

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Escola de Minas

Departamento de Engenharia de Minas

Ítalo Fonseca Rosmaninho

**CICLO DE DESENVOLVIMENTO DE ABERTURAS SUBTERRÂNEAS – ESTUDO
DE CASO MINA VAZANTE**

Ouro Preto – MG

2021

Ítalo Fonseca Rosmaninho

**CICLO DE DESENVOLVIMENTO DE ABERTURAS SUBTERRÂNEAS – ESTUDO
DE CASO MINA VAZANTE**

Trabalho de conclusão de curso, na área de desenvolvimento subterrâneo apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Engenharia de Minas

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Ouro Preto – MG

2021



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e cinco dias do mês de agosto de 2021, às 10h30min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Ítalo Fonseca Rosmaninho**, intitulado: "**CICLO DE DESENVOLVIMENTO DE ABERTURAS SUBTERRÂNEAS – ESTUDO DE CASO MINA VAZANTE**", perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz, Prof. Dr. Hernani Mota de Lima e Eng.º de Minas Igor Oliveira Leite. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 15 (quinze) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, segundo, o Eng.º de Minas Igor Oliveira Leite e em último, o Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi **APROVADO** por unanimidade, com a nota **9,5 (nove virgula cinco pontos)**, sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 25 de agosto de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Membro: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Membro: Eng.º de Minas Igor Oliveira Leite

Discente: Ítalo Fonseca Rosmaninho

Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelos anos de incentivo e investimento na minha educação.

Agradeço à Larissa pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto e ao Departamento de Engenharia de Minas pela oportunidade de me formar como engenheiro.

Por fim, agradeço à Nexa Resources e à equipe de Operação de Mina Vazante pelos ensinamentos e por possibilitar a realização desse trabalho.

RESUMO

Para que a lavra subterrânea seja realizada, é necessário o desenvolvimento de rampas e galerias para que os corpos de minério em profundidade sejam acessados. O desenvolvimento pelo método *drill and blast* ocorre de forma cíclica e permite flexibilidade nas operações por ser dividido em 6 etapas principais: perfuração, carregamento com explosivos, detonação, limpeza de material, saneamento e contenção. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo conceituar o ciclo de desenvolvimento subterrâneo e suas operações, além de apresentar um estudo de caso realizado na Unidade Vazante. O estudo apresentou características da mina como geologia e método de lavra, mas teve foco no desenvolvimento e nas operações do ciclo, trazendo informações como frotas e indicadores de controle. O desenvolvimento na mina foi analisado através do resultado dos indicadores de suas operações em um período de 6 meses. Os maiores impactos observados nesse período foram a baixa média de frentes limpas por dia e a baixa disponibilidade das frotas de saneamento e atirantamento, sendo necessário estudos mais aprofundados para identificação de causas raízes desses problemas. Além disso, conclui-se que o controle do ciclo pela análise dos indicadores de cada etapa facilita a identificação de problemas e tomada de decisões.

Palavras-chave: Mina subterrânea. Desenvolvimento subterrâneo. Ciclo de desenvolvimento.

ABSTRACT

For underground mining to be carried out, it is necessary to develop ramps and galleries so that the deep ore bodies can be accessed. Development using the drill and blast method occurs cyclically and allows for flexibility in operations as it is divided into 6 main stages: drilling, loading with explosives, detonation, material cleaning, scaling and containment. In this context, the present work aimed to conceptualize the underground development cycle and its operations, in addition to presenting a case study carried out at the Vazante Unit. The study presented mine characteristics such as geology and mining method, but focused on cycle development and operations, bringing information such as fleets and control indicators. The mine's development was analyzed through the result of the indicators of its operations in a period of 6 months. The greatest impacts observed in this period were the low average number of clean drifts per day and the low availability of scaling and rock bolting fleets, requiring more in-depth studies to identify the root causes of these problems. In addition, it is concluded that controlling the cycle by analyzing the indicators at each stage facilitates the identification of problems and decision making.

Key words: Underground mine. Underground development. Development cycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de infraestrutura subterrânea contendo rampas e galerias	12
Figura 2 – Ciclo de desenvolvimento pelo método drill and blast	13
Figura 3 – Tipos de furos em uma face de galeria	14
Figura 4 – Visão lateral do Jumbo e seus componentes.	15
Figura 5 – Fatores que impactam avanço	17
Figura 6 – LHD movida à diesel	19
Figura 7 – Equipamento tipo Scaler em operação.....	20
Figura 8 – Esquema de ancoragem com tirante e resinas	21
Figura 9 – Boltec S, equipamento do tipo Rock Bolter.	22
Figura 10 – Município de Vazante destacado no mapa de Minas Gerais.....	25
Figura 11 - Perfil geológico da Zona de Cisalhamento Vazante.....	26
Figura 12 – Perfil longitudinal das minas Vazante e Extremo Norte.....	27
Figura 13 – Representação longitudinal de bloco de lavra por método VRM.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de tolerância para diferentes gases	18
Tabela 2 – Dados da frota de caminhões na Unidade Vazante	29
Tabela 3 – Dados da frota de Scalers na Unidade Vazante	30
Tabela 4 – Dados da frota de atirantamento na Unidade Vazante	31
Tabela 5 – Dados da frota de projeção de concreto na Unidade Vazante	31
Tabela 6 – Dados da frota de Jumbos na Unidade Vazante	32

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultado da média de frentes limpas/dia no período analisado.....	33
Gráfico 2 – Resultado da disponibilidade da frota de Scalers no período analisado	34
Gráfico 3 – Resultado da utilização da frota de Scalers no período analisado	34
Gráfico 4 – Resultado da disponibilidade da frota de atirantamento no período analisado.....	35
Gráfico 5 – Resultado da utilização da frota de atirantamento no período analisado	35
Gráfico 6 – Resultado da produtividade da frota de atirantamento no período analisado.....	36
Gráfico 7 – Resultado da disponibilidade da frota de projeção de concreto no período analisado.....	36
Gráfico 8 – Resultado da utilização da frota de projeção no período analisado.....	37
Gráfico 9 – Resultado da produtividade da frota de projeção de concreto no período analisado.....	37
Gráfico 10 – Resultado da disponibilidade da frota de perfuração no período analisado	38
Gráfico 11 – Resultado da utilização da frota de perfuração no período analisado .	38
Gráfico 12 – Resultado da produtividade da frota de perfuração no período analisado	38
Gráfico 13 – Resultado da média de frentes carregadas/dia no período analisado .	39
Gráfico 14 – Resultado da média de metros desenvolvidos/dia no período analisado	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Desenvolvimento	12
2.2 Ciclo de desenvolvimento	13
2.3 Etapas do ciclo	14
2.3.1 Perfuração.....	14
2.3.2 Carregamento e Desmonte.....	15
2.3.3 Limpeza de frente.....	18
2.3.4 Saneamento.....	19
2.3.5 Contenções	20
3 METODOLOGIA	24
4 ESTUDO DE CASO	25
4.1 Geologia	25
4.2 Mina	26
4.3 Lavra.....	27
4.4 Desenvolvimento	28
4.4.1 Limpeza de frente.....	29
4.4.2 Saneamento.....	30
4.4.3 Atirantamento.....	30
4.4.4 Projeção de concreto	31
4.4.5 Perfuração.....	31
4.4.6 Carregamento e desmonte.....	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1 Limpeza de frente	33
5.2 Saneamento	33
5.3 Atirantamento	34

5.3	Projeção de concreto	36
5.4	Perfuração	37
5.5	Carregamento e desmonte:	39
6	CONCLUSÕES	42
	REFERENCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade presente em grande parte da história humana, permitindo a exploração da matéria prima necessária para o desenvolvimento da humanidade. A crescente escassez de recursos presentes em superfície faz com que a lavra subterrânea seja uma opção cada vez mais viável para suprir a demanda mundial de bens minerais, possibilitando métodos de extração mineral para variadas profundidades e morfologias.

Nesse contexto, o desenvolvimento é a etapa produtiva que antecede a lavra em uma mina subterrânea, tendo como objetivo alcançar os corpos de minério e prepará-los para serem lavrados. O desenvolvimento subterrâneo pode ser vertical, como no aprofundamento de rampas, ou horizontal, no caso das galerias e travessas em diferentes níveis.

O método *drill and blast*, usado para o desenvolvimento de rampas e galerias subterrâneas, é composto por um ciclo de operações contendo etapas de perfuração, carregamento com explosivos, desmonte, saneamento e contenção (PAIVA, 2016). Cada uma dessas etapas possui objetivos e particularidades distintas, fazendo-se necessário um bom entendimento dessas características para melhor compreensão do ciclo como um todo.

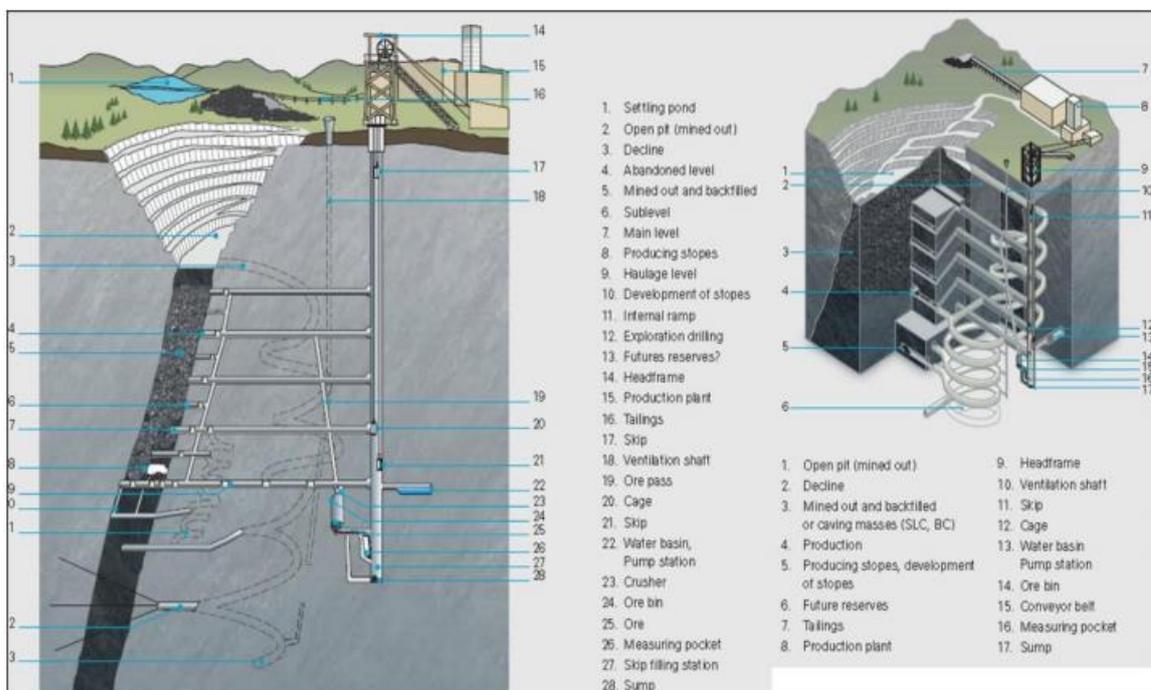
Devido a isso, este trabalho tem como objetivo geral estudar as etapas e o funcionamento do ciclo de desenvolvimento subterrâneo. Além disso, os objetivos específicos são: revisar a bibliografia existente sobre o tema, avaliar o desempenho do ciclo e suas etapas em um estudo de caso, e identificar fatores de impacto no ciclo por análise de indicadores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desenvolvimento

O desenvolvimento horizontal é responsável por alcançar os corpos de minério em diferentes níveis e prepará-los para serem lavrados, através da abertura de rampas, galerias e travessas.

Figura 1 – Esquema de infraestrutura subterrânea contendo rampas e galerias



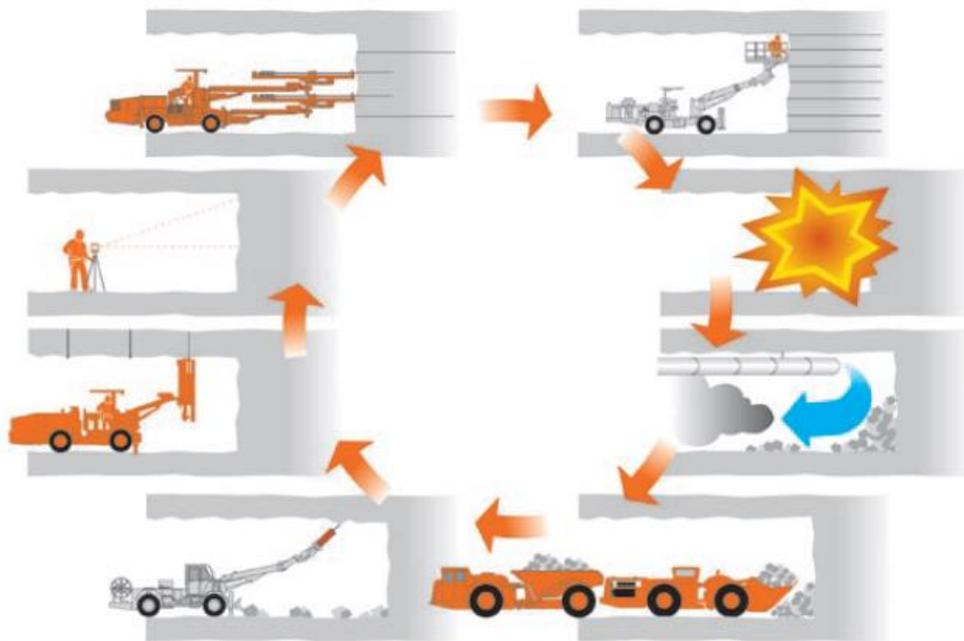
Fonte: PAIVA, 2016

Como bem nos assegura Tuck (2011), pode-se dizer que o desenvolvimento horizontal é a etapa que proporciona a infraestrutura necessária para o processo de lavra. O mais relevante, contudo, é constatar que além do acesso ao depósito mineral, outros objetivos dessa etapa são a obtenção de dados geológicos precisos e informações geotécnicas e hidrogeológicas. Não é exagero afirmar que as atividades de desenvolvimento horizontal são importantes tanto para o nível operacional da mina quanto para o planejamento de médio e longo prazo.

2.2 Ciclo de desenvolvimento

O avanço das frentes de desenvolvimento pelo método *drill and blast* é feito através de rodadas, nas quais uma determinada seção do túnel é aberta por vez, e cada rodada é definida por um ciclo de operações: o ciclo de desenvolvimento. Esse ciclo é composto por cinco operações fundamentais: perfuração, desmorte, limpeza, saneamento e contenções, sendo que cada operação possui suas particularidades, podendo variar de acordo com o método de lavra, litologia e necessidades da mina.

Figura 2 – Ciclo de desenvolvimento pelo método *drill and blast*



Fonte: HEINIÖ *et al*, 1999

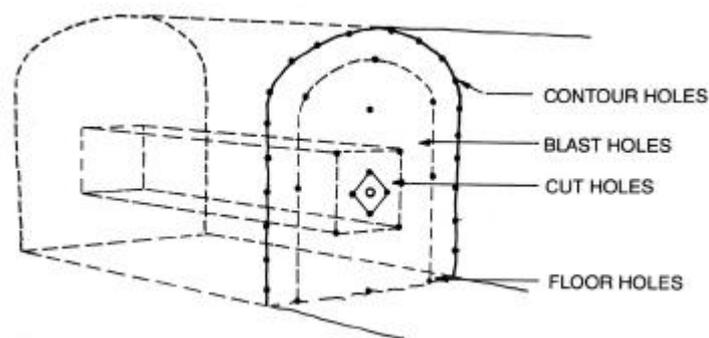
O método *drill and blast* pode ser aplicado para diferentes tipos de rocha. A versatilidade e o baixo custo dos equipamentos são vantagens ao se comparar com métodos mecânicos, porém o ciclo de desenvolvimento exige um rigoroso controle para que o avanço das frentes se mantenha estável. (HEINIÖ *et al*, 1999). Por causa disso, se faz necessário conhecer bem as etapas do ciclo e suas incertezas, o que possibilita ciclos mais dinâmicos e otimizados.

2.3 Etapas do ciclo

2.3.1 Perfuração

O ciclo de desenvolvimento se inicia pela etapa de perfuração. A malha de perfuração segue uma seção pré-definida composta por furos para carregamento, furos de contorno e furos de pilão. De acordo com Heiniö *et al.* (1999), essa seção depende de fatores como dimensões e geometria do túnel; diâmetro do furo; condições geológicas e geomecânicas, padrão de qualidade requerido, entre outros. Devido a isso, diferentes tipos de galerias podem ter seções de perfuração distintas.

Figura 3 – Tipos de furos em uma face de galeria

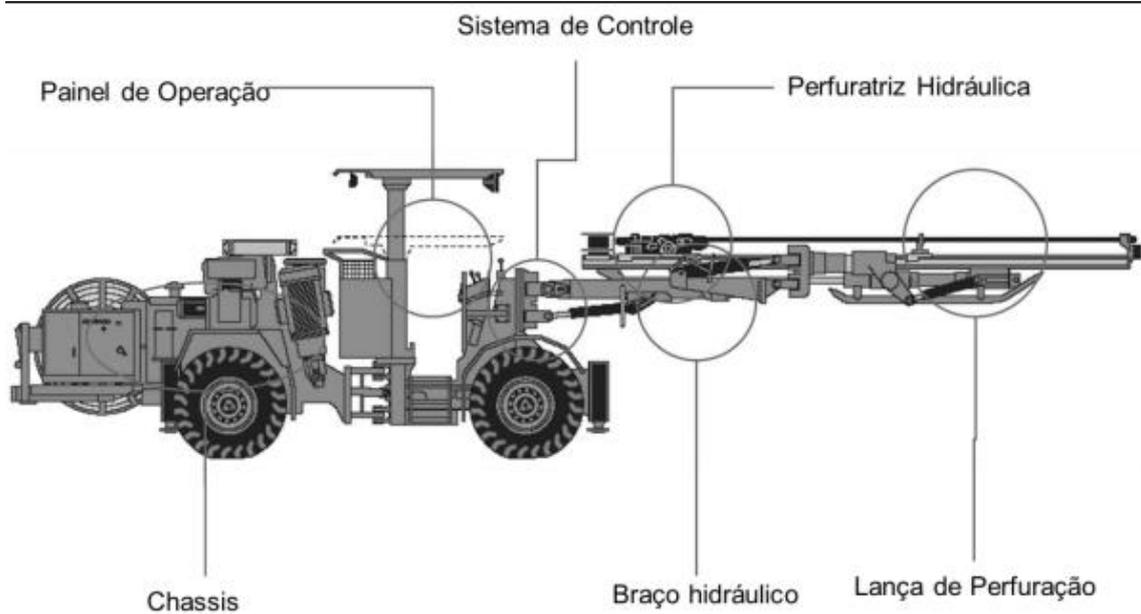


Fonte: HEINIÖ *et al.*, 1999

A Figura 3 apresenta os tipos de furo em uma seção. O pilão é o conjunto de furos na parte central da galeria, cuja função é gerar um espaço vazio para que o material fragmentado possa se expandir durante o desmonte. Os furos de carregamento recebem a carga de explosivos e os furos de contorno criam uma região de alívio que define a seção da galeria.

O equipamento normalmente utilizado nessa etapa é o Jumbo, composto por um chassi movido a diesel que contém uma ou mais perfuratrizes rotopercussivas elétricas acopladas em braços hidráulicos (PAIVA, 2016). O tamanho do bit e da haste de perfuração definem a largura e a profundidade do furo, respectivamente.

Figura 4 – Visão lateral do Jumbo e seus componentes.



Fonte: Paiva, 2016

Segundo Ortiz (2018), a perfuração é composta por 4 funções principais:

- Percussão: Responsável pelo impacto do bit com a rocha
- Rotação: Fragmenta a rocha no fundo do furo por atrito
- Avanço: Exerce pressão em direção à rocha, mantendo contato durante toda a perfuração.
- Limpeza: Remove fragmentos do interior do furo através de injeção de água e/ou ar.

2.3.2 Carregamento com explosivo e desmonte

O carregamento da frente perfurada é feito através da injeção de explosivos nos devidos furos. Essa operação pode ser feita com uso de unidades de carregamento móveis que transportam e bombeiam os explosivos para dentro dos furos (HEINIÖ *et al*, 1999).

De acordo com Nieble (2017), explosivos do tipo ANFO e emulsões são mais usados atualmente. O ANFO, sigla para *ammonium nitrate/fuel oil*, é uma mistura de nitrato de amônio com óleo diesel, sendo uma opção de baixo custo, mas não recomendada para casos de ocorrência de água. Já as emulsões são explosivos gelatinosos constituídos por nitrato de amônio, pó de alumínio, nitroglicol e outros compostos. Esse tipo de explosivo pode ser encartuchado ou bombeado diretamente no furo, possuindo maior resistência à água.

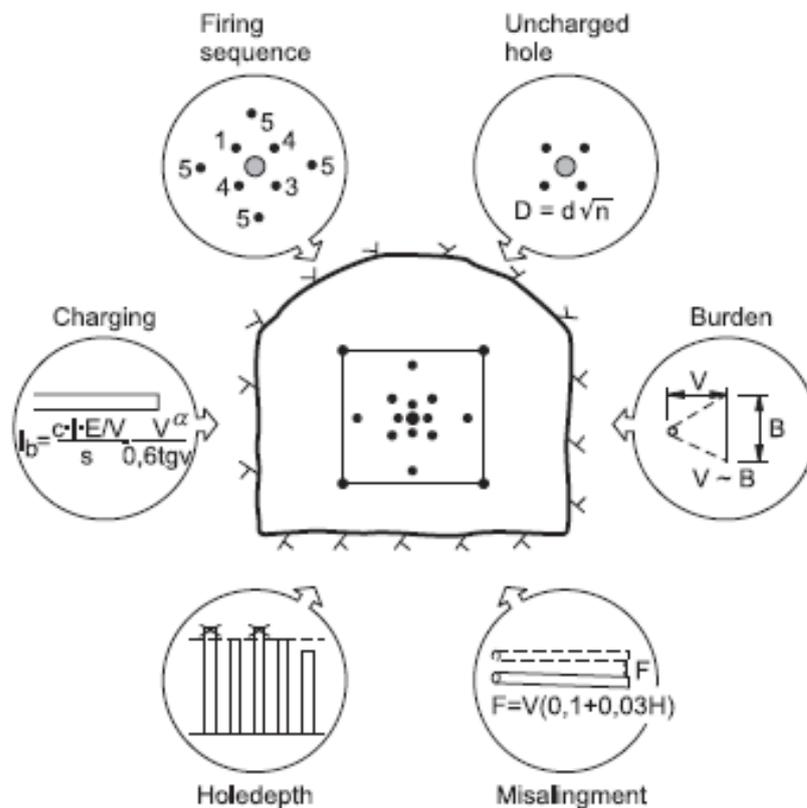
Além da carga de explosivos, é feito uso de um sistema de iniciação e ligação entre furos com finalidade de garantir que a detonação ocorra com o sequenciamento correto. (NIEBLE, 2017). De acordo com Lusk e Worsey (2011), são três tipos básicos de sistemas de iniciação:

- Elétrico: Sistema versátil acionado através de baixas correntes elétricas que possui elemento de retardo dentro do furo. Porém, Nieble (2017) afirma que sistemas elétricos estão em desuso e sendo substituídos por sistemas mais seguros.
- Não elétricos: São os sistemas mais comuns, como o cordel detonante e a escorva. O primeiro é um explosivo de alta velocidade de detonação envolto por um tubo ao longo do furo, o segundo é a junção da espoleta com o estopim colocado no fundo do furo.
- Eletrônico: Sistema moderno e de alta precisão, faz uso de microchips para acrescentar retardos nas detonações.

Em uma frente de desenvolvimento, o sequenciamento das detonações ocorre do interior para as extremidades da face, fazendo com que cada detonação forneça maior área livre para a próxima (HEINIÖ *et al*, 1999).

Segundo Heiniö *et al* (1999), o avanço da frente por ciclo, ou arranque, é definido principalmente pela profundidade da perfuração. O aumento dessa profundidade pode resultar em furos desalinhados e prejudicar a qualidade da perfuração, mas em certas condições e com equipamentos precisos, o arranque pode chegar a 8 metros. Outros fatores de impacto no arranque são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Fatores que impactam avanço



Fonte: HEINIÖ *et al*, 1999

Antes da próxima etapa do ciclo é necessário que os gases e poeira liberados pela detonação sejam dispersados pelo sistema de ventilação. O método de ventilação mais comum é a injeção de ar limpo nos túneis através de dutos, que dilui e remove os gases próximos à face (HEINIÖ *et al*, 1999). A Tabela 1 apresenta os valores tolerados de gases tóxicos.

De acordo com Nieble (2017), a concentração desses gases deve ser monitorada através de instrumentos de medição. A ventilação e o controle de gases poluentes contribuem para a segurança da operação.

Tabela 1 – Limites de tolerância para diferentes gases

Gás	Limite de tolerância
CO	39 ppm
CO ₂	3900 ppm
NOX	12 ppm
NH ₃	8 ppm
H ₂ S	8 ppm
SO ₂	2 ppm
O ₂	19,5%
NH ₄	1%

Fonte: Casagrande, 2018

2.3.3 Limpeza de frente

Quando as condições do ar próximo à face de desenvolvimento atingem níveis aceitáveis, o ciclo segue para a etapa de limpeza de frente. Nessa etapa, o material desmontado é carregado em caminhões por carregadeiras articuladas conhecidas como LHDs (Load-Haul-Dump) e transportado para determinado destino.

As LHDs são máquinas relativamente baixas e de estrutura articulada, o que facilita a movimentação em galerias subterrâneas. Segundo Darling et al (2011), elas possuem uma concha frontal cuja capacidade varia de 3 a 10 m³, de acordo com as dimensões das galerias e produtividade planejada. O autor também afirma que as LHDs podem ser elétricas ou movidas à diesel, sendo que a segunda opção oferece maior versatilidade e facilidade de locomoção, comparado a modelos elétricos. Esse equipamento também possui uma cabine para operação, protegendo o operador contra queda de blocos em áreas instáveis.

Figura 6 – LHD movida à diesel



Fonte: McCarthy, 2011

Os caminhões utilizados para transporte de material em limpeza de frentes de desenvolvimento são rebaixados, podendo ser do tipo articulado ou rodoviário. Esses equipamentos podem ter capacidades de até 60 toneladas, sendo que maiores capacidades resultam em um menor custo operacional, mas em contrapartida requerem rampas, galerias e sistema de ventilação de maiores proporções (MCCARTHY, 2011)

Segundo McCarthy (2011), deve existir uma compatibilidade entre caminhão e carregadeira, para que o caminhão tenha sua caçamba completamente cheia com 3 a 5 passes da carregadeira.

2.3.4 Saneamento

Uma consequência da detonação de uma frente de desenvolvimento é o fraturamento do maciço rochoso presente no teto e nas laterais da seção desmontada. Esse fraturamento provoca a ocorrência de fragmentos de rocha soltos conhecidos como “chocos”, que podem cair a qualquer momento causando perdas materiais, lesões e até fatalidades (FARIA, 2008).

A etapa de saneamento serve para remover os “chocos” da frente avançada após a limpeza de material, a fim de neutralizar o risco de queda de fragmentos de rochas no local. De acordo com Cline (2011), o saneamento pode ser realizado manualmente, com uso de uma alavanca apropriada, ou de forma mecânica com

equipamentos conhecidos como *Scalers*. O autor também afirma que o saneamento manual é uma tarefa difícil e demorada, enquanto a operação mecânica é mais rápida e segura.

A alavanca utilizada no abatimento de “choco” manual é uma haste metálica de variado comprimento com ponteira de aço na extremidade (FARIA, 2008). Alguns modelos também contam com um cinzel de determinado ângulo na outra extremidade.

Já os *Scalers*, utilizados no abatimento de “choco” mecanizado, são equipamentos robustos constituídos por um braço hidráulico e telescópico com um rompedor percussivo em sua extremidade. O braço é montado em um chassi sobre rodas e movido a diesel, contendo também uma cabine para operação (FARIA, 2008). Dentro da cabine, o operador consegue identificar e abater os “chocos” rapidamente e com segurança.

Figura 7 – Equipamento tipo *Scaler* em operação



Fonte: Normet. Disponível em: <https://www.normet.com>. Acesso em: 15 jul. 2021.

2.3.5 Contenções

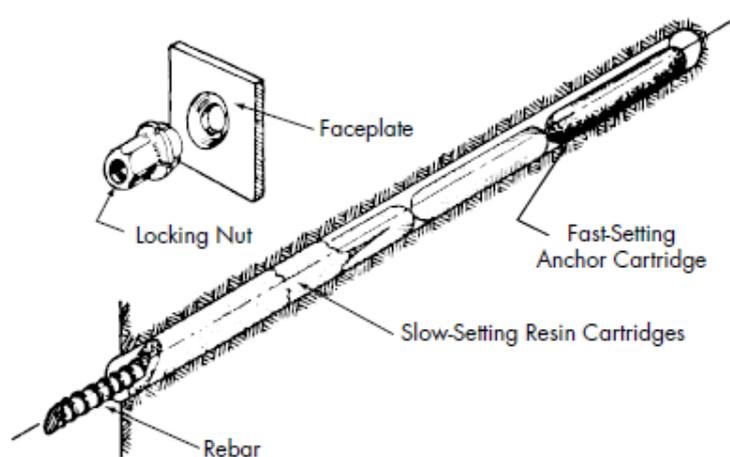
Após o abatimento dos “chocos” na etapa de saneamento, a frente de desenvolvimento fica liberada para a última etapa do ciclo: as medidas de contenção

do maciço rochoso. O tipo de contenção depende da qualidade do maciço, sendo que maciços de pior qualidade podem precisar de múltiplas medidas de contenção para cada ciclo (HADJIGEORGIU; POTVIN, 2011)

Curi (2017) cita como métodos mais comuns de sustentação a ancoragem com tirantes, concreto projetado e suporte com estruturas metálicas. O primeiro é descrito pelo autor como a introdução de parafusos de aço no teto da galeria avançada, com objetivo de aumentar a resistência à tração do maciço e torná-lo autossustentado.

A ancoragem com tirantes pode ser mecânica, onde diferentes tipos de tirantes podem ser utilizados, ou pode ser química, que faz uso de cimento ou resina (SILVA, 2019). Segundo Bawden (2011), o método de atirantamento com resina utiliza cartuchos de resina de secagem rápida (inseridos no fundo do furo) e cartuchos de secagem lenta, onde o tirante então é inserido no furo e rotacionado, misturando a resina e gerando torque. Tal método cria uma forte ancoragem e previne a corrosão dos tirantes.

Figura 8 – Esquema de ancoragem com tirante e resinas



Fonte: Bawden, 2011

O atirantamento, operação responsável pela instalação de tirantes, é normalmente realizado de forma mecanizada através de equipamentos do tipo *Rock Bolter*. Essa máquina é semelhante ao Jumbo, citado anteriormente, podendo até compartilhar do mesmo chassi, tendo como diferença seu braço hidráulico, que é

equipado com uma perfuratriz, mangueira para injeção de resinas, suporte para tirantes (*magazine*) e parafusadeira para tirantes (BAWDEN, 2011). A aplicação de tirantes segue uma malha cujo espaçamento entre tirantes depende da qualidade do maciço, sendo menor nos casos de maciços mais fraturados.

Figura 9 – *Boltec S*, equipamento do tipo *Rock Bolter*.



Fonte: Epiroc. Disponível em: <https://www.epiroc.com>. Acesso em: 15 jul. 2021.

A projeção de concreto pode ser usada em conjunto com o atirantamento para estabilização de galerias onde o maciço rochoso se encontra mais fraturado. Hadjigeorgiou e Potvin (2011) descrevem esse tipo de suporte como a aspersão de concreto em alta pressão no teto, nas laterais e na face da galeria com objetivo de suportar pequenos fragmentos de rocha nesses locais. O autor também afirma que geralmente é aplicada uma camada de 50 a 75 mm de concreto, que também pode conter aditivos para maior durabilidade e fibras de aço na mistura para evitar rachaduras e aumentar a resistência à tração do material. Hoek, Kaiser e Bawden (1995) complementam que para maior aderência do concreto à superfície, essa deve ser lavada previamente com jato de ar e água.

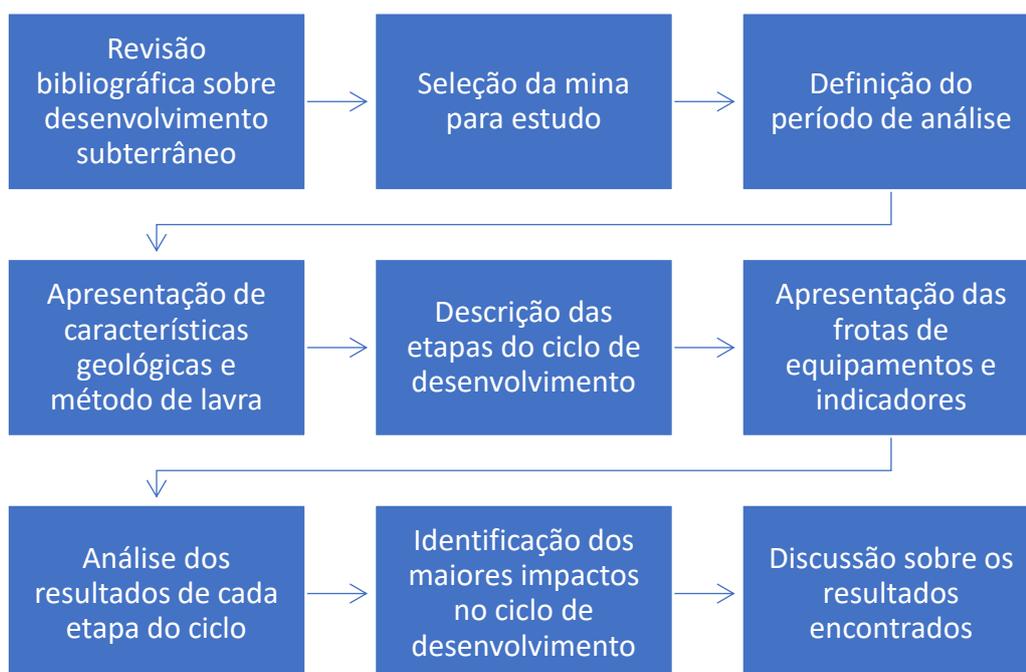
Os métodos básicos de aplicação de concreto projetado são o *dry-mix* e o *wet-mix*, sendo o segundo utilizado em 90% dos casos por apresentar maior qualidade e produtividade. No método *wet-mix* a mistura de água, cimento e agregados é feita com

antecedência e carregada no equipamento de projeção de concreto, que adiciona aditivos à mistura e projeta o material com alta pressão e velocidade por bombeamento e injeção de ar comprimido. Pressão e velocidade são importantes para que o concreto tenha boa aderência à superfície do maciço (BASF, 2014).

Em galerias subterrâneas, a projeção de concreto por método *wet-mix* é realizada por equipamentos móveis adaptados, constituídos por bomba de concreto, sistema de dosagem de aditivos, velocidade e pressão, e braço hidráulico com mangueira para projeção. Esses equipamentos recebem a carga de concreto de caminhões betoneira e podem ser operados com controle remoto, a uma distância segura (BASF, 2014).

3 METODOLOGIA

Com o objetivo de descrever o ciclo de desenvolvimento pelo método *drill and blast* e estudar os resultados e impactos de um cenário real, este trabalho foi desenvolvido de acordo com a seguinte metodologia:



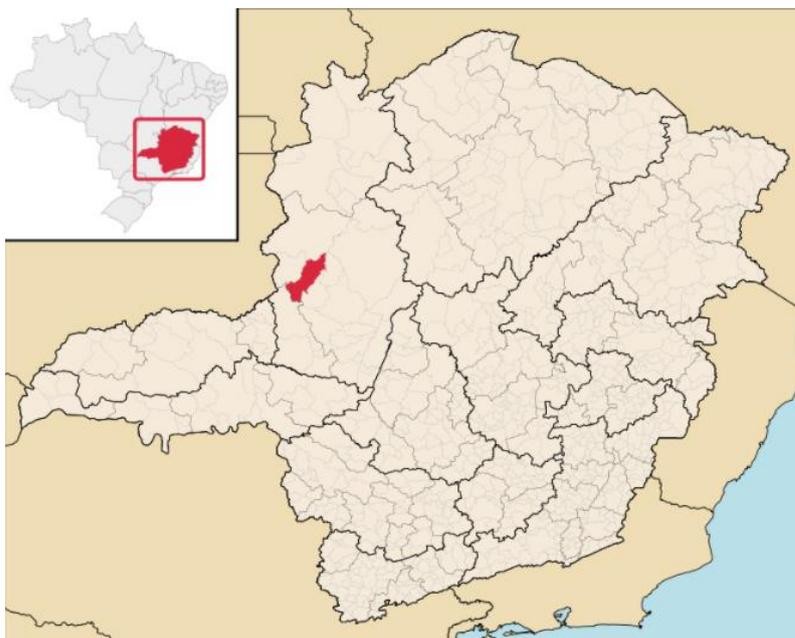
O estudo de caso teve como base o desenvolvimento subterrâneo na Mina Vazante, em um período de 6 meses. Os dados utilizados foram coletados do banco de dados do sistema de despacho usado pela empresa. Esses dados foram exportados para o Excel e analisados em conjunto com suas metas, na forma de indicadores.

Dessa forma, os indicadores de cada etapa do ciclo foram analisados, permitindo a identificação de impactos no processo e discussão sobre possíveis causas desses impactos, levando em consideração fatores observados durante o período do estudo.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo em questão tem como base a Unidade Vazante, mina de zinco que pertence à Nexa Resources, antiga Votorantim Metais. Essa unidade se localiza na cidade de Vazante, presente na zona Noroeste de Minas Gerais, e se divide em duas minas subterrâneas: Mina Vazante e Mina Extremo Norte.

Figura 10 – Município de Vazante destacado no mapa de Minas Gerais



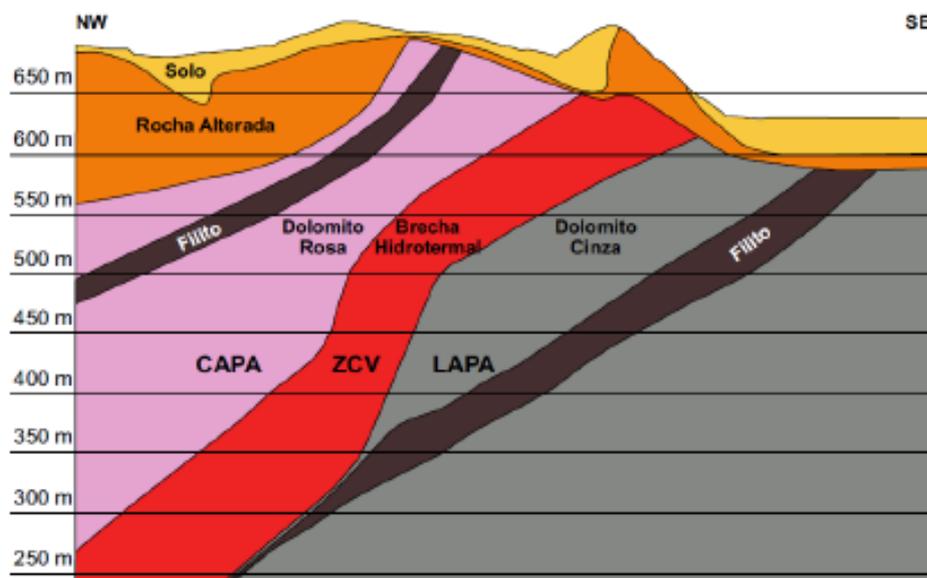
Fonte: WIKIPEDIA, 2021

4.1 Geologia

O depósito em questão faz parte da Zona de Cisalhamento Vazante, uma estrutura tectônica de 12 km de extensão com mergulho de 60° e direção de mergulho de 320° . Nessa região, o minério de zinco se encontra no mineral minério willemita, localizado em brechas hidrotermais denominadas brechas willemíticas, que possuem formato lenticular de extensão média. A litologia da área também apresenta dolomito rosa no *hanging wall* (capa) e dolomito cinza no *foot wall* (lapa), além da presença de filito inserido nos dois tipos de dolomito (CHARBEL, 2015)

O perfil geológico da zona é apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Perfil geológico da Zona de Cisalhamento Vazante.



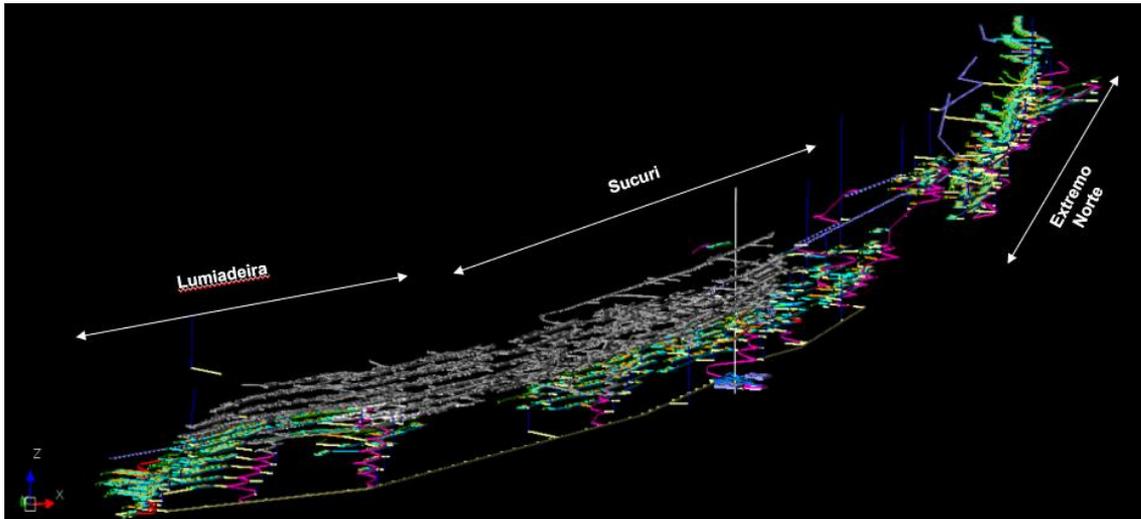
Fonte: CHARBEL, 2015

4.2 Mina

As minas Vazante e Extremo Norte podem ser consideradas rasas por possuírem profundidade de aproximadamente 500 m e 350 m, respectivamente. Entretanto, a grande extensão da Zona de Cisalhamento Vazante permitiu que a mina se desenvolvesse horizontalmente por maiores distâncias para alcançar os corpos de minério ao longo dessa falha. A Mina Vazante é mais extensa e se divide em duas regiões: Sucuri e Lumiadeira. Sua extensão total chega a aproximadamente 5 km, enquanto a da mina Extremo Norte, 2 km.

A figura 12 apresenta o perfil longitudinal das regiões Lumiadeira e Sucuri da mina Vazante e da mina Extremo Norte.

Figura 12 – Perfil longitudinal das minas Vazante e Extremo Norte



Fonte: Nexa Resources

É previsto pelo planejamento de médio e longo prazo a união subterrânea entre as duas minas e o aprofundamento delas, a fim de se explorar novos corpos de minério e prolongar a vida útil do empreendimento. Para que isso seja possível, o nível de água subterrânea deve ser abaixado, o que é feito através de *raises* e galerias de drenagem que direcionam a água da mina para estações de bombeamento de alta capacidade.

4.3 Lavra

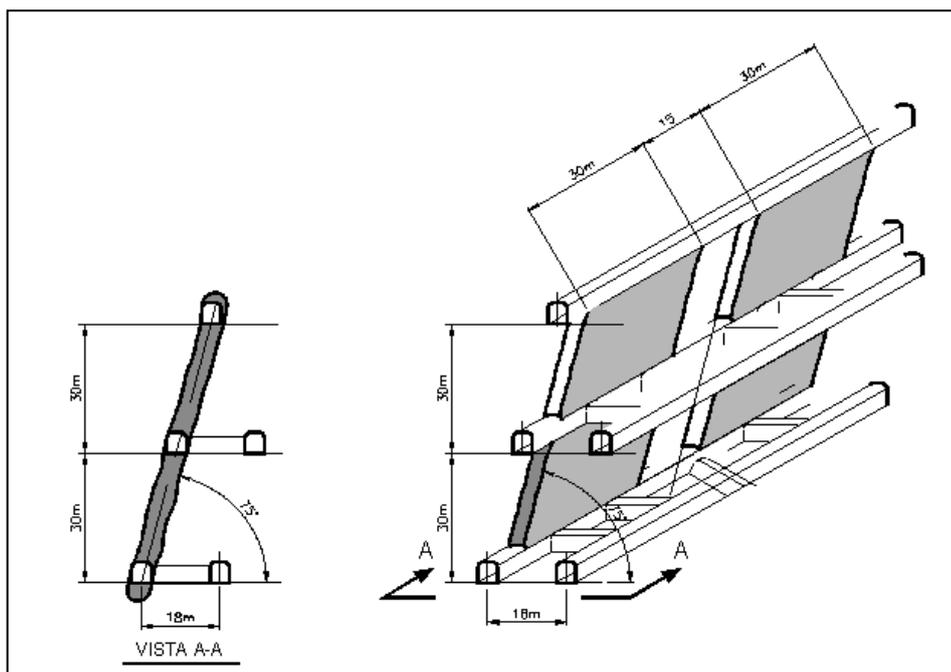
A lavra na Unidade Vazante é realizada por dois métodos: *Vertical Retreat Mining* (VRM) e *Sublevel Open Stope*, também conhecido como método de realces abertos.

O método VRM, conforme Curi (2017), funciona lavrando em recuo blocos de minério entre três níveis, e em fatias verticais. O autor também afirma que o método é indicado para corpos de forte mergulho (acima de 45°) e utiliza perfurações longas e de grande diâmetro. A perfuração é realizada por equipamentos tipo *fandril*, capazes de perfurar furos em leque de forma ascendente ou descendente. Os realces abertos com acesso por níveis superiores são preenchidos por estéril.

O método *Sublevel Open Stope* é similar ao VRM, com a diferença de realizar perfurações apenas ascendentes, sem ligação com nível superior ao bloco.

A figura 13 representa o modelo VRM utilizado na Unidade Vazante.

Figura 13 – Representação longitudinal de bloco de lavra por método VRM



Fonte: Nexa Resources

4.4 Desenvolvimento

O desenvolvimento de rampas e galerias nas minas da Unidade Vazante é realizado de forma cíclica pelo método *drill and blast*. A Mina Vazante pode ser acessada pela Rampa 7, na região Lumiadeira, e pela Rampa 10, na região Sucuri, enquanto a Mina Extremo Norte é acessada pela Rampa 1. Devido à grande extensão da Mina Vazante, as duas rampas de acesso são ramificadas em outras 9 rampas com acesso a níveis mais profundos, permitindo que corpos de minério sejam explorados ao longo de toda a mina.

O aprofundamento da mina através dessas rampas permite o acesso a vários níveis, cada vez mais profundos. Tais níveis são desenvolvidos por galerias horizontais de diferentes tipos, sendo eles:

- Galeria de Acesso (AC): Ligam a rampa ao nível a ser desenvolvido.
- Galeria de Transporte (GT): Galerias primárias e de grande extensão, usadas para transporte de material pelo nível.
- Travessa (TR): Galeria de menor extensão usada para ligar galerias paralelas entre si.
- Galeria de Minério (GM): Galeria escavada ao longo do corpo de minério, para que esse possa ser lavrado posteriormente.
- Galeria de Drenagem (GD): Galeria de grande extensão usada em certos níveis para direcionamento de água até estações de bombeamento.
- Galeria de Pesquisa (GP): Usada para pesquisa mineral de áreas inexploradas.
- Gaveta (GV): Escavações de pequena extensão, usadas para diversas finalidades, como instalação de banheiros, câmaras de refúgio, subestações de energia etc.

A seguir serão descritas as etapas do ciclo de desenvolvimento da Unidade Vazante, suas frotas relacionadas, indicadores de controle e metas para o período de análise.

4.4.1 Limpeza de frente

A limpeza de frentes de desenvolvimento é realizada por carregadeiras tipo LHD e caminhões rebaixados. A frota de carregadeiras conta com 6 carregadeiras CAT R1700G e 2 CAT R1700, com capacidades de carga de 12,5 e 15 toneladas, respectivamente. Já a frota de caminhões possui 17 equipamentos no total, sendo esses descritos na Tabela 2:

Tabela 2 – Dados da frota de caminhões na Unidade Vazante

CAMINHÃO	QUANTIDADE	CAPACIDADE (ton)
VOLVO A30G	7	29,0
VOLVO A30F	7	28,0
VOLVO FMX 460 6x4R	3	28,1

Fonte: Nexa Resources

A frota de caminhões e carregadeiras atendem tanto frentes de desenvolvimento quanto os blocos de lavra. Dessa forma, o indicador chave para a limpeza de frentes é o número de frentes limpas por dia, com meta de 12 frentes no período analisado.

4.4.2 Saneamento

Após a limpeza da frente, o saneamento de chocos é realizado de forma mecanizada com equipamentos tipo Scaler. Durante a instalação, a máquina é estabilizada por patolas e conectada a painel elétrico próximo à frente. O saneamento é realizado no teto e nas laterais da seção que foi limpa e, além disso, é feita uma conferência ao longo da galeria já desenvolvida e abatimento de chocos pontuais.

A frota de Scalers do desenvolvimento é composta por 6 Scalers de dois modelos distintos, e seus indicadores de controle são Disponibilidade (DF) e Utilização (UF), conforme indicado na Tabela 3:

Tabela 3 – Dados da frota de *Scalers* na Unidade Vazante

MODELO	QUANTIDADE	DF (meta)	UF (meta)
BTI - HSF 25	4	61,9%	51,6%
NORMET - SCAMEC 2000S	2	61,9%	51,6%

Fonte: Nexa Resources

4.4.3 Atirantamento

A próxima etapa do ciclo é a estabilização da frente desenvolvida com aplicação de tirantes. Equipamentos tipo Rock Bolter são usados para essa atividade, realizando etapas de perfuração, inserção de resinas, aplicação e torqueamento de tirantes. A malha de atirantamento usada segue o padrão “pé de galinha”, e o espaçamento entre tirantes varia de acordo com a qualidade do maciço, de 1,0m (rochas friáveis) a 1,8m (rochas competentes).

Além dos indicadores de disponibilidade e utilização, o desempenho dos equipamentos é medido pela produtividade, sendo essa a razão de tirantes aplicados por hora trabalhada.

Tabela 4 – Dados da frota de atirantamento na Unidade Vazante

MODELO	QUANTIDADE	DF (meta)	UF (meta)	Prod. (meta)
ATLAS COPCO - 235 S	2	62,0%	35,1%	7,55 tir./h
ATLAS COPCO - H827	1	62,0%	35,1%	7,55 tir./h
SANDVIK - DS 311 C	1	62,0%	35,1%	7,55 tir./h

Fonte: Nexa Resources

4.4.4 Projeção de concreto

O desenvolvimento de galerias em regiões com presença de rochas de menor qualidade, como o filito, precisam ter o teto e laterais projetados com uma camada de 5 cm de concreto, sendo que a avaliação da necessidade de uso desse tipo de contenção é realizada pela equipe de Mecânica de Rochas. A operação pode acontecer antes ou após o atirantamento, e é realizada por equipamento projetor de concreto, e a frente é liberada para a próxima etapa do ciclo após um período de 6 horas para cura do concreto.

A Unidade Vazante conta com 2 equipamentos para essa atividade, tendo como indicadores de controle DF, UF e produtividade em m³ de concreto por hora trabalhada, conforme exibido na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados da frota de projeção de concreto na Unidade Vazante

MODELO	QUANTIDADE	DF (meta)	UF (meta)	Prod. (meta)
NORMET - 6050 WPC	2	45,0%	22,0%	5,5 m ³ /h

Fonte: Nexa Resources

4.4.5 Perfuração

A perfuração é realizada após a frente ser marcada pela equipe de topografia, com *grade*, direção e malha de perfuração. A malha em questão segue dois padrões:

um com 4,50 m de largura e 4,50 m de altura, com espaçamento de 0,90 m entre furos, e outro com seção de 5,0 m x 5,0 m, com 0,80 m de espaçamento. A primeira seção é usada para GMs, e a segunda para demais tipos de galerias.

O Jumbo perfura com 4,30 m de profundidade e 51 mm de diâmetro, tendo 5 furos do pilão alargados para 102 mm. São apresentadas na Tabela 6 informações sobre a frota e seus indicadores.

Tabela 6 – Dados da frota de Jumbos na Unidade Vazante

MODELO	QUANTIDADE	DF (meta)	UF (meta)	Prod. (meta)
ATLAS COPCO - 282 S	4	65,2%	40,2%	103,4 m/h
ATLAS COPCO - S2 C	1	65,2%	40,2%	103,4 m/h

Fonte: Nexa Resources

4.4.6 Carregamento e desmonte

Na etapa de carregamento, os furos são bombeados com explosivo tipo emulsão, tendo como sistema de iniciação não elétrico o uso de escorva e cordel detonante. A Unidade Vazante tem esse processo realizado por empresa terceira e, devido a isso, é acompanhado pelo Desenvolvimento apenas o indicador de frentes carregadas por dia, cuja meta é de 12 frentes.

O desmonte da frente é a etapa final do ciclo, e tem como resultado o avanço da galeria. Esse avanço é levantado por escaneamentos da equipe de topografia, e medido por metros desenvolvidos, com meta diária de 46 metros no período de análise.

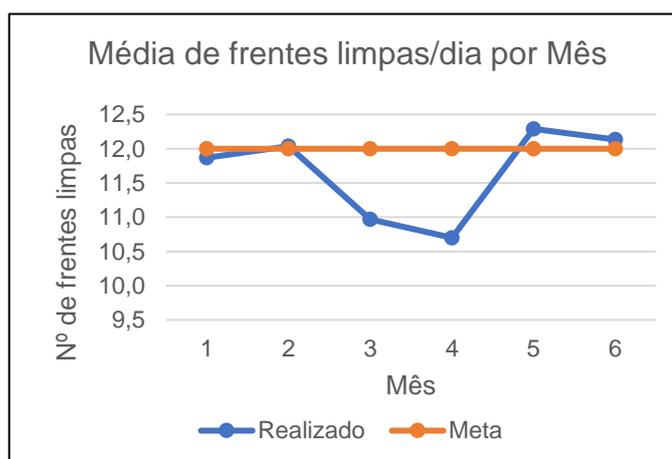
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo, serão analisados os resultados referentes aos indicadores chave para cada uma das etapas do ciclo de desenvolvimento da Unidade Vazante, dentro do período de análise de 6 meses. Além disso, os resultados serão discutidos buscando-se compreender os fatores que geram impacto em tais indicadores.

5.1 Limpeza de frente

O resultado da média de limpeza de frentes de desenvolvimento por dia para os meses analisados é apresentado no Gráfico 1:

Gráfico 1 – Resultado da média de frentes limpas/dia no período analisado



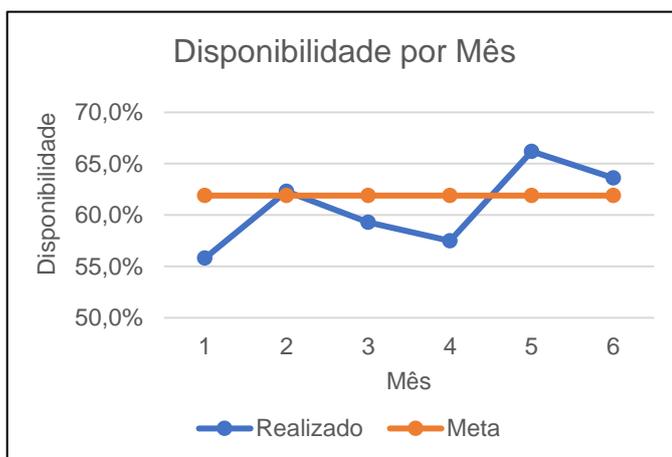
Fonte: Nexa Resources

Observa-se pelo gráfico que o indicador foi mais impactado nos meses 3 e 4. Uma das causas desse impacto é a priorização da frota para carregamento e transporte de minério em blocos de lavra. Já nos meses 5 e 6, o indicador fica acima da meta, sendo um dos motivos o maior número de frentes de minério no desenvolvimento.

5.2 Saneamento

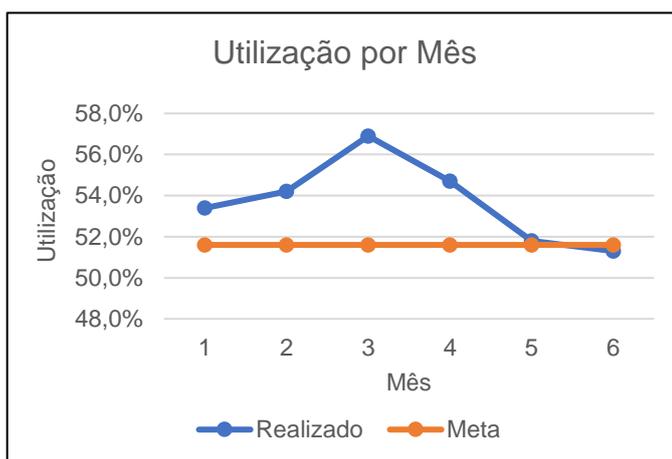
O rendimento da frota responsável pelo saneamento, analisado pelos indicadores de DF e UF, é apresentado nos gráficos abaixo:

Gráfico 2 – Resultado da disponibilidade da frota de *Scalers* no período analisado



Fonte: Nexa Resources

Gráfico 3 – Resultado da utilização da frota de *Scalers* no período analisado



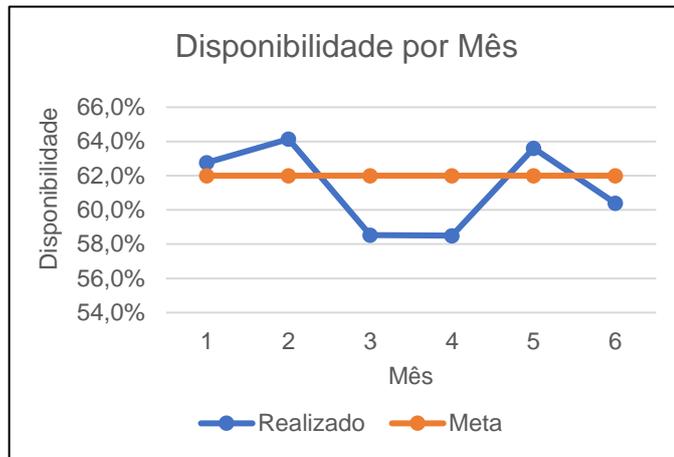
Fonte: Nexa Resources

Pode-se observar que os meses 1, 3 e 4 foram impactados pela baixa disponibilidade dessa frota, o que sucedeu em uma maior utilização nesse período. Já nos meses 4 e 5, a disponibilidade ficou acima da meta, resultando em maior ociosidade dos equipamentos e, conseqüentemente, menor utilização.

5.3 Atirantamento

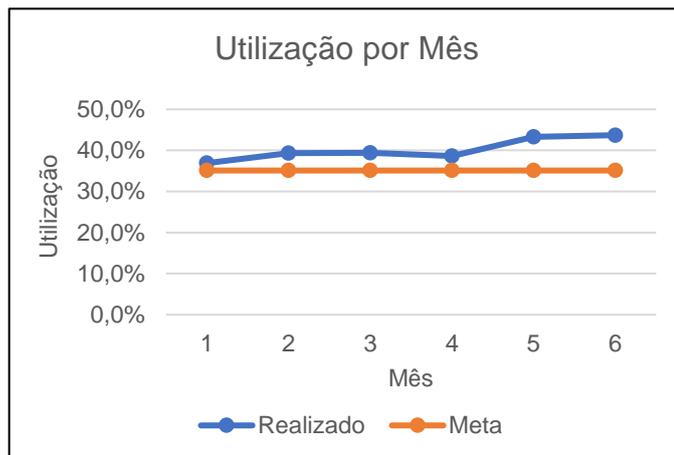
Os indicadores referentes à etapa de atirantamento são apresentados nos gráficos abaixo:

Gráfico 4 – Resultado da disponibilidade da frota de atirantamento no período analisado



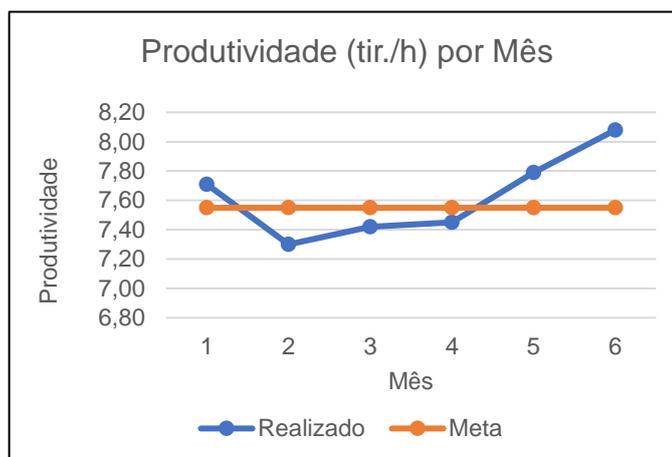
Fonte: Nexa Resources

Gráfico 5 – Resultado da utilização da frota de atirantamento no período analisado



Fonte: Nexa Resources

Gráfico 6 – Resultado da produtividade da frota de atirantamento no período analisado



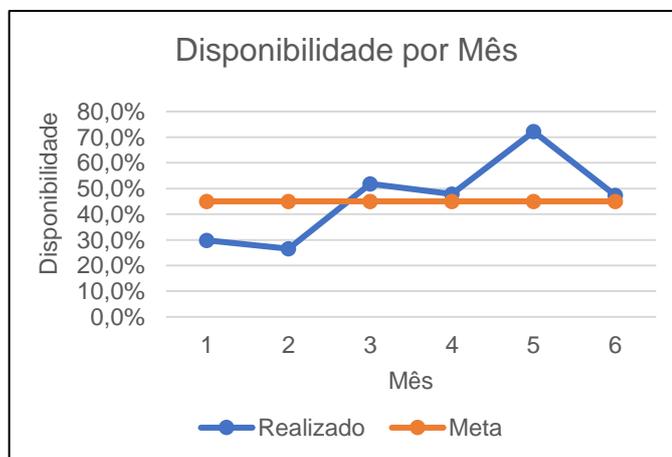
Fonte: Nexa Resources

O atirantamento teve maior impacto no ciclo de desenvolvimento nos meses 3 e 4, isso se dá pela perda de eficiência por baixas disponibilidade e produtividade. Essa baixa eficiência resulta em atraso nessa etapa, fazendo subir o número de frentes aguardando atirantamento e liberando poucas frentes para a próxima etapa do ciclo, tornando a etapa um gargalo para o processo.

5.3 Projeção de concreto

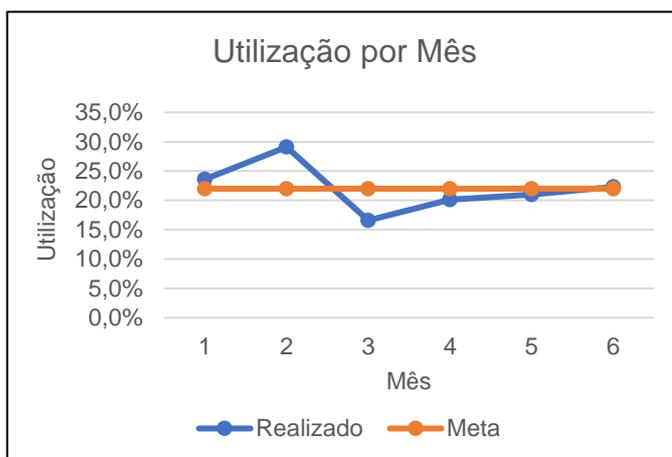
A etapa de projeção de concreto é analisada pelos indicadores segundo os gráficos abaixo:

Gráfico 7 – Resultado da disponibilidade da frota de projeção de concreto no período analisado



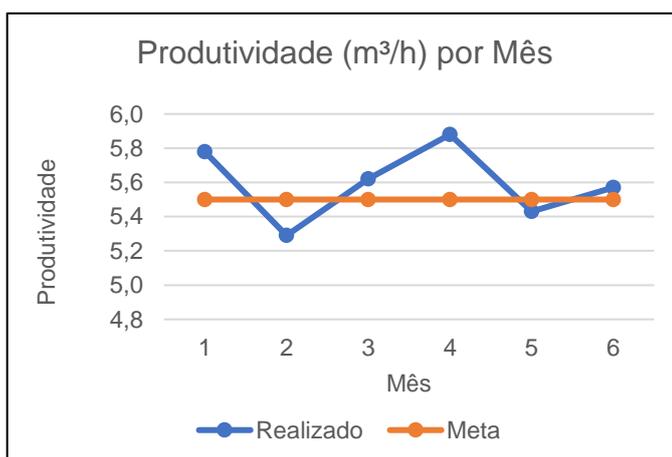
Fonte: Nexa Resources

Gráfico 8 – Resultado da utilização da frota de projeção no período analisado



Fonte: Nexa Resources

Gráfico 9 – Resultado da produtividade da frota de projeção de concreto no período analisado



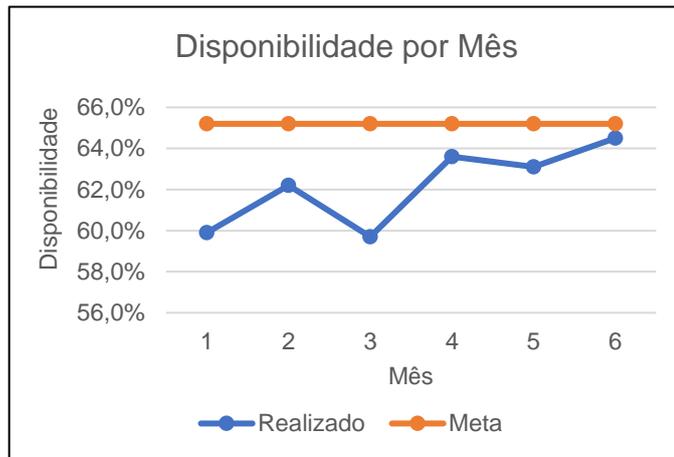
Fonte: Nexa Resources

A disponibilidade dos projetores de concreto foi baixa nos dois primeiros meses devido à reforma de um dos equipamentos. Já a produtividade apresentou oscilações ao longo desses meses, o que pode ser justificado pela variação na performance das máquinas.

5.4 Perfuração

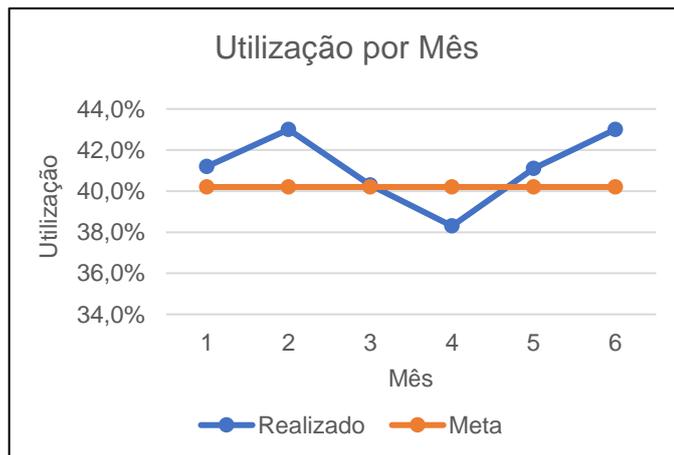
A perfuração de frentes de desenvolvimento também é controlada pelos indicadores de sua frota, sendo apresentados a seguir:

Gráfico 10 – Resultado da disponibilidade da frota de perfuração no período analisado



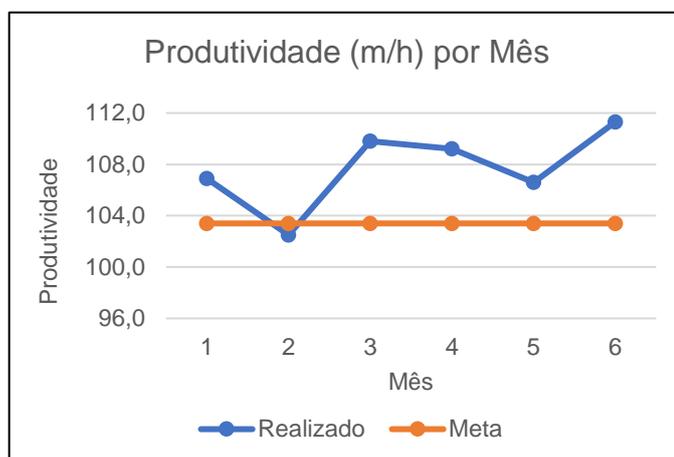
Fonte: Nexa Resources

Gráfico 11 – Resultado da utilização da frota de perfuração no período analisado



Fonte: Nexa Resources

Gráfico 12 – Resultado da produtividade da frota de perfuração no período analisado



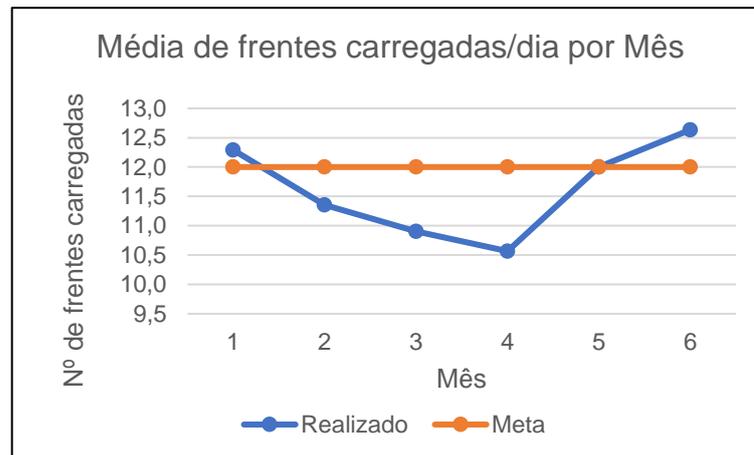
Fonte: Nexa Resources

Na etapa de perfuração, observa-se um impacto no indicador de disponibilidade ao longo dos meses analisados, sendo um dos motivos longas paradas para reforma de alguns dos Jumbos. Entretanto, o indicador de produtividade mostra uma boa performance dos equipamentos, que vem aumentando junto com a DF.

5.5 Carregamento e desmonte:

O indicador de média de frentes carregadas por dia, para o período analisado, é exibido no Gráfico 13:

Gráfico 13 – Resultado da média de frentes carregadas/dia no período analisado

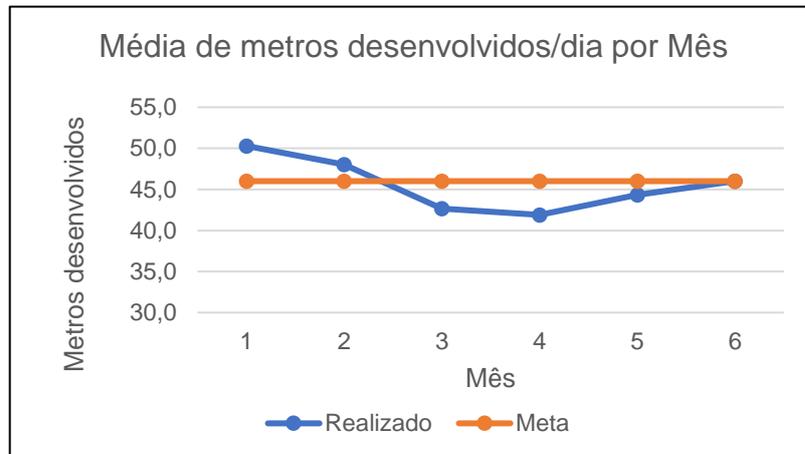


Fonte: Nexa Resources

A média de frentes carregadas por dia se mostra em queda nos quatro primeiros meses, ficando abaixo da meta do mês 2 ao mês 4, e alcançando o valor esperado nos meses 5 e 6. O impacto mais relevante nessa etapa do ciclo é a falta de frentes perfuradas para serem carregadas, como consequência de atrasos e impactos provenientes das etapas anteriores.

A conclusão de cada ciclo de desenvolvimento resulta em um valor de metros desenvolvidos, sendo de 4 metros a média de avanço no período analisado. O Gráfico 14 apresenta o resultado de média de metros desenvolvidos por dia nos meses estudados:

Gráfico 14 – Resultado da média de metros desenvolvidos/dia no período analisado



Fonte: Nexa Resources

Observa-se que o indicador ficou abaixo da meta nos meses 3, 4 e 5, tendo maior impacto nos meses 3 e 4. A performance do desenvolvimento é consequência da eficiência de suas etapas, sendo assim, é possível identificar quais etapas impactaram negativamente o ciclo nesses dois meses.

Pela análise dos indicadores por etapa, foi observado que o baixo número de frentes limpas e a baixa disponibilidade das frotas de saneamento e atirantamento foram os fatores mais relevantes para o não cumprimento da meta de desenvolvimento nos meses 3 e 4.

A limpeza de frentes pode ser impactada por fatores relacionados à frota de carregamento e transporte, como baixas DF, UF e produtividade. Outra variável que pode prejudicar o indicador é a distância média de transporte, que aumenta o tempo de viagens dos caminhões, diminuindo o número de frentes limpas por dia. Além disso, fatores estratégicos como a priorização da frota para limpeza de blocos de lavra também afeta a limpeza de frentes de desenvolvimento.

Em relação à disponibilidade das frotas, o impacto pode vir de fatores como atrasos em manutenções preventivas, menor período entre falhas, maior tempo de reparo e descuidos operacionais.

Para melhor compreensão dos problemas envolvendo os indicadores citados acima, se faz necessário uma análise de causas raízes, em conjunto com as áreas de Transporte e Manutenção Automotiva.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho descreveu o funcionamento do desenvolvimento de galerias subterrâneas pelo método *drill and blast*, com foco nas etapas do ciclo de desenvolvimento, trazendo conceitos da literatura existente e as principais características de cada etapa.

Um estudo de caso apresentou o desenvolvimento subterrâneo na Mina Vazante, citando as suas características geológicas, as regiões da mina subterrânea e os métodos de lavra utilizados. Tal estudo teve como foco descrever as etapas do ciclo de desenvolvimento na mina, as frotas responsáveis por cada uma delas e seus indicadores de controle e, além disso, analisar as etapas que impactaram o desenvolvimento em determinado período.

O método de estudo escolhido foi a análise do desenvolvimento na Mina Vazante em um período de 6 meses, através da comparação entre valores realizados e esperados por mês dos indicadores operacionais de cada etapa do ciclo.

A partir dessa análise, foi observado que o controle sobre os indicadores por etapa do ciclo facilita a identificação de impactos e “gargalos” no processo de desenvolvimento. No período analisado, observou-se menor desenvolvimento nos meses 3 e 4, sendo impactados pela etapa de limpeza de frente, pelo baixo número da média de frentes limpas por dia, e pelas etapas de saneamento e atirantamento, devido à baixa disponibilidade da frota nesse período.

Foram levantadas possibilidades de causas para os impactos analisados. Entretanto, para determinação precisa de causas raízes desses problemas, se faz necessário um estudo mais aprofundado sobre as variáveis de influência sobre esses indicadores, envolvendo também outras áreas como Manutenção e Transporte.

REFERÊNCIAS

- BASF (ed.). **Sprayed Concrete for Ground Support**. 13. ed. Mannheim: BASF Construction Chemicals Europe Ltd, 2014.
- BAWDEN, William F. **Ground Control Using Cable and Rock Bolting**. In: DARLING, Peter. **SME Mining Engineering Handbook**, Terceira Edição. Cap. 8.8, 2011.
- CHARBEL, Paulo André. **Gerenciamento de Risco Aplicado à Diluição de Minério**. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2015.
- CLINE, Joe. **Construction of Underground Openings and Related Infrastructure**. In: DARLING, Peter. **SME Mining Engineering Handbook**, Terceira Edição. Cap 12.6. 2011.
- CURI, Adilson. **Lavra de Minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- FARIA, Mário Parreiras de. **Fatores Intervenientes Na Segurança Do Trabalho De Abatimento Mecanizado De Rochas Instáveis Em Uma Mina Subterrânea De Ouro**. 2008. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Medicina, Faculdade de Medicina, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- HADJIGEORGIOU, John; POTVIN, Yves. **Hard-Rock Ground Control with Steel Mesh and Shotcrete**. In: DARLING, Peter. **SME Mining Engineering Handbook**, Terceira Edição. Cap 8.6. 2011.
- HEINIÖ, Matti. (ed.). **Rock Excavation Handbook**. Sandvik Tamrock Corp. 1999.
- HOEK, Evert; KAISER, Peter K.; BAWDEN, William F. **Support of Underground Excavations in Hard Rock**. Brookfield: Aa Balkema Publishers, 1995.
- LUSK, Braden; WORSEY, Paul. **Explosives and Blasting**. In: DARLING, Peter. **SME Mining Engineering Handbook**, Terceira Edição. Cap 7.3. 2011.
- MCCARTHY, Peter L. **Hard Rock Equipment Selection and Sizing**. In: DARLING, Peter. **SME Mining Engineering Handbook**, Terceira Edição. Cap 12.2. 2011.
- NIEBLE, Carlos Manoel. **Desmontes cuidadosos com explosivos: aspectos de engenharia e ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- ORTIZ, Carlos Enrique Arroyo. **Métodos de perfuração, fundamentos, características. Equipamentos de perfuração**. Operações Mineiras. DEMIN/EM/UFOP. 2018.
- PAIVA, Guilherme. **Aplicação de tecnologias de informação e automação em minas subterrâneas: desafios e perspectivas**. 138 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2016.
- SILVA, José Margarida. **Suportes Descontínuos**. Estabilidade de Escavações Subterrâneas. DEMIN/EM/UFOP. 2019.
- TUCK, Michael A. **Underground Horizontal and Inclined Development Methods**. In: DARLING, Peter. **SME Mining Engineering Handbook**, Terceira Edição. Cap 12.4. 2011.