento operacional, já que ao desdobrar um plano, digamos do horizonte de 25 anos, para um plano de orçamento anual diretamente, a estratégia de longo prazo poderia ser afetada sem conhecimento dos impactos.

O sequenciamento de longo prazo da vida útil da mina, também chamado de *Life of Mine*, abrange toda vida útil da reserva. Seu objetivo maior é avaliar o comportamento do empreendimento ao longo da sua vida útil, podendo ser observadas necessidades de investimentos de acordo com a estratégia prevista, capacidade de produção no longo prazo, alocação de barragens ou estruturas de disposição de estéril, variação de custos, frota requerida e reposições necessárias (FONTOURA, 2017).

No contexto de longo prazo, algumas definições podem ser acrescidas de modo a abranger uma maior amplitude ao processo de planejamento de longo prazo. Este processo é de extrema importância dentro do contexto de projetos minerários, uma vez que está ligado ao retorno financeiro e à estratégia maior da atividade mineira. A cava final e a delimitação de fases de sequenciamento de mina e produção a longo prazo estabelecem a massa da reserva, minério e estéril, a escala e o programa de produção, tamanho e localização das estruturas como pilhas de estéril, estoques de minério, entre outros (CHATTERJEE, 2015). Estes são aspectos dos quais dependem todas as fases subsequentes de um projeto mineiro, bem como valores a serem investidos e fluxo de caixa e indicadores financeiros do projeto como VPL, TIR, *Payback*. A definição desses termos econômicos é apresentada abaixo:

- O Valor Presente Líquido (VPL) é uma técnica utilizada na análise de investimentos para determinar a viabilidade financeira de um projeto. Ele consiste em calcular a diferença entre o valor presente dos fluxos de caixa futuros esperados e o investimento inicial, descontando-os a uma taxa de desconto adequada. Segundo Brealey e Myers (2008), o VPL é uma medida de valor que permite aos investidores avaliar se um projeto trará retorno financeiro positivo, considerando o valor do dinheiro ao longo do tempo. Essa métrica é amplamente utilizada no campo das finanças para auxiliar na tomada de decisões de investimento.

- A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma métrica utilizada na análise de investimentos para medir a rentabilidade de um projeto. Ela representa a taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos de caixa futuros esperados ao investimento inicial. Segundo o autor Ross et al. (2016), a TIR é um indicador que auxilia na tomada de decisões de investimento, pois indica a taxa de retorno necessária para que o projeto seja considerado viável financeiramente.

- O *Payback* é uma medida de análise de investimentos que calcula o tempo necessário para recuperar o investimento inicial realizado em um projeto. Ele representa o período em que os fluxos de caixa acumulados se igualam ao investimento inicial. De acordo com o autor Gitman (2010), o *Payback* é uma métrica utilizada para avaliar a liquidez de um projeto, sendo um indicador de rapidez na recuperação do capital investido.

Os projetos de mineração têm como característica serem projetos de longa duração, e durante sua vida útil podem ocorrer o surgimento de novas tecnologias bem como a evolução dos estudos geológicos e de conhecimento do depósito, variações de mercado, demanda, entre outros. Nesse sentido, a vida útil real do empreendimento pode ser bem diferente daquela prevista inicialmente na fase de projeto.

A definição de cava final de um empreendimento mineiro é atualmente realizada utilizando-se um algoritmo para o processo de otimização da cava final. Esse processo ganhou

importância dentro da indústria mineral depois que Lerchs e Grossmann apresentaram em 1965 um algoritmo capaz de projetar o contorno final da escavação a céu aberto maximizando a diferença entre o valor total do minério lavrado e os custos totais dessa extração (CARMO ET AL., 2006). O algoritmo criado por Lerchs e Grossmann revolucionou a indústria mineral e permitiu, junto à evolução do processamento dos computadores a criação de softwares cada vez mais sofisticados. Na abordagem clássica do planejamento de lavra, o algoritmo de Lerchs e Grossmann é utilizado para a obtenção de cavas aninhadas (MARTINS ET AL., 2021), que constitui a geração de vários pits de massas, tamanhos e valores diferentes através da variação do preço de venda do produto, também conhecido como “*revenue factor*”. O planejador escolhe a cava final e os *pushbacks*, que constituem a ordem de geração dessas cavas no tempo. Somente após estes processos, é realizado o sequenciamento da lavra e gerado o plano de produção, para então ser valorado.

A qualidade do planejamento de lavra e sua efetividade para as operações mineiras podem ser medidas através da análise de alguns indicadores de desempenho comumente utilizados na mineração. Nader (2013) mapeou o processo produtivo da cadeia mineral e definiu os indicadores mais importantes do planejamento de lavra que se relacionam com a eficiência de um negócio de mineração. Estes indicadores são o índice de reconciliação geológica de curto prazo com a de longo prazo e o Índice de aderência do plano de curto prazo ao plano de longo prazo. Esses dois indicadores medem respectivamente a eficácia dos modelos de curto e longo prazos e o quanto os planos de curto prazo desviam dos planos de longo prazo. O negócio mineral tem como base econômica o modelo de blocos de longo prazo e o plano de longo prazo e esses índices de reconciliação e aderência devem ser altos para que o retorno financeiro do projeto saia como o planejado.

3.4 Projetos de mineração

De acordo com Noort e Adams (2006) apud Nader (2013) o projeto de um empreendimento mineiro é tradicionalmente dividido em 5 partes, sendo essas as seguintes:

- i. Projeto de escopo (SS – *Scoping Study*);
- ii. Projeto de pré-viabilidade (PFS – *Pre Feasibility*);
- iii. Projeto de viabilidade (DFS – *Detailed Feasibility Study*);
- iv. Elaboração e Construção (*Design and Construction*);
- v. Operação (*Operations*).

O planejamento de um projeto de mineração é um processo extremamente complexo e detalhado que deve levar em consideração diversos fatores que influenciam no custo de capital, ou CAPEX do projeto. Para Zang et al. (2020) existem muitos fatores que impactam os custos do projeto, como fatores geotécnicos, infraestrutura preexistente, localização do site, condições iniciais para implantação, evolução do cronograma do projeto, ambiente regulatório, custos de financiamento, tecnologia de processos, produtividade da força de trabalho e custos com moeda estrangeira, mas um dos pontos mais críticos é a capacidade produtiva do projeto mineral. Já segundo Díaz et al. (2021), do ponto de vista da avaliação econômica de um projeto de mineração, o fator que mais tem influência nos estudos de lucratividade de projetos de mineração, principalmente de minerais metálicos, é o preço de venda do metal ou dos produtos, devido à flutuação que pode ocorrer com os preços dos metais e sua variância percentual é muito mais alta do que a de outros parâmetros.

A estimativa de custos possui grande importância no processo decisório sobre a continuidade, a postergação ou mesmo o abandono de um projeto (MOHUTSIWA E MUSINGWINI, 2015), portanto é essencial para sua continuidade que a análise financeira seja viável. O processo de estimativa de custos normalmente é feito durante todas as fases do projeto, inclusive quando o escopo do projeto é modificado ou refinado (MOHUTSIWA E MUSINGWINI, 2015).

Nourali e Osanloo (2019) citam que uma estimativa altamente precisa dos custos de capital (CAPEX) de um projeto de mineração é crucial e tem um impacto inegável no fluxo de caixa do projeto, uma vez que o CAPEX geralmente muito grande e é gasto na fase inicial dos projetos, onde ainda não há geração de caixa. Devido aos altos investimentos iniciais, os projetos de mineração demandam gerenciamento de riscos associados, e tanto subestimar ou superestimar os valores de investimentos podem trazer danos aos empreendimentos.

3.5 Principais métodos de lavra a céu aberto

Os métodos de lavra podem ser divididos em duas grandes categorias, a saber a lavra a céu aberto ou de superfície e a lavra subterrânea. A lavra a céu aberto é aplicável aos corpos de minério localizados próximos à superfície, com a técnica de lavra subterrânea sendo aplicada quando este não é o caso (BLOM et al., 2018). Essa definição é clássica na mineração e simplifica em uma frase a análise que é considerada por Macedo et al. (2001) como um dos principais elementos em qualquer análise econômica de um projeto de mineração. Muitos projetos de mineração podem ser complexos ao ponto de utilizarem mais de um método de lavra

durante sua vida útil (MACEDO et al., 2001) sendo um método mais adequado para uma determinada parte do depósito enquanto para outras não. Em alguns casos, um depósito pode até alternar de um método de lavra de superfície para um método subterrâneo.

Segundo De Carli (2013) a lavra a céu aberto é muito mais frequentemente aplicada do que a lavra subterrânea devido ao menor custo de lavra, a maior capacidade produtiva, menor diluição de lavra, a versatilidade do método, elevado nível de mecanização, grande recuperação de lavra do método em comparação com os métodos subterrâneos que normalmente utilizam parte da mineralização para ajudar a manter a estabilidade das escavações e um por possuir um ambiente de trabalho menos agressivo. Importante ressaltar que o método de lavra a céu aberto não é bem aplicado a corpos profundos, possuindo limitação pela profundidade, além de gerar maiores áreas necessárias de serem utilizadas e recuperadas ambientalmente durante e depois do término do empreendimento mineiro, com elevados custos (DE CARLI, 2013).

Os métodos de lavra a céu aberto mais comuns são a lavra em cava e a lavra em tiras (DE CARLI, 2013). A lavra em cava ou open pit é uma das variações do método de lavra a céu aberto em bancadas, que pode ser realizado também em encosta. A lavra de bancadas em cava se dá quando é formado uma espécie de cone invertido (DE CARLI, 2013) e todo o perímetro da área operacional das bancadas está abaixo do nível de escoamento da drenagem, tornando a mina um grande reservatório (FERREIRA, 2013) conhecido como cava ou *pit*.



Figura 3.3 – Lavra a céu aberto por bancadas na Mina Bingham Canyon, nos Estados Unidos (Fonte: ISEKPLANT.COM.AU, 2022).

A lavra por bancadas em encosta ou meia encosta ou ainda em flanco, acontece normalmente nas partes mais elevadas da mina nas encostas de montanhas, onde todo o perímetro operacional está compreendido acima do nível de escoamento natural da drenagem e se faz sem acumular água (FERREIRA, 2013). Uma mina a céu aberto lavrada pelo método de bancadas pode naturalmente apresentar as duas variações do método em diferentes regiões da mina ou momentos operacionais (Figura 3.4).

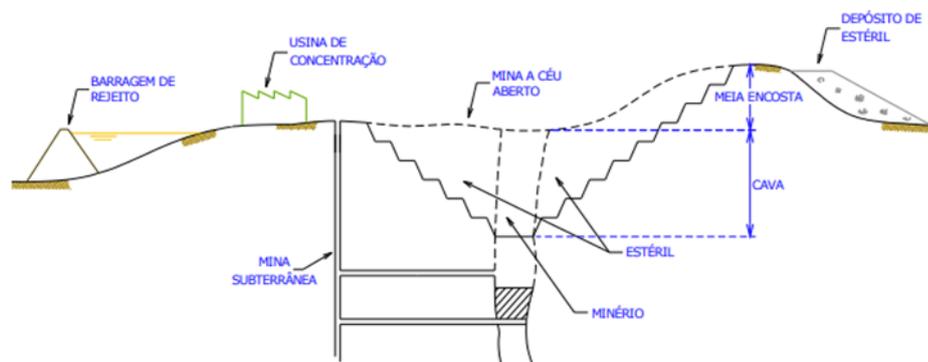


Figura 3.4 – Lavra em meia encosta e cava (céu aberto) com etapa em fase subterrânea para aproveitamento da porção mais profunda do corpo mineral (FERREIRA, 2013).

Outro importante método de lavra a céu aberto na indústria de mineração mundial é o método de lavra em tiras, também conhecido como Lavra em Tiras (*Strip Mining*). Esse método é aplicado a corpos minerais de formas tabulares horizontais ou sub-horizontais, próximos ao nível da superfície, de forma que a remoção do estéril expõe o minério (DE CARLI, 2013). Uma característica do método que o difere da lavra convencional por bancadas em encosta ou cava é que o estéril normalmente é disposto diretamente nas áreas onde o minério já foi lavrado (FERREIRA, 2013), diminuindo assim a necessidade de pilhas de estéril. O desenvolvimento da lavra acontece em tiras paralelas e adjacentes, onde o estéril lavrado é disposto em uma tira lavrada anteriormente por um equipamento, enquanto o minério liberado nessa nova tira é extraído por outros equipamentos, o que acarreta maiores investimentos em maquinário (DE CARLI, 2013).

Alguns métodos de lavra subterrânea apresentam em comum a necessidade de suporte estrutural para o maciço, seja ele artificial ou as próprias paredes de rocha. De Carli (2013) subdivide os métodos de lavra subterrânea em três tipos: os que precisam de suporte artificial, os que não utilizam suporte artificial, mas utilizam parte da rocha para essa função e os métodos de abatimento. No caso da lavra a céu aberto por bancadas a função de estabilização das escavações é exercida pelas bancadas, através dos parâmetros geomecânicos específicos adotados para os taludes de mina (DAMASCENO, 2008).

Segundo Damasceno (2008), as condições geomecânicas específicas de uma mina dependem das seguintes limitações:

- Presença de vias de transporte, ou rampas de acesso, necessárias para o transporte de material para fora da cava;
- Porte dos equipamentos de lavra;
- Utilização de explosivos;
- Tipo de rocha do minério e encaixantes;
- Restrições econômicas da relação estéril/minério (REM), onde quando maior a inclinação do talude, menor a massa de estéril.

Damasceno (2008) afirma que conforme uma mina a céu aberto lavrada pelo método de bancadas com formação de encostas ou cava vai se desenvolvendo desde os níveis superficiais, ocorre a formação de taludes de bancadas e globais, que necessitam ser inclinados de alguns graus para prevenir rupturas do maciço rochoso. A estabilidade desses taludes é fundamental para a lavra em bancada, e para cada projeto de mineração são definidos os parâmetros construtivos utilizados para o desenho da mina. Segundo Damasceno (2008), deve-se atentar para a geometria das bancadas de escavação e dos taludes inter-rampas para os projetos de

desenho de uma mina já que esses parâmetros influenciam na estabilidade do talude global e na estabilidade das rampas de acesso.

3.6 Seleção de equipamentos de lavra

O problema da seleção de equipamentos para mineração a céu aberto passa por definir os equipamentos que farão a extração e o transporte do material lavrado, incluindo minério e estéril, por toda vida útil do empreendimento (BURT E CACCETTA, 2014). Para Patyk et al. (2021) uma análise compreensiva do problema de tomada de decisão na avaliação e seleção de equipamentos de lavra compreende um conjunto de critérios consistentes que cobrem aspectos de engenharia, econômicos, ambientais e operacionais, além de aspectos relativos à confiabilidade.

Dentre os muitos fatores relacionados à capacidade produtiva de um projeto de mineração as fases de seleção e dimensionamento da frota de mina exercem um papel chave para se desenhar um cronograma e horizonte de produção com objetivo de atingir maior lucratividade (NOURALI E OSANLOO, 2019). Burt e Caccetta (2014) explicam detalhadamente como ocorre o processo de seleção de equipamentos de lavra, mostrando o passo a passo deste importante processo. De acordo com os autores, o processo de seleção de equipamentos de lavra necessita de um input de um plano de lavra de longo prazo que inclua os requisitos de produção e todos os pontos de carregamento e basculamento; um conjunto de tipos de equipamentos de carga e transporte que podem ser comprados para determinado projeto; as produtividades e índices dos equipamentos selecionados observando-se cenários de diferentes combinações de equipamentos; informações de custos, incluindo depreciação e juros, valores de aquisição, manutenção e custos de operação.

Vários fatores podem influenciar a escolha de determinados equipamentos para um projeto de mineração em detrimento de outros. Burt e Caccetta (2014) citam métodos que utilizam inteligência artificial para ajudar na tomada de decisão de quais equipamentos comprar para grandes projetos. Esses métodos citados pelos autores levam em conta as condições do site, a geologia do depósito, meio ambiente e a combinação de equipamentos. Segundo Bozorgebrahimi et al. (2005), para ser tomada uma decisão apropriada sobre a seleção dos equipamentos de lavra, as características do depósito e o cenário operacional devem ser consideradas em paralelo, já que as características do depósito são parâmetros inerentes ao desenho de mina e não podem ser alterados. Como exemplo são citados: teor do minério, massa do depósito, geometria do depósito e topografia do site são características inalteráveis da jazida.

Em contrapartida, o cenário operacional apresenta características que podem ser alteradas como plano de produção, o cronograma de produção e a geometria da mina (BOZORGEBRAHIMI et al., 2005).

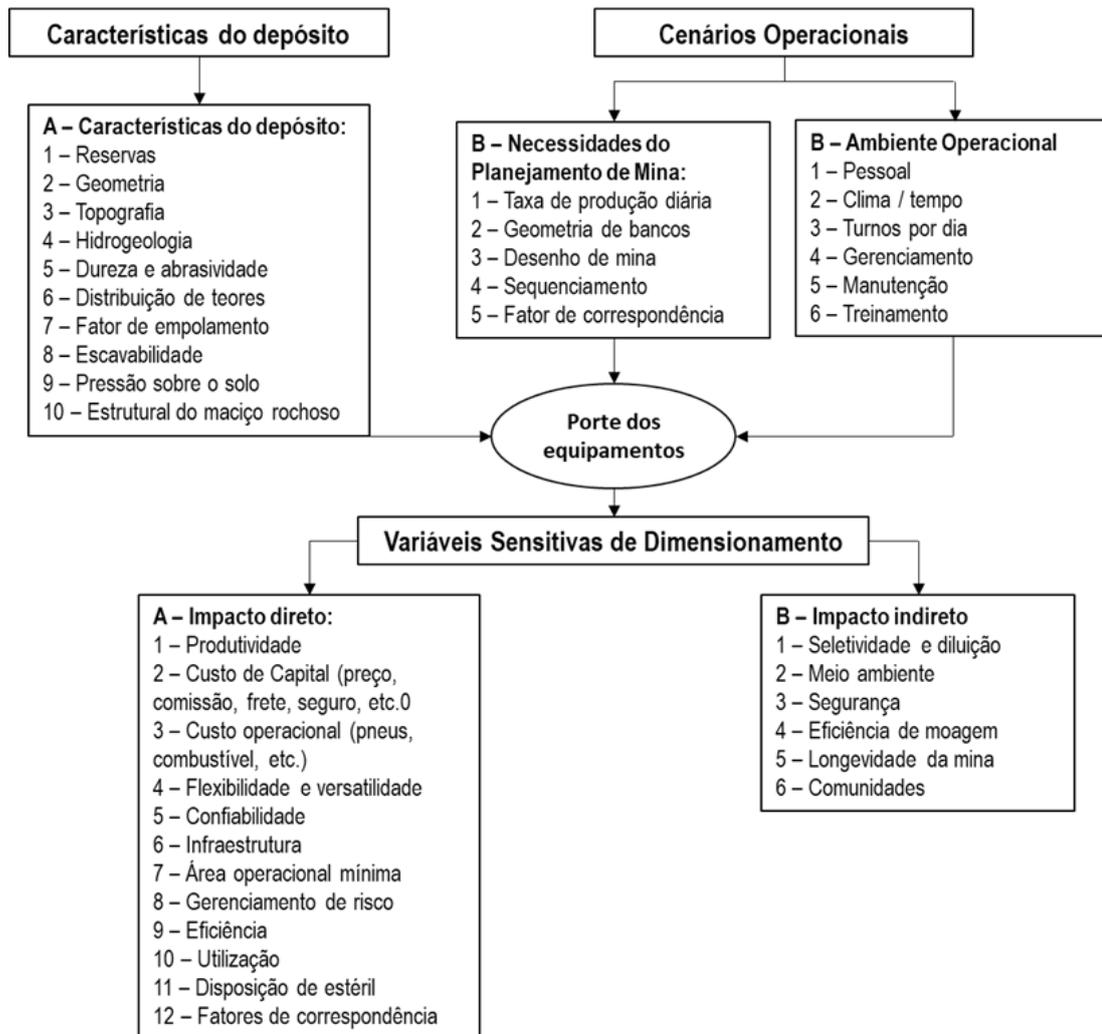


Figura 3.5 – Aspectos relacionados ao dimensionamento e seleção de equipamentos de lavra em uma mina a céu aberto. (Fonte: ADAPTADO DE BOZORGEBRAHIMI et al., 2005).

Macedo et al. (2001) é outro autor que cita a importância das características do depósito, principalmente o mergulho do corpo mineral, a espessura do depósito e sua forma, como limitador tanto da escolha de métodos de lavra quanto de equipamentos. A relação entre métodos de lavra e equipamentos é importante já que os dois refletem aspectos técnicos compõe a técnica de extração, como um todo (MACEDO et al, 2001). Outro aspecto importante citado por Macedo et al. (2001) é o fato de que os métodos de lavra dependem diretamente dos equipamentos disponíveis, ou seja, em geral os métodos de lavra de alta produtividade

necessitam de equipamentos e mão de obra mais sofisticados, do mesmo modo um método de lavra mais seletivo também dependeria de equipamentos mais apropriados ao método.

Para Bozorgebrahimi et al. (2005) existe uma relação muito forte entre o tamanho dos equipamentos e a geometria da mina, como por exemplo na relação entre o tamanho dos equipamentos e as dimensões geométricas como altura de bancada. Neste caso o aumento do porte dos equipamentos resultará em maiores diluições de lavra. Esses fatores seriam relacionados à lavra em si, enquanto alguns fatores de controle da diluição estão mais relacionados à geologia (exemplo: espessura e inclinação do corpo mineral). O porte dos equipamentos escolhidos pode influenciar diretamente também outros fatores-chaves dos projetos, como por exemplo a relação estéril-minério (BOZORGEBRAHIMI et al., 2005). Este exemplo é melhor visualizado analisando a quantidade de estéril necessária de ser retirada para a lavra de uma mesma quantidade de minério. No caso de um *pushback* com profundidade de 100 m, a troca de caminhões de 230 t para 320 t demandaria uma rampa aproximadamente 8.7 metros mais larga, o que resultaria em uma queda de 3.5° no ângulo geral do talude. A massa extra de estéril lavrado para execução desta rampa seria algo em torno de 1.5 Mt.

Dentre os equipamentos de lavra mais utilizados nos projetos minerais brasileiros, os mais difundidos são através de caminhões, seja de pequeno, médio ou grande porte e através de correias transportadoras (ALMEIDA et al., 2018). Para Almeida et al. (2018), outros aspectos que devem ser levados em conta na seleção de equipamentos de lavra são o atendimento das demandas sociais e ambientais e a procura por operações mais limpas e sustentáveis.

3.7 Transporte de materiais

3.7.1 Transporte por caminhões

De acordo com Melo (2020), dentre os diversos modais e sistemas de transporte de materiais em uma mina, destacam-se como largamente mais utilizados o transporte por caminhões e correias, sendo que o transporte com caminhões é o mais utilizado na mineração, tendo sido beneficiado pelo processo de mecanização que proporcionou maior ganho de escala de produção e maior automatização.

O processo de lavra de uma mina compreende as operações unitárias de desmonte do material (que pode ser via perfuração e desmonte por explosivos ou mecânico via corte com trator ou escavação com a escavadeira), carregamento e transporte entre as frentes de lavra até a planta de beneficiamento de minério ou pilha de estéril. Os acessos de uma mina permitem

que ocorra a operação fundamental de transporte do material via caminhões (REIS, 2014). Este processo é o mais tradicionalmente usado na grande maioria das minas a céu aberto e constitui a maior parte dos custos de mina (COUTINHO, 2017).



Figura 3.6 – Caminhão fora de estrada CAT 793 realiza transporte de material em uma mina a céu aberto (Fonte: WWW.CAT.COM, 2023).

Para Coutinho (2017) a etapa de transporte constitui a maior parte dos custos operação de mina, e para maior eficiência algumas condições são essenciais para um bom desempenho na operação como a padronização da largura dos acessos, inclinação e condições de acesso, alocação e gerenciamento de frota, treinamento e capacitação dos operadores, além de outros fatores. Reis (2014) e Silva (2020) desenvolveram importantes trabalhos relacionando a necessidade da análise da qualidade dos acessos de mina para proporcionar os melhores ganhos na etapa de transporte. Essas análises são importantes para o desenvolvimento da mineração, uma vez que a manutenção de acessos de mina sempre foi um tema deixado de lado na mineração (REIS, 2014).

Para medir o desempenho da operação de transporte com caminhões alguns indicadores chave de desempenho (KPIs) são comumente monitorados nas operações. Nader (2013) cita alguns KPIs relacionados à operação de lavra que são comumente utilizados para medir o

desempenho operacional de uma frota de caminhões para transporte de materiais em uma mina. Alguns desses indicadores são apresentados abaixo:

- Caminhões: Índice de utilização, largura de rampa, disponibilidade física dos equipamentos, distância média de transporte, tempo médio entre falhas, custo por tonelada produzida, custo de operação, custo de manutenção, consumo de diesel por tonelada produzida, custo por hora por frota, custo por tonelada movimentada, custo de remoção de estéril, eficiência geral dos equipamentos de transporte, velocidade do transporte, emissões de gases de efeito estufa.

De acordo com Coutinho (2017) o ciclo operacional dos caminhões é constituído de diversas etapas. Este ciclo se inicia na alocação do caminhão vazio para uma frente de lavra designada por meio de um sistema de gerenciamento de frota na maioria das minas a céu aberto. Ao chegar na frente de lavra o caminhão realiza uma manobra de posicionamento próximo ao equipamento de carga, com objetivo de possibilitar a carga do material. Após o término do posicionamento do caminhão é iniciada a operação de carregamento, onde o equipamento responsável pela carga realiza diversos passes até completar o enchimento da caçamba do caminhão. Com a carga realizada, o caminhão se desloca até o seu destino, onde realiza a manobra para descarga e basculamento do material, encerrando assim o seu ciclo.

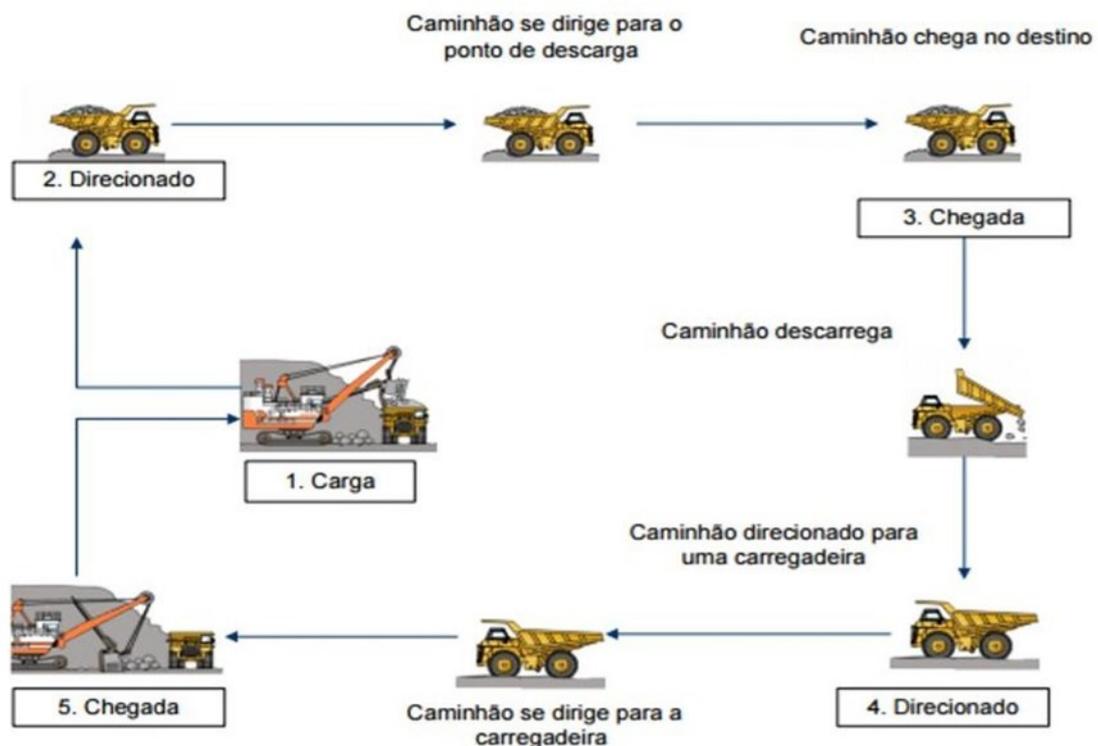


Figura 3.7 – Ciclo de operação de um caminhão fora de estrada em uma mina a céu aberto (Fonte: RESEARCHGATE.NET, 2022).

Conforme explica Coutinho (2017) o custo do processo de transporte é composto pelo elevado consumo de combustível dos caminhões, pneus e materiais mecânicos além de custos com mão de obra para operação e manutenção. Para o autor, as condições de piso são essenciais para um bom desempenho e produtividade dos caminhões.

Com o aumento da tecnologia nos processos de mina ocorrido nos últimos anos, diversas tecnologias em despacho eletrônico permitiram maior controle de KPIs para medir o desempenho da frota de transporte, melhorando o tempo de atuação e permitindo ganhos de produtividade. Além disso, algumas empresas como Caterpillar e Komatsu passaram a oferecer operação de caminhões completamente autônomos, o que permitiu ganhos ainda maiores de produtividade. No entanto, a operação com frota de caminhões autônomos passou a exigir maiores cuidados com os acessos de mina, já que as tecnologias atuais não permitem que os caminhões desviem de obstáculos, mesmo que estáticos, que bloqueiem a pista (GUIEIRO et al., 2019). Segundo Guieiro et al. (2019) um acesso que apresente grandes blocos, buracos ou “borrachudos” interrompem o ciclo do equipamento e impõe perdas de produtividade e por isso a equipe de infraestrutura de mina desempenha papel relevante ao realizar as manutenções necessárias nos acessos.

3.7.2 Correias transportadoras

As correias transportadoras são sistemas motorizados que movimentam um tapete que circula por um leito sobre rolos e roletes, que forma um sistema de fluxo de material que se inicia com o carregamento do material, seu transporte e por último acontece a etapa de descarga do material em um ponto de descarga, que pode ser uma pilha ou um chute para outra correia (LOPES, 2010).



Figura 3.8 – Sistema de correias de bancada instaladas na mina da Samarco (Fonte: LOPES, 2010).

Os transportadores de correias normalmente possuem custos operacionais mais baixos que aqueles relacionados ao transporte por caminhões, já que as correias utilizam energia elétrica para o seu funcionamento, usualmente mais barata que o diesel utilizado pelos caminhões. Segundo Resende (2021) o custo operacional do transporte com caminhões é 3,6 vezes mais elevado que o custo do transporte por correias. No entanto, de acordo com Chaves (2015) apud Resende (2021) os custos de aquisição, ou CAPEX, de um sistema de correias representa 94% do seu custo total, enquanto o custo operacional ou OPEX representa apenas 6% do seu custo total. Observa-se então que os custos para aquisição do sistema de correias são muito representativos, sendo 1,7 vezes mais caros que os custos de aquisição de caminhões (RESENDE, 2021).

Segundo Lopes (2010) as correias transportadoras passaram a ser utilizadas na mineração brasileira após a segunda guerra mundial, mas ganharam força mesmo após a década de 1960. Ainda segundo Lopes (2010), os transportadores de correias para lavra podem ser de:

- Longa Distância: projetados para o transporte de materiais em grandes trajetos, com sua montagem realizada de maneira mais elaborada, geralmente em estruturas fixas de concreto. Normalmente são responsáveis por levar o material da mina até uma estrutura de beneficiamento.

- Coletoras: são correias intermediárias que recebem material das correias instaladas nas frentes de lavra (bancada) e transportam para pilhas intermediárias de estoques ou alimentam diretamente as correias de longa distância.

- Bancadas: são correias montadas nas frentes de lavra para transportar o minério carregado na frente até uma correia coletora intermediária. Como as frentes de lavra são dinâmicas e avançam com o tempo, essas correias são montadas em estruturas modulares de aço, para permitir seu descolamento de maneira mais fácil. Geralmente são pequenas e por isso demandam motores de acionamentos menos potentes quando comparados aos transportadores de longa distância.

3.7.3 Diferenças entre os modais

As vantagens do transporte por caminhões são muitas, e podemos citar: alta flexibilidade de realocação de frentes, altas capacidades de transporte, maior flexibilidade nos sequenciamentos de lavra, entre outros. Com a crescente preocupação das empresas com o controle de custos e fatores relacionados ao meio ambiente como reduções de emissões atmosféricas e segurança, muitas empresas passaram a adotar sistemas de transporte por correias, tidos como mais baratos durante a operação. Diversos autores como Lages (2018) e Burt e Caccetta (2014) apontam que os custos de carregamento e transporte representam entre até 40 a 60% dos custos totais de uma mina, enquanto Mohutsiwa e Musingwini (2015) falam em até 80% dos custos de mina.

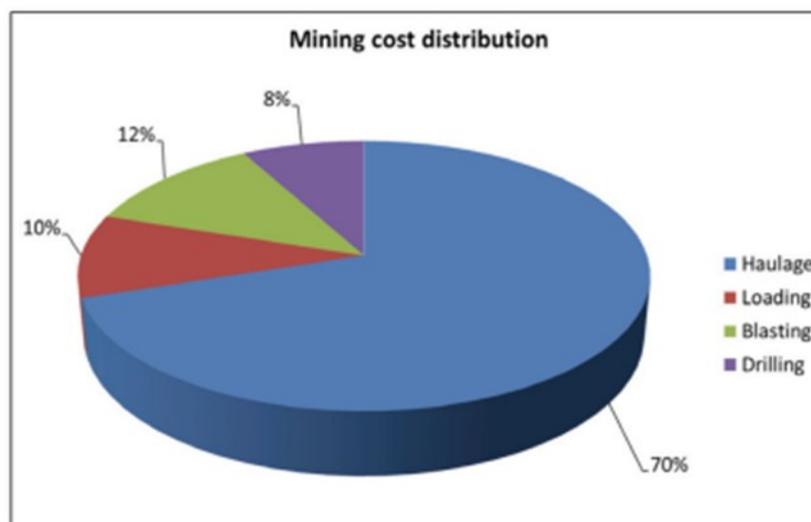


Figura 3.9 – Distribuição dos custos de mina, com destaque para elevada composição das etapas de carregamento e transporte (Fonte: MOHUTSIWA E MUSINGWINI, 2015).

Em um contexto de redução de custos e aumento de produtividade, o uso de economia de escala necessita que, para métodos tradicionais de carregamento e transporte, os

equipamentos sejam cada vez maiores. No entanto, a possibilidade de aumento de porte de equipamentos é limitada uma vez que o transporte por caminhões possui alta demanda de energia, força de trabalho e água (NEHRING ET AL., 2018). Nesse contexto, sistemas de britagem *in-pit* (IPCC) e lavra e transporte via sistemas de correia estão ganhando maior atenção e reconhecimento pelas inúmeras vantagens em relação aos modais tradicionais de transporte por caminhões.

Nehring et al. (2018) afirma que o aumento da DMT com o aprofundamento das minas leva ao aumento do número de caminhões e conseqüentemente da necessidade de força de trabalho requerida para a operação ao longo do tempo em minas a céu aberto, além de maiores custos com consumo de combustíveis, onde todos esses fatores somados levariam inevitavelmente ao aumento do OPEX dessas minas.

No Brasil a lavra por correias em bancadas a céu aberto é conhecida por ser utilizada há mais de 30 anos na Samarco Mineração e recentemente foi adotada para o projeto S11D da Vale, no Pará. Em ambos os casos, a sustentabilidade dos projetos é um importante fator para a sua utilização. Coutinho (2017) cita que o impacto ambiental da lavra por caminhões é maior, uma vez que há alto consumo de combustíveis fósseis, enquanto a lavra por correias utiliza energia elétrica.

As correias transportadoras são constituídas de roletes de carga, tapetes, polias, dispositivos de acionamento, chutes para carregamento e descarga de material e a estrutura de suporte (COUTINHO, 2017). A alimentação do sistema de correias pode ser realizada diretamente via carregadeiras ou escavadeiras através de alimentadores, um classificador ou um britador, como o sistema conhecido como “*In-Pit Crusher*”, ou britador em cava (COUTINHO, 2017). Lopes (2010) define a lavra com correias como um modal que substitui os caminhões por correias móveis de bancada e com isso as carregadeiras pneumáticas alimentam o minério diretamente no sistema de correias através de um silo de alimentação que faz a transferência do minério.



Figura 3.10 – Sistema de lavra por correias de bancada em mina a céu aberto na Samarco Mineração (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

O uso de caminhões de grande porte é altamente difundido para a etapa de transporte de material e o seu uso proporcionam ganho de escala, obtido através da grande capacidade de carga que possuem (ALMEIDA et al., 2018). Já o uso de correias para lavra é menos difundido que o uso de caminhões, porém já se apresenta como prática comum na mineração. A lavra com caminhões apresenta alta flexibilidade, uma vez que os equipamentos possuem grande mobilidade, podendo ser direcionados para diversas frentes de lavra e diversos destinos para basculamento.

Para Almeida et al. (2018) a lavra com correias possui vantagens e desvantagens em relação à lavra com caminhões fora de estrada. As vantagens são a manutenção de um fluxo constante de transporte, o baixo custo operacional e sua alta confiabilidade, enquanto as principais desvantagens são a baixa mobilidade do sistema de correias quando comparado aos caminhões, que possuem fácil realocação de frentes, além do seu elevado custo de implantação. Outra desvantagem significativa da lavra por correias citada por Almeida et al. (2018) é a necessidade de todas as correias operacionais estarem ligadas ao mesmo tempo à medida que o sistema cresce e fica complexo.

Segundo Bernardi et al. (2020), em minas com sistemas tradicionais de transporte por caminhões de grande porte as dificuldades começam aparecer conforme aumenta a DMT. Os

tempos de ciclo aumentam conforme ocorre o aumento da distância transportada, resultando necessidade de aumento do número de equipamentos para manter a produção constante. Nesse caso, um sistema de lavra por correias poderia ser instalado próximo às frentes de lavra mantendo um fluxo constante de transporte.

Os custos associados a lavra por correias e caminhões também são fontes de diversas discussões, sendo que muitos autores tendem a concordar que a lavra por correias possui custos, em geral, menores que a lavra tradicional com caminhões. Para Almeida et al. (2018), os custos de transporte dos caminhões fora de estrada são representativos no processo de lavra, principalmente custos de pneus e diesel, enquanto as correias possuem baixo custo operacional, apesar de alto custo de aquisição inicial.

A lavra por correias possui potencial para resultar em menores custos por ser mais eficiente em termos de energia que a lavra tradicional por caminhões, além de usualmente os custos de manutenção do sistema por correias serem menores que o de caminhões (BERNARDI ET AL., 2020). Para Nehring et al. (2018), os custos operacionais do transporte por correias são entre 15% e 35% menores que os custos do sistema por caminhões. Já Coutinho (2017) vai além e cita que em seus estudos e referências, os custos do transporte por caminhões chegam a ser entre 38% até 64% maiores que os custos com o transporte por correias.

Alguns autores como Nehring et al. (2018) e Nunes et al. (2019) também desenvolveram trabalhos comparativos entre os modais de lavra por correias considerando sistemas de britagem *in-pit* semimóveis e transporte por caminhões. Um modelo é proposto por Nunes et al. (2019) para tomada de decisão em estudos conceituais onde é possível identificar de maneira mais rápida quais projetos que têm potencial para utilização de correias e britagem semimóvel *in-pit*, ajudando as empresas a focarem nas alternativas que continuem mostrando potencial para aprofundamento dos estudos. Os custos operacionais (OPEX) do modal por correias é aproximadamente 34% menor que por caminhões, embora o custo de capital (CAPEX) seja até 60% maior segundo Nunes et al. (2019), tendo como consequência o fato de que a lavra por correias seja viável apenas para projetos com maior tempo de vida útil.

Nehring et al. (2018) trazem uma visão diferente sobre o comparativo dos modais citando que um sistema de operação utilizando correias e sistemas de britagem *in-pit* necessitam de uma abordagem completamente diferente no planejamento de lavra e desenho de mina, por causa das adequações geométricas necessárias para acomodar os leitos de correias e das restrições que esse modal acarreta. Outro efeito da substituição do transporte de caminhões por correias é a perda da flexibilidade da lavra (NEHRING ET AL., 2018), também citada por

Almeida et al. (2018). Esses são pontos importantes que muitas vezes são negligenciados por modelos que consideram apenas fatores financeiros como base para tomada de decisão.

Os autores citados neste trabalho e que desenvolveram estudos diretos ou relacionados comparativos entre a lavra de correias e caminhões concordam que, no longo prazo, os menores custos operacionais (OPEX) da lavra por correia compensam a lavra por caminhões, mesmo que o seu CAPEX seja maior. Embora essa afirmação possa ser válida para muitos projetos de mineração, não pode ser tomada como verdade absoluta, já que cada projeto possui particularidades que podem mudar o cenário.

4 METODOLOGIA

4.1 Aspectos técnicos da lavra na Samarco

A operação da Samarco contempla a lavra a céu aberto em encosta e cava em duas minas na região do Complexo do Germano, nos municípios de Ouro Preto e Mariana, Minas Gerais. As minas de Alegria Norte e Alegria Sul têm sido operadas pelo método de lavra a céu aberto por bancadas desde sua abertura e serão operadas assim até a sua exaustão. A escolha pelo método de lavra a céu aberto com parte da lavra do minério por correias deu-se principalmente devido às características da formação da jazida, tendo grande extensão, grande espessura, inclinação relativamente baixa, material friável e por aflorar à superfície.

Tabela 4.1 – Divisão das minas e regiões de lavra do Complexo Alegria da Samarco (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

Mina	Região
Alegria Norte	Área Quadrado
	Alegria Centro
	Alegria 126
	F11 - Arrendamento
Alegria Sul	Alegria Sul 2
	Alegria 8
	Conta História

Devido a características topográficas da região onde a jazida se encontra, com relevo acidentado e montanhoso, o desenvolvimento da mina ocorre normalmente com a lavra iniciando-se em encosta e evoluindo para a formação de uma cava à medida em que ocorre o aprofundamento (Figura 4.1). O início do desenvolvimento de uma nova área da mina é

realizado normalmente com a abertura acontecendo com caminhões, depois evoluindo para uma lavra mista entre equipamento móveis e correias, sendo potencialmente maior uso de correias de bancada quando as inclinações das correias não são maiores que 15° com altura máxima equivalente a duas bancadas para cada correia, sendo possível montar um sistema onde um conjunto de transportadores vençam uma altura maior, e retornando novamente ao uso apenas de caminhões quando a lavra se aprofunda em cava.

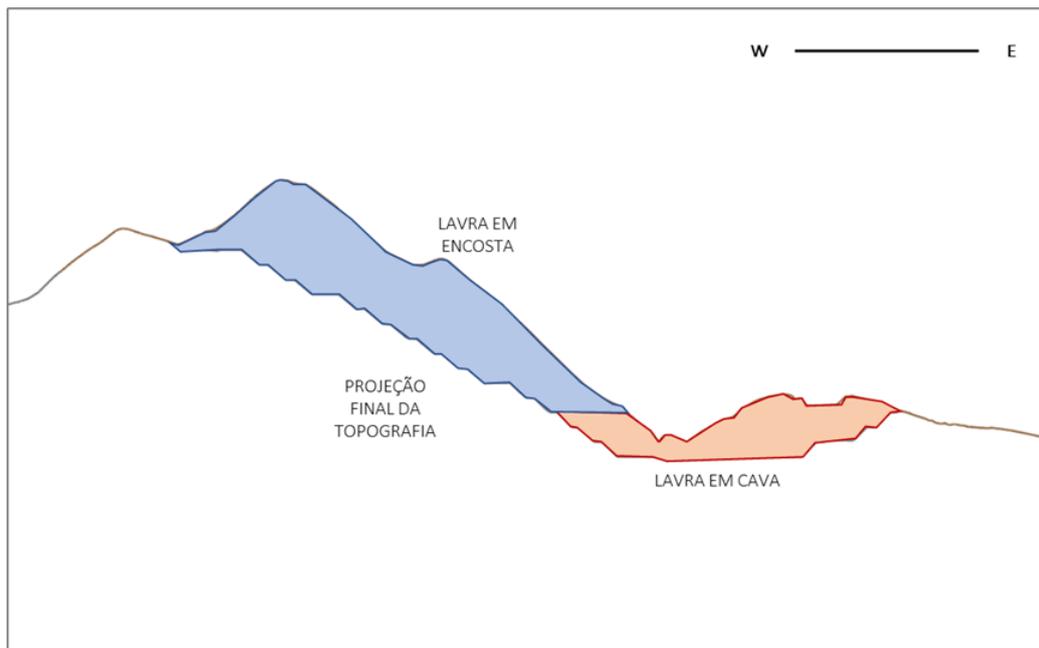


Figura 4.1 – Projeção de lavra em encosta e cava durante a evolução operacional da área de Alegria Centro, Mina de Alegria Norte, Samarco (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

A mina é operada por frota de grande porte, com caminhões CAT 789D de 197t e carregadeiras compatíveis ao porte dos caminhões (CAT 993K e 994H). A operação de transporte com caminhões ocorre tanto para lavra de minério quanto para estéril e todas outras movimentações auxiliares. Além da lavra convencional com transporte de caminhões, a Samarco realiza a lavra de minério por correias de bancada, que consiste na operação de desmonte mecânico, carregamento e transporte do minério sem a utilização de caminhões fora de estrada.

Uma estrutura de correias de bancada é montada dentro da mina e conectada ao sistema de correias de longa distância que leva o material aos concentradores. Essas correias se aproximam das frentes de lavra e na sua extremidade é instalado um alimentador de bancada, chamado de carregador simples. O material é então desmontado e movimentado com trator para o pé do banco, sendo transportado por uma carregadeira de rodas até o alimentador de bancada

onde é alimentado, e posteriormente cai no sistema de correias de longa distância. Essa operação acontece com uma distância máxima de aproximadamente 100 m entre o material desmontado e o alimentador de bancada, sendo que a produtividade diminui conforme aumenta a distância entre o material e o alimentador. A Figura 4.2 representa o processo:

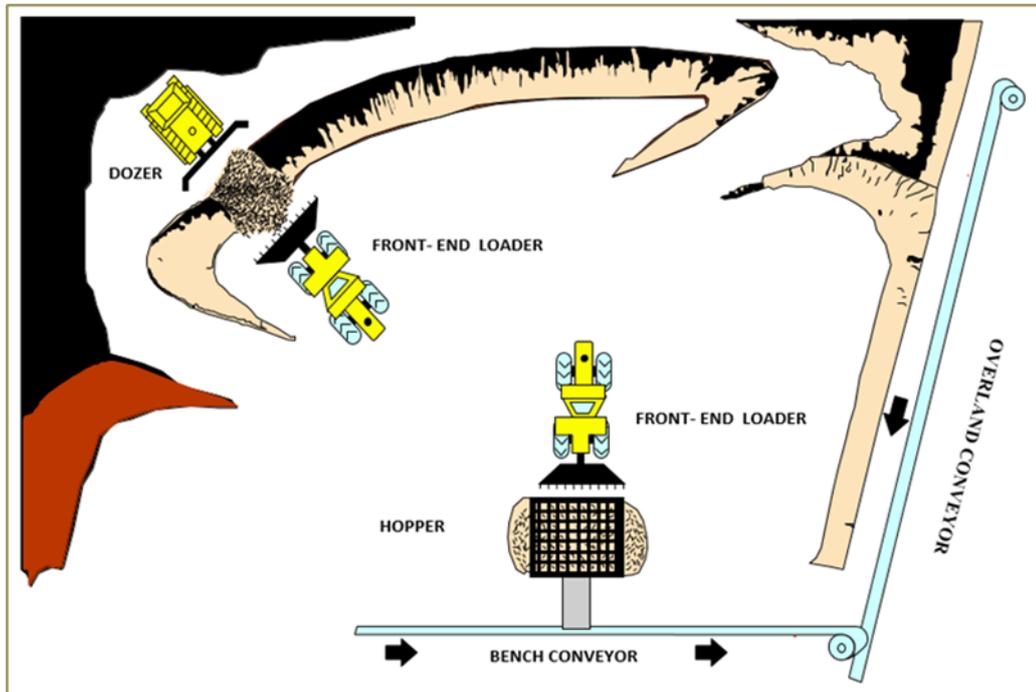


Figura 4.2 – Representação gráfica do conceito da lavra por correias de bancada na Samarco (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

Quando não é possível fazer a lavra do minério por correias, o carregamento é realizado nos caminhões fora de estrada, que levam o material para alimentação em alimentadores chamados *hoppers*. Em ambos os alimentadores há uma grelha que retém o material retido em 150mm para que este não caia no sistema de correias e cause danos nos tapetes das correias e chutes de transferências.

A lavra por correias vem sendo praticada na Samarco desde o fim da década de 1970, quando a empresa iniciou suas operações no complexo de Germano. Ao longo do tempo a empresa se tornou referência na prática, mostrando que desde o passado já existia na empresa uma visão voltada para maior eficiência nos processos, mesmo em um tempo ainda havia maior abundância de recursos e menor preocupação ambiental e com energia. A Samarco inovou em vários conceitos operacionais na sua criação em processos das quais se tornou referência, como é possível citar: a lavra por correias na mina; o processo de beneficiamento de minério de ferro

de baixo teor através da tecnologia de flotação de minério de ferro; o transporte de concentrado via mineroduto por mais de 400 km entre a mina e o porto; e o processo de pelotização.

A lavra por correia iniciou-se de forma pioneira em 1977 na Samarco na Mina do Germano, primeira área de lavra da Samarco, onde a topografia favorável e a mineralização relativamente homogênea, friável e com pouca presença de estéril permitiu um cenário ideal para aplicação da lavra por correias de bancadas.



Figura 4.3 – Lavra por correias na Samarco na Cava do Germano, no ano de 1989 (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

Ao longo do tempo, a Samarco abriu novas minas no Complexo do Germano, como as Minas de Alegria Norte e Alegria Sul a partir da década de 1990. Através de imagens de satélite antigas do Google Earth é possível observar a evolução do sistema de lavra por correias de bancada na mina de Alegria Norte a partir do ano de 2002 em diante (Figura 4.4). Após o retorno operacional da Samarco, em 2021, a lavra por correias teve que ser repensada de forma a se adaptar à nova realidade da empresa, que considera menor alimentação de ROM e produção em comparação com o praticado até 2015, e uma nova estratégia de movimentação de mina e qualidade. O estudo apresentado neste trabalho de dissertação mostra a metodologia aplicada no processo de planejamento de médio e longo prazo da Samarco para desenvolver os futuros leitos de correia a serem operados ao longo do tempo, bem como os resultados potenciais de massa lavrada nos próximos anos pelos leitos propostos.



Figura 4.4 – Operação por meio da lavra por correias na Mina de Alegria Norte da Samarco em 2004 (Fonte: GOOGLE EARTH, 2023).

4.2 Desenvolvimento da metodologia

O planejamento de lavra de longo prazo na Samarco é desenvolvido conforme os padrões mais elevados da indústria de mineração mundial. Todas as etapas do planejamento de longo prazo são realizadas, desde a otimização de cava até o sequenciamento de longo prazo e dimensionamento de frota. Na Samarco, os sequenciamentos de longo prazo normalmente adotam períodos anuais até o fim da vida útil da mina, detalhando as movimentações de material, alimentação de ROM, geração de estéril, entre outros.

As metodologias de sequenciamento de lavra de longo prazo com auxílio de softwares especialistas compreendem a definição prévia de alguns parâmetros como taxa de aprofundamento da cava e taxa anual de extração de material. A taxa de aprofundamento da cava pode ser controlada no software através da utilização de fases no sequenciamento ou através de restrições inseridas que controlam a quantidade de diferentes bancos lavrados ao mesmo tempo dentro de um mesmo período. Normalmente, em uma mina operada com equipamentos móveis onde o transporte seja realizado por caminhões, não há limitações para as taxas de aprofundamento anuais da cava, a não ser que existem outras restrições relacionadas ao rebaixamento do nível de lençol freático, restrições por DMT e frota, qualidade, ou outra restrição que deve ser considerada.

O sequenciamento do plano de lavra deste estudo permitiu a lavra de não mais que três níveis de bancadas simultaneamente por período, para permitir a execução de parte da lavra com correias. O controle da taxa de aprofundamento da lavra não é uma realidade para muitas minas, principalmente aquelas onde o corpo mineral é mais verticalizado. A Samarco se beneficia de uma jazida relativamente homogênea com uma baixa REM. Já foram realizados estudos internos que mostram que a forma como a jazida é sequenciada no longo prazo não altera a dinâmica de produção e teores, e como consequência não influencia no fluxo de caixa da empresa, fator que permite que a mina seja sequenciada visando proporcionar a operação com correias, e não apenas visando o *blending* ou a produção. Mas é importante ressaltar que este é um aspecto específico das minas da Samarco, em grande parte dos casos o sequenciamento vai ser determinante nos resultados de uma empresa.

Considerando todos os aspectos citados dos sequenciamentos dos planos de longo prazo da Samarco, fez sentido então partir de um plano de longo prazo sem detalhes operacionais como base para um plano mais detalhado operacionalmente em períodos menores. A metodologia para definir a posição futura dos leitos de correia na lavra da Samarco consistiu em utilizar o plano de longo prazo como base para seleção de áreas potenciais e detalhar essas áreas potenciais em horizontes menores de tempo, porém com o desenho dos leitos para correia. No caso deste estudo, utilizou-se um plano *Life of Mine* realizado em 2022 e sequenciado em períodos anuais para seleção dessas áreas potenciais e posteriormente realizou-se detalhamentos dos leitos em um sequenciamento de horizonte de médio prazo de 5 anos, conforme Figura 4.5 abaixo:



Figura 4.5 – Metodologia aplicada para o planejamento da lavra por correias (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

4.3 Metodologia

Do plano *Life of Mine* foram retiradas as superfícies matemáticas dos períodos anuais oriundas do sequenciamento no software MineSched e foi realizada a seleção das áreas potenciais para realização da lavra com correias nos horizontes de médio prazo (5 anos) nas minas de Alegria Norte e Alegria Sul. Em seguida, foi realizado *pit design* das cavas matemáticas incorporando o desenho conceitual dos leitos de correias previstos às cavas. Utilizando o conceito dos leitos de correias, realizou-se um novo sequenciamento de médio prazo no software Deswik, com período de 5 anos, onde detalhou-se a lavra por correias no horizonte trimestral (para os dois primeiros anos do sequenciamento) e semestral (a partir do terceiro ano do sequenciamento). Por fim, foi realizado o cálculo da massa lavrada por correias considerando premissas operacionais e a capacidade calculada para os sistemas de correia de bancada. Os leitos de correia do horizonte de longo prazo não foram desenhados em detalhe, mas foi realizada uma análise conceitual da evolução dos leitos de correias transportadoras para a lavra no horizonte de longo prazo com objetivo de identificar as áreas potenciais. O trabalho futuro para o planejamento da lavra por correias dessas áreas potenciais deverá seguir essa metodologia aplicada nesse trabalho.

4.3.1 Seleção das áreas de lavra por correias

A viabilidade da lavra por correias depende de vários aspectos, alguns já citados nesse trabalho. Para seleção das áreas a serem operadas com correias no médio e longo prazo, foram levados em consideração os aspectos abaixo:

- Existência de estrutura de correias já montada;
- Nível topográfico das bancadas;
- Largura operacional das praças;
- Lavra em cava ou encosta;
- Possibilidade de implantação de leito de correia na área;
- Presença de estéril ou minério de baixa qualidade;

Como a Samarco possui duas minas operadas simultaneamente no complexo de Alegria, Alegria Norte e Alegria Sul, optou-se por avaliar a condição para lavra por correia de modo individual em cada mina, levando em consideração os aspectos característicos de cada uma. As duas minas já foram operadas com correias no passado, sendo viável aplicar a lavra por correias para o desenvolvimento futuro de ambas.

4.3.1.1 Mina de Alegria Norte

Existe atualmente na mina de Alegria Norte algumas estruturas de correias já montadas e até mesmo em operação com menor taxa. Algumas dessas estruturas são utilizadas abaixo da capacidade de projeto ou mesmo não utilizadas, portanto, puderam ser aproveitadas para os projetos de maximização futura da lavra por correias.

Optou-se por aproveitar a estrutura existente da CV02, que possui taxa horária nominal de 2750 t/h, leito que fora usado no passado para a realização da lavra por correias na mina norte e possui bom histórico de operação e disponibilidade. Ele está conectado a CV01, que é parte de um sistema de correias coletoras intermediárias que interliga as correias de bancada (como a CV02) com a pilha pulmão de Alegria Norte e o sistema de correias de longa distância. A utilização desse sistema de alta capacidade viabiliza a lavra da região conhecida como Alegria 126, na mina de Alegria Norte no horizonte de médio a longo prazo. Este é o mesmo sistema de transportadores que permitiu a realização da lavra por correias em Alegria Norte apresentada na Figura 4.4.

Para o desenho do leito conceitual em Alegria Norte foi utilizada uma cava matemática do ano de 2027 dessa mina, retirada do sequenciamento do plano de longo prazo *Life of Mine*. Escolheu-se a cava do ano de 2027 por se tratar de um horizonte de tempo de médio prazo coincidindo com a data final do sequenciamento de médio prazo apresentado nesse trabalho, permitindo também uma boa visão para os anos anteriores e boas projeções para continuidade da lavra por correia após o ano de 2027. Realizou-se então o *pit design* dessa cava com foco no desenvolvimento desse leito partindo da configuração atual até a configuração desejada para ele em 2027. As cavas matemáticas e operacionalizadas do Norte em 2027 podem ser observadas na Figura 4.6 abaixo:

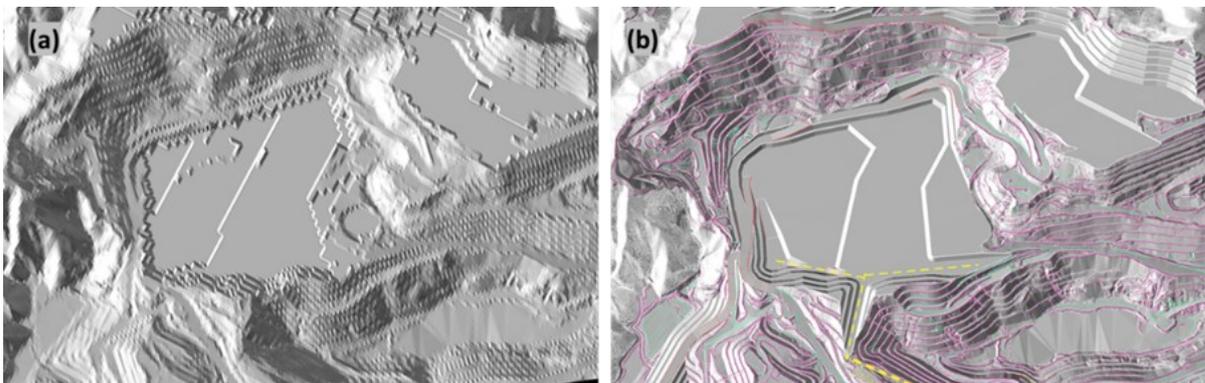


Figura 4.6 – Cava matemática da mina de Alegria Norte de 2027 (a) e versão operacionalizada pelo pit design com o desenho dos leitos das correias (b) (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR)

O desenvolvimento dos leitos em Alegria Norte via correia CV02 viabiliza a lavra da região central da mina de Alegria Norte, conhecida como Alegria 126, mas também abre a possibilidade de operação em outra região da mina, conhecida como área F11, após o ano de 2027 e não estará presente nessa avaliação de médio prazo.

4.3.1.2 Mina de Alegria Sul

Na mina de Alegria Sul, a análise inicial mostrou que as possibilidades de lavra com correia são maiores no médio prazo, porém menores e mais sensíveis à evolução da mina no horizonte de longo prazo. Com uma distribuição de áreas mais distantes e menos contínua, além de difícil topografia, a lavra por correias na região concentra-se em possibilidades no horizonte de médio prazo, principalmente na área conhecida como Alegria Sul 2. Para tal, observa-se a necessidade de desenvolvimento da porção mais elevada da área para permitir a construção de um leito de correias operacional, que, após concluído, permitirá a operação com as correias de bancada.

A metodologia aplicada na mina de Alegria Sul foi a mesma aplicada na mina de Alegria Norte, onde utilizou-se as cavas matemáticas do sequenciamento de longo prazo para avaliar as melhores possibilidades de aproveitamento das correias na lavra no horizonte de médio prazo avaliado no plano e realizou-se o desenho de cava (*pit design*) para encaixar a localização dos leitos de correias.

Duas cavas matemáticas do plano de longo prazo foram utilizadas para a referência do desenho de cava e dos leitos conceituais de correias no Sul, tendo sido escolhidas as cavas dos anos de 2024 e 2027. A utilização de duas cavas de médio prazo na mina sul foi necessária em função de uma maior necessidade de detalhamento da possível evolução dos leitos no médio prazo em função do maior potencial de lavra nesse período e da ausência de um leito pronto, fator não observado na análise da mina norte com a CV02.

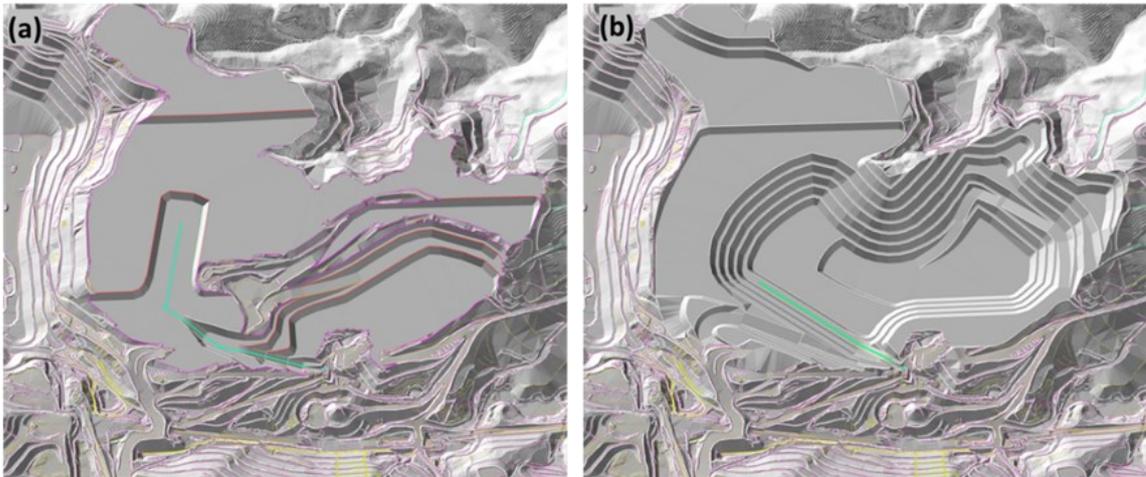


Figura 4.7 – *Pit design* das cavas de 2024 (a) e 2027 (b) retiradas do plano de longo prazo com o detalhamento dos desenhos dos leitos conceituais da mina de Alegria Sul (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

As cavas matemáticas foram operacionalizadas com o desenho dos leitos de correias conceituais operacionais (Figura 4.7). No plano de longo prazo foi observada que a taxa de aprofundamento da cava na área de Alegria Sul 2 será maior que na mina de Alegria Norte, fator que impacta a evolução da lavra por correias após 2027 no sul. Na análise de longo prazo, a lavra em outras áreas da mina sul é tida como possível através do prolongamento das correias previstas nesse trabalho, porém seu aproveitamento será menor que o aproveitamento possível após 2027 na mina norte.

4.3.2 Detalhamento do plano de médio prazo

Os desenhos das cavas retiradas do plano de longo prazo com os leitos conceituais foram utilizados para a criação e seleção de fases de lavra para o sequenciamento do horizonte de médio prazo, realizado no software Deswik. Para esse sequenciamento considerou-se o período entre os anos de 2023 e 2027, dividindo os anos de 2023 e 2024 em períodos trimestrais e os anos de 2025 a 2027 em períodos semestrais.

Tabela 4.2 – Horizonte de períodos do sequenciamento de médio prazo (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

Ano	2023				2024				2025		2026		2027	
Trimestre / Semestre	1º Tri	2º Tri	3º Tri	4º Tri	1º Tri	2º Tri	3º Tri	4º Tri	1º Sem	2º Sem	1º Sem	2º Sem	1º Sem	2º Sem
Período Sequenciado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Do sequenciamento de médio prazo foram geradas as cavas matemáticas dos períodos mostrados na Tabela 4.2 e foi realizado o pit design dessas cavas para as minas de Alegria Sul e Norte, e em cada uma delas foram posicionados os acessos, as praças e os leitos de correias de bancada. Assim foi possível ver a evolução não só da geometria de mina, mas principalmente da lavra por correias ao longo do plano e a partir disso levantar informações cruciais para o processo como: a massa lavrada por correias nos períodos; os tamanhos dos leitos de correias a serem montados; os prolongamentos necessários; o dimensionamento dos motores de acionamento de acordo com a massa e o fluxo ascendente ou descendente de material na correia; etc. Embora muito se possa explorar dessas informações, este trabalho se concentra nas etapas mais relacionadas ao planejamento de lavra.

O desenho dos leitos de correia operacionais foi realizado levando-se em consideração os parâmetros técnicos para instalação de correias de bancada na Samarco. Esses parâmetros foram elaborados pelas equipes envolvidas no processo de planejamento e montagem dos transportadores de correias como planejamento de lavra, operação de mina e manutenção, objetivando padronizar esse processo e garantir a operacionalidade dos sistemas de lavra por correias. Os principais parâmetros considerados no planejamento e desenho dos leitos dos transportadores de correias para esse trabalho são apresentados na Tabela 4.3 abaixo:

Tabela 4.3 – Parâmetros geométricos adotados no planejamento e desenho dos leitos e transportadores de correias na Samarco (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

Parâmetro	Valor
Comprimento Máximo Transportador	500m
Distância mínima entre a cauda e o carregador	15m
Ângulo formado entre as duas correias	$\geq 28^\circ$
Comprimento plano na cauda	$\geq 40m$
Cabeça da correia	$\geq 40m$
Grade máximo do trecho inclinado da correia	15°
Desnível máximo do perfil do transportador	48m
Área de servidão	22m
Praça Op. Carregadeira	30x30m
Distância frente de lavra ao carregador	$>15m$

O perfil esquemático apresentado na Figura 4.8 abaixo exemplifica um perfil de um transportador por correias montado na Samarco, considerando os parâmetros construtivos mostrados na Tabela 4.3 acima. O sistema final para operação da lavra por correias é um conjunto de transportadores e alimentadores que obedece aos parâmetros de planejamento e construção. O posicionamento dos alimentadores nas correias não pode ser detalhado em períodos de médio prazo, pois entende-se que esta definição é feita nível de curto prazo a operacional, uma vez que os alimentadores podem ser movimentados com relativa facilidade e em períodos de tempos relativamente curtos em um mesmo transportador de correias, à medida que a lavra avança ou mesmo seguindo a necessidade de uma qualidade específica de ROM.

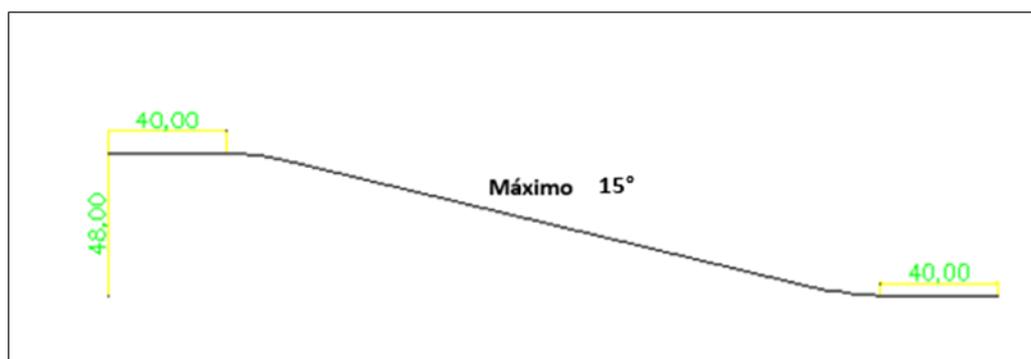


Figura 4.8 – Perfil esquemático de um transportador de correias de bancada para operação de lavra na Samarco (CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

O resultado dos pits designs das cavas matemáticas do plano de médio prazo com a evolução dos leitos dos transportadores de correias é exemplificado na Figura 4.9 abaixo, onde é mostrada uma cava desenhada para um dos períodos sequenciados do ano de 2024 em Alegria

Sul. É possível notar que o detalhamento permite calcular o tamanho das correias a serem montadas ou desmontadas em cada período, permitindo assim que as equipes de correias façam o planejamento das montagens e desmontagens, que deve considerar: reforma de materiais existentes; compra ou aquisição de novas partes; especificações e potência dos motores de acionamento dos transportadores; mão de obra necessária; entre outros.

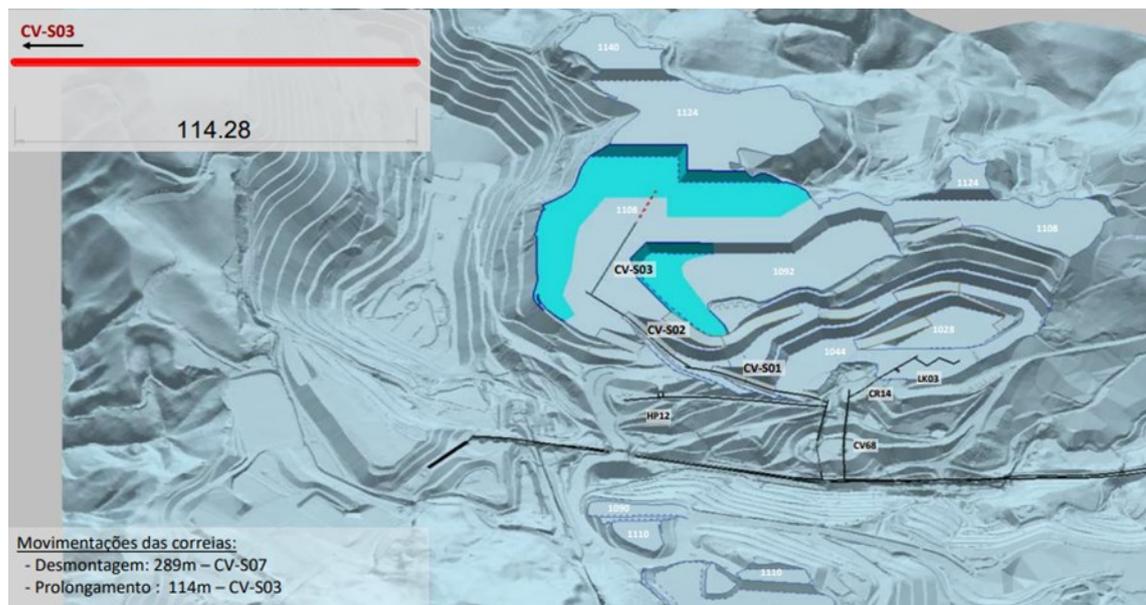


Figura 4.9 – Planejamento de leitos de transportadores de correias no desenho de cava operacional para lavra na mina de Alegria Sul no 4º trimestre de 2024 (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

4.3.3 Delimitação dos sólidos da lavra por correias

Os sistemas de transportadores de correias de bancada das minas da Samarco foram projetados para execução da lavra de minério, sendo conectados aos transportadores de correias de longa distância que transportam todo o ROM das minas até as plantas de concentração do complexo do Germano. A lavra do estéril é então realizada por caminhões fora de estrada carregados por carregadeiras, na lavra convencional. A análise da lavra por correias passa, além da definição das frentes de lavra e desenho dos leitos operacionais já mencionados nesse trabalho, pela análise dos blocos de minério e estéril e sua proximidade aos leitos de correia.

A lavra por correias acontece através do transporte do minério desmontado na frente de lavra até a sua alimentação no carregador de bancada por uma carregadeira de rodas de grande porte. Tipicamente, não é recomendado que carregadeiras de rodas se movimentem em longas distâncias para alimentar ou carregar o material, seja em um alimentador ou caminhão, sob risco de perda de produtividade quanto maior é a distância a ser percorrida. Por isso utiliza-se como

limitação máxima para a lavra por correias um raio de 100 metros entre o carregador e frente de lavra. Quando a distância entre o material cortado na frente de lavra e o carregador de bancada posicionado na correia atinge a máxima distância operacional de 100 metros, usualmente se realiza um prolongamento da correia conforme o avanço da lavra e o carregador é reposicionado mais próximo ao material.

Adotando-se esse padrão operacional, utilizou-se o software Deswik para desenhar os sólidos de minério a serem lavrados ao longo dos leitos dos transportadores já desenhados anteriormente, sempre obedecendo um raio médio de no máximo 100 metros. A Figura 4.10 demonstra esse processo. Para sua delimitação foi utilizado o modelo de blocos para o contorno do minério ao longo dos leitos de correia, sendo possível considerar alguns poucos blocos de estéril que possam estar em meio aos blocos minério e nesse caso considera-se uma pequena diluição de lavra. Após a delimitação dos sólidos a serem lavrados por correias em cada período, realizou-se a etapa de cubagem desses sólidos para obter a massa. Ao valor cubado aplicou-se um fator de aproveitamento da lavra por correias de 90%, considerando uma margem para possíveis perdas operacionais no dia a dia da mina.

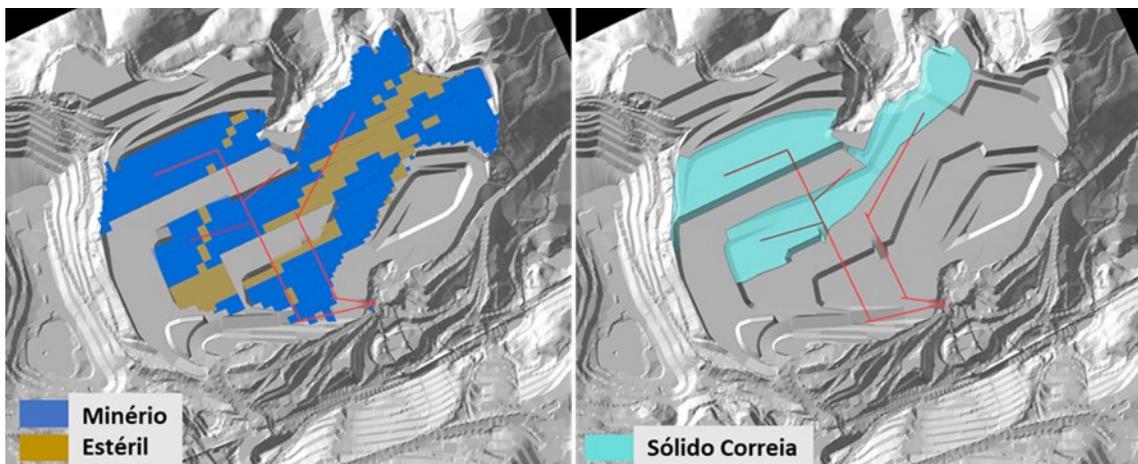


Figura 4.10 – Processo de delimitação dos sólidos lavrados com correia através da análise do modelo de blocos e do desenho dos leitos de correias de bancada (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

4.3.4 Avaliação da produção dos transportadores

A última etapa do processo de cálculo da massa lavrada por correias consistiu na cubagem dos sólidos da lavra por correias e a avaliação da capacidade do sistema de transportadores das minas de Alegria Norte e Alegria Sul. A checagem das capacidades é importante para garantir que a massa planejada pode realmente ser realizada. A cubagem foi

realizada dentro do software Deswik utilizando-se o mesmo modelo de blocos usado no sequenciamento de lavra.

Para calcular a capacidade produtiva dos sistemas de transportadores de correias de bancadas planejado para um determinado período, utilizou-se o desenho dos leitos de correias para este determinado período, conforme metodologia já mostrada nesse trabalho, para analisar a quantidade de transportadores propostos no conjunto e os transportadores de correias fixos que interligam cada sistema de correias de bancada.

Aplicou-se também aos sistemas um rendimento operacional de 70%, que considera a Disponibilidade Física (DF), a Utilização (UT) dos sistemas de correias de bancada. Em caso de a massa total calculada por correias exceder a capacidade do sistema, seria necessário voltar à etapa anterior e ajustar o sólido de correias para obedecer a capacidade máxima produtiva do sistema.

A capacidade do sistema de lavra por correia foi calculada com base na largura da correia proposta, a quantidade de braços de correias e alimentadores que serão instalados para alimentação na correia e a capacidade horária dos sistemas de correias fixos às quais a correia de bancada será interligada. Já a massa diária prevista foi calculada através da cubagem dos sólidos lavrados por correias, aplicando-se o fator de aproveitamento da correia e dividindo-se pelo número de dias operados com correias no período em questão. O resultado da demanda diária de lavra por correia em toneladas por dia não pode exceder a capacidade de produção do sistema previsto

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do detalhamento de planejamento de lavra contemplando o processo de lavra por correias no médio e longo prazo da Samarco são vários, com desdobramentos em diversas áreas. De forma efetiva, o principal resultado a ser apresentado nesse trabalho são as quantidades planejadas de lavra por correias nos anos sequenciados no médio de prazo, que tem como próximo passo sua operacionalização nos planos de curto prazo para sua execução em campo pela operação de mina. Nesse contexto, um dos objetivos é alcançar patamares de lavra por correias próximos aos praticados no passado, que compreendia em torno de 60% a 70% do ROM total.

A quantidade de ROM planejado para lavra por correias é o resultado da aplicação de todos os passos desenvolvidos na metodologia de planejamento de lavra por correias apresentada acima e contribui também com o processo de dimensionamento de frota. A massa

a ser lavrada por correias não demanda caminhões no seu transporte e por isso dimensioná-la de maneira correta é fundamental para evitar possíveis erros no dimensionamento da frota de equipamentos móveis. Um dimensionamento errado do sistema de correias levará fatalmente a um subdimensionamento da frota de caminhões se a correia for superdimensionada, ou a uma superestimativa de frota de caminhões se a lavra por correia for subdimensionada. Os erros se propagariam para os dimensionamentos de mão de obra, aquisição de peças e sobressalentes, planejamentos de manutenções, oficinas, entre outros.

5.1 Massa lavrada pelo sistema de correias

A metodologia de planejamento da lavra por correias na mina foi aplicada ao processo de planejamento da Samarco e possibilitou os resultados de massa abaixo:

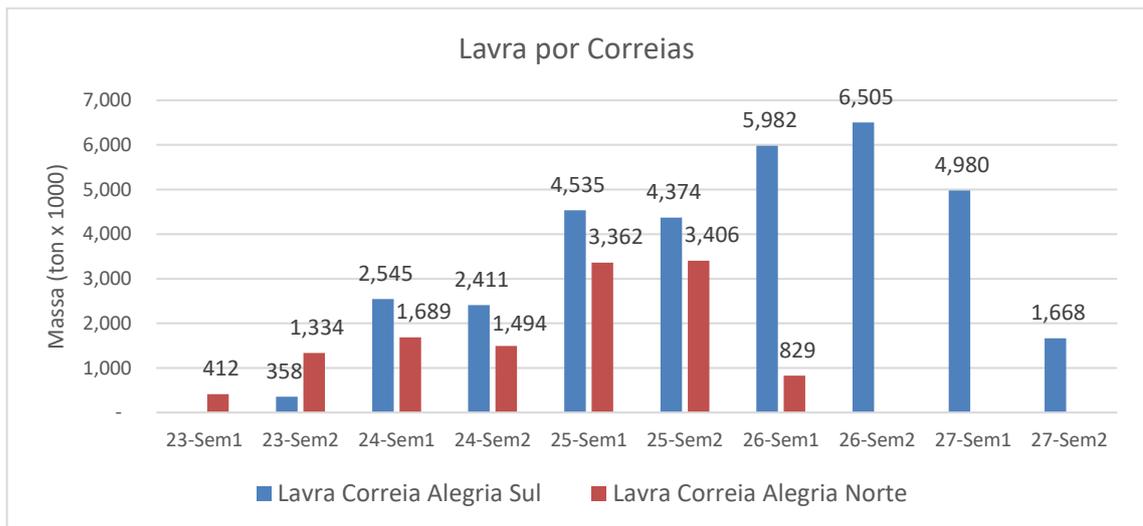


Figura 5.1 – Massa calculada através da metodologia para lavra por correia ao longo do plano de médio prazo (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

Para facilitar a visualização e interpretação dos dados, os períodos trimestrais dos anos de 2023 e 2024 foram acumulados em períodos semestrais. O desenvolvimento da lavra mostrou que no início do plano os leitos para os transportadores de correias precisam ser desenvolvidos até chegarem a sua configuração de aproveitamento para os próximos anos. Por exemplo, é possível perceber que esse desenvolvimento será realizado em 2023, com a lavra começando a acontecer no segundo semestre desse ano. Em 2024, já com os leitos desenvolvidos, a lavra por correia aumentará consideravelmente.

O pico de lavra por correia no médio prazo é observado nos anos de 2025 e 2026 onde os leitos instalados estão na sua melhor condição de produtividade para a mina de Alegria Sul. Já a condição de sequenciamento na mina de Alegria Norte mostra que em 2026 e 2027 há uma paralisação da lavra por correias para realizar a abertura de áreas altas da mina (*pushbacks*). Nesse momento, não há condição operacional para montagem de correias nessas áreas. Na mina de Alegria Sul, em 2027 ocorre aprofundamento da cava, fator que causa a redução da lavra por correia nesse período.

A validação das taxas dos transportadores é importante para checar a capacidade dos sistemas propostos e a massa prevista para eles, evitando que a massa planejada por correias exceda a capacidade de produção. No caso desse estudo, a validação das capacidades do sistema proposto mostrou que o layout de correias terá capacidade para produzir a massa prevista nas minas de Alegria Sul e Alegria Norte, ou seja, as massas planejadas são factíveis conforme Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente. Caso não fossem, seria necessário redesenhar o sólido da lavra por correias buscando menos massa ou propor um novo layout de correias, com mais alimentadores ou mais braços de correias.

Tabela 5.1 – Capacidades requeridas e instaladas nos sistemas de correias de Alegria Sul (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

Período	Massa cubada (t)	Fator Aprov. Correia	Massa correia (t)	Cap. Req. Sist. (t/h)	Cap. Instalada (t/h)
Q1 2023	-		-	-	-
Q2 2023	-		-	-	-
Q3 2023	-		-	-	-
Q4 2023	397,583	90%	357,825	706	1,200
Q1 2024	1,529,994	90%	1,376,995	896	1,200
Q2 2024	1,297,418	90%	1,167,676	759	1,200
Q3 2024	1,218,650	90%	1,096,785	713	1,200
Q4 2024	1,460,411	90%	1,314,370	855	1,200
S1 2025	5,038,769	90%	4,534,892	1,475	2,400
S2 2025	4,860,097	90%	4,374,087	1,422	2,400
S1 2026	6,646,302	90%	5,981,672	1,945	2,400
S2 2026	7,227,631	90%	6,504,868	2,115	2,400
S1 2027	5,533,698	90%	4,980,328	1,620	2,400
S2 2027	1,853,039	90%	1,667,735	542	1,200

Tabela 5.2 – Capacidades requeridas e instaladas nos sistemas de correias de Alegria Norte (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

Período	Massa cubada (t)	Fator Aprov. Correia	Massa correia (t)	Cap. Req. Sist. (t/h)	Cap. Instalada (t/h)
Q1 2023	-	90%	-	-	-
Q2 2023	457,963	90%	412,167	488	1,200
Q3 2023	740,953	90%	666,857	434	1,200
Q4 2023	741,151	90%	667,036	877	1,200
Q1 2024	911,922	90%	820,730	1,079	1,200
Q2 2024	965,079	90%	868,571	1,142	1,200
Q3 2024	618,114	90%	556,302	732	1,200
Q4 2024	1,042,214	90%	937,993	610	1,200
S1 2025	3,735,611	90%	3,362,050	1,093	1,200
S2 2025	3,784,643	90%	3,406,179	1,108	1,200
S1 2026	921,064	90%	828,958	270	1,200
S2 2026	-	90%	-	-	-
S1 2027	-	90%	-	-	-
S2 2027	-	90%	-	-	-

A massa total de minério planejada para lavra por correias nos cinco anos sequenciados foi de 45,9 milhões de toneladas nas duas minas. Se essa massa fosse transportada com caminhões, seriam necessárias aproximadamente 79.000 horas a mais de operação com caminhões fora de estrada do tipo que operam na Samarco, modelo CAT 789D de 197 toneladas.

5.2 Percentual de minério lavrado por correias

Em termos percentuais, tem-se uma visão da distribuição dos modais de transporte do ROM total no período planejado, sendo correias e caminhões. A maior parte da lavra durante o plano será realizada com caminhões considerando a produção total de minério e estéril, porém com grande contribuição das correias, chegando à marca de 50% do ROM (Alegria Sul + Norte) no seu auge em 2025. Os percentuais de lavra por correias já foram próximos de 70% em alguns anos no passado, porém, considerando-se a evolução das cavas nos próximos anos, os percentuais atingidos nesse trabalho são consideráveis e mostram que a partir de um plano estruturado, é possível manter grandes volumes a serem lavrados por correias.

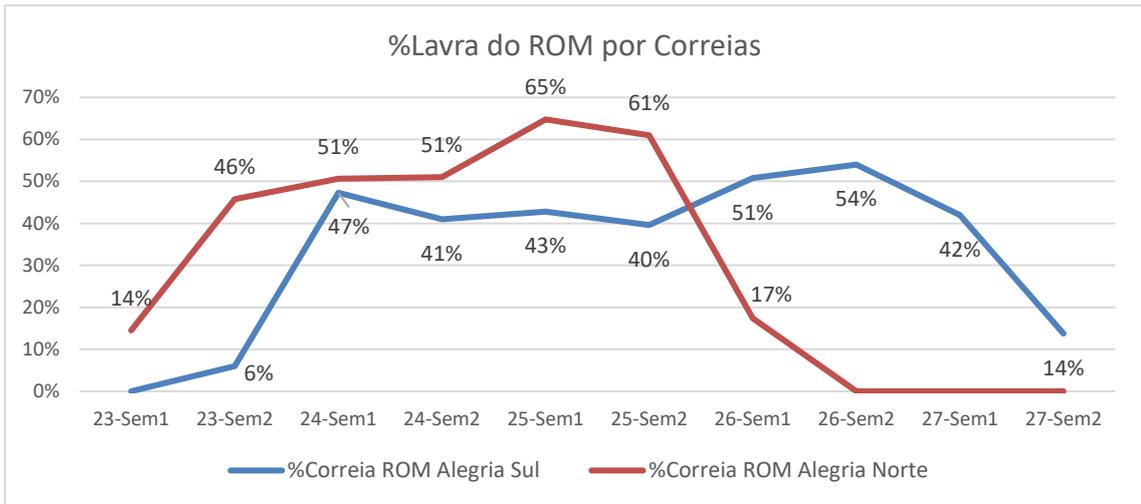


Figura 5.2 – Percentual do ROM de cada mina lavrado por correias ao longo dos semestres do plano de lavra (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR).

A análise do gráfico do percentual de lavra por correias é similar à realizada no tópico anterior para o gráfico de massa lavrada, com relação a evolução do sequenciamento. Inicia-se o ano de 2023 desenvolvendo os leitos para aumento da lavra em 2024, 2025 e 2026. Em 2027 a lavra diminui com o aprofundamento da cava sul já citado anteriormente. Estudos futuros deverão tratar os períodos após 2028 com foco na recuperação da lavra por correias através do desenvolvendo de novos leitos para as áreas futuras (citadas na metodologia e que serão mais comentados nas recomendações de trabalhos futuros).

No total, a lavra por correias planejada representou 34% do ROM para o período de cinco anos sequenciado. O percentual não foi maior devido a necessidade de desenvolvimento de leitos em 2023 e pelas condições operacionais nas duas minas em 2027 com aprofundamento do pit em Alegria Sul e abertura de novos *pushbacks* em Alegria Norte.

5.3 Discussão dos resultados

Ao se desenvolver o plano buscando maior detalhe da lavra por correias, alguns aspectos do desenvolvimento da mina foram observados com maior detalhe, como por exemplo a necessidade de desenvolvimento das geometrias dos leitos principais no primeiro ano de sequenciamento para então executar a lavra por correias de forma mais robusta. No passado, as condições favoráveis de geometria de mina favoreceram a execução de grande parte da lavra da Samarco por correias mesmo sem um processo detalhado de planejamento dessa lavra. Os cenários atuais e futuros mostram-se muito mais desafiadores para sua execução uma vez que

as condições do passado já não existem mais e só um bom planejamento pode garantir sua continuidade durante toda vida da mina.

Além da visão matemática dos objetivos de um plano de lavra, existe uma visão estratégica por trás que dita sua evolução. Existem várias formas de se atingir um mesmo resultado, ou resultados similares, e o dever de um plano de lavra bem elaborado por uma equipe de engenheiros de minas é entregar o melhor *output* dentro de um contexto específico. No exemplo desse trabalho, desenvolver mecanismos para viabilizar o modal operacional por correias em condições diferentes e, pode-se dizer, menos favoráveis do que no passado foi o objetivo e o principal resultado alcançado.

O planejamento da lavra por correias apresentado nesse trabalho resultou na lavra de 34% do ROM total programado para alimentar a planta entre os anos de 2023 e 2027 a ser realizado pelo modal por correias. No passado a Samarco já chegou a médias próximas a 70% de lavra por correias por anos. Embora na mina de Alegria Norte tenha sido possível chegar próximo desse patamar em 2025, na mina de Alegria Sul o percentual de lavra por correias ficou próximo a 40%. Avaliar as razões pelas o antigo patamar não será novamente atingido nos próximos anos, ou se ainda será atingido algum dia novamente, é importante para o entendimento e consolidação do processo.

Dentre os aspectos que diferenciam a lavra do passado para o presente e contribuem com essas diferenças pode-se citar diferenças de procedimentos operacionais, mudança na estratégia de sequenciamento de longo prazo de mina balizada pelo novo método de disposição de rejeito em cava adotado após o retorno operacional em 2021, a realização de novos *pushbacks* para expansão da mina no médio prazo e o aprofundamento da mina. Outro fator que certamente contribuiu para que houvesse uma redução na participação das correias na lavra foi a falta de um detalhamento do desenvolvimento dos leitos de correias nos cenários de longo prazo para permitir a lavra por correias nas futuras áreas de lavra.

O sequenciamento da mina de Alegria Norte mostra uma queda abrupta na lavra por correias no ano de 2026 e 2027 (Figura 5.2), fator explicado pela realização de *pushbacks* em áreas de topografia acidentada onde a instalação de correias torna-se inviável. Uma alternativa nesse caso seria reavaliar o sequenciamento de forma a estudar um sequenciamento onde a lavra não é completamente desviada para a abertura de *pushbacks* em 2026 e 2027 e mantém-se parte da operação na região do leito montado da CV02. Importante nesse caso avaliar nos planos de longo prazo se essas mudanças alterariam a dinâmica futura dos planos de lavra e da produção, uma vez que os *pushbacks* são importantes para acessar novas frentes de minério no futuro. A

massa total planejada para lavra por correias em Alegria Norte é de 12,6 Mt, o que corresponde a uma média de 30% do ROM oriundo dessa mina no período.

Na mina de Alegria Sul, a lavra por correia mostrou-se mais equalizada durante os anos sequenciados, com destaque para o período entre os anos de 2024 até o primeiro semestre de 2027. No ano de 2023 acontece o desenvolvimento e preparação dos leitos, enquanto em 2027 a cava se aprofunda no segundo semestre de forma a inviabilizar a instalação dos transportadores para execução da lavra (Figura 5.2). A massa total lavrada por correias na mina de Alegria Sul é de 33,4 Mt, o que corresponde a uma média de 36% do ROM oriundo dessa mina no período.

Observa-se que a maior massa lavrada por correias acontece na mina de Alegria Sul, representando 73% de toda massa a ser lavrada por esse sistema. As razões para esse resultado de maior massa de correias no Sul têm relação com a distribuição da lavra no plano, onde a maior parte da produção de mina acontece na mina de Alegria Sul no período sequenciado e com a geometria dos leitos dos transportadores desenvolvidos para essa mina, que permitiram melhor desenvolvimento dos leitos.

O desenho de mina do final do plano, ou seja, a cava de dezembro de 2027 das minas de Alegria Norte e Sul permite avaliar qual o direcionamento futuro a ser buscado para evolução dos leitos de transportadores de correias para lavra. Nas minas de Alegria Norte, por exemplo, a lavra por correias poderá continuar evoluindo na cava norte à medida que esta cava se aprofunda e abrangerá a região conhecida como Frente F11, aproveitando-se do leito desenvolvido em 2023 da CV02 (Figura 4.6). Futuramente, o desenvolvimento de um leito para a região de Alegria Centro é possível conceitualmente, porém mostra-se necessário realizar um trabalho detalhado de engenharia para avaliar sua viabilidade devido à condição de topografia acidentada dessa área.

Já na mina de Alegria Sul, a continuidade futura da lavra por correias se mostra pouco favorável levando-se em consideração a possível evolução futura da cava. Após o aprofundamento da cava em 2027 não sobram muitas opções futuras de desenvolvimentos de leitos de transportadores para o longo prazo, mesmo com a expansão da mina de Alegria Sul para áreas adjacentes.

Os resultados também mostraram que as maiores limitações para a lavra por correias estão relacionadas à topografia da mina, uma vez que existem limitações físicas para instalação dos transportadores de correias, principalmente relacionadas à inclinação deles. Não é possível operar com as correias inclinadas com ângulos maiores que 15° de inclinação, o que impede sua instalação em regiões altas (pushbacks) e regiões baixas da mina (lavra em cava). Devido

em grande parte à essas características mais favoráveis nos cinco anos planejados, a mina de Alegria Sul apresentou maior possibilidade de lavra por correias no horizonte de médio prazo (5 anos) do que a mina de Alegria Norte. Essa condição se reverte no longo prazo (+5 anos) uma vez que foi identificado baixíssimo potencial para esse modal após 2027 no Sul.

A lavra por correia apresentada nesse trabalho nunca seria possível sem um bom plano de lavra que sustentasse sua realização. As correias possuem uma grande estrutura de montagem, manutenção e operação que necessitam de uma visibilidade prévia e assertiva para que possam entrar em operação e realizar a massa prevista no plano. Além disso, é necessário conjugar a construção de leitos com o sequenciamento de lavra, bem como definir as frentes onde será possível operar com as correias. Nesse contexto, conclui-se que o planejamento de lavra considerando o detalhamento da lavra por correias é essencial para viabilizar essa modalidade de lavra na Samarco.

Por fim, a utilização de transportadores de correias na lavra da Samarco pode contribuir para os processos de descarbonização na indústria mineral. Este fato é relevante uma vez que o setor mineral deve se preparar para implementar esforços de descarbonização para cumprir os objetivos do Acordo de Paris, e uma solução que pode ser adotada é a eletrificação dos equipamentos de operação de mina. Nesse contexto a lavra por correias da Samarco utiliza eletricidade como matriz energética e isso resulta na redução das emissões atmosféricas de poluentes e gases de efeito estufa (GEE) atingida através da redução do uso de caminhões e consequentemente da queima de combustíveis fósseis. O benefício financeiro do método já é bem conhecido, agora a Samarco deve também quantificar esse ganho ambiental.

6 CONCLUSÕES

Durante muitos anos o processo de lavra por correia na Samarco se beneficiou de condições favoráveis ao seu desenvolvimento e maximização, principalmente pelas condições topográficas mais adequadas a essa modalidade no passado. Condições diferentes de operação e sequenciamento das cavas mudaram o cenário de forma que o aprofundamento das minas ameaçou inviabilizar esse processo na operação de mina.

Objetivando avaliar o potencial de lavra por correias para o futuro da operação na Samarco, desenvolveu-se este trabalho de planejamento de mina com foco nesse modal. O trabalho compreendeu o desenvolvimento de uma metodologia para o planejamento da lavra por correias que compreendeu análises de planos de longo prazo aliados a um sequenciamento

de médio prazo e seu posterior detalhamento através do pit design das cavas levando em consideração os leitos e o desenvolvimento dos transportadores de correias.

De forma objetiva, o trabalho mostrou que a lavra por correias continua viável no médio a longo prazo da empresa, muito embora não foi possível atingir a mesma quantidade de massa lavrada por correias praticada no passado. Enquanto já se praticou patamares próximos de 70% do ROM lavrado por correias nos períodos do seu pico durante a década de 2000, esse patamar não foi atingido em nenhum período avaliado, ficando próximo desse valor no ano de 2025 na mina de Alegria Norte, não sendo possível mantê-lo de forma sustentável no plano. A razão para o não atingimento de patamares passados da lavra por correias se justifica nas diferentes condições topográficas da mina no presente e em novos padrões operacionais para aumento da segurança da lavra por correia na mina após 2021. Apesar disso, é possível concluir que dadas as diferentes condições topográficas do presente e do futuro, este plano maximiza a utilização de correias considerando esses novos parâmetros.

O planejamento mostrou também que haverá grande variação da lavra por correias durante os próximos anos, devido principalmente a fatores relacionados ao sequenciamento de lavra, com o aprofundamento de algumas regiões da mina e a necessidade de *pushbacks* em regiões de topografia menos favorável. No total, o planejamento da lavra por correias mostrou que é possível lavar um total de 45,9 Mt por correias entre 2023 e 2027.

O estudo de caso da mina da Samarco ajudou a mostrar que o maior limitante para a lavra por correias é a topografia das bancadas de mina uma vez que este foi o fator mais determinante para determinar os períodos de maior e menor massa lavrada por correias observados no sequenciamento de mina.

Por fim, foi possível através do trabalho desenvolvido determinar quais são os aspectos técnicos compreendidos no planejamento de lavra de uma mina que utiliza correias e caminhões na operação de lavra, mostrando na prática a influência dos aspectos técnicos mais importantes como sequenciamento de desenho de mina, características dos transportadores de correias e limitações físicas e topográficas para a sua aplicação. A definição desses aspectos é importante pois poderá ajudar em processos decisórios de quais equipamentos serão utilizados na lavra de novos projetos de mineração, principalmente quando for considerada a utilização de correias na lavra.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

Como continuidade do trabalho apresentado nessa dissertação de mestrado, sugere-se visitar o planejamento de longo prazo de correias na Samarco dentro dos próximos 2 anos, contemplando o período após 2027, onde novas áreas de lavra serão desenvolvidas. O objetivo seria realizar os desenhos futuros da lavra por correias, buscando visualizar os desafios e possibilidades para a modalidade no longo prazo.

Sugere-se também montar um modelo financeiro que compare o custo de operação de uma determinada área com correias ou caminhões. Este método auxiliaria na tomada de decisão entre quais frentes serão lavradas por correias no futuro, considerando frentes possíveis de serem operadas pelos dois modais. Dentro desse modelo de *Trade Off* estariam compreendidos os dados de custos por tonelada de cada modalidade e seria possível determinar qual a massa lavrada mínima por correias para que ela seja viável em relação à lavra convencional.

Por fim, sugere-se fazer o inventário de emissões atmosféricas e de gases de efeito estufa comparando as modalidades de correias e caminhões para quantificar os ganhos ambientais proporcionados. Uma forma de fazê-lo seria dimensionar a frota do plano utilizado nessa dissertação sem a lavra por correias e comparar o consumo de diesel, tamanho da frota de transporte, distância trafegada, emissão de particulado, consumo energético e por fim realizar a conta da diferença das emissões de gases de efeito estufa.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. M., NEVES, T. C., FIGUEIREDO, A. C. L. **Estudo de viabilidade econômica do uso de correias transportadoras nas operações de lavra de uma mina de minério de ferro.** In: SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO, 19, ABM WEEK, 4, 2018, São Paulo. Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2018, p.178-188.

ANM. **Anuário Mineral Brasileiro.** 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-2021-ano-base-2020.pdf>>. Acessado em setembro de 2022.

AZEVEDO, R. C. **Modelo de gerenciamento de informações na cadeia de valor de mineração e petróleo.** Dissertação (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BERNARDI, L.; KUMRAL, M.; RENAUD, M. **Comparison of fixed and mobile in-pit crushing and conveying and truck-shovel systems used in mineral industries through discrete event simulation.** Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 103, 2020. 102100. ISSN 1569-190X.

BLOM, M.; PEARCE, A. R.; STUCKEY, P. J. **Short-Term Planning for Open Pit Mines: A Review.** International Journal of Mining Reclamation and Environment. 2018. DOI:10.1080/17480930.2018.1448248.

BOZORGEBRAHIMI, A.; HALL, R. A.; MORIN, M. A. **Equipment size effects on open pit mining performance.** International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. Vol. 19, No. 1, março de 2005, p. 41-46.

BREALEY, R A.; MYERS, C. **Princípios de Finanças Empresariais.** 10. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

BURT, C. N.; CACCETTA, L. **Equipment Selection for Surface Mining: A Review**. *INFORMS Journal on Applied Analytics*. Vol. 44, No. 2, março-abril de 2014, p. 143-162. ISSN 0092-2102.

CATERPILLAR. Disponível em: < https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/116620.html>. Acesso em maio de 2023.

CARMO, F. A. R.; CURI, A.; SOUZA, W. T. **Otimização econômica de explorações a céu aberto**. *Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, 59(3): 317-321, jul. set. 2006.

CHATTERJEE, S.; SETHI, M. R.; ASAD, M. W. A. **Production phase and ultimate pit limit design under commodity price uncertainty**. *European Journal of Operational Research*, Vol. 248, n. 2, 2016, p. 658-667, ISSN 0377-2217.

COSTA, F. V. **Análise dos principais indicadores de desempenho usados no planejamento de lavra**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2015.

COUTINHO, H. L. **Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

DAMASCENO, C. S. R. **Modelagem geológica e geomecânica 3D e análises de estabilidade 2D dos taludes da mina de Morro da Mina, Conselheiro Lafaiete, MG, Brasil**. Dissertação (Mestrado) – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2008.

DE CARLI, C. **Análise de projetos limite: lavra a céu aberto vs lavra subterrânea**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

DÍAZ, A. B.; ÁLVAREZ, I. D.; FERNÁNDEZ, C. C.; KRZEMIEN, A.; RODRÍGUEZ, F. J. I. **Calculating ultimate pit limits and determining pushbacks in open-pit mining projects**. *Resources Policy*, Volume 72, 2021,102058, ISSN 0301-4207.

FERREIRA, L. A. **Escavação e exploração de minas a céu aberto**. Trabalho final de conclusão de curso – Faculdade de Engenharia da UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2013.

FONTOURA, D. M. **Método para auxílio na definição da quantidade de minério liberado**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

RESENDE, G. P. S. **Desenvolvimento de um Sistema de Dimensionamento de Custos de um Transportador de Correia na Samarco Mineração S.A.** Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2021.

GITMAN, L. J. **Princípios de Administração Financeira**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

GUIEIRO, G. A.; LEITÃO, E. A.; BALBINO, E. S.; MELIS, L. V. **Implantação de caminhões fora de estrada autônomos na indústria de mineração**, p. 269-278. In: 20º Simpósio de Mineração, São Paulo, 2019. ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/2594-357X-33680.

GOOGLE EARTH WEBSITE. <http://earth.google.com/>, 2009.

ISEEKPLANT. Disponível em: <<https://blog.iseekplant.com.au/blog/5-largest-open-pit-mines>>. Acesso em setembro de 2022.

LAGES, A. R. **Estudo Preliminar da Influência do Porte de Veículos de Carregamento e Transporte Nos Custos Operacionais de Minas a Céu Aberto**. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018. 74p.

LOPES, J. **Viabilização Técnica e Econômica da Lavra Contínua de Minério de Ferro com Uso de Sistema de Britagem Móvel “in pit” Autopropelido**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2010.

MACEDO, A. J. B.; BAZANTE, A. J.; BONATES, E. J. L. **Seleção do método de lavra: arte e ciência.** Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 54(3), julho de 2021. DOI:10.1590/S0370-44672001000300010.

MANDARINO, M. F. **Análise de métodos para planejamento de curto prazo: uma abordagem para o line up.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.

MARTINS, S. C.; MATA, J. F. C.; MAZZINGHY, D. B. **Planejamento de lavra por sequenciamento direto de blocos com e sem a adição de variáveis geometalúrgicas.** In: 10º CBMINA - Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto e Minas Subterrâneas, 2021, Belo Horizonte. 10º CBMINA – TRABALHOS TÉCNICOS, 2021.

MELO, S. O. **Estudo de tempos de ciclo de carregamento e transporte de minério em uma mina a céu aberto.** Trabalho de conclusão de curso – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2020.

MOHUTSIWA, M.; MUSINGWINI, C. **Parametric estimation of capital costs for establishing a coal mine: South Africa case study.** The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 115, 2015, p. 789-797. DOI: 10.17159/2411-9717/2015/v115n8a17.

NADER, A. S.; **Monitoramento de taludes via radar SSR como indicador chave de desempenho geotécnico integrado às atividades primárias da cadeia de valor mineral.** Tese de Doutorado – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

NEHRING, M.; KNIGHTS, P. F.; KIZIL, M.S.; HAY, E. **A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing and conveying, and truck/shovel systems.** International Journal of Mining Science and Technology, v. 28, n. 2, p. 205-214, 2018.

NOURALI, H.; OSANLOO, M. **Mining capital cost estimation using Support Vector Regression (SVR).** Resources Policy, v. 62, 2019, p. 527-540. ISSN 0301-4207.

NUNES, R. A.; JUNIOR, H. D.; DE TOMI, G.; INFANTE, C. B.; BLADEN, A. **A decision-making method to assess the benefits of a semi-mobile in-pit crushing and conveying alternative during the early stages of a mining project.** REM, Int. Eng. J. 72 (2) abr-jun 2019. DOI:10.1590/0370-44672018720109.

PATYK, M.; BODZIONY, P.; KRYSA, Z. **A Multiple Criteria Decision-Making Method to Weight the Sustainability Criteria of Equipment Selection for Surface Mining.** Energies, v. 14, p. 3066, 2021. DOI:10.3390/en14113066.

REIS, M. S. **Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra a céu aberto de minério de ferro dentro do quadrilátero ferrífero.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

RESEARCHGATE. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Ciclo-do-processo-de-carregamento-e-transporte-por-caminhao_fig1_339298534>. Acesso em setembro de 2022.

ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JORDAN, B. D. **Administração Financeira: Corporate Finance.** 10. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

SILVA, A. E. G. **Análise de qualidade de estradas de mineração utilizando indicadores operacionais.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.