



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto- UFOP  
Departamento de Engenharia de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM

---

**ENGENHARIA  
MINERAL**



ALMA MATER IN  
MINERALIA BRASILIENSIS

JADIR PEDRO ALVES

**AUTOMAÇÃO COMO PROCESSO DISRUPTIVO NA PERFURAÇÃO  
DE ROCHAS EM MINAS A CÉU ABERTO:  
desafios e ganhos reais**

Ouro Preto  
2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto- UFOP  
Departamento de Engenharia de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM

---



# **AUTOMAÇÃO COMO PROCESSO DISRUPTIVO NA PERFURAÇÃO DE ROCHAS EM MINAS A CÉU ABERTO: desafios e ganhos reais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Lavra de Mina

**Autor:** Jadir Pedro Alves

**Orientador:** Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Ouro Preto  
2022

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A474a Alves, Jadir Pedro.

Automação como processo disruptivo na perfuração de rochas em minas a céu aberto [manuscrito]: desafios e ganhos reais. / Jadir Pedro Alves. - 2022.

114 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Lavra de Minas.

1. Mineração a céu aberto. 2. Rochas - Perfuração. 3. Automação. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.24.05

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Jadir Pedro Alves**

### **Automação como Processo Disruptivo na perfuração de Rochas em minas a Céu Aberto: Desafio e Ganhos Reais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral, Area de concentração Lavra de Minas

Aprovada em 29 de julho de 2022

#### Membros da banca

Dr.- Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) - Univeridad Federal de Ouro Preto  
Dr. - Enrique Munaretti - Universidade Federal de Rio grande do Sul  
Dr. - Sergio Assunção Monteiro - Universidade Carioca

[Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 29/09/2022



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/09/2022, às 21:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0405827** e o código CRC **6E9A3F81**.

## **DEDICATÓRIA**

A DEUS por nos permitir viver e sentir a força do amor, mesmo em tempos difíceis nos quais tudo é peregrino;

A minha esposa, Lúcia Helena, pelo carinho e dedicação ao longo desta caminhada.

## AGRADECIMENTOS

A DEUS pela proteção, força, coragem e persistência em minha jornada;

Ao meu pai por ter ensinado o valor da realização de um sonho e mostrar-me a capacidade da pessoa humana;

À minha mãe, exemplo de humildade e sabedoria;

Ao meu sogro, sinônimo de dedicação e paciência;

À minha sogra, exemplo de oração e amor ao próximo;

À minha esposa, Lúcia Helena, pelo carinho e dedicação ao longo da nossa caminhada;

Ao meu irmão e minha irmã que sempre torceram por mim;

A todos da minha família;

Aos meus amigos e colegas de trabalho que sempre espelharam-se em mim como expoente e exemplo a ser seguido;

Aos professores e funcionários da UFOP que sempre trataram-me com cordialidade e respeito;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo, pela ajuda, atenção e oportunidade de enriquecimento cultural através dos conhecimentos adquiridos;

Aos colegas tão queridos do PPGEM por todo apoio nesta doce jornada em busca do conhecimento.

## RESUMO

Diante da crescente concorrência, exigências do mercado de trabalho, dos melhores desempenhos produtivos, do aumento na segurança nas operações, da redução na geração de resíduos e das emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente, as empresas de mineração têm procurado maneiras de, cada vez mais, tornarem-se competitivas, ou seja, apresentar vantagens em relação à concorrência através, principalmente, da redução nas perdas e otimização dos processos produtivos. Nota-se, portanto, que as lavras a céu aberto possuem vários processos operacionais que ocorrem de forma simultânea ou não, mas que são responsáveis pelo desenvolvimento e sucesso do empreendimento econômico. Esses podem ser considerados como operações unitárias e compreendem as operações de perfuração, desmonte, carregamento e transporte, na prática, essas operações quando são utilizadas para extrair o minério recebem a denominação de operações de produção. Há bastante tempo, tem-se realizado mudanças nos ciclos de operações de forma a acomodar algum tipo de equipamento ou tecnologia capaz de melhorar a adequação ao processo produtivo, uma vez que a automação é uma realidade presente e uma alternativa bastante atraente que vai ao encontro das exigências do mercado por um aumento nos diferenciais competitivos das organizações. Este trabalho descreve o uso da automação como sistema propulsor de melhorias na operação de perfuração de rochas. Desta forma, foram utilizados sete parâmetros ou componentes principais para combinar a medição durante a perfuração (*MWD*) juntamente com outras informações geradas pelos três equipamentos de perfuração de grande porte da marca *Epiroc*. Ajustes e correções nos dados coletados foram sugeridos para minimizar as influências externas, além da rocha, a fim de garantir a efetividade nas análises. Buscou-se comparar o desempenho do processo de perfuração no modo manual de operação com a perfuração no modo automático, sendo assim, o objetivo principal é tentar quantificar os benefícios advindos do uso de novas tecnologias na perfuração. Durante a pesquisa, em campo, foram coletadas informações de 617 furos perfurados em quatro diferentes bancadas, essas compostas por diversas litologias, tomadas 500 imagens de média resolução em formato 2D das faces horizontais dos furos, gerando uma imagem área de um polígono em perfuração a fim de obter dados para as análises quantitativa e qualitativa. Finalmente, são apresentados os benefícios da automação na perfuração, bem como, as possibilidades de melhorias futuras.

**Palavras-chave:** automação; perfuração de rocha; medição durante a perfuração (*MWD*); parâmetros operacionais; propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

Faced with growing competition, the market demands, better production performance, increased safety in operations, reduction in waste generation and environmentally harmful gases emissions, mining companies have increasingly sought ways to become competitive, that is, to present advantages in relation to the competition through the reduction in losses and optimization of its production processes. Open pit mining has several operational processes that occur simultaneously or not, but which are responsible for the development and success of the economic enterprise. These can be considered as unit operations and comprise drilling, blasting, loading and transport operations. In practice, when these operations are used to extract the ore, they are called production operations. For a long time, changes have been made to the cycles of operations to accommodate some type of equipment or technology capable of better adaptation to the production process, since automation is a present reality and an extremely attractive alternative that meets the demands for an increase competitive differentials of organizations. So this work describes the use of automation as a driving system for improvements in rock drilling operations and seven main parameters or components were used to combine the measurement during drilling (*MWD*) with other information generated by the three Epiroc brand large drilling rigs. Adjustments and corrections in the collected data were suggested to minimize external influences, in addition to the rock, to guarantee the effectiveness of the analyses, comparing the performance of the drilling process in manual mode of operation with drilling in automatic mode. The main objective is to try to quantify the benefits arising from the use of innovative technologies in drilling. During the field research, information was collected from 617 holes drilled in four different benches, these are composed of different lithologies and 500 medium resolution images were taken in 2D format of the horizontal faces of the holes, an area image of a polygon in drilling was generated, to obtain some information for quantitative and qualitative analyses. Finally, the benefits of automation in drilling are presented, as well as the possibilities for future improvements.

**Keywords:** automation; rock drilling; measurement during drilling (MWD); operating parameters; mechanical properties.



## SUMÁRIO

Dedicatórias.....	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Sumário.....	v
Lista de figuras.....	vii
Lista de tabelas.....	ix
Lista de siglas e abreviaturas.....	x
Lista de símbolos e unidades.....	xi

### PARTE I – ARGUMENTAÇÃO

#### CAPÍTULO 1

<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
OBJETIVO GERAL.....	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17

### PARTE II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### CAPÍTULO 2

<b>2 PERFURAÇÃO DE ROCHAS NA LAVRA DE MINAS A CÉU ABERTO.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Métodos de perfuração.....</b>	<b>21</b>
2.1.1 Método <i>top hammer</i> .....	21
2.1.2 Método <i>down the hole</i> (martelo de fundo) .....	22
2.1.3 Método rotativo.....	23
2.1.4 Método híbrido.....	23
<b>2.2 Parâmetros geométricos na perfuração.....</b>	<b>24</b>
2.2.1 Comprimento do furo .....	24
2.2.2 Diâmetro da ferramenta de perfuração.....	25

2.2.3 Malha de perfuração.....	26
<b>2.3 Gestão de ativos.....</b>	<b>27</b>
2.3.1 Dimensionamento de equipamentos.....	27
2.3.2 Ativos como fonte geradora de valor.....	29
2.3.3 Ciclo de vida útil dos ativos.....	30
2.3.4 Indicadores.....	31
<b>2.4 Tecnologias na mineração.....</b>	<b>34</b>
2.4.1 Evolução tecnológica na lavra a céu aberto.....	34
2.4.2 interfaces amigáveis e padronizadas.....	35
<b>2.5 A digitalização e a mineração 4.0.....</b>	<b>37</b>
2.5.1 Desafios da automação em busca de uma mineração 4.0.....	42
2.5.1.1 Perda de sinal de geolocalização.....	42
2.5.1.2 Pré requisitos mínimos das redes.....	44

## CAPÍTULO 3

<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>47</b>
-------------------------	-----------

## PARTE III –CONSIDERAÇÕES FINAIS

## CAPÍTULO 4

<b>4.1 Estudo de caso.....</b>	<b>49</b>
4.1.1 Visão geral dos dados.....	49
4.1.2 Local dos testes.....	49
4.1.3 Equipamentos de Perfuração.....	50
4.1.4 Tipos de Dados disponibilizados .....	51
<b>4.2 Etapas básicas para elaboração de um furo.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3 Sistema de perfuração e coleta de dados.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4 Análise dos dados.....</b>	<b>56</b>
4.4.1 Processamento dos dados.....	56

4.4.2 Correção dos dados (Conversão dos valores negativos de peso sobre a broca ( <i>WOB</i> ))..	56
4.4.3 Refinamento dos valores acima das capacidades mecânicas dos equipamentos.....	58
4.4.4 Influência da profundidade dos furos.....	63

## **CAPÍTULO 5**

<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>77</b>
<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>90</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – As três economias mais inovadoras no mundo por região.....	15
Figura 2 - Mina de cobre de Salobo.....	19
Figura 3 – Principais estruturas de uma cava a céu aberto.....	19
Figura 4 – Lavra em tiras.....	20
Figura 5 – Operação no método <i>terrace mining</i> .....	21
Figura 6 - Os quatros principais métodos de perfuração.....	24
Figura 7 – Diâmetros de perfuração versus minerais.....	25
Figura 8 – Tipos de malhas de perfuração.....	26
Figura 9 – Perfuração automatizada.....	29
Figura 10 – Gerenciamento de ativos.....	30
Figura 11 – Etapas da gestão de ativos.....	31
Figura 12 – Sala de operação remota equipamentos de perfuração mina a céu aberto.....	34
Figura 13 – Cabine de operação tele remota.....	35
Figura 14 – Evolução da digitalização na mineração.....	38
Figura 15 – Digitalização relativa por indústria.....	41
Figura 16 - Esquema básico do sistema GPS usado em equipamentos de perfuração.....	42
Figura 17 – Tela de configuração e visualização sistema GPS.....	44
Figura 18 – <i>Survey</i> rede mina de ouro no Brasil.....	46
Figura 19 – Fases da pesquisa.....	47
Figura 20 – Perfuratriz marca Epiroc modelo PV275.....	50
Figura 21 - Interior da cabine de operação PV275D.....	50
Figura 22 – Tipos e extensão dos arquivos de dados das máquinas.....	52
Figura 23 – Gráfico técnica de operação utilizada na perfuração.....	57
Figura 24 – Gráfico valores negativos de <i>WOB</i> .....	58
Figura 25 – Gráfico valores positivos de <i>WOB</i> .....	58
Figura 26 – Ponto ótimo de penetração do botão na rocha.....	61
Figura 27 - Vibração excessiva com penetração de 80%.....	61
Figura 28 – Gráfico da taxa de penetração ( <i>ROP</i> ) realizada.....	62
Figura 29 – Gráfico da disponibilidade PV275.....	69
Figura 30 – Status operacional perfuratriz PV275.....	69

Figura 31 – Horas trabalhadas versus metros perfurado.....	70
Figura 32 - Vista aérea do polígono perfurado pela PV275 sem o sistema <i>GPS</i> .....	71
Figura 33 – Perfuração com o auxílio do sistema <i>GPS</i> .....	72
Figura 34 – Condições estruturais da rocha e situações operacionais dos furos banco 865.....	72
Figura 35 - Condições estruturais da rocha e situações operacionais dos furos banco 850.....	73
Figura 36 – Condições estruturais da rocha e situações operacionais dos furos banco 868.....	74
Figura 37 - Condições estruturais da rocha e situações operacionais dos furos banco 950.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo da indústria 4.0 no Brasil versus o Mundo.....	15
Tabela 2 – Parâmetros quantitativos para escolha de perfuratrizes.....	28
Tabela 3 - Matriz de monitoramento e coleta de dados.....	48
Tabela 4 – Litologias da mina.....	49
Tabela 5 – Dados de perfuração.....	55
Tabela 6 – <i>ROP</i> estimada para uma broca tricônica modelo série 60 marca Epiroc.....	62
Tabela 7 – Variáveis operacionais.....	64
Tabela 8 – Peso sobre a broca ( <i>WOB</i> ) perfuração automática versus manual.....	65
Tabela 9 – Rotação da broca (RPM) perfuração automática versus manual.....	65
Tabela 10 – Taxa de penetração da broca ( <i>ROP</i> ) perfuração automática versus manual....	66
Tabela 11 – Torque de rotação ( <i>TQR</i> ) perfuração automática versus manual.....	66
Tabela 12 – Pressão de ar ( <i>PAR</i> ) perfuração automática versus manual.....	67
Tabela 13 – Penetração do botão ( <i>PEB</i> ) perfuração automática versus manual.....	67
Tabela 14 – Energia específica mínima ( <i>MSE</i> ) perfuração automática versus manual.....	68
Tabela 15 – Assertividade na confecção dos emboques dos furos.....	75

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

AD2	Perfuração automática versão 2
ARC	Troca automática de tubos de perfuração
DF	Disponibilidade física
GPS	Sistema global de posicionamento
IADC	Associação Internacional de Empreiteiros de Perfuração
IREDES	Padrão internacional de intercâmbio de dados de escavação em rocha
KPI	Key performance indicator
MP	Metros perfurados
MTBF	Tempo médio entre falhas
MTTR	Tempo médio de reparo
MWD	Sistema de medição durante a perfuração
PAR	Pressão de ar
RCS	Sistema de controle da perfuratriz
RED	Rendimento operacional
ROP	Taxa de penetração
RPM	Rotações por minuto
TQR	Torque de rotação
UF	Utilização física
USB	Barramento serial universal
VLP	Velocidade de limpeza
VOD	Velocidade de detonação
WOB	Peso sobre a broca
OEE	Eficiência operacional
RO	Rendimento operacional
IA	Inteligência artificial
WLAN	Rede local sem fio
JPERF	Teste de performance de rede sem fio
MSE	Energia mínima específica

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

PPM	Pés por minuto
Psi	Libras por polegadas ao quadrado
Klb	Quilo libra
Klb.F	Quilo libra força
KN	Quilo Newton
KN. F	Quilo Newton força
CFM	Pés cúbicos por minuto
bcm	Metros cúbicos por banco



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Segundo Fox (2019) durante séculos, considerou-se a mineração um dos três setores com maior periculosidade para se trabalhar no mundo. Atualmente, essa reputação está desaparecendo à medida que a tecnologia é incorporada aos processos produtivos e eleva a automação a um novo patamar dentro desses ambientes. Desta forma, pode-se dizer que um dos principais fatores de mudanças na mineração é, sem dúvida, o advento da automação, pois a realidade de automatizar funções e operações tornam o trabalho mais seguro e eficiente, tendo um efeito profundo sobre a forma como a mineração funciona, mesmo que tenha sido um processo lento.

Muitas empresas têm relutado em aderir à onda tecnológica, enquanto os métodos tradicionais ainda produzem bons resultados, algumas investem em automação apenas em determinadas áreas e, geralmente, em pequena escala (FOX, 2019). O interesse pela automação tem aumentado, pois torna-se uma das maneiras mais viáveis para resolver os muitos desafios e conflitos enfrentados pela indústria de mineração, desde a escassez de mão de obra qualificada até as margens de lucros menores. Talvez, o principal fator motivador para as companhias automatizarem seja o desenvolvimento das tecnologias, a aquisição de informação, nos últimos anos, que permite automatizar muito mais em diversos aspectos das operações unitárias da mineração com maior rapidez e a um custo que tende a ser cada vez mais baixo.

Segundo Pohlmann (2021) quando se compara o Brasil com outros países em uso das tecnologias pelas empresas, nota-se que aqui, as companhias ainda estão aprendendo a utilizar todos os recursos, “engatinhando”, ou seja, o país está se desenvolvendo a passos lentos em alguns setores. Uma pesquisa da Accenture de 2019 indicou que empresas que investem mais em tecnologia chegam a ter um resultado positivo acima do dobro nas receitas em relação as companhias que disponibilizam poucos recursos. Veja a tabela 1.

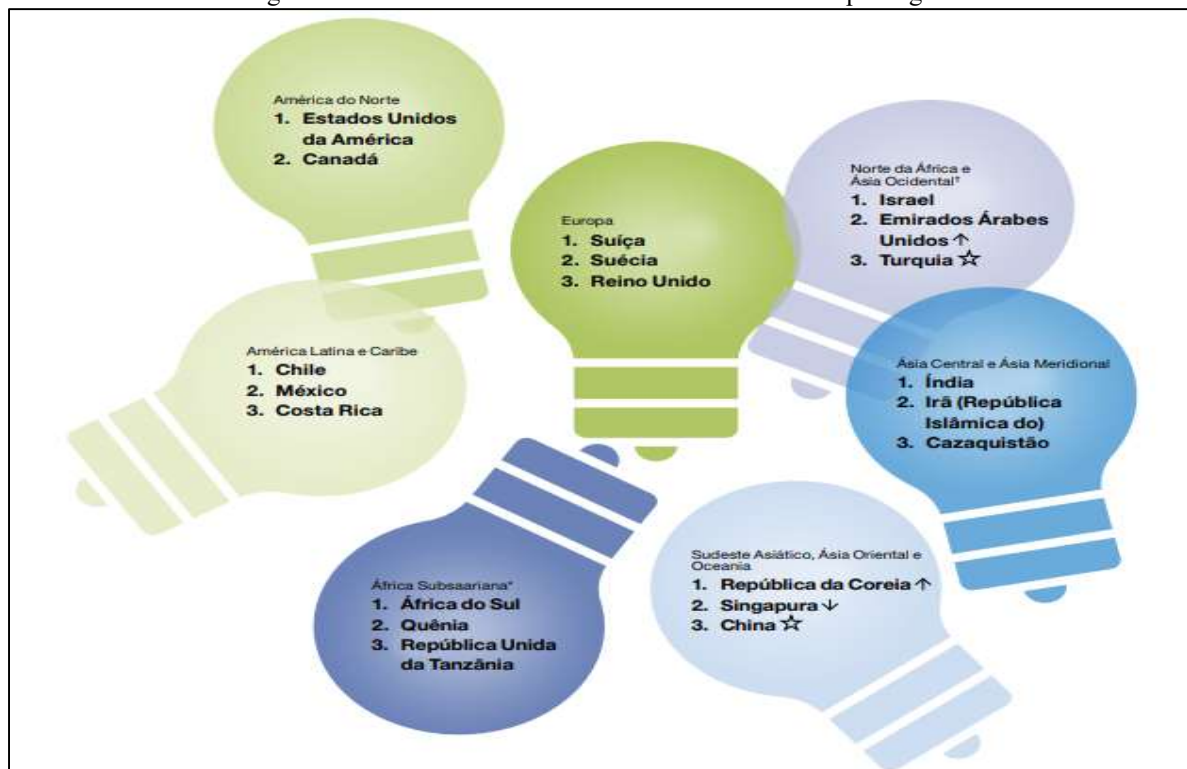
Tabela 1 - Comparativo da indústria 4.0 no Brasil versus o Mundo

Crítérios	Brasil	Mundo
Percentual do PIB investido em P&D	1,2%	1,7%
Percentual da automação digital com sensores	46%	73%
Percentual da automação digital sem sensores	39%	30%
Maturidade Digital	40,7%	66%
Principal impacto da indústria 4.0	Produtividade	Sociedade
Como está a indústria 4.0	Em desenvolvimento	Franca expansão
Percepção coletiva da indústria 4.0	Conceitual	Realidade

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A figura 1 abaixo mostra, segundo o Índice Global de Inovação, as três economias mais inovadoras por regiões no mundo em 2021, dentre os 130 países pesquisados, o Brasil aparece atrás do Chile, México e Costa Rica na região da América Latina e Caribe.

Figura 1: As três economias mais inovadoras no mundo por região



Fonte: WIPO (2021)

Atualmente, vive-se tempos difíceis, mas doravante empolgantes para a indústria de mineração de superfície, em especial para a perfuração e desmonte de rochas. Houveram várias mudanças desde que o homem sentiu a necessidade em perfurar para obter os recursos minerais necessários tanto para a fabricação de utensílios quanto para a elaboração de edificações para diversos fins.

Para Abbaspour *et al.* (2018), a perfuração e detonação são as etapas iniciais mais importantes nas operações em minas a céu aberto, essas são capazes de impactar de forma singular e crucial as fases a jusante. Sendo assim, percebe-se uma maior demanda por furos para detonação, bem como, a melhoria na qualidade durante a execução dos mesmos devido ao aumento da produção mineral mundial. No Brasil, segundo a Agência Nacional de Mineração, o crescimento desse setor em 2021 foi de 7% e com a previsão de continuidade para os próximos anos.

O aprofundamento das cavas e a presença de corpos minerais cada vez mais inclinados é um entrave que exige uma mudança de cultura e, também, dos processos operacionais das minas, onde faz-se necessário utilizar controles mais precisos e eficientes nas operações de perfuração, afim de realizar os desmontes sempre de maneira confiável e controlada de forma a garantir uma maior preservação do maciço rochoso o qual apresenta-se com características geomecânicas que mudam a cada metro perfurado. Nas palavras dos perfuradores, “cada furo perfurado é uma estória diferente!”

Operações de perfuração por teleremoto e autônomas não são mais pensamentos futuristas, e sim, a realidade em várias minas na busca por melhores condições operacionais, por segurança e por processos produtivos mais rentáveis. Tratando de um tema relativamente novo, em crescente discussão, com referências mais recentes e que merece aprofundamento, uma análise mais estruturada, baseada na relação entre a tecnologia e o desenvolvimento sustentável podendo contribuir para o entendimento e explicação desse evento.

## **JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO**

Há bastante tempo, tem sido feitas mudanças nos ciclos de operações das minas de forma a acomodar algum tipo de equipamento ou tecnologia capaz de realizar uma melhor adequação no processo produtivo, visto que a mecanização é uma realidade presente e, também, uma alternativa bastante atraente que vai ao encontro das exigências do mercado por um aumento nos diferenciais competitivos das organizações.

Segundo Cilo (2019), a automação é uma realidade, um caminho irreversível pelo qual as empresas brasileiras deverão triar, caso queiram se manter ativas no mercado, uma vez que a automatização é uma tendência mundial. Deste modo, por que não buscar um aumento de eficiência nos processos da cadeia de valor mineral, em especial os processos de perfuração, usando as tecnologias de automação e informação embarcadas? Por que não usufruir dos

benefícios oriundos da tecnologia, buscando uma mineração moderna, mais segura e sustentável (mineração 4.0)?

Este trabalho, justifica-se sob um viés inovador, capaz de contextualizar as técnicas e as tecnologias com enfoque revolucionário ao demonstrar as tendências de evolução para um futuro próximo, conciliador na proposta de manter uma estreita interação/colaboração entre os aspectos humanos, operacionais e gerenciais. Mostra-se, também, relevante ao buscar a otimização do processo de perfuração com o auxílio das tecnologias de automação e informação que são capazes de explorar não só uma melhor performance operacional e/ou produtiva, mas garantir, sobreguardar a integridade e a segurança dos atores envolvidos no processo.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GERAL**

A presente dissertação tem como objetivo apresentar os possíveis ganhos advindos a partir do uso das novas tecnologias inseridas no processo de perfuração de rochas, através de uma comparação direta entre a perfuração por meio do modo manual e da perfuração automatizada.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar a relação de gasto energético entre a perfuração automatizada versus a perfuração convencional;
- Elencar todos os fatores e/ou variáveis de possíveis “ganhos” quando da opção tecnológica na perfuração;
- Estabelecer os indicadores mais adequados referentes a utilização da perfuração automatizada (KPI's).

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2 PERFURAÇÃO DE ROCHAS NA LAVRA DE MINAS A CÉU ABERTO

A perfuração de rochas nas minas a céu aberto é realizada por perfuratrizes percussivas e/ou rotativas que utilizam energia hidráulica ou pneumática, sendo que os equipamentos utilizados podem ser de tamanhos e modelos variados. Normalmente, são feitos furos com profundidades diversas que variam de 10 a 18 metros de acordo com a bancada final especificada. Nota-se, também, que a limpeza desses furos pode ser realizada através da injeção de água ou ar, dependendo do ambiente a ser perfurado.

O método, *open pit mining*, que é o mais usado, consiste no processo de mineração de um depósito mineral superficial por meio de uma ou mais bancadas horizontais descendentes, o minério é removido das bancadas e, a princípio, as cavas podem alcançar qualquer profundidade. O objetivo dessas bancadas é controlar a profundidade dos furos e estabilizar as paredes para diminuir o risco de desabamentos, assim como, fornecem altura suficiente para serem sustentadas (quando necessário uso de tirantes ou telas), pois é uma produção ininterrupta.

As bancadas individuais são projetadas para acomodar materiais e equipamentos responsáveis pelo manuseio, dependendo da orientação dos maciços, alguns cuidados durante o processo de perfuração serão necessários para manter uma face limpa e, conseqüentemente, melhorar a estabilidade dos taludes.

Esses cuidados vão desde a criação de furos verticais ou subverticais, a redução da subfuração, a manutenção de uma praça limpa, a utilização dos planos de acamamento (o que torna desnecessária a subfuração), podendo chegar até a diminuição da razão de carga dos explosivos, caso haja danos no pé da bancada.

De acordo com Quaglio (2020) uma maior qualidade na perfuração irá refletir positivamente nos processos subsequentes da lavra, fato que evitará o aparecimento de possíveis problemas como repés, falhas nas faces livres, anomalias no maciço remanescente, deslocamentos/deslizamentos, *backcreak* e a má fragmentação no pé da bancada.

A figura 2 mostra um exemplo de exploração usando o método *open pit mine* na mina de cobre de Salobo localizada no município de Marabá no estado do Pará. Nessa operação, o processo de perfuração tem importância singular.

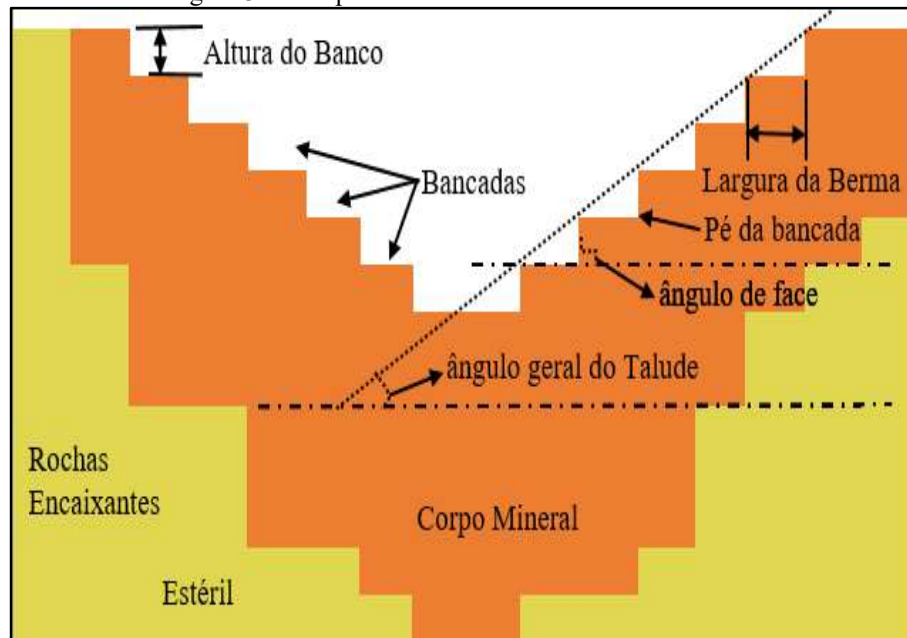
Figura 2: Mina de cobre de Salobo



Fonte: arquivo pessoal do autor

Segundo Silva (2018) caso a rocha seja dura, deve-se utilizar explosivos com maior VOD<sup>1</sup> e reduzir o tempo dos retardos, se a rocha for branda, utiliza-se explosivo de menor VOD, mais gasoso o que aumenta o tempo de retardo. A Figura 3 mostra os principais componentes geométricos que definem a estrutura geral de uma cava a céu aberto.

Figura 3: Principais estruturas de uma cava a céu aberto



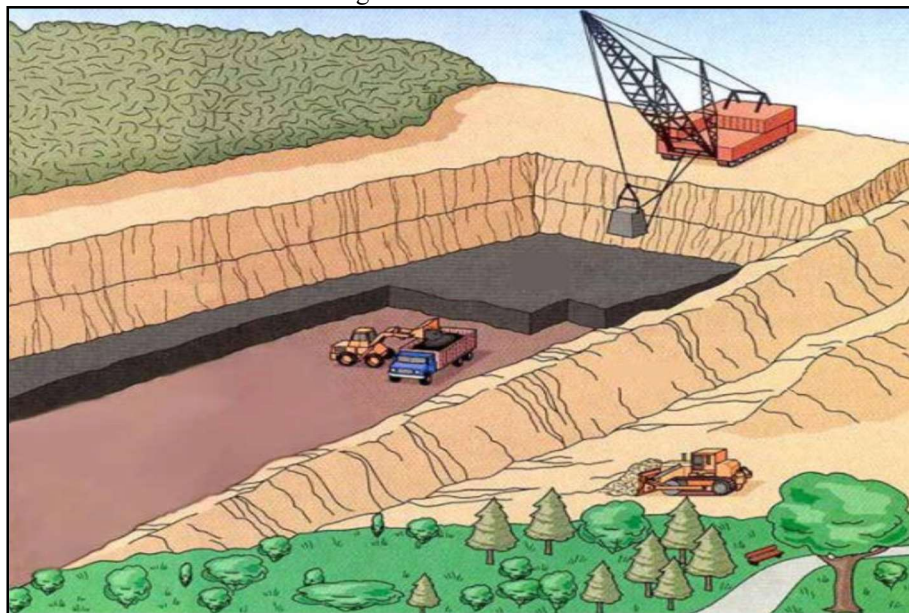
Fonte: Adaptado de Furtado, 2013

<sup>1</sup> A velocidade de detonação de um explosivo (VOD) é característica de cada formulação e é influenciada pelo diâmetro, grau de confinamento, tipo de iniciação, presença de água e outros fatores. In: [www.tecnoblast.com.br](http://www.tecnoblast.com.br) acesso em março de 2021.

A perfuração em jazidas com grande extensão e volume são formadas por várias camadas de rochas mineralizadas com orientações horizontais ou semi-horizontais de pouca espessura e localizadas a profundidades não muito grandes ( $< 50$  m). Normalmente, a perfuração não é necessária devido a facilidade com que podem ser escavadas, ou seja, no método *strip mining* a etapa de perfuração é dispensada, o que gera impactos diretos em termos de custos sobre as ferramentas de perfuração e explosivos.

De acordo com Hassani (2021), a perfuração e a detonação são as duas principais atividades que juntas constituem mais de 15% do custo total da mineração de superfície, pois caso a rocha seja dura ou haja uma maior resistência do maciço, usa-se a perfuratriz para fazer furos verticais (inclinados ou não) com subfuração. A Figura 4 mostra um esquema ilustrativo da metodologia, em que a operação de decapeamento é realizada com *dragline* e a lavra do minério é feita através do sistema *truck-loader*.

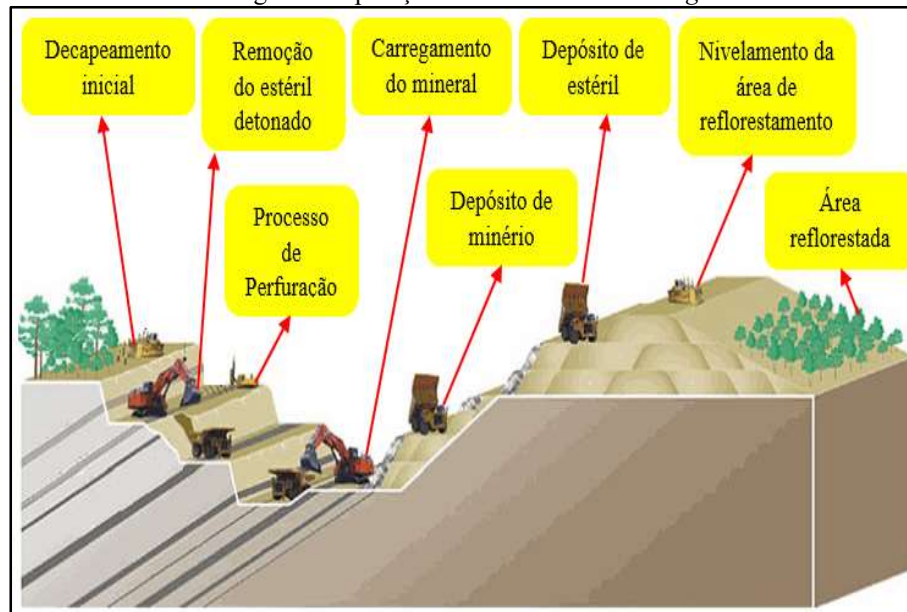
Figura 4: Lavra em tiras



Fonte: SLIDE PLAYER, 2017

Na maioria das cavas onde o capeamento é muito espesso, ele composto, basicamente, por solo e rochas com baixa resistência mecânica. Nesses casos, o decapeamento pode ser realizado através de equipamentos (método de lavra *Terrace Mining*). Nas situações em que é necessário o uso de explosivos, o processo de perfuração é muito similar ao usado no método *open pit*, pois são feitos furos verticais que podem ser inclinados ou não, seguidos de subperfuração. A figura 5 mostra o esquema típico de uma operação mineral usando o método de lavra *retrace mining*.



Figura 5: Operação no método *trace mining*

Fonte: Adaptado de GAUKOARTIFACT, 2009

## 2.1 Métodos de perfuração

De acordo com Alves *et al.* (2022), a riqueza de uma nação vem da terra, ou seja, está diretamente relacionada as reservas minerais exploráveis. No universo da mineração, há um corolário que diz “se não puder ser cultivado, deve ser extraído”, logo, há a necessidade em desenvolver e utilizar metodologias e técnicas para extrair os minerais. Deste modo, diferentes aplicações e condições de rocha precisam de diferentes métodos e tipos de equipamentos, de modo que, seja possível realizar a perfuração de forma efetiva. Para tanto, basicamente, há quatro métodos – sendo dois percussivos, um rotativo e um híbrido.

### 2.1.1 Método *top hammer*

É o método mais amplamente utilizado e o mais simples, também conhecido como martelo de topo, pois a energia de impacto é gerada quando o pistão da unidade de perfuração bate no adaptador da haste, logo, a potência de percussão é obtida diretamente pelo produto entre a energia de impacto e a frequência dos golpes. Na sequência, a energia gerada é transmitida para haste e desta para a ferramenta de perfuração denominada de bit, a velocidade do pistão é diretamente proporcional ao deslocamento e a frequência de golpes exercida pelo pistão. Esse método é usado, principalmente, para perfuração em rochas duras para diâmetros de furos até 5 ½ polegadas (140 mm), sendo que os martelos nesse método podem ser acionados por forças hidráulicas ou pneumáticas (Zhang, 2019).



Nesse método, a principal vantagem é a alta penetração (altas taxas) em boas condições de rocha sólida, como desvantagem pode-se citar a questão da perda de energia. Segundo Epiroc (2019), 5% da energia gerada pela perfuratriz é perdida sob a forma de calor em cada junta enroscada. Há, também, a questão da geração de ruídos, desvios dos furos quando da perfuração a profundidades acima de 12m e a impossibilidade em perfurar em locais onde haja água.

Portanto, as perfuratrizes pneumáticas portáteis são usadas para diâmetros de furos pequenos, enquanto as hidráulicas (montadas em plataformas) são, comumente, utilizadas para diâmetros de furos acima de 1 5/8 polegadas (41 mm).

### 2.1.2 Método *dow the hole* (martelo de fundo)

Esta metodologia, permite perfurar, de maneira confiável, vários tipos de litologias (de rochas duras a macias) de materiais competentes a fragmentados, minerais abrasivos às rochas não abrasivas. Nesse método, o martelo encontra-se localizado na parte inferior da coluna de perfuração, onde o seu pistão atinge diretamente o bit. Isso resulta numa perda mínima de energia, bem como, no mínimo desvio dos furos, mesmo em operações sob condições de instabilidade, fissuras e/ou outras rochas exigentes.

A área anular entre o tubo de perfuração e a parede do furo é comparativamente pequena, o que resulta em uma alta velocidade de limpeza que contribui, ainda mais, para uma melhor qualidade dos furos. Observa-se que a boa qualidade dos furos permite que a carga dos explosivos e o espaçamento da malha de perfuração sejam aumentados, o que economiza tempo e dinheiro, os furos retilíneos agilizam o processo de carregamento e reduzem a quantidade dos explosivos, ou seja, o método *dow the hole* (DTH) é uma maneira viável de produzir furos profundos e retos.

Uma das vantagens encontra-se do ponto de vista ambiental, com redução nas emissões de ruído e vibração, em contra partida a principal desvantagem seja a estrutura de apoio operacional necessária para poder fazer a afiação das ferramentas de perfuração (bits), nota-se, também, em destaque, que nesses equipamentos as forças geradas no pistão têm natureza apenas pneumática enquanto a rotação pode ser oriunda de energias pneumáticas ou hidráulicas (Gokhale, 2011).

Observa-se que os martelos com diâmetros maiores são mais efetivos do que os projetados para pequenos diâmetros. Segundo Zhang (2019), a pressão pneumática sobre o pistão é diretamente proporcional a taxa de penetração, já o manual de perfuração de superfície da Epiroc (2021) diz que essa técnica é amplamente usada para perfuração de furos longos não

só para detonação, mas, também, para poços de água, poços de gás e petróleo. Esse método na mineração, também, é utilizado para fazer amostragens via sistema de circulação reversa (perfuração RC).

### 2.1.3 Método Rotativo

A principal diferença deste método em relação aos outros é a ausência de percussão. Desta forma, o corte rotativo, usando garras de tipo fixo ou bits de arrasto, é, principalmente, usado para rocha macia que é cortada por cisalhamento, já a britagem rotativa usa tricône bits que dependem de esmagamento e fragmentação a rocha. Isso é realizado por transferência *downforce*, conhecida como *pulldown*, o bit gira para conduzir os dentes (comumente tipo de carboneto de tungstênio) no orifício inferior à medida que os três cones giram em torno dos respectivos eixos, pois quanto mais suave a rocha, maior a velocidade de rotação.

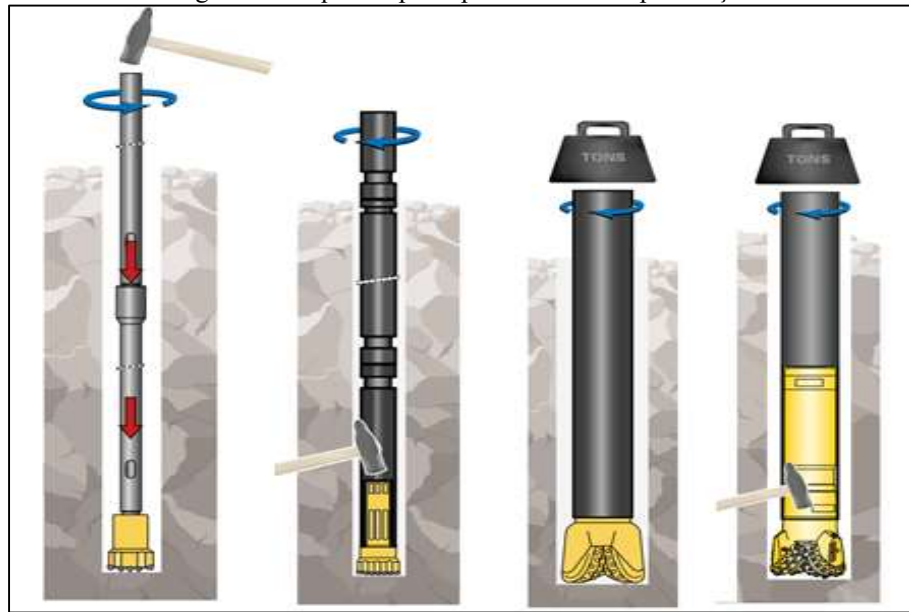
As perfuratrizes precisam ser pesadas para fornecer peso suficiente na broca que, geralmente, tem perfuração abaixo de 152 mm (6 polegadas), pode ser bem realizada por perfuração percussiva, a menos que prevaleça as condições das rochas, sendo adequadas ao corte. A britagem rotativa é a principal escolha para furos de grande diâmetro, acima 254 mm (10 polegadas) em mineração a céu aberto, decapagem de estéril em minas de carvão e perfuração de poços profundos.

### 2.1.4 Método híbrido

O Método de perfuração híbrido, também conhecido como perfuração rotativa assistida por percussão, utiliza um martelo de baixo impacto com um pistão leve cujo curso é curto, o que proporciona uma alta frequência. Segundo a Epiroc (2021), esse sistema é uma sinergia entre o martelo adaptado e as forças de rotação que criam um nível superior de energia do que os métodos percussivo e rotativo.

As três principais vantagens desse método são as altas taxas de perfuração obtidas, embocamentos mais fáceis dos furos e perfuração mais estável, sendo a principal desvantagem, o alto custo das ferramentas de perfuração. A figura 6 mostra os quatro métodos de perfuração.

Figura 6: Os quatro principais métodos de perfuração



Fonte: Adaptado de Epiroc (2019)

## 2.2 Parâmetros geométricos na perfuração

### 2.2.1 Comprimento do furo

O parâmetro de comprimento, também chamado de profundidade do furo, é um fator determinante para escolha do equipamento e do método de perfuração, através dele é possível obter uma face segura do talude e uma superfície plana e mais nivelada possível. Sendo assim, pode-se dizer que a qualidade dos pisos das praças de trabalho numa cava depende diretamente desse parâmetro e que quando não é observado, pode gerar situações de risco à estabilidade e segurança dos equipamentos de mina.

O comprimento do furo também exerce influência sobre a retilinidade da perfuração, ou seja, desvios nos furos são muito mais comuns quando há orifícios profundos. Segundo Silva *apud* Sitionio (2017), quando os explosivos estão distribuídos corretamente, os furos precisam ser os mais retilíneos possíveis, caso contrário, o produto da detonação poderá ser comprometido.

Para Ricardo e Catalani (1977) o comprimento do furo está diretamente relacionado à altura da bancada, mas não é igual a mesma, pois deve-se considerar a questão da subperfuração (comprimento perfurado abaixo da praça da bancada). As equações abaixo podem ser utilizadas para o cálculo do comprimento do furo ( $H_f$ ).

$$\text{Bancada inclinadas: } H_f = H \cos \alpha + 0,2 A_p \quad (1)$$

$$\text{Bancadas verticais: } H_f = H + 0,3 A_p \quad (2)$$

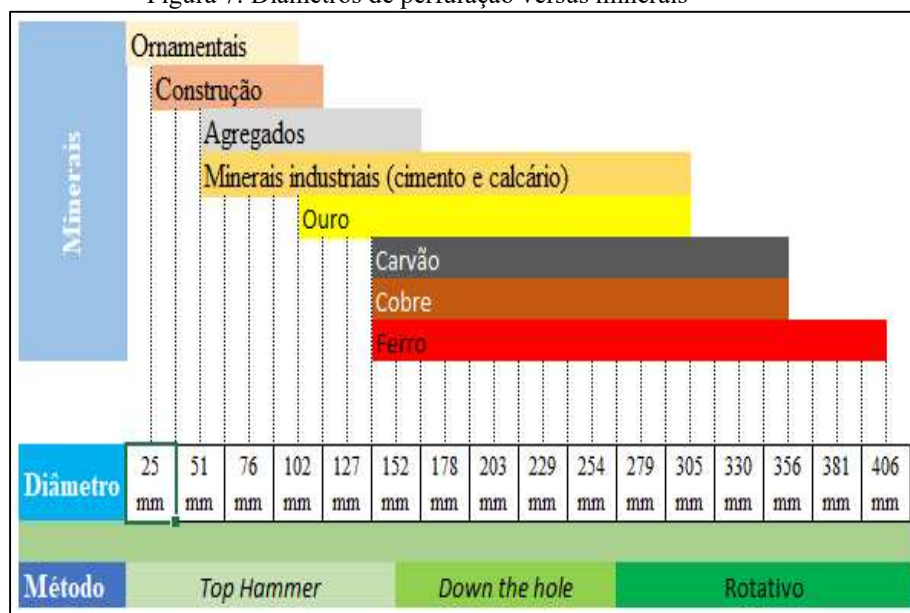
Onde:  $H$  = altura da bancada;  $\alpha$  = ângulo de inclinação da face com a vertical;  $Ap$  = afastamento prático

### 2.2.2 Diâmetro da ferramenta de perfuração

O diâmetro da ferramenta de perfuração ou, simplesmente, diâmetro do furo irá depender do tipo de material a ser lavrado e da sua finalidade. Os furos para detonações são passíveis de várias influências quanto da escolha do diâmetro a ser perfurado, tais como, o tamanho e fragmentação após o processo de detonação, o tipo de explosivo e a carga a ser considerada, bem como, o nível de vibração a ser gerado com o processo de detonação. De forma sucinta, furos de grande diâmetro permitem abrir (aumentar) a malha de perfuração, ou seja, na prática de perfurar menos e desmontar um volume maior de material, favorecendo a uma redução dos custos operacionais, os furos com diâmetros menores contribuem para uma malha de perfuração mais fechada na qual é necessário perfurar mais para poder gerar um mesmo volume de material fragmentado.

De acordo com Ricardo e Catalani (2007), algumas grandezas do plano de fogo estão de forma direta ou indireta ligadas com o diâmetro do furo, logo, há uma regra prática que é levada em consideração: “o valor máximo do diâmetro do furo em polegadas é igual à capacidade da caçamba do equipamento de carga em jardas cúbicas”. A relação entre o diâmetro do furo e o material a ser perfurado pode ser visualizada através da figura 7.

Figura 7: Diâmetros de perfuração versus minerais

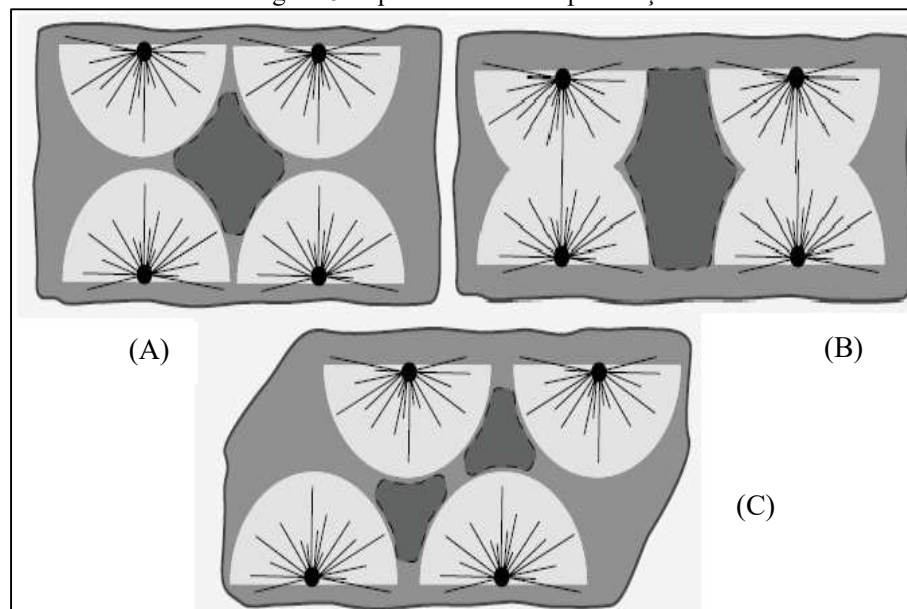


Fonte: Adaptado de Epiroc (2012)

### 2.2.3 Malha de perfuração

Em minas a céu aberto, normalmente, utiliza-se três modelos de malhas de perfuração; malha quadrada, retangular e estagiada (conhecida, coloquialmente, na maioria das operações como, malha tipo pé de galinha). De acordo com Mariano (2018), a escolha da malha de perfuração apresenta uma importância singular, uma vez que esta tem influência direta na fragmentação, podendo gerar blocos (matacões) e/ou excesso de particulados finos, ambas as situações comprometem os processos subjacentes e, em especial, aqueles voltados ao tratamento e beneficiamento mineral. A figura 8 mostra os tipos de malhas disponíveis.

Figura 8: Tipos de malhas de perfuração



Fonte: Adaptado de Atlas Copco (2011)

A figura 8A é a malha do tipo quadrada e a 8B malha retangular, ambas, são mais fáceis e rápidas para perfurar, a malha quadrada tem esse nome devido possuir afastamento e espaçamento iguais (exemplo malha 4 x 4 m), já na malha retangular, um dos parâmetros (afastamento -espaçamento) pode variar (exemplo malha 4 x 5m). A figura 8C representa uma malha estagiada cuja a principal vantagem é a melhoria na distribuição da carga explosiva, já a desvantagem, quando ao uso, é a questão do deslocamento furo a furo dos equipamentos de perfuração em virtude das alternâncias das posições dos mesmos.

Nota-se que o afastamento é a distância entre o furo e a face livre da bancada ou a distância entre as linhas da detonação, já o espaçamento é dado em metros e representa a distância existente entre dois furos na mesma fileira. Segundo Oliveira (2017), a razão entre o

afastamento e espaçamento influência diretamente a qualidade do desmonte, logo, são variáveis que devem ser consideradas e controladas.

## **2.3 Gestão de ativos**

### **2.3.1 Dimensionamento de equipamentos**

De acordo com Santos (2019), a atividade mineral deve ser capaz de descobrir os recursos existentes, fazendo a extração, o transporte do material extraído da jazida por meio das operações de lavra e, por fim, deve-se colocar esse bem mineral em condições que possam ser usados pelo homem.

Todas estas etapas presentes no processo de exploração e tratamento mineral são chamadas de Operações Unitárias, em outras palavras, são todas as operações feitas de forma simultânea ou não, que contribuem para o funcionamento do empreendimento econômico.

Na mineração a céu aberto as principais operações unitárias são:

- Escavação;
- Perfuração;
- Desmonte;
- Carga;
- Transporte;
- Beneficiamento.

Na maioria das minas a céu aberto, o processo de perfuração precede a escavação, logo, o desmonte de rochas ocorre com o auxílio de explosivos elevando a economia e a produção do empreendimento. Observa-se que o desmonte com explosivos diminui os custos, desgastando os equipamentos nas etapas de carregamento, transporte e no britador primário. Para que esse processo seja atraente é necessário que ele seja efetivo, principalmente, no que diz respeito ao comprimento e aos desvios nos furos.

Na atualidade, as mineradoras sabem que o aumento de produtividade está diretamente ligado a integração dos sistemas logísticos alinhados ao planejamento e execução das operações unitárias empregadas no processo de lavra da mina. Normalmente, após o processo de avaliação do depósito mineral e do estabelecimento da base geológica, inicia-se o estudo para dimensionamento das frotas.

Com base na litologia e na produção esperada são dimensionados os equipamentos de carga, transporte, desmonte, os utensílios de apoio e perfuração. De acordo Junior (2021),

durante a escolha dos equipamentos diferentes fatores devem ser considerados, como a escala de produção, a capacidade financeira do investimento, as características da mina, entre outros.

Jesus (2013) afirma que para o correto dimensionamento de equipamentos de lavra a céu aberto, algumas informações prévias do projeto são necessárias, tais como, a vida útil estimada do projeto, informações sobre a natureza do material a ser lavrado e condições do solo a ser perfurado.

No caso específico dos equipamentos de perfuração, o processo de dimensionamento e escolha dos equipamentos é uma tarefa bastante complexa. Além de se conhecer as capacidades operacionais dos equipamentos, necessita-se obter informações bastantes peculiares do local da operação, como exemplos, localização geográfica, temperatura média ambiente e cotas altimétricas dos locais a serem perfurados.

De acordo com Bernardi (2015) para a realização do dimensionamento de todo o processo de perfuração e desmonte, são necessárias informações capazes de definir as metragens a serem perfuradas, horas necessárias de operação, consumo esperado das ferramentas de perfuração, gastos com explosivos, quantidade de furos e de material que será detonado. A tabela 1 mostra os parâmetros quantitativos a serem considerados na escolha dos equipamentos de perfuração.

Tabela 2 – Parâmetros quantitativos para escolha de perfuratrizes

Parâmetros de Perfuração		Parâmetros da máquina	
Diâmetro da broca	250 mm	Método de perfuração	Rotativo
Altura da bancada	15 m	Velocidade de rotação	90 RPM
Profundidade de subperfuração	0,9 m	Vazão de ar do compressor	1530 CFM
Carga de explosivos	4 m	Tamanho da torre	12,8 m
Espaçamento	7 m	Diâmetro do tubo de perfuração	194 mm
Afastamento	5 m		
Fator de fragmentação	0,469 kg/bcm		
Razão de carga dos explosivos	1,15		
Parâmetros da mina		Parâmetros operacionais	
Elevação máxima	695 m	Disponibilidade média esperada	70%
Temperatura média ambiente	26°C	Utilização média esperada	70%
Resistência a compressão da rocha	250 Mpa	Eficiência operacional	65%
Densidade da rocha:	3,4 T/bcm		
Resultados Equipamento			
ROP estimada	26,2 m/h		
Fator de perfuração geral	59%		
ROP global estimada	14 m/h		
Velocidade de limpeza	8925 PPM		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Atualmente, mais do que nunca, a opção tecnológica é algo que deve ser considerada e avaliada durante o processo de dimensionamento das frotas, pois, poderá fazer toda a diferença

para o empreendimento.

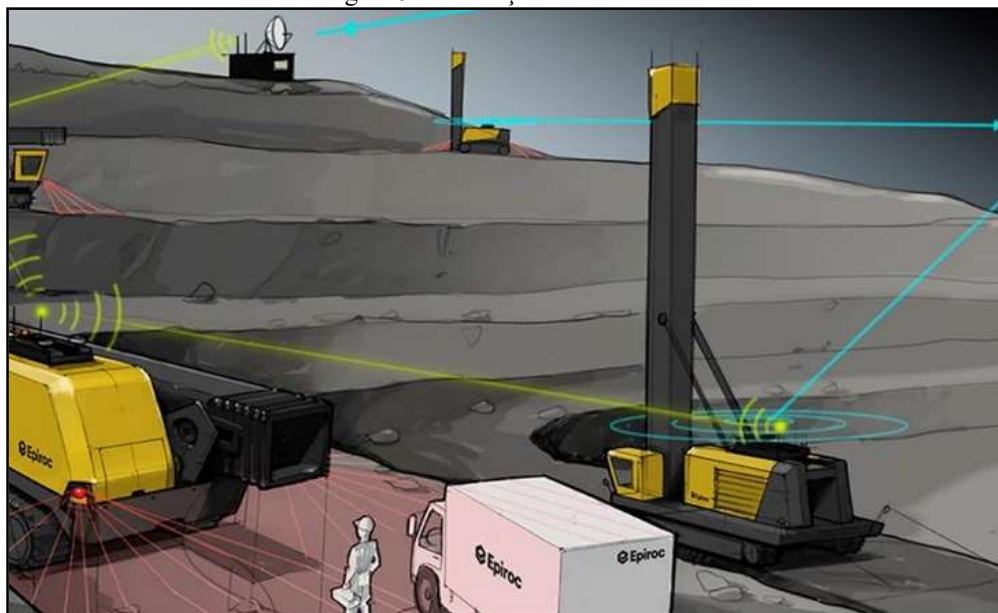
### 2.3.2 Ativos como fonte geradora de valor

Todos os ativos de uma empresa devem ser utilizados de forma consciente para gerar valor. Segundo Paiva (2016), um ativo é algo capaz de produzir um produto ou gerar um serviço de modo a atender as necessidades dos clientes. Sob esta perspectiva, são considerados ativos todos os equipamentos, dispositivos e infraestrutura utilizados nas operações unitárias de uma organização.

Para Calder *et. al.* (2019), as companhias podem gerar valor de forma sustentável através da adoção de estratégias que passam pelo melhor controle dos custos, alinhado ao aumento da utilização dos ativos. Outra forma de geração de valor, baseia-se no crescimento orgânico da instituição, considerando o aumento na receita.

Do ponto de vista tático, o gerenciamento dos ativos deve buscar alinhar as metas e princípios aos recursos e objetivos do negócio da empresa. O termo ativo refere-se, nesse trabalho, aos equipamentos e aos sistemas tecnológicos disponíveis no processo de perfuração automatizada como mostra a figura 9.

Figura 9: Perfuração automatizada



Fonte: Adaptado de Epiroc, 2020

O uso da tecnologia em conjunto com a estratégia operacional promove, diretamente, a competitividade, uma vez que, novos cenários são apresentados, considerando a interação entre as pessoas, a tecnologia e os processos que favorecem a geração de valor, sempre que o custo



de propriedade for minimizado e a utilização dos ativos for maximizada. A figura 10 sugere como deve ser feito o gerenciamento dos ativos nas empresas.

Figura 10: Gerenciamento de Ativos



Fonte: Adaptado de PAIVA, 2016

### 2.3.3 Ciclo de vida útil dos ativos

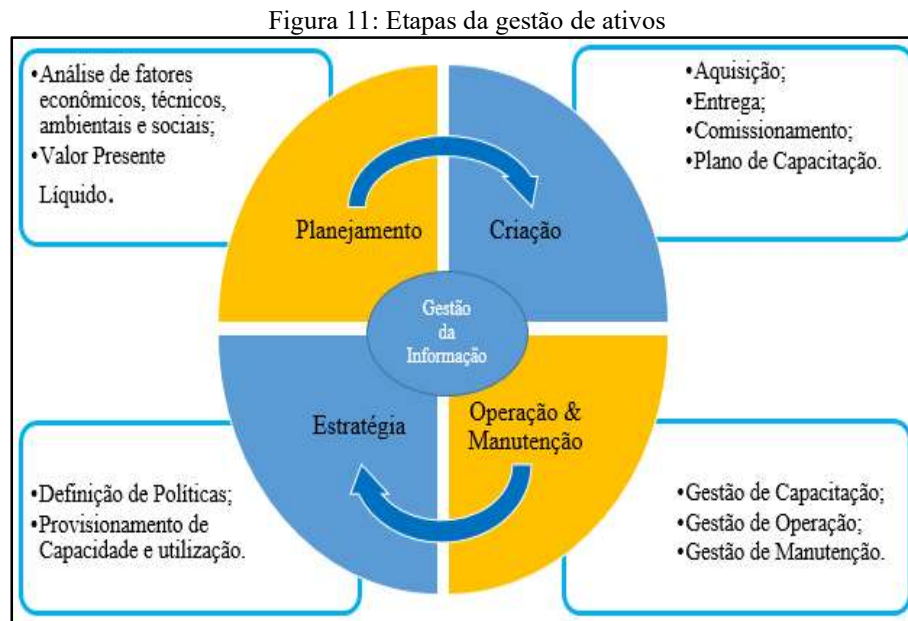
A principal premissa para uma gestão efetiva dos ativos, baseia-se na abordagem que considera o ciclo total de vida útil dentro de um processo estratégico pautado pelo planejamento, criação, manutenção e operação. Frolov *et al.* (2010), relatam que, historicamente, a gestão de ativos era vista apenas como uma atividade técnica, conduzida pela área de engenharia e destinada à manutenção física dos ativos. Para Clark (2014), 61% das organizações têm o envelhecimento dos ativos e infraestrutura como uma das três principais razões para melhorar a sua gestão de imobilizados.

Uma boa gestão deve começar pelo planejamento, pois nesta etapa é considerada todas as possíveis alternativas necessárias ao atendimento das expectativas da organização, os fatores técnicos, econômicos, ambientais e sociais são analisados durante essa fase, de modo que as decisões a serem tomadas possam ser assertivas e consistentes.

A etapa seguinte é a criação na qual contempla os processos de aquisição, entrega técnica e comissionamento, é o momento em que são feitas as tratativas comerciais, avaliando

o investimento e a discussão dos prazos de entrega.

A operação-manutenção é a etapa que engloba o processo de otimização dos ativos, os quais são altamente dependentes das práticas da gestão da manutenção e da operação. Por fim, há a fase da estratégia que são feitas as definições de políticas, provisionamento de capacidades e utilização. A figura 11 mostra cada uma dessas etapas do processo.



Fonte: Adaptado de PAIVA, 2016

### 2.3.4 Indicadores

O aumento de eficiência nos processos da cadeia de valor mineral, em especial, os processos de perfuração, utiliza as tecnologias de automação e informação que embarcadas somente poderão ocorrer de forma eficaz a partir do momento que os reais benefícios forem conhecidos através da determinação dos *Key Performance Indicators* (KPI's).

Na visão de Abijaude (2016), os KPI's possuem a representatividade de combinação de um ou mais indicadores e revela um conjunto de medidas focadas dentro de aspectos críticos que podem comprometer a obtenção de um desempenho satisfatório para que os objetivos da empresa sejam atingidos, sendo considerados como elementos chave para a medição e validação dos resultados quando da aplicação ou não de tecnologias e, até mesmo, da integração entre processos.

A empresa na qual foi realizado o estudo controla vários tipos de indicadores que são divididos por itens de controles e variáveis. Os principais controles referentes aos equipamentos de perfuração são disponibilizados em painéis de indicadores operacionais seguido das suas

metas. De acordo com Paiva (2016) os indicadores de desempenho relevantes à gestão de equipamentos de perfuração, de acordo com pesquisa bibliográfica e contato com profissionais do setor, são:

- 1) Disponibilidade Física;
- 2) Utilização;
- 3) Tempo médio entre reparos;
- 4) Tempo médio entre falhas;
- 5) Metros perfurados;
- 6) Taxa de Penetração;
- 7) Rendimento operacional;
- 8) Eficiência Global.

A disponibilidade física, segundo Cyrino (2019), é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado. Ela pode ser descrita como a razão entre as horas possíveis para o trabalho e as horas calendário, conforme a equação 1.

$$\text{Disponibilidade Física (DF)} = \frac{\text{Horas possíveis de trabalho}}{\text{Horas calendário}} \quad (3)$$

Para Pacola (2016), a utilização é a razão entre as horas trabalhadas e as horas disponíveis para o trabalho (horas calendário), representada pela equação 2.

$$\text{Utilização (UF)} = \frac{\text{Horas trabalhadas}}{\text{Horas calendário}} \quad (4)$$

Tempo Médio de Reparo (MTTR) é a razão entre o tempo para a execução dos reparos e o número de paradas durante um período. Veja a equação 3.

$$\text{Tempo médio para reparo (MTTR)} = \frac{\text{Horas em reparo}}{\text{Nº de paradas}} \quad (5)$$

Tempo Médio entre Falhas (MTBF) é definido como sendo a razão entre o tempo de operação e o número de falhas durante um período, vide equação 4.

$$\text{Tempo médio entre falhas (MTBF)} = \frac{\text{Horas trabalhadas}}{\text{Nº de falhas}} \quad (6)$$

Metro Perfurado é a somatória dos metros perfurados num período específico, conforme mostra a equação 5.

$$\text{Metros perfurados (MP)} = \frac{\sum \text{metros perfurados}}{\text{Horas}} \quad (7)$$

A taxa de penetração efetiva (*ROP*) é a velocidade com que uma perfuratriz avança a broca em uma rocha, podendo ser expressa em cm/min ou em m/horas. Essa variável na perfuração altera de acordo com a litologia, modelo de perfuratriz, diâmetro da broca, pressão de ar etc. Na prática é razão entre o comprimento do furo e o tempo gasto para fazer o mesmo, essa taxa está diretamente relacionada ao custo de perfuração e ao planejamento do projeto. Vide equação 6.

$$\text{Taxa de penetração (ROP)} = \frac{\text{Comprimento do furo}}{\text{Horas}} \quad (8)$$

Rendimento operacional é a razão entre a disponibilidade física e a utilização, observe a equação 7.

$$\text{Rendimento operacional (Ro)} = \frac{\text{Disponibilidade x Utilização}}{100} \quad (9)$$

*Overall Equipment Effectiveness* (OEE), chamado na língua portuguesa de eficiência global de equipamentos (EGE), é um indicador utilizado para medir as melhorias realizadas, possibilitando enxergar as perdas, principalmente, as que são geradoras de custos em potencial, observe a equação 8.

$$\text{Eficiência Global (OEE)} = \text{disponibilidade x performance x qualidade} \quad (10)$$

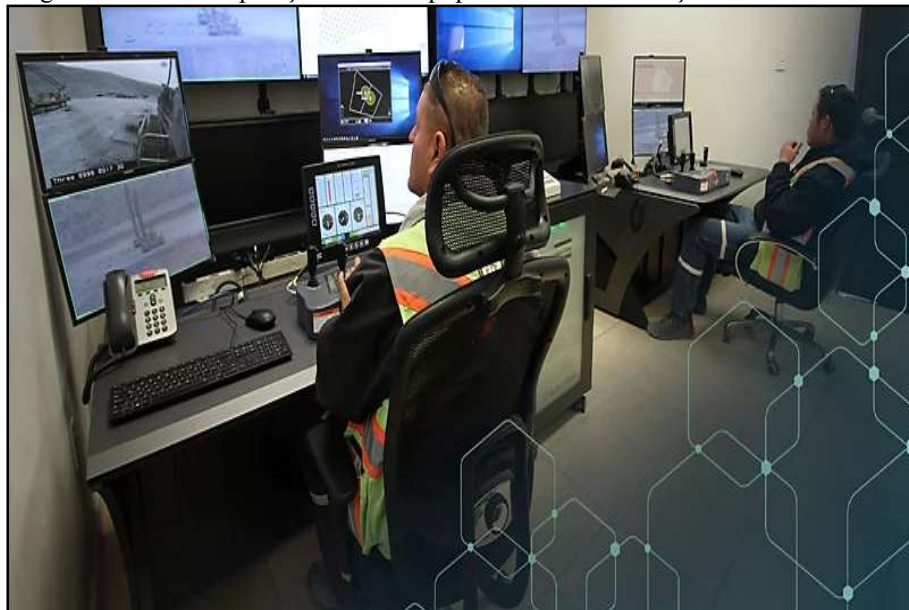
## 2.4 Tecnologias na mineração

### 2.4.1 Evolução tecnológica na lavra a céu aberto

Nos últimos anos, a evolução tecnológica tem dominado o cenário dos discursos e operações na mineração, pois a evolução das tecnologias dos processos, dos sistemas e, principalmente, os equipamentos que têm possibilitado as companhias de mineração obter ganhos reais no que diz respeito ao gerenciamento dos ativos, com aumento da produtividade e controle racional dos custos.

Koppe (2007) e Sachs (2009) informam a respeito da segurança, eficiência, flexibilidade e confiabilidade que são alguns dos principais aspectos incorporados a partir da utilização dos equipamentos automatizados na mineração, algumas soluções tecnológicas implementadas em minas a céu aberto são mostradas através das figuras 12 e 13.

Figura 12: Sala de Operação remota equipamentos de Perfuração mina a céu aberto



Fonte: Adaptado de Epiroc, 2018

Figura 13: Cabine de Operação tele remota.



Fonte: Adaptado de Epiroc (2018)

A evolução tecnológica na mineração permite uma nova relação entre o operador e a máquina com controle teleremoto. Plataformas com esse tipo de sistema permitem que os equipamentos sejam operados remotamente com um painel de controle que monitora sensores e câmeras locais. O operador pode estar localizado longe de áreas perigosas com segurança e conforto de uma sala de controle ou em um ambiente seguro de trabalho, uma cabine teleremota.

A tecnologia, também, permite fazer a conectividade e automação para aumentar a produtividade através da integração de máquinas conectadas de maneiras inteligentes, programadas para completar, por exemplo, uma sequência de perfuração precisa a um tempo de operação prolongado, reduzindo o desgaste associado a uma operação manual.

#### 2.4.2 Interfaces amigáveis e padronizadas

Uma interface amigável, deve fazer com que o usuário sinta-se bem quando trabalhar com o sistema, transmitindo uma sensação de que seja fácil operar o maquinário. No desenvolvimento de uma tecnologia ou adaptação de novos módulos para um sistema já operante é importante que seguir um padrão de mercado ou, quando possível, agregar o máximo de características semelhantes às de uma interface que o usuário alvo já esteja acostumado a trabalhar.

Um dos pontos importantes na aceitação da interface é a maneira com que o desenvolvedor irá "driblar" a poluição visual que pode acabar tornando uma interface muito

diferente dos padrões de uma interface amigável. "Ter uma interface amigável é muito mais do que dispor de algo fácil de usar" (A IMPORTÂNCIA DA INTERFACE AMIGÁVEL PARA O SEU PABX - L5 NETWORKS).

Ser intuitivo é um requisito básico para toda solução, um *software* ou aplicativo que visa melhorar a produtividade e facilitar a vida dos usuários, permite adaptar rapidamente as transformações tecnológicas diárias, afinal, atualizações e novos recursos surgem quase que dia após dia.

Para Porter & Millar (1985), a informação tem significado estratégico capaz de modificar a estrutura do negócio, criar oportunidades e gerar vantagem competitiva. Talvez, um dos maiores desafios a ser vencido pela tecnologia seja a capacidade de obtenção de dados e/ou informações operacionais em um formato padrão, o qual seja capaz de possibilitar uma integração entre todos os equipamentos utilizados na mina, ou seja, usar linguagem única que possa ser reconhecida por todos os envolvidos nas diversas atividades de planejamento e aplicações, tais como, na perfuração, desmonte, carregamento e transporte.

Na tentativa de buscar uma padronização e integração das diferentes tecnologias, em específico para minas subterrâneas, há uma organização não-governamental com atuação global e sem fins lucrativos chamada IREDES (*International Rock Excavation Data Exchange Standards*) que busca desenvolver práticas que possibilitem a otimização dos processos da mineração subterrânea através de comunicação efetiva dos dados operacionais.

Para o caso da mineração a céu aberto, empresas como a ABB têm buscado soluções capazes de unir e coordenar os processos unitários de modo a impactar de forma positiva na eficiência operacional. Segundo a ABB (2019), ao integrar o controle de planejamento e o agendamento em tempo real, por meio de uma plataforma digital única, a performance da empresa melhora e as ocorrências não planejadas são reduzidas, contribuindo para reduzir as irregularidades da produção em todas as etapas do processo produtivo. "A coordenação entre o plano tático e o operacional é um dos principais desafios enfrentados na mineração moderna" (LIMA, 2019).

Ao unir a tecnologia operacional e a tecnologia da informação aumenta-se a visibilidade da operação e a integração de toda a equipe, sendo que a aplicação do agendamento de curto prazo permite que os operadores da mina monitorem, revisem os planos operacionais e de desempenho com base nos objetivos, métricas e KPI's.

Essa tecnologia foi testada na mina subterrânea *Renstrom da Boliden* na Suécia, pela *Arcelor Mittal*, na mina a céu aberto de *Mont-Wright*, no Canadá. Todavia, dados e informações são importantes quando passam a fazer parte dos processos de gestão e na tomada de decisão.

A flexibilidade dos sistemas para adaptação a diferentes aplicações em cenários diversos suporta o gerenciamento de riscos e incertezas internas e externas ao projeto (MAYER & KASAKIDIS, 2007).

## **2. 5 A digitalização e a mineração 4.0**

Nos últimos anos, tem-se testemunhado os grandes avanços tecnológicos nos mais diversos ramos de negócios e nas mais variadas situações humanas. A digitalização tem crescido e continua a avançar de forma a se adaptar para atender a todas estas demandas. Em se tratando de mineração não é diferente, observa-se a evolução desse setor que procura alinhar as operações a “mina do futuro”, remodelando os negócios para o crescimento e a sustentabilidade, usando a tecnologia e a inovação como catalisadores.

As mineradoras têm procurado formas para se reinventarem muito em função de uma crescente pressão do mercado para que elas tenham processos mais limpos, seguros e eficientes, as organizações estão buscando a digitalização, a análise de dados para melhorar o gerenciamento de riscos e alcançar a tão esperada excelência operacional.

Especialistas no setor de Inovação Tecnológica e renomados institutos de pesquisa como o *International Data Corporation* revelam que os investimentos mundiais em tecnologias e serviços que permitem a transformação digital de práticas, produtos e organizações atingirão US\$1,97 trilhões em 2022.

Busca-se alcançar a excelência operacional para tanto, essas empresas precisarão superar algumas barreiras até pouco tempo atrás, consideradas como quase insuperáveis, tais como, a integração ineficaz entre a mina, o processamento e o transporte.

Para uma transformação digital efetiva é necessário que estas empresas mantenham os objetivos nos sistemas, processos e, sobretudo, nos recursos capazes de estabelecer uma nova cultura organizacional, uma vez que o mundo globalizado é cada dia mais desafiador, a digitalização tornou-se um imperativo gerencial capaz de alavancar novas tecnologias de forma a aprimorar processos, manter a competitividade, reduzir riscos, melhorar as operações e o desempenho sustentável do negócio.

A figura 14 mostra a evolução da digitalização na mineração.



Figura 14: Evolução da digitalização na mineração

	Antes da Década de 1930	1930 - 1980	1980 - 2005	2005 até a Atualidade
TRABALHO	Trabalho Intensivo na Mineração	Uso de Equipamentos Mecanização de processos de mineração. Predominância da interação humana com as máquinas.	Automação de Processos simples e minimalistas em mineração.	A automação assume um papel maior, com mais autonomia e poder para as minas conectadas.
CONNECTIVIDADE	Relatórios manuais com dados coletados por meio de processos manuais.	Dados capturados em formato semi-elétrônico, computadores numa fase posterior.	Introdução do 2G. Captura de dados e comunicação via internet.	Desenvolvimento rápido com 3G e 4G, comunicação de dados mais rápida e de grande largura de banda.
CAPTURE DE DADOS	N/A	Dados de mineração capturados por meio de sistemas legados.	N/A	Dados de mineração monitorados continuamente por meio de aprendizado de máquina e IoT. Análise de big data, comunicação máquina a máquina.

Fonte: Adaptado de CULLEN, 2020

Nota-se que uma das maiores mudanças implementadas pela digitalização seja a introdução de sistemas de automação e informação nas operações unitárias das minas, pois, atualmente, as informações em tempo real podem ser prontamente acessadas e ajudam em tomar decisão mais prontamente, uma vez que os dados mais importantes encontram-se completamente atualizados e a disposição.

De acordo com Cullen (2020), a digitalização do processo de mineração muda de uma operação manual baseada em papel para uma plataforma digital que incorpora sistemas, essa nova temática utiliza ferramentas de simulação, como por exemplo os “gêmeos digitais”, as quais permitem que as empresas analisem os processos em um ambiente virtual e projetem o desempenho operacional usando cenários prováveis (*what if*) o que gera uma redução significativa de tempo e custo durante as operações minerais.

A inteligência artificial e as análises avançadas estão sendo aplicadas para impulsionar as melhorias nos processos, além de identificar, removendo os gargalos. O uso dessas tecnologias, também, pode auxiliar no aumento da disponibilidade, confiabilidade, utilização dos ativos, bem como, ajudar no controle dos custos e mitigar os riscos ambientais. Empresas como a australiana BHP *Billiton* passaram a utilizar avançados sensores na fase de extração para fornecer informações sobre os minérios, gerando um aumento na previsibilidade e maior precisão na extração do cobre.

De acordo com Mirim (2019) a transformação digital na mineração tem gerado ações relacionadas com a Inteligência Artificial (IA) que vão desde a fase de exploração, transitam

pelos processos de estimativa de recursos minerais (classificação de reservas) e produção. Ele cita como casos de sucesso da IA para a mineração o uso de dados relevantes que embasam a construção de modelos geológicos preditivos, tais como:

- ❖ Mapas geológicos → Para caracterizar a distribuição dos tipos de rochas;
- ❖ Dados geoquímicos → Sedimentos de drenagens, solo, rocha, testemunhos de sondagem e outros;
- ❖ Dados topográficos → Modelagem digital capaz de possibilitar a análise estrutural indicando contatos litológicos ou lineamentos estruturais relevantes;
- ❖ Imagens de satélite → Para fazer o cadastro de depósitos minerais conhecidos ou ocorrências minerais confirmadas após a visita de um geólogo no campo;
- ❖ Furos de sondagem exploratórios → Para interceptar a mineralização.

Segundo a startup PixForce um outro caso de sucesso do uso da IA dentro da mineração que pode ser citado, além das máquinas autônomas, é a Deeptack (solução criada pela PixForce em parceria com a Enevoa). Essa tecnologia é aplicada em drones, foi criada para trazer segurança, eficácia e praticidade para os processos de inspeção das correias transportadoras através de sensores infravermelho e Led RGB<sup>2</sup>. Esse processo de inspeção permite identificar e localizar os rolos das correias transportadoras que estão trabalhando acima dos limites aceitáveis de temperatura e que, provavelmente, poderão a vir apresentar falhas. Desta forma, é possível fazer uma supervisão apurada do processo sem colocar funcionários em risco.

De acordo com Zaparolli (2020), um dos maiores desafios enfrentados pela tecnologia na mineração global é liderado pela companhia sueca *Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag (LKAB)*, essa mineradora pretende chegar até 2030 as reservas de minério de ferro situadas a quase dois quilômetros de profundidade nas minas de *Kiruna e Malmberget*.

Segundo Tomi (2020), a mineração do futuro não terá funcionários em áreas de risco, visto que a realidade virtual ou realidade aumentada possibilitará treinar, aprimorar a força de trabalho para que tarefas de alto risco sejam feitas de forma mais rápida, segura, no sentido de colaborar na solução dos principais problemas e dos desafios operacionais. Nos dias atuais, há

---

<sup>2</sup> Led RGB - Esta abreviatura significa três cores, que são usadas em vários dispositivos eletrônicos para misturar cores. Estas são as cores básicas: R-red (vermelho), G-green (verde) e B-blue (azul). Graças à combinação dessas três cores, qualquer outra cor pode ser ainda mais misturada. A tonalidade de cores individuais é então dada pela quantidade adicionada ou removida dessas cores básicas. O princípio das cores RGB é usado em vários dispositivos. Por exemplo, em ecrãs de computador, TV e em relação aos produtos que oferecemos em fitas de LED RGB, lâmpadas ou luzes. Disponível em: <https://www.lampmania.pt/artigos/o-que-representa-rgb-em-iluminacao/>. Acesso em 10 de agosto de 2022.

a utilização de drones para fazer o gerenciamento de inventário das pilhas, reconhecimento de áreas, gerenciamento de tráfego, inspeções pós-detonações e na manutenção de pontos de difíceis acessos.

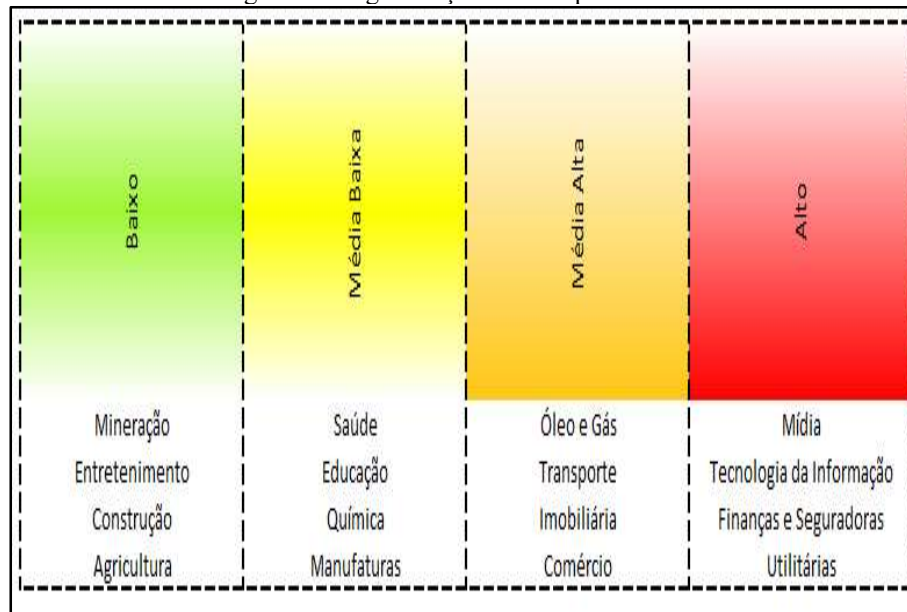
Pagnini (2019) afirma que três são os principais fatores para o sucesso em digitalizar as operações de mineração, para ele, o primeiro seria o esforço de concentração nos fatores principais de valor e risco do negócio, ou seja, a digitalização deve abordar um problema claro e relevante para a empresa, incentivar os recursos digitais nos processos de tomada de decisão e gestão é o segundo fator a ser considerado, pois trata-se da integração desses recursos ao sistema operacional de gerenciamento (ERP) e ao modelo operacional dos negócios que, na prática, a digitalização irá apoiar efetivamente a tomada de decisões desde o nível estratégico até o nível operacional. O terceiro ponto a ser considerado é o apoio irrestrito das lideranças nas mudanças culturais necessárias ao processo de digitalização, os líderes precisam estar preparados para aprimorar, maximizando as habilidades de liderança a fim de evoluir e apoiar a organização da jornada de transformação rumo ao sucesso.

Soofastaei (2020) afirma que as Universidades e demais instituições de ensino têm papel fundamental no processo de transformação digital da mineração ao fomentar cursos direcionados as novas tecnologias vigentes, visto que ao propor mudanças curriculares capazes de despertar o interesse voltado para a adoção e a difusão de sistemas de manufatura inteligente, aproximará o estudando ao mundo tecnológico.

Segundo ele cerca de, aproximadamente, 1% da população mundial trabalha na mineração com um contingente humano tão grande é indispensável a este setor priorizar e fazer uma transformação digital nos seus processos. Para Soofastaei (2020), em geral, as companhias de mineração se encontram muito atrás em relação as outras indústrias na corrida tecnológica.

A figura 15 mostra a digitalização relativa por tipo de indústria.

Figura 15: Digitalização relativa por indústria



Fonte: Adaptado de SOOFASTAEI, 2020

A evolução tecnológica de uma empresa, naturalmente, deverá seguir um caminho que inicia-se na automação dos processos, passa pela digitalização e culminaria na indústria 4.0 (Quarta Revolução Industrial). Essa tendência é, atualmente, uma realidade em boa parte das grandes corporações ao redor do mundo. O uso de máquinas, sistemas, redes inteligentes alinhadas aos processos de produção, armazenamento, distribuição têm transformado o mundo dos negócios, possibilitando mudanças nas relações de trabalho de forma autônoma, eficiente e adaptável.

Esse novo modelo de negócio começa a ser aplicado ao universo da mineração, no qual tem ocorrido uma junção entre esse setor e a Indústria 4.0 (Mineração 4.0). As companhias começam a fazer um planejamento otimizado através do uso de dados que podem ser reunidos e cruzados de forma a proporcionar interseções que ajudem na tomada de decisão. Outro fator determinante é a execução automatizada e conectada de tarefas com o uso de sistemas autônomos somados a Inteligência Artificial (IA).

Duas das mudanças mais perceptíveis da mineração do futuro têm a ver com os resultados consolidados e com as questões que envolvem a segurança no trabalho. As novas tecnologias promovem um aumento significativo na eficiência operacional o que amplia o nível produtivo e gera uma redução de custos. A automação dos processos permite que menos pessoas sejam expostas a riscos, além de proporcionar um melhor controle do ambiente de trabalho com a mitigação efetiva dos riscos.

Portanto, a jornada tecnológica tem o poder de mudar para melhor os processos produtivos na mineração de forma que essa seja capaz de evoluir e manter-se competitiva.

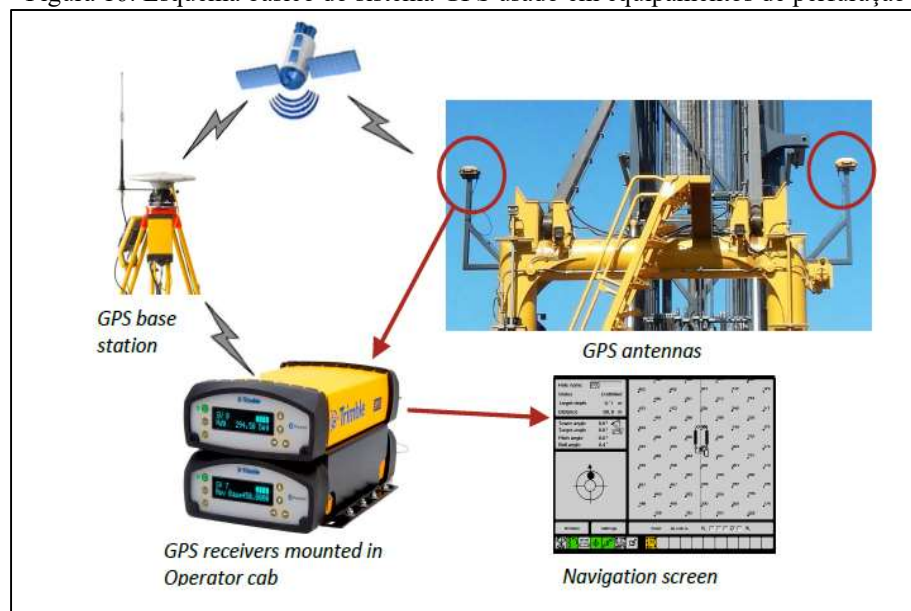
## 2.5.1 Desafios da automação em busca de uma mineração 4.0

### 2.5.1.1 Perda de sinal de geolocalização

As perdas do sinal de geolocalização geram interrupções e retrabalhos nos processos produtivos que dependem dessa informação para poderem operar de maneira automatizada, efetiva e sustentável. Na perfuração, esse tipo de ocorrência gera paradas indesejadas dos equipamentos e em algumas situações podem gerar falhas no processo de fragmentação das rochas.

As empresas, normalmente, optam por usar o sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*) o qual consiste em um conjunto de satélites (também denominados de constelação) que enviam ondas eletromagnéticas com informações moduladas a respeito dos processos para as estações de correções e triangulação posicionadas em pontos estratégicos na terra. Segundo Leite (2019), os sinais enviados pelos conjuntos de satélites, seja pelo GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya System*) ou outros sistemas, podem sofrer interferências atmosféricas e espaciais. Vide figura 16.

Figura 16: Esquema básico do sistema GPS usado em equipamentos de perfuração



Fonte: Adaptado de Epiroc, 2019

Uma das principais constelações usadas nos equipamentos de perfuração de grande porte em minas a céu aberto é chamada de Navstar que é uma rede de satélites que fornece serviços de posicionamento global (GPS), composta por 24 principais satélites GPS que orbitam a terra a cada 12 horas. Cada um desses satélites transmite informações sobre a posição atual e clima em intervalos regulares, como eles se movem em direções diferentes, um receptor terrestre recebe os sinais com uma pequena diferença de tempo.

Pelo menos quatro satélites GPS são “visíveis”, simultaneamente, e os sinais deles são recebidos pelo receptor GPS, que calcula a distância de cada satélite com base em quanto tempo leva para a mensagem chegar do ponto de origem (emissor) até o ponto de chegada (receptor), usa-se para isso uma estação base que é estabelecida como um ponto de controle conhecido, pois ao usar os satélites GPS, a estação base recebe uma posição calculada e em seguida usa essa posição, já conhecida, para calcular a diferença entre elas.

Esta diferença é o valor de “correção” que é transmitido via rádio ou WLAN e pode ser transmitido para os equipamentos através de uma conexão WLAN (rede sem fio) ou RF (radiofrequência), contudo isso depende da aplicação específica do site, se a mina estiver transmitindo dados de correção de rádio, as antenas de RF são montadas na máquina, mas se os dados de correção forem transmitindo via WLAN, os receptores devem estar conectados a um ponto de acesso sem fio e a instalação da antena de RF não é necessária.

Os pontos de referência/controlado da mina são usados para calibração do local, eles determinam a relação entre as coordenadas GPS e os valores X, Y e Z (Norte, Leste e elevação), ou seja, convertem longitude e latitude para norte e leste. A Estação Total (teodolito) é usada para completar a calibração do local de referência na mina, gerando um arquivo com extensão DC que pode ser exportada pela Estação Total.

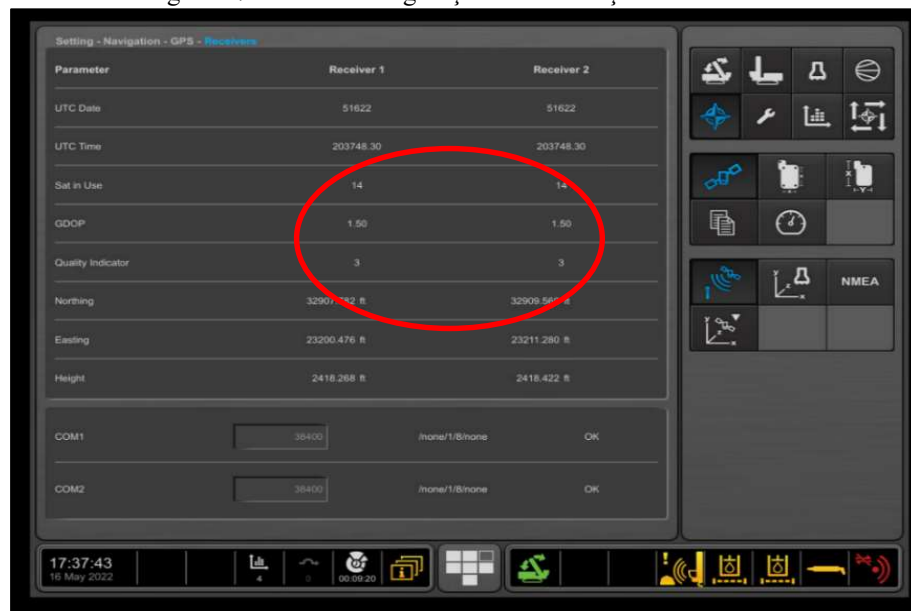
As antenas de GPS recebem dados de satélites para fornecer as coordenadas aos receptores, já esses são montados no suporte do GPS na torre de perfuração e são conectadas via cabos aos receptores localizados dentro da cabine dos equipamentos. Observa-se que alguns modelos de equipamentos de perfuração podem ter duas antenas, mas se houver somente uma, ela se conectará ao receptor GPS n. #2, dependendo da região, utilizando uma antena de 450 MHz ou 900 MHz, normalmente usa um receptor SPS 855 e um SPS 555.

De acordo com Freitas (2019), a terra possui uma atmosfera composta por diferentes elementos com densidades diversas que são capazes de provocar distorções nas propagações das ondas eletromagnéticas que chegam às antenas dos receptores. Esses efeitos vão desde a atenuação da potência até alterações na direção de propagação e velocidade da onda. Um dos

fatores que mais interferem no sinal e que está frequentemente presente nos levantamentos é a cintilação ionosférica.

Alguns estudos apontam formas de se realizar a mitigação dos efeitos da cintilação na mineração. Entre as estratégias mais utilizadas, destacam-se a modelagem estatística dos dados (CONKER *et al.*, 2002) e as melhorias no hardware dos receptores (VAN DIERENDONCK, 1999). Observa-se que a vivência em campo alinhada aos estudos recentes mostra que essas técnicas não são totalmente eficazes contra os efeitos da cintilação ionosférica, atualmente, busca-se aumentar o número de constelações de satélites. A figura 17 mostra o número de satélites disponíveis e em uso em uma aplicação de perfuração de rochas no Brasil.

Figura 17: Tela de configuração e visualização sistema GPS



Fonte: Próprio autor, 2022

### 2.5.1.2. Pré-requisitos mínimos das redes

O problema de rede é o principal gargalo a automação das minas, visto que o custo de investimento é elevado e algumas restrições como profundidade da lavra limitam o fluxo e troca de informações e dados, basicamente, o envio/recebimento de dados (vídeos, GPS, dados binários etc.). Abaixo encontram-se elencados os principais tipos de redes, a saber:

*Wlan* = Rede sem fio (feita ponto a ponto);

*Wlan* = Através de antenas;

*Ethernet switch* = Dados no formato conhecido da internet (a banda é um entrave);

*Voip* = Tecnologia que usa dados semelhantes aos telefônicos com a vantagem de ser mais veloz;

*Bluetooth* = Rede local sem fio, porém limitada a uma distância de no máximo 60 metros e sujeita a interferências externas (ondas de rádio, campos magnéticos etc.);

Fibra ótica = Cabeamento a base de supercondutor limitação vibração e umidade;

Redes mistas = Compostas por roteadores e dispositivos físicos de conexão.

Recomenda-se fazer um *site survey* que consiste em simular, através de equipamentos apropriados, a operação e locomoção de um modelo autônomo dentro dos limites operacionais da mina. Em outras palavras, busca-se medir através do uso de ferramentas de monitoramento da rede SW, a qualidade, a largura da banda e latência em vários locais e pontos da cava, tendo como principal objetivo a busca pela superação das limitações na transmissão e recepção dos dados. Abaixo, seguem as etapas básicas do processo de avaliação da rede de trabalho:

Etapas 1: Coordenar com a mina os recursos necessários e os pontos de coletas;

Etapas 2: Receber, inventariar o kit de ferramentas para análise da rede;

Etapas 3: Montar os dois simuladores (um num ponto fixo – sala e/ou escritório na mina e outro, em um veículo – caminhonete com acesso as áreas de lavra);

Etapas 4: Verificar a atribuição de TR e calibrar o kit simulador da máquina;

Etapas 5: Testar a conectividade e funcionalidade dos simuladores (arquivos Jperf) para coletar os logs;

Etapas 6: Realizar a avaliação da rede atual, gerar os pontos de coletas;

Etapas 7: Registrar os logs (coleta mínima de sete pontos);

Etapas 8: Consolidar os registros e enviar os dados para o computador da avaliação;

Etapas 9: Observar os problemas de conexão/permanências no kit simulador da máquina e registre cada ponto;

Etapas 10: Pontos estacionários: Executar o primeiro ponto e "inicie" o programa JPerf para os níveis de largura de banda/latência;

Etapas 11: Selecionar "salvar" para capturar e salvar ou registrar como um arquivo de dados no formato "*Point\_1\_Stationary\_pit name*";

Etapas 12: Fazer também uma captura de tela do Jperf para os registros e resumo da pesquisa;

Etapas 13: Repetir todas as etapas anteriores para todos os pontos estacionários.



Observa-se que não é recomendado ultrapassar a velocidade de 20 a 25 km/h com o simulador montado no veículo.

Os requisitos para a execução de operações remotas e/ou autônomas dos equipamentos Epiroc encontram-se listados abaixo.

1º) Taxa de transferência → A taxa de transferência é a quantidade de dados (Mbps) que será transmitida entre o roteador do *rack* no local e o(s) roteador(es) da máquina. Número máximo de máquinas alocadas por vez (no máximo 3 máquinas).

2º) *Jitter* na rede → O *Jitter* é a variação na latência em um fluxo de pacotes quando esse leva mais tempo para viajar da máquina para o *rack* no local de operação. O '*Jitter*' deve ser  $\leq 30$  ms.

3º) Latência → A latência na rede é a quantidade de tempo que leva para o pacote viajar da máquina para o roteador do *rack* no local. A latência deve ser  $\leq 200$  ms.

4º) Perda de Pacote → É quando o pacote enviado do roteador local não alcança o roteador da máquina ou vice-versa. A perda de pacotes deve ser  $\leq 1\%$ .

5º) Teste de *Wi-Fi* → O teste *WiFi* consiste em fazer a alocação da máquina (simulador móvel) a sala de controle (simulador fixo). A figura 18 mostra o teste de rede realizado numa mina de ouro no Brasil.

Figura 18: *Survey* rede mina de ouro no Brasil



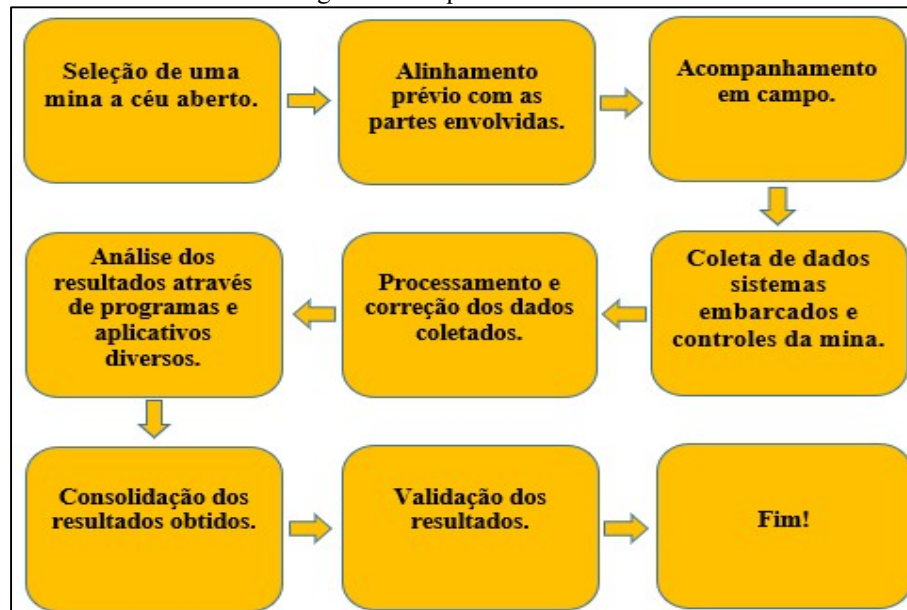
Fonte: Próprio autor (2022)

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento desta pesquisa pode ser compreendida através da visualização da figura 19.

Figura 19: Esquema de trabalho



Fonte: Próprio autor (2022)

Este trabalho encontra-se baseado em um estudo de caso com abordagem descritiva e exploratória, sendo que a pesquisa iniciou-se com a seleção de uma mina a céu aberto localizada nas proximidades da cidade de Itabira no estado de Minas Gerais. Foi realizado um alinhamento prévio com as partes envolvidas que passaram a fazer reuniões regulares com as equipes.

Na sequência foi estabelecida uma rotina para fazer os acompanhamentos em campo dos equipamentos de perfuração, já o processo de coleta de dados se deu através dos sistemas de despacho (disponibilidade física, utilização e rendimento operacional), diretamente do sistema embarcado nas máquinas (*RCS* – dados de *MWD*, horímetros e dos tempos dos ciclos operacionais).

A etapa seguinte destacou-se pela realização do processamento e a consolidação dos dados que foram analisados, utilizando das ferramentas estatísticas (gráficos, paretos e histogramas) gerados em aplicativos e programas específicos como (*Excel*, *surface manager* e *Ictus drill calculator*). A etapa final materializou-se com a validação e apresentação dos resultados da pesquisa.

A seleção da unidade produtiva deu-se em virtude das recentes mudanças realizadas na mina, onde uma opção tecnológica através do uso de equipamentos de perfuração automatizados da marca Epiroc modelo PV275D, método roto-percussivo foi escolhida, pois os equipamentos selecionados são capazes de perfurar furos longos (inclinados ou não) com profundidade de até 52 metros, diâmetro máximo de 270 mm (10 5/8”), utilizando os métodos percussivo (martelo de fundo) ou rotativo (brocas tricônicas com *inserts* de carbureto de tungstênio).

A coleta de dados foi realizada de forma rotineira, seguindo as frequências estabelecidas pela matriz de monitoramento conforme mostra a tabela 3.

Tabela 3 - Matriz de monitoramento e coleta de dados.

Horometro	mensal	horas
Disponibilidade	mensal	% horas
Utilização	mensal	% horas
Rendimento Operacional	mensal	%
Eficiência Operacional Global	mensal	%
Taxa de Perfuração	mensal	m/h
Tempo Médio entre Falhas (MTBF)	mensal	horas
Tempo Médio de Reparos	mensal	horas
Geração de energia específica	mensal	pressão em psi
Número Total de Furos	mensal	adimensional
Produção	mensal	metros lineares

Fonte: Elaborada pelo autor

## CAPÍTULO 4

### ESTUDO DE CASO

#### 4.1 Visão geral dos dados

##### 4.1.1 Local dos testes

A mina escolhida para realização do estudo encontra-se próximo a um outro grande empreendimento mineral que no passado chegou a ser considerado como a maior mina de ferro do ocidente. Localizada na região centro-leste de Minas Gerais, abrangendo o município de Itabira, apresenta litologias ricas em óxidos de ferro com o predomínio de itabiritos compactos (com teor de ferro na faixa de 40 a 50%) e hematita (com mais de 63% de teor de ferro).

Além dos Itabiritos, há dolomitos ferruginosos e filitos hematíticos que compõem um conjunto de formações ferríferas metamórficas. Observa-se que os dolomitos e itabiritos ocorrem intercalados tanto vertical como lateralmente (Pires 1995) e o contato entre essas litologias é brusco, há, também, rochas granito-gnáissicas que encontram-se nas áreas de menor altitude e xistos que compõem as encostas.

A tabela 4 relaciona as litologias analisadas no estudo juntamente com o valor de UCS atribuído a partir de laudos geológicos e a classificação de minério/estéril, uma imagem de referência de cada tipo de rocha também está incluída.

Tabela 4 - Litologias da mina

Tipo de Rocha	Xisto	Gnaisse	Itabirito Compacto	Hematita
UCS (Mpa)	49	113	429	239
Minério/ Estéril	Estéril	Estéril	Minério	Minério



Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.1.2 Equipamentos de perfuração

Foram utilizadas três perfuratrizes da marca Epiroc modelo PV275 com sistema embarcado de controle denominado *RCS (rig controle system)* identificadas neste trabalho como P50, P51 e P53, Essas máquinas são consideradas produtos básicos na indústria de extração mineral pelo desempenho e confiabilidade comprovados.

Com capacidade de carga da broca de até 85.000 lb (42,5 toneladas), podendo usar brocas tricônicas rotativas de até 12-1/4” (311 mm), utilizadas para perfurar rochas duras no mais diferentes e diversos tipos de litologias desde o cobre até os minérios de ferro. A PV275 pode perfurar furos com comprimento de 37 pés (11,3 m) em uma única passagem, ou obter profundidade total de 195 pés (59,4 m) em várias passagens usando um carrossel com 4 hastes (tubos de perfuração) com 40 pés de comprimento (12,2 m).

A plataforma operacional *Rig Control System (RCS)* fornece recursos de automação escalonáveis, visto que essa tecnologia fornece aos equipamentos vários recursos de segurança e intertravamentos, bem como, uma base para adicionar novas funcionalidades/opcionais sem grandes esforços.

Os equipamentos com esse tipo de tecnologia podem ser controlados por um operador a bordo usando opções automatizadas tais como, auto perfuração (*Autodrill*), auto nivelamento (*Autolevel*) e troca automática de tubos (*ARC*), ou podem ser operados com o operador fora da máquina através do sistema de tecnologia remota (pacote opcional chamado *BenchRemote*).

O sistema teleremoto permite que um mesmo operador opere, simultaneamente, até três equipamentos, também é possível fazer implementações (*up grade*) para o sistema de perfuração autônoma com quase nenhuma interação humana. As figuras 20 e 21 mostram, respectivamente, a perfuratriz e o interior da sua cabine de operação.

Figura 20: Perfuratriz marca Epiroc modelo PV275D



Fonte: Adaptado de Epiroc (2020)

Figura 21: Interior da cabine de operação PV275D



Fonte: Adaptado de Epiroc (2020)

De acordo com a Epiroc (2021), a estratégia de controle para perfuração automática (*AD2*) é para que o equipamento perfure o mais rápido possível, com base na configuração de ataque, a rocha (agressividade<sup>3</sup>) selecionada pelo operador e ao mesmo tempo não exceda aos limites operacionais estabelecidos pelo sistema de automação.

Os limites de operação não mudam durante a perfuração automática, mas o valor máximo do peso sobre a broca (*WOB*) será recalculado se a escala de agressividade (ataque a rocha) for alterada pelo usuário ou pelo sistema de controle automático. O *WOB* e rotação (*RPM*) reagem às condições do solo, alterando a taxa de Penetração (*ROP*).

#### 4.1.3 Tipos de dados disponibilizados

As perfuratrizes da marca Epiroc modelo PV275 com o sistema embarcado RCS possuem quatro opções de registro de dados disponíveis nos formatos de dados IREDES<sup>4</sup> (extensão dos arquivos XML) e texto (extensão txt).

- Registro *MWD* (medição durante a perfuração) – O registro *MWD* inclui o registro de eventos (anomalias) e o registro de *status* do equipamento (perfuração, locomoção etc.). Este arquivo de registro é enviado quando o furo é concluído;
- Registro de qualidade - O registro de qualidade somente é aplicado quando há o uso do sistema global de posicionamento (*GPS*), neste caso, o arquivo é gerado quando o furo é concluído;
- Registro de *status* – Mostra o *status* de operação do equipamento;
- Registro de eventos – Faz o registro de entrada / saída do operador, perfuração, locomoção, nivelamento, códigos de atrasos definidos pelos usuários, consumíveis (ferramentas de perfuração) e falhas de produção. Os arquivos são gerados pela configuração de "Taxa de atualização" e vem com o registro *MWD* que é salvo como "DSxxxxxx.xml" onde xxxxxx é baseado na data e hora em que o evento foi gerado.

<sup>3</sup> O controle de ataque a rocha também chamado de agressividade, permite ao operador escolher entre uma configuração mínima onde as taxas de penetração serão menores, mas ocorrerá uma maximização da vida útil da ferramenta de perfuração (broca tricônica ou *bit*). De forma inversa, a configuração máxima permitirá taxas de penetração mais altas à custa da vida útil das ferramentas. A escala de agressividade varia de um a dez, sendo o um o ajuste de menor agressividade e o dez o de máxima agressividade. Normalmente usa o nível cinco de agressividade durante as perfurações automatizadas em rochas médias e duras. Fonte: Epiroc (2019).

<sup>4</sup> O padrão IREDES é estabelecido por organizações de todo o mundo para atender aos requisitos locais de qualquer usuário de máquina. Esta é uma pré-condição para tornar o equipamento utilizável globalmente e para usar informações unificadas dos locais de mineração para fornecer suporte as decisões em nível gerencial nas empresas de mineração que operam globalmente. Disponível em: <https://iredes.org>. Acesso em 12 agosto de 2021.



Há duas formas para fazer a coleta dos dados das máquinas: 1ª. usando um *stick* de memória *USB* conectado a um *hub* ou porta *USB* na cabine da máquina ou 2ª. usando *CCI* (Interface de comunicação comum - servidor da máquina) o qual envia as informações para um outro servidor externo.

Nesse estudo foi utilizado o método *USB* para coletar os arquivos das máquinas, uma vez, que elas não estavam conectadas a rede de dados da mina. A figura 22 mostra os tipos e as extensões dos arquivos de dados gerados pelos equipamentos de perfuração.

Figura 22: Tipos e extensões dos arquivos com dados das máquinas

Nome	Data de modificação	Tipo	Tamanho
text-20220225 --70.txt	25/03/2022 08:40	MWD	20 KB
text-20220227 --71.txt	25/03/2022 08:40	MWD	13 KB
text-20220228 --71.txt	25/03/2022 08:40	MWD	16 KB
EV11000442.xml	25/03/2022 08:42	Eventos	18 KB
EV110004817.xml	25/03/2022 08:42	Eventos	18 KB
EV11010638.xml	25/03/2022 08:42	Eventos	18 KB
DS010344.xml	25/03/2022 08:41	Status	2 KB
DS010444.xml	25/03/2022 08:41	Status	2 KB
Console2022-03-23 _190941.txt	25/03/2022 08:54	Qualidade	1 KB
Console2022-03-23 _201547.txt	25/03/2022 08:54	Qualidade	1 KB

Fonte: Adaptado de Epiroc (2019)

#### 4.2 Etapas básicas para elaboração de um furo

A operação para fazer um furo no maciçoso rochoso envolve além de técnica todo um cuidado especial de modo que a qualidade do furo seja a melhor possível, uma vez que, a principal finalidade é a alocação dos explosivos necessários para o desmonte da rocha. De acordo com Jardim (2017), a perfuração de rocha é o perfeito sincronismo entre quatro movimentos:

- Impacto ou percussão – sua função é de provocar o cisalhamento do material a ser perfurado (rocha). O impacto ou percussão é gerado pelo movimento do pistão, e é transmitido pelo punho para as hastes, para a coroa e para o material que está sendo perfurado;

- Rotação – Sua função é reposicionar as pastilhas da coroa, abrindo toda a área do furo. A rotação é feita através de motores e redutores;
- Avanço – Tem como função manter as ferramentas constantemente em contato com a rocha, evitando-se assim a flutuação das hastes;
- Limpeza – Tem como finalidade manter o furo limpo. Furo com detritos prejudica a perfuração, quanto mais limpo o furo maior a velocidade de penetração.

Os furos, normalmente, podem ser divididos em três zonas distintas (zona do emboque, zona do comprimento e zona de fundo). A correta zona será definida pela posição quando a ferramenta de perfuração estiver (bit ou broca tricônica), já o objetivo do emboque é fornecer um início estável do furo para garantir que o restante dele seja reto e não desmorone.

O solo perto da superfície é sempre rompido e instável a partir das detonações anteriores e deve ser tratado com cuidado. A profundidade de emboque para autoperfuração Epiroc (também denominado de *Auto drill 2* ou AD2) é estabelecida pelo sistema quando o emboque é iniciado em função direta com o tipo de litologia, quando o solo firme é detectado dentro da zona de emboque permitida (0,5 - 3 m a partir do ponto zero da profundidade do furo), o sistema muda para perfuração normal. Durante o emboque do furo as pressões de avanço, ar, rotação e fluxo de água deverão ser as mínimas possíveis de modo que se configure o perfil ou a circunferência do furo, mantendo uma geometria cilíndrica.

O local de emboque do furo deverá estar limpo, a ferramenta de perfuração deverá estar em contato com o solo para que toda a energia gerada pelo equipamento de perfuração seja transmitida e possa fragmentar a rocha executando o furo. Deve-se aumentar gradativamente a percussão e a rotação, mantendo a pressão de avanço firme e constante, caso isso não ocorra, poderá causar danos mecânicos e uma queda brusca na velocidade de perfuração (GERALDI, 2011). O sistema AD2 permite três tipos de limpeza dos furos na fase de embocamento que são:

- Limpeza desligada: O sistema permitirá a transição direta da fase de emboque para zona do comprimento do furo sem limpar o mesmo;
- Limpeza ligada: O AD2 fará transição da zona de emboque para perfuração após realizar a limpeza em toda a extensão do comprimento do emboque;
- Limpeza automática: Se as condições do solo exigir, será realizada uma limpeza no emboque antes da transição para a perfuração.



Após o emboque inicia-se a fase do comprimento do furo que busca perfurar com a máxima velocidade possível, mantendo um perfeito sincronismo entre as pressões de avanço, rotação, ar e injeção de água. Na prática, busca-se maiores taxas de penetração, uma vez que essa tem influência direta no custo da perfuração.

Sabe-se que, a perfuração é extremamente importante para o sucesso do desmonte de rocha com explosivos, sendo que uma perfuração incorreta no maciço pode acarretar uma série de problemas, tais como fragmentação deficiente, excesso de vibrações, excesso de ruídos, ultra lançamento etc. (QUAGLIO, 2003).

Próximo ao término do furo encontra-se a zona de fundo, que nada mais é do que a fase final, respeitando o limite de profundidade especificado para o furo. O domínio completo das técnicas e o respeito pelos passos do ciclo de perfuração das rochas permite realizar o desmonte com elevado rendimento e segurança.

### 4.3 Sistema de perfuração e coleta de dados

As bancadas da mina analisadas possuem altura de 15 m., com inclinação máxima de 25° e bermas com larguras que variam de seis a oito metros. O posicionamento dos furos é controlado pelo operador, mas a perfuração e o registro dos parâmetros de perfuração são feitos automaticamente.

A perfuração é feita com tubos de extensão de 40 pés de comprimento (12,2 m.), broca de 9 7/8" (250 mm.) de diâmetro e *IADC*<sup>5</sup> 6, sendo que os furos apresentam comprimentos que variam na ordem de 15 a 17 m. de profundidade dependendo da litologia a ser perfurada.

O sistema de controle da perfuratriz (*RCS* versão 5.4 rev. 17) faz a coleta das amostras a cada 0,05 m. perfurado de acordo com o que foi definido para monitorar as informações, gerando até 340 pontos de amostragem por furo a um comprimento médio de 17 metros. Esses dados são confiáveis e podem ser usados para analisar o processo da perfuração, são eles:

- Data e hora: A hora de início do dia útil é usada em combinação com o calendário ao recuperar dados para a (s) data (s) selecionada (s);
- Modo de operação: Há dois modos possíveis manual e automático. O sistema mostra qual o modo de operação utilizado durante a perfuração;

---

<sup>5</sup> Desde 1940, a ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE COMPANHIAS DE PERFURAÇÃO (*IADC – International Association of Drilling Contractors*) desenvolveu um sistema de padronizado para classificação das brocas tricônicas, para fazer comparações e evitar confusão entre os tipos de brocas equivalentes em relação aos seus distintos fabricantes.  
Disponível em: Erro! A referência de hiperlink não é válida.

- Comprimento do furo: Comprimento da perfuração no ponto de amostragem em metros;
- Rotação da ferramenta (RPM): Mostra a velocidade de rotação da broca ou bit;
- Força sobre a ferramenta (*WOB*): Registra o valor de força (peso) aplicado de modo a vencer a resistência do maciço rochoso. Unidade de medidas mais usadas são o quilo libras (KLb) ou quilo Newton (KN);
- Taxa de Penetração (*ROP*): velocidade com que a broca avança através do maciço rochoso. Expressa em metros por minuto (m/min) e/ou em metros por hora (m/h);
- Torque de rotação: É a força horizontal necessária para girar e fazer o reposicionamento da estrutura cortante da ferramenta de perfuração. Unidade de medida é quilo libra força (KLb.F) ou quilo Newton força (KN. F);
- Pressão de ar: Pressão do ar usada para fazer a limpeza dos fragmentos de rochas dos furos. Pode ser medida em bar (b) ou em libras por polegadas ao quadrado (psi).

Para realização deste estudo foram coletados os dados de perfuração que referem-se as três zonas do furo (emboque, zona do comprimento e zona final ou término), nos pontos de profundidades zero, meio metro e na sequência a cada metro perfurado até a conclusão do furo.

A tabela 5 descreve os dados coletados em campo disponíveis nos sistemas embarcados nas máquinas, apresenta, também, o modo de operação e o(s) tipo(s) de rocha identificada(s) a partir dos relatórios geológicos.

Tabela 5 - Dados de perfuração

Equip.	Banco perfurado	Operação manual	Operação automático	Nº de furos perfurados	Comprimento médio dos furos (m)	Rotação (RPM)	WOB (KLb)	Torque (KLbF)	Pressão de ar (psi)	ROP (m/h)	Litologia
P51	B835	30.0%	70.0%	40	14.7	80	52.5	4.5	55	21.6	Hematita
P53	B835	67.9%	32.1%	56	14.9	86	47.0	4.8	61	30.2	Hematita
P50	B850	50.0%	50.0%	16	9.4	73	53.8	5.0	62	17.4	Itabirito
P51	B850	42.9%	57.1%	7	14.0	66	54.5	4.1	44	8.7	Itabirito
P53	B850	36.7%	63.3%	30	14.1	77	53.5	4.5	53	17.0	Itabirito
P50	B865	77.8%	22.2%	9	16.1	88	51.3	4.5	58	45.2	Itabirito
P50	B868	32.1%	67.9%	215	15.6	87	36.0	4.1	48	67.9	xisto
P51	B868	11.7%	88.3%	77	13.7	87	34.0	4.4	53	57.7	xisto
P53	B868	7.7%	92.3%	65	14.6	84	32.0	4.3	53	51.9	xisto
P53	B900	83.7%	16.3%	49	17.2	85	48.0	5.3	51	25.3	Gnaisse
P51	B950	52.0%	48.0%	25	16.6	83	40.0	4.7	49	48.2	xisto
P53	B950	7.1%	92.9	28	12.6	87	33.0	4.9	55	49.5	xisto

Fonte: Dados da pesquisa.

## 4.4 Análise dos dados

### 4.4.1 Processamento dos dados

De maneira geral, os dados gerados pelos sistemas embarcados, assim com o *MWD*, são afetados diretamente pelas condições de aplicações dos equipamentos e pela utilização do seu sistema de controle operacional. Dessa forma, incertezas são anexadas aos dados que devem ser corrigidos de modo a priorizar as mudanças nos parâmetros que dependem das propriedades da rocha.

A priori, esse é um processo simples que inicia-se com uma filtragem para remover os valores irrealistas (por exemplo, valores negativos de *WOB* que podem suscitar uma ideia de flutuação nos sistemas de avanço das máquinas). Em seguida, devem ser removidos os picos de valores que ultrapassam as capacidades mecânicas dos equipamentos, como exemplo, tem-se as altas taxas de penetração (*ROP*). Por fim, devem ser feitas as correções em função das influências das profundidades dos furos.

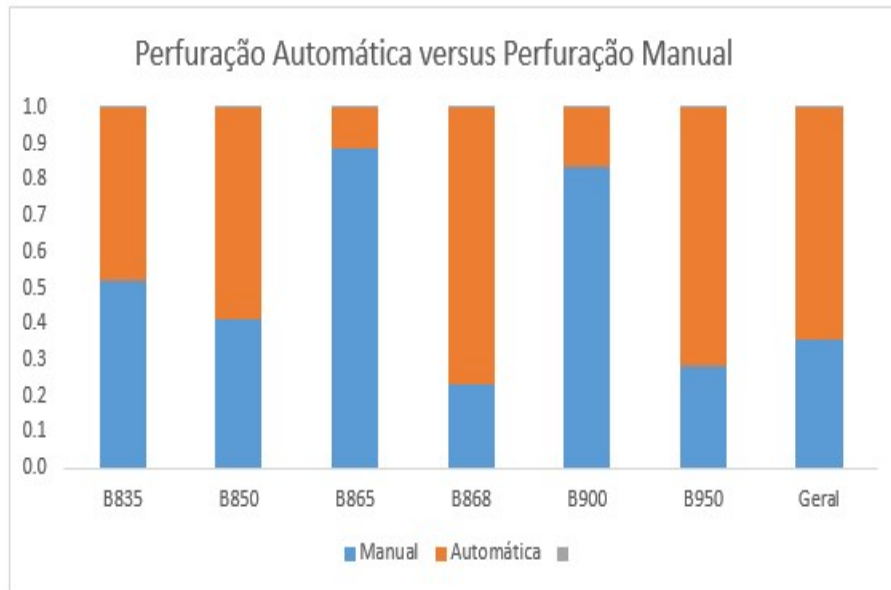
### 4.4.2 Correção dos dados (conversão dos valores negativos de peso sobre a broca - *WOB*)

Por vezes, dados de produção incluem valores irreais de alto e baixa *performance* dos equipamentos, podendo gerar dificuldades, dúvidas quando a análise e interpretação. Visto que, a distribuição da probabilidade experimental é composta pelos valores da amostra de dados coletados no período de 21 de maio a 01 de setembro de 2021, compreendendo 617 furos amostrados a cada 0,05 m., totalizando mais de 10.000 linhas com informações.

Para facilitar a análise e discussão, os dados foram divididos em seis blocos que correspondem, exatamente, as seis diferentes frentes de lavras onde eles foram gerados, sendo três bancos de minérios localizados nas cotas altimétricas (835, 850 e 865) e três de estéreis nas posições com cotas topográficas (868, 900 e 950).

A figura 23 ilustra a distribuição dos furos perfurados nas frentes de trabalho e as técnicas de perfuração utilizadas.

Figura 23: Gráfico técnica de perfuração utilizada.

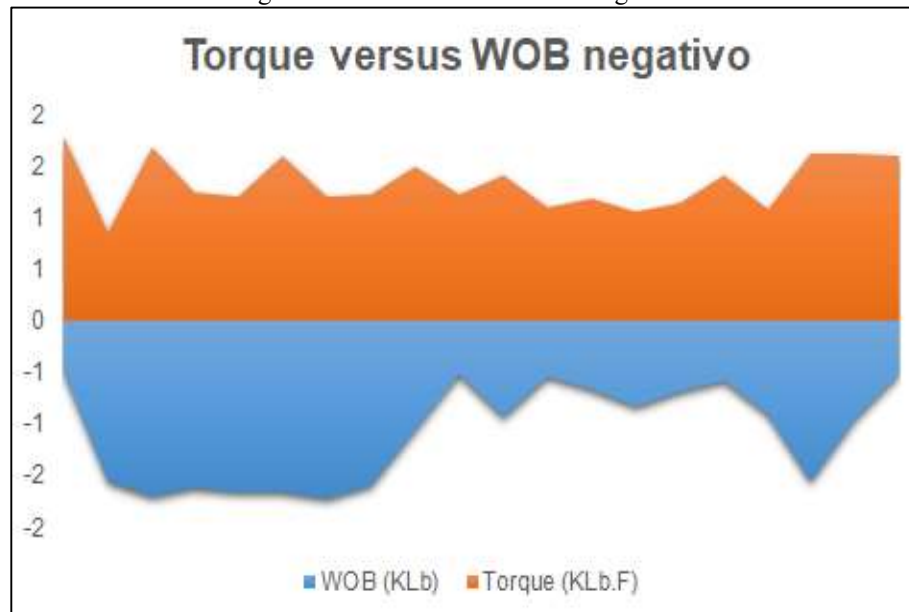


Fonte: Elaborado pelo autor.

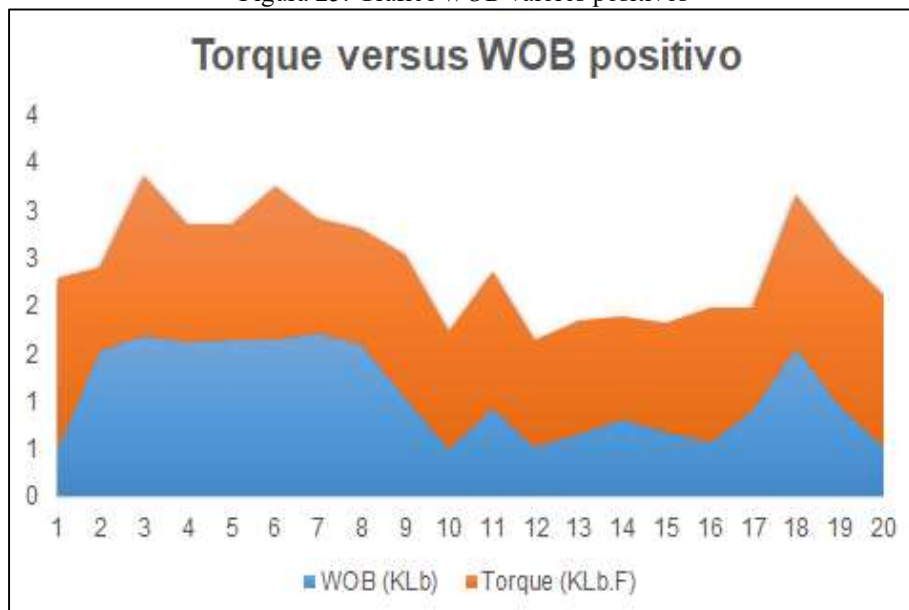
De acordo com Costa (2018), as rochas são perfuradas, basicamente, pela ação da rotação e do peso sobre a broca (*WOB*), já do ponto de vista técnico, alguns podem achar confuso muitas das definições e unidades de medidas usadas quando aborda-se a temática da perfuração, contudo, cabe salientar que vários dos termos e unidades usadas na perfuração têm uma história que data aos primórdios quando esse processo era baseado na experiência prática das pessoas e não nos padrões de engenharia.

Para muitos usuários e fabricantes de equipamentos, a força de alimentação é comumente referida como "Peso na broca" (*WOB*), expresso em lb (libras) ou quilograma (kg), sendo o "peso na broca" definido como uma força descendente que atua sobre ela, gerada pela energia hidráulica dos cilindros de avanço e somada ao peso da coluna de perfuração. Sendo assim, como o peso é uma grandeza vetorial influenciada diretamente pela ação gravitacional, é impossível conceber a ideia de valores negativos para a variável *WOB* em um processo de perfuração, seja ele manual ou automatizado.

Caso fosse possível indicaria uma, provável, situação de flutuação da ferramenta de perfuração sobre o maciço rochoso, na qual os valores de torque deveriam ser nulos, a fim de evitar interpretações errôneas e aferir uma maior precisão nas análises, sendo inserida uma constante multiplicativa de valor (-1) para fazer a transformação dos valores de *WOB* negativos em valores positivos, uma vez que, os seus binários de torque apresentam valores diferentes de zero, conforme observa-se nas figuras 24 e 25.

Figura 24: Gráfico *WOB* valores negativos

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 25: Gráfico *WOB* valores positivos

Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.4.3 Refinamento dos valores acima das capacidades mecânicas dos equipamentos

Nota-se que vários são os estudos e esforços no sentido de otimizar os parâmetros operacionais durante a perfuração a fim de determinar uma melhor opção, possível, de rotação (RPM) e peso sobre a ferramenta de perfuração (*WOB*).

O intuito principal é obter uma máxima taxa de penetração (*ROP*) que muitas das vezes uma *ROP* maximizada não é possível, logo, deve-se buscar uma taxa de penetração desejada

com o mínimo consumo de energia. Isso é uma tarefa árdua, que sem dúvida, é uma das questões mais complicadas, difíceis e necessária a um processo de perfuração efetivo. Existem diversos complicadores que tendem a levar a uma limitação na velocidade de avanço da broca (limpeza do fundo do furo, condição da rocha, riscos de travamentos da coluna de perfuração, limite operacional das ferramentas e máquinas).

Para Rocha *et al.* (2019), uma estratégia interessante, capaz de permitir uma produtividade mais assertiva é fixar um limite máximo para a ROP já Barbosa *et al.* (2019), atenta-se para trabalhos recentes que utilizam técnicas de aprendizado de máquina para obter modelos e reportar os resultados. Segundo eles, os resultados atuais são mais significativos e melhores que os modelos tradicionais.

Desta forma, nota-se a importância de saber qual a máxima taxa possível pode ser obtida com o modelo de broca selecionado, para tanto, a solução trivial passa pela determinação do correto par de força de avanço (*WOB*) e rotação (RPM), embora parecendo fácil, na prática é uma ação muito difícil e complicada, pois envolve diversas variáveis que influenciam diretamente a ROP, tais como vazão, rotação da broca (RPM), peso sobre broca (weight on bit, ou simplesmente *WOB*), diâmetro da broca, entre outros (BOURGOYNE *et al.*, 2013). Portanto, observa-se uma forte tendência em buscar uma melhor taxa de penetração (*ROP*) alterando exclusivamente a força sobre a broca (*WOB*).

De acordo com Aadnoy *et al.* (2022), um ajuste inadequado nos parâmetros de perfuração pode gerar sérios transtornos a perfuração com gasto desnecessário de energia, sendo que esse excesso é dissipado em forma de calor, ruído e retorna para a máquina gerando vibrações, essas são extremamente danosas ao processo de perfuração, pois irão causar perdas de produtividade, paradas indesejadas dos equipamentos e flambagem dos tubos de perfuração.

Deve-se, desta forma, buscar a relação mais adequada entre peso e rotação capaz de gerar a menor energia mecânica específica, logo, a eficiência, otimização na perfuração passa pela adoção e uso de parâmetros operacionais capazes de gerar uma *ROP* que, também, pode ser considerada como ótima.

A falta de um modelo confiável para a previsão da *ROP* é um entrave que impede o desenvolvimento sustentável do processo de perfuração de rochas, há poucos modelos que se prestam a essa finalidade, todos apresentam limitações que impossibilitam o uso de forma universal, rápida e segura.

Outro ponto a ser externado é que falta, no mercado de ferramentas e equipamentos de perfuração, informações precisas sobre os níveis de produtividade alcançáveis, ou seja, ao contrário de outros produtos na mineração, não há uma “fonte segura” ou manuais de produção

com dados confiáveis, isso justifica a procura e evidência a necessidade em obter um modelo para a previsão da *ROP*.

A partir das observações feitas por Maurer em laboratório, nota-se que ele concluiu a respeito do aumento da rotação da ferramenta de perfuração que gera um aumento da *ROP* e que isso, somente, é possível quando há um determinado peso sobre a broca, obtendo uma equação capaz de fornecer a máxima taxa de penetração para ela.

Uma vez que conhecendo o limite superior (a capacidade máxima possível) pode-se estabelecer uma faixa de *ROP* favorável que deverá ser atendida durante o processo de perfuração, esse modelo de previsão de taxa de perfuração é mostrado na equação 10.

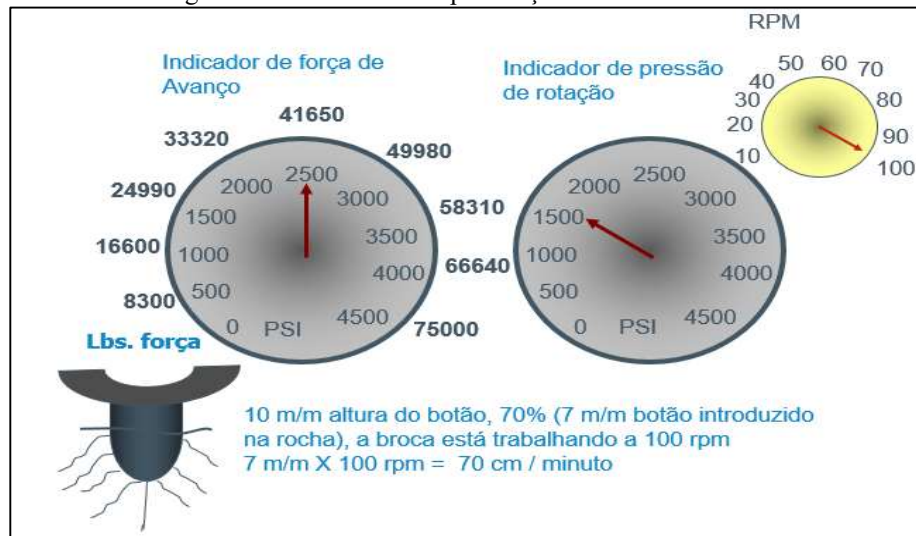
$$\text{Taxa de penetração prevista} = P_b \times R_B \quad (10)$$

Onde: *ROP* é a taxa de penetração (m/h),  $P_b$  é a profundidade de penetração do botão na rocha (metros) e  $R_B$  é a rotação da broca (RPM).

Estudos mostram que o ponto ideal de penetração do botão, sendo possível obter uma taxa de penetração máxima, encontra-se na faixa de 70% a 75% da altura do mesmo dentro da rocha. Portanto, ressalta-se que um máximo valor de *WOB*, necessariamente, não significa uma máxima *ROP*, uma vez que é necessário que se mantenha uma distância entre a face da broca e o maciço rochoso de modo que possa ser realizada uma eficiente limpeza, capaz de remover os cavacos (cascalhos) do fundo do furo.

Para tanto, o peso adicional fará com que os botões enclave completamente na rocha resultará numa diminuição na taxa de penetração, em algumas situações, a força de avanço é tamanha que a taxa de penetração chega a zerar. As figuras 26 e 27 exemplificam a situação de penetração do botão na rocha.

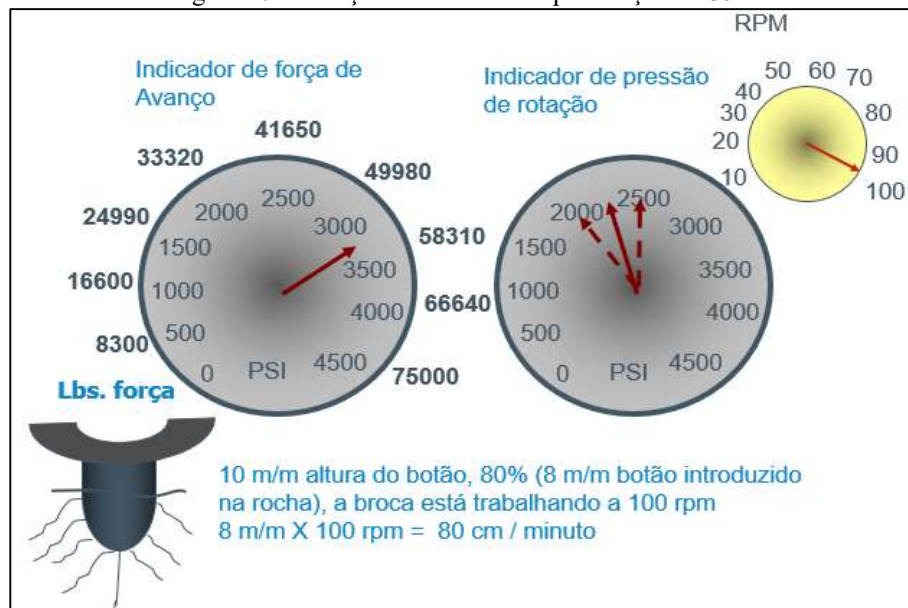
Figura 26: Ponto ótimo de penetração do botão na rocha



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 26 mostra o ponto ótimo de penetração do botão na rocha (70%), sendo possível obter uma *ROP* de 70 cm/min. (42 m/h) sem que houvesse vibração excessiva na coluna de perfuração.

Figura 27: Vibração excessiva com penetração de 80%



Fonte: Elaborado pelo autor

Pela figura 27, percebe-se que a taxa de penetração foi de 80 cm/min. (48 m/h) quando o botão penetrou 80% da sua altura, mas gerou um excesso de vibração sobre a coluna de perfuração. A vibração causa desgastes nos equipamentos, contudo, o mais importante é observar que essa vibração cria um ambiente muito desagradável e inseguro para o operador.

Quando há vibração nos equipamentos de perfuração, os operadores, invariavelmente, reduzem o peso ou a rotação até que a vibração volte a um nível confortável, gerando uma



diminuição na taxa de perfuração e outras perdas. A tabela 6 mostra os valores mínimos e máximos da *ROP* estimada em função do tipo de broca usada na mina (broca tricônica série 60 marca Epiroc).

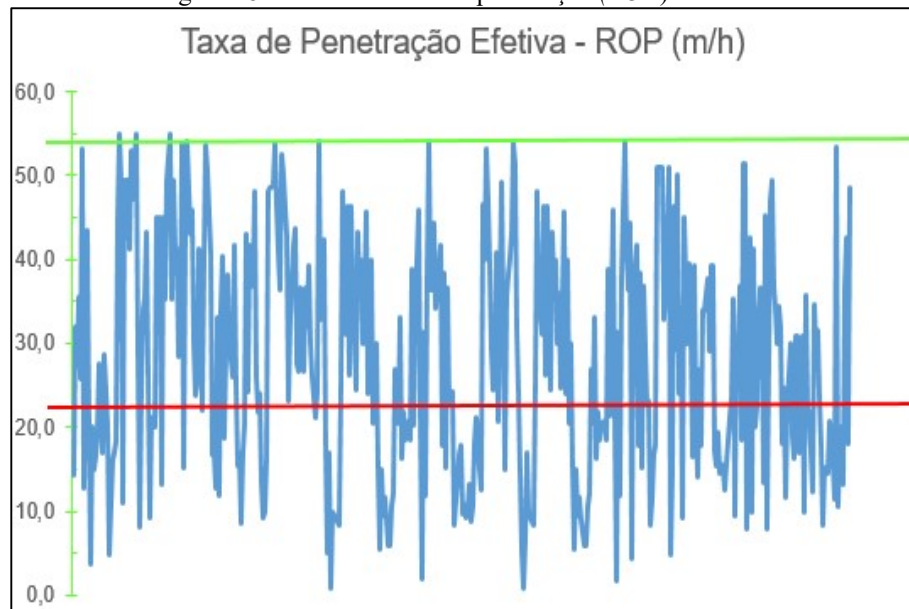
Tabela 6 - *ROP* estimada para uma broca série 60 modelo Epiroc

Broca Tricônica	Rotação Especificada (RPM)	<i>WOB</i> Especificada por polegadas de diâmetro (KLb)		<i>ROP</i> Estimada (m/h)		Pressão de ar Estimada (PSI)			
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.		
IADC	Altura do botão (mm)								
6	11,0	50	120	4	7	23,1	55,4	40,0	65,0

Fonte: Adaptado do manual de brocas tricônicas Epiroc

As taxas de penetração realizadas podem ser visualizadas na figura 28. Os limites superiores, inferiores coincidem com os valores mínimo e máximo estimados com base na altura dos botões da broca. Constata-se que 71,5% dos valores de *ROP* encontram-se dentro do intervalo de confiança e 28,5% ficaram abaixo do valor mínimo estimado.

Figura 28: Gráfico da taxa de penetração (*ROP*) realizada



Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.4.4 Influência da profundidade dos furos

A última etapa referente ao refinamento dos dados trata-se da correção da influência da profundidade do furo. Embora haja vários autores que abordaram essa questão, infelizmente, são raras as análises dessa natureza para as minas a céu aberto. Segundo Navarro *et al.* (2019), as variações com a profundidade podem estar relacionadas com as perdas de energia e/ou com a limpeza dos furos.

De acordo com o manual de perfuração da Atlas Copco de 15% a 30% do ar gerado pelo compressor é desviado para fazer a limpeza e refrigeração dos rolamentos da broca, nota-se, também, que fatores como a pressão e o volume afetam diretamente a vida útil das brocas e a limpeza dos furos.

Outros dois fatores que afetam a limpeza dos furos são o teor de umidade e a litologia das rochas, a rocha úmida devido as condições do maciço ou a injeção excessiva de água aumenta o peso específico dos cavacos (cascalhos) dificultando a remoção do fundo do furo.

Litologias fraturadas tendem a desviar o fluxo de ar e causam redução na velocidade de limpeza, nesses casos, o volume de ar real necessário pode ser muito mais alto do que indicaram os cálculos teóricos diretos.

A limpeza do furo deve ser priorizada de modo que a ferramenta de perfuração se mantenha em constante contato com o maciço rochoso, caso contrário, a taxa de penetração ficará comprometida, observando que quanto mais comprido (profundo) for o furo, maior será o esforço no sentido de remover as partículas fragmentas para fora do mesmo.

Portanto, para garantir uma limpeza eficiente, usa-se o conceito de velocidade de limpeza o qual depende do diâmetro do tubo, diâmetro da broca e, principalmente, a vazão real do compressor de ar. Dessas três variáveis, a que menos tem-se acesso é o real diâmetro do furo perfurado, por isso, deve-se fazer o cálculo da velocidade de limpeza e, com base nesse, fazer toda a configuração da coluna de perfuração.

Segundo o manual de perfuração da Epiroc, em condições normais de rocha com baixo teor de umidade e com baixa densidade, a velocidade de limpeza (VLP) deverá estar na faixa de 5.000 a 7.000 ppm (pés por minuto), já em situações que a rocha é um material mais denso, pesado ou com altos teores de umidade, a velocidade ideal encontra-se no intervalo de 9.000 a 10.000 ppm e os valores acima de 10.000 ppm irão reduzir, drasticamente, a vida útil das ferramentas de perfuração.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Automação, como qualquer outro processo de conhecimento e desenvolvimento centrado no ser humano, apresenta uma curva de aprendizagem bastante importante que, talvez, no primeiro momento, não seja capaz de explicitar todos os benefícios advindos do uso dessa tecnologia.

Muitos são os argumentos capazes de justificar a adoção e o uso desse conhecimento no processo de perfuração de rochas, sendo os principais as questões voltadas a segurança, ergonomia dos operadores e aumento na produtividade, mesmo que, em termos produtivos e sob certas condições, o homem sobressaia em relação a tecnologia, contudo o uso dessa é de suma importância na busca por melhores resultados.

De forma geral, o sistema automatizado é mais rápido e mantém uma constância operacional em relação a uma operação manual. Todavia, há poucos estudos sobre automação nos processos produtivos minerais, mas autores como Gustafson publicaram artigos analisando a produtividade, o impacto do ambiente de mineração e realizaram uma comparação entre uma operação manual e automática. Neste trabalho, procurou-se fazer algo parecido através de análises comparativas entre a perfuração manual e automatizada, buscando uma abordagem diferenciada com viés pautado em sete variáveis (parâmetros operacionais) e com foco no uso da mínima energia específica<sup>6</sup>, conforme mostra a tabela 7.

Tabela 7 – Variáveis operacionais

PARÂMETROS OPERACIONAIS		
Parâmetro	Acrônimo	Unidade
Peso sobre a broca	<i>WOB</i>	Quilo libras - KLB
Rotação da broca	RPM	Rotações por minuto - RPM
Taxa de Penetração	<i>ROP</i>	Metros por hora - m/h
Torque de rotação	TQR	Quilo libras por força - KLB.F
Pressão de ar	PAR	Libras por polegadas ao quadrado - PSI
Penetração do botão	PEB	Porcentagem da altura do botão - %
Energia específica mínima	MSE	Mega pascal - Mpa

Fonte: Elaborado pelo Autor

<sup>6</sup> A energia específica é definida como sendo o trabalho executado por unidade de volume escavado. Esta energia se refere à soma total de todo esforço aplicado na broca para que esta perfure e corte a rocha. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br>. Acesso em 06 setembro de 2021.

Ao analisar os dados do parâmetro peso sobre a broca, também conhecido como força de avanço (*WOB* ou *pulldown*), os resultados mostraram o que já era previsto, nas frentes com minérios, a força de avanço foi maior, apresentando valores que variaram de 1 a 69 KLb com média ponderada de 49,4 KLb, já nos materiais estéreis, o *WOB* foi menor e variou de 1 a 68 KLb com média de 36KLb.

Observa-se, sob o ponto de vista da técnica operacional empregada que, no modo automático, houve uma redução de 16,3% da força de avanço em relação a força utilizada no modo de operação manual durante a perfuração dos materiais estéreis, com minérios, a perfuração automatizada apresentou um ganho de 11,8% em relação a perfuração manual. No geral, o ganho advindo com a perfuração automatizada em termos de *WOB* foi de 18,7%, conforme mostra a tabela 8.

Tabela 8 – Peso sobre a broca (*WOB*) perfuração automática versus perfuração manual

PESO SOBRE A BROCA - WOB (KLb)				
	Geral	Manual	Automática	Ganhos
Mínimo	0,1	1,2	0,1	
Máximo	68,6	68,1	68,3	18,7%
Média	39,5	44,9	36,5	

Fonte: Dados da pesquisa

A análise dos dados de rotação da broca (RPM) confirmou um conceito, amplamente difundido na mineração, que em materiais com menor resistência mecânica, deve-se usar mais rotação e menos avanço, já em materiais mais resistentes, o correto seria diminuir a rotação e aumentar o peso sobre a broca a fim de conseguir maiores taxas de penetração (*ROP*) com menor gasto energético.

Percebe-se uma mínima diferença nos valores de rotação em relação a perfuração manual e a automática, tanto nas perfurações nos estéreis, quanto nos minérios. A tabela 9 apresenta os valores de rotação obtidos durante o processo de perfuração e mostra um ganho de 2,4% na utilização no modo automático.

Tabela 9 – Rotação da broca (RPM) perfuração automática versus perfuração manual

ROTAÇÃO DA BROCA - RPM (RPM)				
	Geral	Manual	Automática	Ganhos
Mínimo	38	38	46	
Máximo	97	95	97	2,4%
Média	85	84	86	

Fonte: Dados da pesquisa

A taxa de penetração (*ROP*) na perfuração automática foi 32,8% superior a taxa obtida com o uso do modo manual, durante as perfurações nos estéreis, já nos minérios a taxa de penetração na perfuração manual foi 4% maior que a realizada pela perfuração automatizada.

No geral, os ganhos na taxa de penetração no modo automático foram de 22,6%, vide tabela 10.

Tabela 10 – Taxa de penetração da broca (*ROP*) perfuração automática versus perfuração manual

	TAXA DE PENETRAÇÃO - ROP (m/h)			
	Geral	Manual	Automática	Ganhos
Mínimo	0,9	3,8	0,9	
Máximo	55,0	55,0	55,0	22,6%
Média	36,6	31,9	39,1	

Fonte: Dados da pesquisa

O torque de rotação (*TQR*) é um parâmetro relevante para monitorar a perfuração, isto porque há um aumento ou queda exagerada do mesmo, representando algum problema, desde um travamento da coluna de perfuração até o encerramento da broca (Rocha *et al.*, 2009).

O modo de operação automático apresentou valores de torque de rotação 10,6%, superiores aos obtidos na perfuração manual para os furos realizados nos estéreis e 6,4% quando da perfuração em minérios.

Para o parâmetro torque de rotação, os ganhos representados pela automação foram de 10,6% de acordo com a tabela 11.

Tabela 11 – Torque de rotação (*TQR*) perfuração automática versus perfuração manual

	TORQUE - TQR (KLb-F)			
	Geral	Manual	Automática	Ganhos
Mínimo	0,1	0,1	3,0	
Máximo	11,7	10,6	11,7	10,6%
Média	4,4	4,7	4,2	

Fonte: Dados da pesquisa

De acordo com o Atlas Copco, a pressão de ar em um sistema de perfuração rotativo com brocas tricônicas tem três objetivos fundamentais, são eles: manter os rolamentos da broca limpos, refrigerados e fazer a limpeza dos furos.

No modo automático obteve um ganho de 16,3% na pressão de ar comparado ao modo manual na perfuração das frentes de estéril, já no minério o ganho do processo automatizado foi de 1,7%. Portanto, de forma geral, durante as perfurações, o ganho foi de 1,9% da perfuração

automática em relação a perfuração manual. A tabela 12 mostra os valores médios da pressão de ar durante as perfurações e os ganhos obtidos.

Tabela 12 – Pressão de ar (PAR) perfuração automática versus perfuração manual

	PRESSÃO DE AR - PAR (PSI)			
	Geral	Manual	Automática	Ganhos
Mínimo	11	11	15	
Máximo	101	101	95	1,9%
Média	53	52	53	

Fonte: Dados da pesquisa

A correta penetração do botão (*insert*) na rocha é algo fácil de ser alcançado, mas difícil de ser mantido devido as características geomecânicas dos maciços rochosos. Para tanto, observa-se a orientação, o espaçamento, a rugosidade, a persistência, o preenchimento, a abertura e infiltração ou percolação de água.

Conforme já mencionado, o ponto ideal de penetração do botão na rocha, capaz de fornecer uma máxima taxa de penetração da broca, encontra-se na faixa de 70 a 75% da altura do botão, significa que o botão ao penetrar nessa porcentagem a altura da rocha, o *ROP* tende chegar ao valor máximo.

Os dados analisados demonstram que na perfuração automatizada, em materiais estéreis, a média da penetração dos botões foi de 77%, contra 65% conseguida pela operação manual, nos minérios, durante a operação automatizada, a porcentagem média de penetração dos botões foi de 38% e no modo manual, o valor chegou a 42%.

No geral a automação trouxe um ganho de 16,7% no quesito penetração do botão, veja a tabela 13.

Tabela 13 – Penetração do botão (PEB) perfuração automática versus perfuração manual.

	PENETRAÇÃO DO BOTÃO - PEB (%)			Ganhos
	Geral	Manual	Automática	
Mínimo	4,0	4,0	4,0	16,7%
Máximo	100,0	100,0	100,0	
Média	70,0	60,0	70,0	

Fonte: Dados da pesquisa.

De acordo com Brito (2010), a forma mais usual para analisar a *performance* da perfuração é baseada na comparação direta entre o atual desempenho e um padrão histórico obtido a partir dos furos já perfurados. Esse tipo de análise, muitas vezes, limita-se a comparar apenas o parâmetro taxa de perfuração, o que na prática, busca-se maximizar a *ROP* podendo

levar a variações e erros devido a subjetividade da metodologia utilizada.

Autores como Teale propuseram metodologias mais objetivas e assertivas para analisar o desempenho do processo de perfuração. Em 1965, Teale introduziu o conceito de energia específica mínima (MSE) e a ideia de máxima eficiência quando a energia empregada pela coluna de perfuração se aproximasse do valor da resistência da rocha perfurada, em outras palavras, a máxima eficiência da perfuração é obtida quando a energia na broca for igual a mínima energia necessária para fragmentar a rocha.

Na atual conjuntura, o conceito de (MSE) tem sido utilizado para avaliar a eficiência da perfuração rotativa, monitorando a quantidade de energia mecânica que está sendo colocada no sistema durante a perfuração e comparando-a com a força da rocha (MAJIDI *et al.*, 2017).

Trata-se de um conceito ainda em desenvolvimento, haja visto que outros autores têm trabalhado no sentido de minimizar as variações decorrentes do confinamento das rochas e as incertezas operacionais, de forma a otimizar o processo de perfuração através do conhecimento seguro dessa variável.

Optou-se em realizar uma análise na perfuração sob a perspectiva do uso racional das energias, através de uma narrativa baseada no uso da mínima energia necessária para fragmentar a rocha, ou seja, a energia específica mínima.

Os dados obtidos na pesquisa apontam que nos estéreis, a perfuração automatizada conseguiu uma eficiência energética de 25,6% em relação a perfuração manual, já nos minérios houve um gasto cerca de 7,8% a mais do processo automatizado em relação ao manual. No geral, a automação conseguiu um ganho de 22,3% de eficiência em termos de energia específica mínima empregada. A tabela 14 apresenta os valores obtidos para a energia específica mínima durante a perfuração.

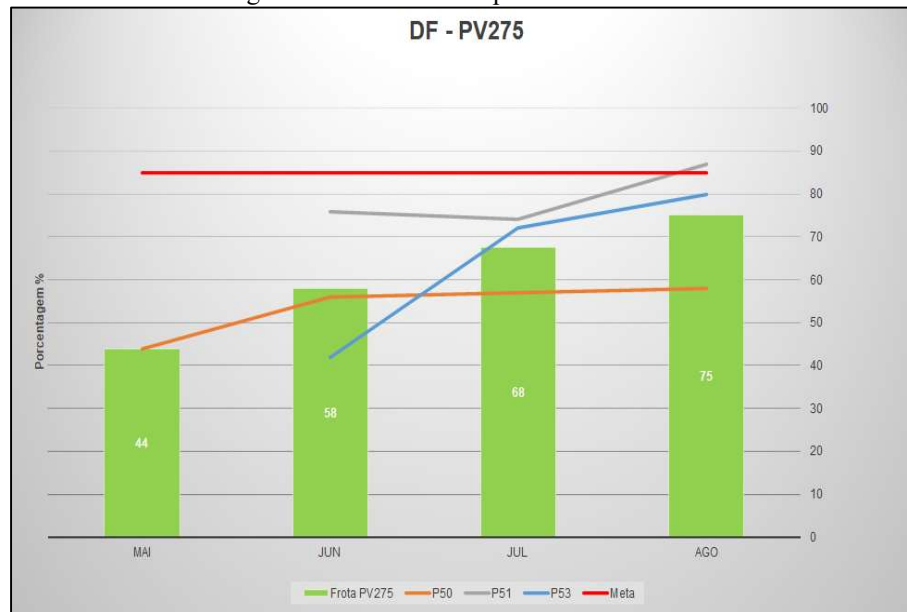
Tabela 14 – Energia específica mínima (MSE) perfuração automática versus perfuração manual

ENERGIA ESPECÍFICA - MSE (MPa)				
	Geral	Manual	Automática	Ganhos
Mínimo	2,4	2,4	12,8	22,3%
Máximo	459,9	417,4	459,9	
Média	144,4	168,7	131,0	

Fonte: Dados da pesquisa

A fim de complementar a análise quantitativa, foram feitas observações sobre o estudo realizado a partir dos dados coletados, sendo possível gerar uma curva comparativa para suportar a análise do desempenho da frota de perfuração, vide Figura 29.

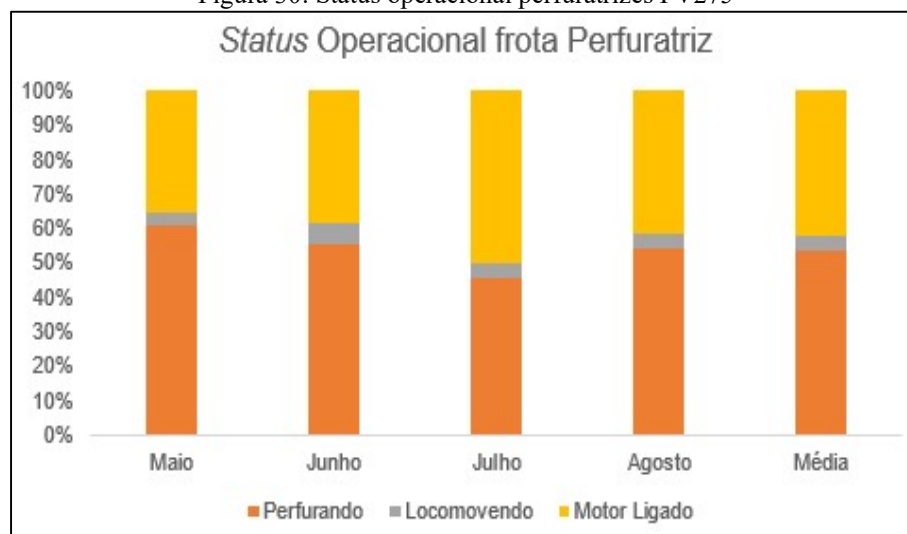
Figura 29: Gráfico da disponibilidade PV275



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico, na figura 29, mostra que a disponibilidade física dos equipamentos nos primeiros três meses ficou abaixo da meta estipulada de 85%, aponta, também, para uma tendência de aumento no número médio de horas disponíveis da frota. Mesmo apresentando uma curva crescente, os valores mantiveram-se abaixo do planejado durante quatro meses e somente em setembro de 2021 foi possível atingir a meta. No geral, eles foram puxados para baixo pelo equipamento P50. Na sequência, observa o *status* operacional das perfuratrizes, organizado de forma a evidenciar o ciclo de trabalho durante o período amostral. Os tempos foram estratificados no *status* operacional como é mostrado na Figura 30.

Figura 30: Status operacional perfuratrizes PV275



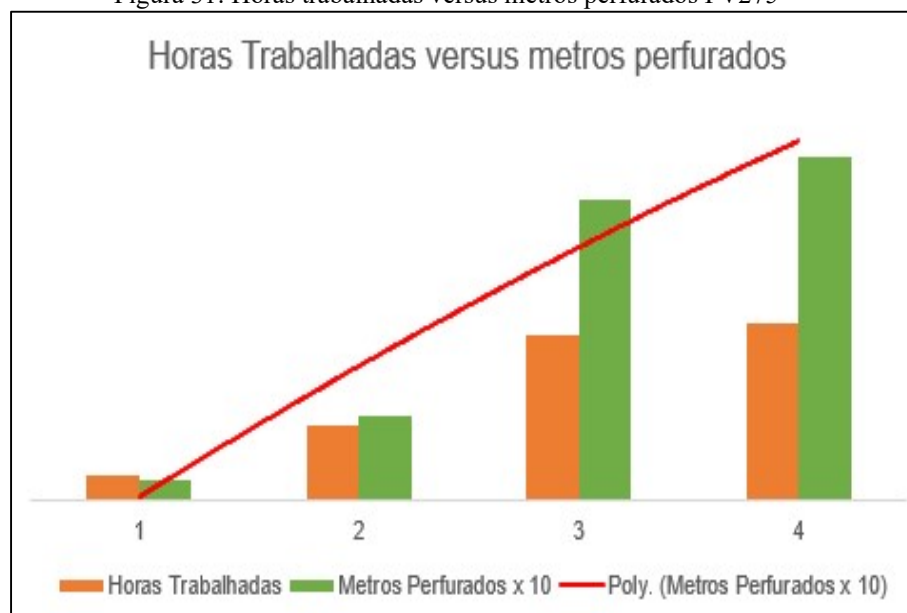
Fonte: Elaborado pelo autor



Os dados mostram que os equipamentos, efetivamente, foram utilizados em média 53,5% do tempo total disponível, ou seja, as máquinas operaram uma média mensal de 854,5 horas. Em 42,1% do tempo, elas estiveram disponíveis, mas não foram utilizadas, ou seja, houve consumo de combustível sem a realização de furos.

As locomoções ou deslocamentos somaram 4,4% do total de tempo e a produção acumulada foi de 58.013 metros lineares ou 907 furos por mês. A figura 31 mostra a tendência de crescimento tanto para as horas trabalhadas, quanto para os metros perfurados, sugerindo uma evolução no processo.

Figura 31: Horas trabalhadas versus metros perfurados PV275



Para a análise qualitativa, foram coletadas informações diretamente dos operadores e realizados registros fotográficos das malhas de perfuração, bem como, das faces horizontais dos furos.

Foram obtidas mais de 500 imagens em 2D, em quatro diferentes bancadas na mina, através do uso de uma câmera digital de média resolução, também foi usado um drone para gerar a imagem aérea que mostra os desalinhamentos dos furos perfurados sem o uso da tecnologia de posicionamento global *GPS*.

Veja a figura 32.

Figura 32: Vista área do polígono perfurado pela PV275 sem o *GPS*



Fonte: Dados da pesquisa

A figura acima mostra os furos completamente desalinhados e desordenados no polígono perfurado. Sendo que, a posição de cada bancada individual precisa ser topografada em 3D e as informações precisam ser passadas aos engenheiros para planejar o plano de fogo.

De posse desse plano, a topografia precisa posicionar acuradamente os furos no terreno para que os operadores das perfuratrizes possam executá-los. Na mina estudada há um padrão muito irregular de malha que é gerado no terreno, devido a marcação de furos que é feita de forma manual através do uso de pedaços de papel dobrados e posicionado no solo sobreposto por uma pedra.

A direção e inclinação do furo são dadas pela posição do papel no terreno. Deste modo, observou-se que o papel, muitas das vezes, se deslocou no terreno e perdeu a correta orientação do furo e na maioria das vezes, o operador da perfuratriz tentou seguir fielmente essa orientação o que gerou um grande descompasso na malha de perfuração.

A prática de perfuração recomenda aos operadores das perfuratrizes devam respeitar a perfuração de acordo com o estabelecido pelo plano de fogo elaborado pela engenharia de mina, sendo que um equipamento eficiente para auxiliar no posicionamento dos furos é o sistema de posicionamento global - *GPS*, conforme pode ser observado na figura 33.

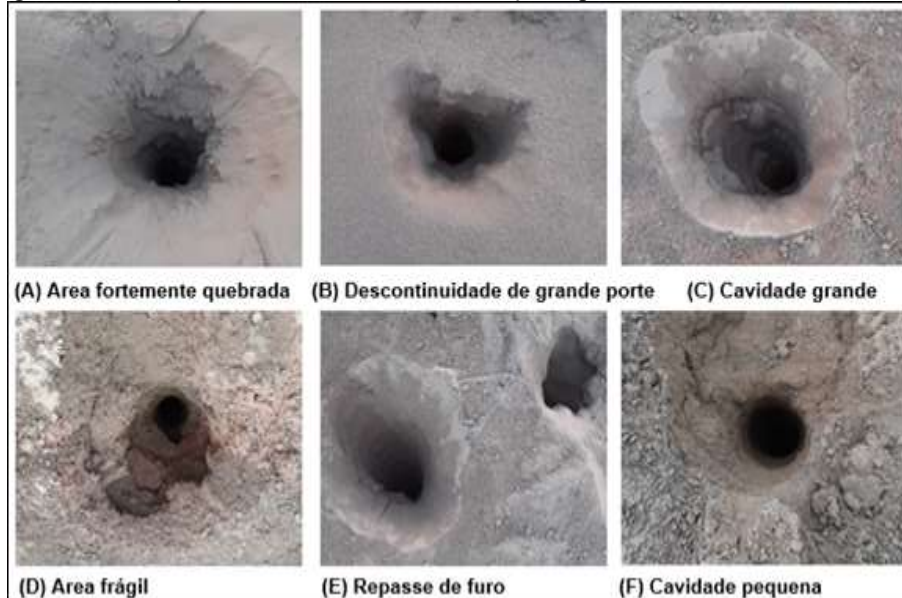
Figura 32: Perfuração com o auxílio do sistema *GPS*



Fonte: Epiroc (2018)

Conforme a análise das imagens dos furos, identificou-se diferentes situações que vão desde as questões estruturais das rochas (tais como rochas fortemente fraturadas, descontinuidades, áreas intactas, áreas frágeis, dentre outras), até as questões operacionais como o repasse de furos e emboques deficitários. Conforme mostram as figuras 34, 35, 36 e 37.

Figura 34: Condições estruturais da rocha e situações operacionais dos furos banco 865.



Fonte: Dados da pesquisa.

Constata-se que algumas dessas situações são recorrentes mesmo em se tratando de litologias distintas, tais como, nas bancadas de minérios e estéreis. A figura mostra a presença de áreas fortemente quebradas (Fig. 34A), presença de descontinuidades de grande porte (Fig.

34B), área frágil (Fig. 34D), repasse de furo (Fig. 34E), cavidades grandes (Fig. 34C) e pequenas (Fig. 34F). Todas essas situações foram constatadas nos furos perfurados no banco 865 (minério).

Figura 35: Condições estruturais da rocha e situações operacionais dos furos banco 850

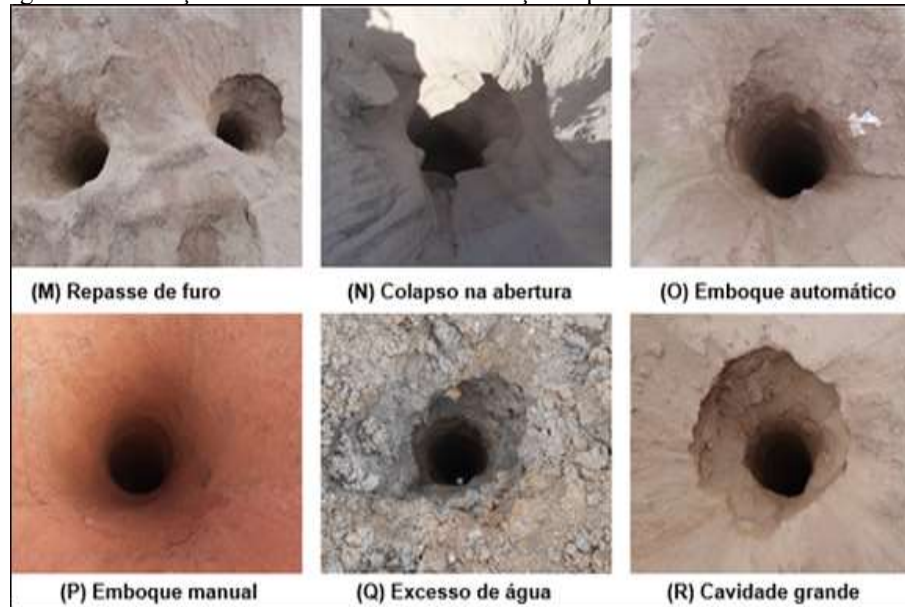


Fonte: Dados da pesquisa

As imagens obtidas no banco 850 (minério) e ilustradas pela figura 34 mostram situações operacionais recorrentes como o repasse de furos (Fig. 35G), oportunidades de melhorias para o processo de perfuração, exemplificadas, pelo uso excessivo de água (Fig. 35K) e pelo colapso na abertura dos furos (Fig. 35H).

Constata-se que há algumas condições estruturais da rocha que dificultam a realização dos furos, tais como, a ocorrência de rochas extremamente fraturadas (Fig. 35L), sendo possível visualizar a presença de cavidades grandes (Fig. 35J) que podem estar relacionadas a intrusões litológicas de rochas mais macias. Um emboque ideal de furo é mostrado na figura 35I.

Figura 36: Condições estruturais da rocha e situações operacionais dos furos banco 868



Fonte: Dados da pesquisa

A figura 36 apresenta as imagens dos furos perfurados no estéril (banco 868), sendo assim observa-se o processo de emboque dos furos realizados no modo de operação manual (Fig. 36P) e no modo automático (Fig. 36O).

Percebe-se que no modo manual, o emboque apresenta um melhor equilíbrio em termos de aspecto visual e manutenção da geometria do furo, ou seja, o diâmetro da zona inicial é igual ao diâmetro das demais zonas perfuradas ao longo do comprimento do furo, já no emboque realizado através do modo automático, o diâmetro inicial é ligeiramente maior do que o diâmetro do restante do furo.

Há presença de irregularidades na circunferência e ocorrência de marcas de catracas que podem caracterizar os locais de origem de uma fratura por fadiga decorrente do uso de altas rotações na ferramenta durante o processo de emboque do furo. Pode-se, também, verificar a recorrência de situações operacionais, tais como, repasse de furo (Fig. 36M) e excesso de água (Fig. 36Q).

A presença de cavidades grandes (Fig. 36R) e furos com aberturas colapsadas (Fig. 36N) que não são particularidades presentes nas perfurações em minérios, tais condições também ocorreram durante as perfurações dos materiais com menos resistência.



Figura 37: Condições estruturais da rocha e situações operacionais dos furos banco 950



Fonte: Dados da pesquisa

Por fim, a figura 37 apresenta as imagens coletadas no banco 950 (estéril) onde é possível observar situações de instabilidade (Fig. 37S), colapso na abertura dos furos (Fig. 37T), repasses ou refuração (Fig. 37U). Nota-se, também, a presença de furos com áreas frágeis (Fig. 37X), cavidade pequena (Fig. 37Z) e emboque manual (Fig. 37V).

Segundo Navarro *et al.* (2019), algumas condições de rocha (áreas frágeis, fraturas ou descontinuidades e alterações de litologia), normalmente, advém de uma combinação de descontinuidades, intrusões de materiais mais macios e/ou presença de cavidades.

As questões operacionais voltadas a qualidade, além de abordar situações relacionadas as especificações do furo (comprimento, diâmetro e posição no maciço), também devem considerar as questões referentes ao retrabalho (repasso de furos), uso racional dos recursos naturais (uso da água durante a perfuração) e a realização dos emboques dos furos.

Os operadores devem priorizar pela confecção de um emboque ideal, seja através do método manual ou automatizado. De maneira geral os emboques realizados de forma manual foram mais assertivos, conforme mostra a tabela 15.

Tabela 15 – Assertividade na confecção dos emboques de furos

Equipamento	PERCENTUAL DE ACERTO EMBOQUE DE FUROS (%)	
	Manual	Automática
P50	25,0	1,9
P51	43,3	7,2
P52	6,2	5,4

Fonte: Dados da pesquisa

Pelas imagens analisadas, pode-se constatar que durante o processo de perfuração, independente da litologia, o maciço rochoso apresenta alguns distúrbios estruturais que podem ser percebidos através das variações e picos nos valores dos parâmetros operacionais.

Todavia, nem todas as situações estruturais irão impactar a perfuração. Em campo, percebeu-se que as pequenas descontinuidades ou cavidades, além das fraturas preenchidas com materiais respeitando as propriedades similares a rocha, tiveram uma mínima influência no processo.

Contudo, as mudanças na litologia por intrusões de material mais macio geraram picos e situações de perdas da equalização dos parâmetros operacionais o que dificultou a perfuração, nos minérios, as perfurações com o método rotativo mostraram-se desafiadoras, uma vez que os materiais apresentam altas resistências e são extremamente fraturados.

De acordo com Munaretti (2013) independente da metodologia adotada na perfuração, recomenda-se utilizar proteções na boca dos furos (área mais sensível a colapsos) para garantir a integridade e qualidade da perfuração. Deve-se usar cones, tubos de PVC, proteções de papel ou similares para garantir uma melhor estabilidade na zona inicial do furo e evitar quedas de materiais para o seu interior.

## CONCLUSÃO

Esta pesquisa demonstrou a viabilidade do sistema automatizado para perfurar rochas, portanto, constatou-se que o uso e aplicação de novas tecnologias em operações unitárias na mineração, em especial na perfuração, é um processo possível, seguro, efetivo e sustentável.

Desta forma, percebe-se que os sistemas automatizados são confiáveis e operam sob as mais diversas condições de severidades e aplicações.

Logo, a automação depende, não só do aporte de grandes recursos, mas, também, de uma infraestrutura capaz de relacionar-se com todas as outras atividades presentes nos processos produtivos da mineração.

Os sistemas embarcados em máquinas oferecem segurança, produtividade, controle e continuidade das operações (ganhos em termos de eficiência operacional). Abaixo estão elencadas as conclusões específicas:

1. Os parâmetros de perfuração a serem selecionados variam em função das condições geomecânicas do maciço e devem ser aferidos a todo o instante de modo a obter um melhor desempenho do processo. Na perfuração em modo manual, os resultados obtidos estão diretamente relacionados a experiência e perícia dos perfuradores, fato, que de certo modo, dificulta a formação de novos colaboradores. De acordo com alguns especialistas, o tempo médio para formação de um bom operador poderá variar de três a seis anos. Destaca-se que com o auxílio das novas tecnologias, a perfuração automatizada apresenta oportunidades para formação de mão-de-obra operacional qualificada em um período mais curto de tempo (aproximadamente de seis meses a um ano), ou seja, em um menor intervalo de tempo, sendo possível qualificar uma pessoa de modo que ela possa desenvolver as atividades na perfuração;
2. O sistema automático, comparado ao manual, aplica menos peso sobre a broca (*WOB*), obtendo em média um ganho de 18,7% com o uso da perfuração automática, isso significa, explicitar que o sistema busca priorizar e usar a força de avanço mínima necessária para vencer a resistência das rochas;
3. Em termos de rotação (RPM), o sistema automatizado busca sempre um melhor equilíbrio e eficiência durante as fases de confecção dos furos, ou seja, durante o processo de perfuração (mesmo que seja em diferentes litologias e/ou maciços com propriedades diversas), com isso, a rotação é ajustada pelo sistema de modo a



maximizar a taxa de penetração (*ROP*) sem gerar desconfortos (vibrações) aos operadores. Pelo estudo o ganho médio com o sistema automatizado em termos de rotação foi de 2,4%;

4. A variável torque (TQR) tem influência direta no processo de elaboração dos furos, pode variar em função do material a ser perfurado e da sua profundidade, já as perfurações que utilizam menores valores de torque geram menos gasto energético e menores desgastes nos elementos da coluna de perfuração, principalmente, quando pensa-se nas junções enroscadas dos tubos de perfuração. Neste aspecto, o modo automático possibilitou um ganho de 10,6% em comparação a perfuração manual;
5. Em termos de taxa de penetração (*ROP*), o sistema automatizado propiciou um ganho de 22,6% o que pode ser explicado pela otimização da perfuração em função do uso de um sistema tecnológico. Segundo Ifekabeya (2011), a otimização da perfuração tem como objetivo melhorar a eficiência do processo através da melhor combinação de parâmetros principais, tais como, o peso aplicado sobre a broca (*WOB*), a velocidade de rotação (RPM) e o torque (TQR) aplicado na ferramenta de fragmentação. Muitos autores descreveram a respeito das metodologias para otimizar a perfuração, mas, infelizmente, não há um modelo final concluído e consolidado para que possa ser utilizado nas mais variadas situações e condições de minas. Assim, a automação apresenta-se como uma opção capaz de dialogar com os modelos de otimização estabelecidos de modo a maximizar os resultados, fato que na prática pode ser entendido como uma otimização do processo;
6. Do ponto de vista de previsibilidade da taxa de penetração, o sistema automatizado trabalha com o conceito que a máxima *ROP* está pautada em uma eficiente remoção dos resíduos no fundo do furo (especificamente entre a face da broca e o maciço) e na correta penetração do botão na rocha. Objetivando melhorar a limpeza e permitir um melhor contato da ferramenta de perfuração, a taxa de penetração tenderia a aumentar conforme apontou os estudos de Wardlaw (1969). Por outro lado, ao penetrar o botão cerca de 70 a 75% da altura na rocha, há espaços suficientes para que os cavacos dos materiais fragmentados possam ser removidos e manter um contato ideal entre ferramenta e rocha. Na prática, isso significa dizer que não adianta ter altas taxas de penetração, contudo é preciso perfurar, limpar para que haja um perfeito sincronismo, proporcionando que o processo de perfuração possa ser realizado com efetividade. Esta pesquisa mostrou que durante as perfurações no modo automático, o ganho foi de 16,7% na penetração dos botões na rocha e de

1,9% na pressão de ar para limpeza dos furos. Constatou-se, também, que em materiais menos resistentes, a força de avanço (*WOB*) foi reduzida e a rotação (RPM) foi aumentada de modo a obter uma maior taxa de penetração (*ROP*). O oposto, também, foi verificado (redução na rotação e aumento no *WOB* em materiais mais resistentes), embora pareça ser simples, algo lógico a ser feito, essa percepção de mudança de litologia e de alterações nos principais parâmetros operacionais é uma ação complexa que induz vários operadores (experientes ou não) a erros, gerando perdas na produtividade;

7. A perfuração automatizada apresentou um ganho energético de 22,3% em comparação com a perfuração manual. Busca-se, portanto, obter um melhor sincronismo entre os parâmetros operacionais de forma a obter uma *ROP* desejada com o mínimo consumo de energia possível. Segundo Gandelman (2012), cada rocha tem uma energia mínima necessária para o seu rompimento. Essa energia depende do tipo e das condições as quais a rocha está submetida (compactação, pressão, temperatura etc.). Nesta perspectiva, quando a broca consegue transmitir a rocha o valor mínimo necessário a fragmentação, o processo de perfuração ocorrerá, caso contrário, a energia voltará para o equipamento sob as mais diversas formas (ruídos, vibrações e calor), resultando em perdas, danos as máquinas e ao processo como um todo.
8. Por tudo que foi demonstrado nessa pesquisa, podemos estabelecer como sendo os indicadores mais adequados quando da utilização da perfuração automatizada (KPI's), a energia mecânica mínima específica (MSE), a taxa de penetração (*ROP*) e o rendimento operacional (*RO*). A energia específica é um parâmetro bastante importante, que consegue relacionar as propriedades do material perfurado com a dimensão dos equipamentos, além de permitir um maior controle/entendimento dos modos de vibração na coluna de perfuração. A taxa de penetração, por sua vez, é uma métrica bastante complexa, mas importante, visto que ela é uma das mais simples e a mais utilizada nos processos de perfuração. Na prática ela se apresenta como um controle de produtividade e de custos operacionais. O rendimento operacional é uma avaliação quantitativa e qualitativa do desempenho dos equipamentos, nos permite identificar os parâmetros e as formas de controle mais efetivas para o bom andamento do processo produtivo.

Normalmente, os benefícios advindos da automação na perfuração são externados apenas como elementos impulsionadores voltados as questões de segurança, otimização dos intervalos de troca de turnos de trabalho e aumento na produtividade. Este trabalho mostrou que o automatismo nas funções de perfuração pode, realmente fazer a diferença, e ser traduzido em ganhos palpáveis, ou seja, trabalhar com a perfuração automatizada em relação à perfuração manual produz ganhos diretos e indiretos tanto nas questões voltadas à produtividade, quanto a segurança. O principal resultado foi a economia energética durante a realização dos furos.

A mina estudada conta com 21 equipamentos de perfuração de grande porte, sendo que apenas quatro máquinas trabalham com o sistema de perfuração automatizado da Epiroc (AD2). A médio prazo será necessário fazer a aquisição de novos equipamentos automatizados para poder fazer a substituição/atualização da frota de perfuração.

Para Morais (2022) o processo de perfuração e desmonte de rochas por explosivos deve ser abordado de forma sistêmica, uma vez que o resultado do desmonte (especialmente o grau de fragmentação) influenciará os demais processos subsequentes: carregamento, transporte, britagem e moagem. Dessa forma, um melhor conhecimento das variações das litologias da mina irá contribuir para otimização e *performance* dos equipamentos em termos de ganhos produtivos e energéticos a medida que a qualificação técnica dos operadores também forem ampliadas no sentido de direcionar os esforços na confecção de furos com maior qualidade, ou seja, se faz necessário melhorar o treinamento dos operadores (perfuradores) de modo que eles possam ter uma visão sistêmica do processo produtivo mineral e não apenas uma visão parcial e limitada da perfuração.

Pode-se afirmar que todos os benefícios oriundos da automação contribuem de modo a ter uma mineração mais moderna pautada pelas boas práticas (operacionais e gerenciais), capazes de garantir a estabilidade e manutenção do empreendimento mineral. As organizações vêm a automação como um meio de capturar dados de forma mais abrangente, melhorar a experiência do cliente, reduzir o risco, capitalizar e desenvolver novas competências nas pessoas, permitindo a inovação das companhias.

Apesar desta visão positiva em relação ao uso de novas tecnologias, a realidade é bem desafiadora, porque há um apelo pela automação a qual desenvolve-se num ritmo frenético, sendo necessário uma priorização das áreas da empresa a serem automatizadas, mas é preciso compreender e fazer uma escolha tecnológica assertiva entre tantas opções possíveis.

A progressão para uma automação verdadeiramente inteligente requer primeiro definir e otimizar processos e, em seguida, reestruturar a organização em torno desses processos, os quais poderão ser impulsionados pela tecnologia, até então, indisponíveis na organização, já na

prática é algo que impactará o dia a dia no trabalho de todos os funcionários (individualmente ou coletivamente), irá testar a comunicação, a mudança de gestão e, principalmente, propor a cooperação/sinergia de todos os envolvidos nos processos produtivos.

A rotina de inspeções e auditorias regulares é uma boa prática que mostra-se bem atrativa para assegurar a confiabilidade, transparência dos processos e poderá ser usada pela mineração, pois o uso da tecnologia é um argumento que apresenta-se como um diferencial competitivo capaz de trazer melhorias a todos e, principalmente, fortalecer a preocupação pela busca de uma Gestão Eficiente e Responsável dos negócios.

Esta busca demanda mudança cultural organizacional, seguida de uma redefinição de processos e responsabilidades de todas as pessoas envolvidas. Portanto, em um processo de modernização da mineração, pautado pela automação e novas tecnologias, tudo deverá ser atualizado: as máquinas, o homem e os processos.

## SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestão para futuros trabalhos, em termos de segurança, produtividade, sustentabilidade e desenvolvimento econômico-social, recomenda-se:

- ✓ Desenvolver um estudo correlacionando a automação e a sustentabilidade, uma vez que, há uma redução no consumo energético para perfuração da rocha o que resulta também em uma redução significativa do consumo de combustíveis fósseis e emissão de CO<sup>2</sup> na atmosfera;
- ✓ Estudar os impactos das novas tecnologias e da automação sobre as pessoas envolvidas na mineração, em especial, na perfuração de rochas;
- ✓ Desenvolver uma pesquisa de modo a identificar e externar os impactos da variação dos diâmetros dos furos perfurados no processo de desmonte de rochas;
- ✓ Correlacionar os modos de vibração na coluna de perfuração a metodologia operacional escolhida (operação autônoma/automatizada versus manual) e o desempenho final do processo de perfuração;
- ✓ Por fim, propor uma maior integração e parceria entre a academia (universidade), governo e os setores produtivos (público e privado), de modo que eles sejam capazes de superar os problemas e desafios propostos pela mineração moderna.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AADNOY, B; KHOSRAVANI, R. **Data-driven machine learning solutions to real-time ROP prediction**. In: **Methods for Petroleum well optimization. Automation and data solutions**. Austin, United States. Gulf Professional Publishing, 2022. 249-301.

ABB. **Aplicação digital inovadora para integração de minas subterrâneas e a céu aberto em tempo real**. Zurique – Suíça, 2019. 4 páginas. Disponível em: <https://new.abb.com/news>. Acesso em 16 de janeiro de 2022.

ABBASPOUR, H; DREBENSTEDT, C; BADRODDINE, M; MAGHAMINIK, A. **Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling**. *Science Direct*, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.06.009>. Acesso em 21 de fevereiro de 2022.

ABIJAUDE, G; MANO, A; SILVA, W; FETTERMANN, D. **Análise dos indicadores de desempenho de um centro de distribuição de bebidas**. *Engevista*, 2016. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/9058>. Acesso em 15 de setembro de 2021.

ABREU, F. P. V. F. **Estudos de Dispersão/Floculação Seletiva de Lama de Minério de Ferro**. 2018. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto UFOP, Ouro Preto, 2018.

ABREU, F. P. V.; L. M.; LIMA R. M. F. **Characterization and concentration by selective flocculation/magnetic separation of iron ore slimes from dam of Quadrilátero Ferrífero- Brazil**. *Journal of materials research and technology*. v. 9, p. 2021-2027, abril, 2020.

**ACCENTURE REPORT 2019**. Accenture, 2019. Disponível em: <https://www.accenture.com.br>. Acesso em 20 de fevereiro de 2022.

ALVES, J; SILVA, J; SILVA, C. **Automation in underground mines challenges and assumptions**. *ABM week*, sexta edição, 2022.

BARBOSA, L. F. F. et al. **Machine learning methods applied to drilling rate of penetration prediction and optimization-A review**. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2019.

BRADESCO. Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos. **Informativo Setorial do Minério de ferro**. São Paulo, 2017.

BRITTO, G. **Energia mecânica específica e suas aplicações na perfuração de poços de petróleo**. Rio de Janeiro, 2010. 98f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) – Escola Politécnica Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

BRANDÃO, P. R. G. **Agregação e Dispersão**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008 (Notas de aula) apud PINTO, T. S. **Efeito do dispersante silicato de sódio**

**alcalino na aglomeração de partículas ultrafinas de minério de ferro para o processo de sinterização em escala piloto.** 2019. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2019.

Bourgoyne, A.T. & Young, F.S.. (2013). A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 14. 371-384. 10.2118/4238-PA.

CALDER, B.J.; FRIGO, M.L. **The financial of brand.** *Strategic Finance*, v. 81, n. 8, p. 58-58, 2019.

CILO, Nelson. **Impactos da automação terão repercussão no mercado de trabalho.** Estado de Minas economia, 2019. Disponível em: <https://www.em.com.br/>. Acesso em 23 de dezembro de 2021.

CLARK, J. Sponsor’s Perspective: Reliability Matters: Understanding the impact of ISO55000 on Asset Management. **Management Practices, investments and challenges**, 2014.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. **Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/satellite-based augmentation system availability.** *RADIO SCIENCE*, v. 38, 2003. doi:10.1029/2000RS002604. Citado 7 vezes, nas páginas 25, 26, 33, 65, 66, 67 e 70

COSTA, J. **Exploração de petróleo: Perfurações marítimas e os impactos ambientais provenientes.** *Varginha*, 2018. Trabalho de Graduação 55f– Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, Departamento de Engenharia de Mecânica, Varginha, 2018.

CULLEN, B. **Digitalização na mineração.** RCT, 2020. Disponível em: <https://rct-global.com>. Acesso em 11 de dezembro de 2021.

CYRINO, Luis. **Disponibilidade e suas classificações.** *Manutenção em foco*, 2022. Disponível em: <https://www.manutencaoemfoco.com.br/disponibilidade-e-suas-classificacoes/>. Acesso em 22 de fevereiro de 2022.

DAUCE, P. D. **Caracterização Tecnológica de Rejeito de Jigagem de Minério de Ferro.** 2017. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, 2017.

DIERENDONCK, A. J. V.; KLOBUCHAR, J. A.; HUA, Q. **Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers.** In: *Proceedings of the Institute of Navigation*. Alexandria (VA): [s.n.], 1993. v. 93, p. 1324–1333. Citado 4 vezes, nas páginas 26, 37, 41 e 42.

EPIROC. **Technical book System description PV270.** Garland – Estados Unidos da América, 2021. 257 páginas.

\_\_\_\_\_. **Reference book. Drilling in surface mining, quarrying and construction.** Orebro – Suécia, 2021. 108 páginas.

FREITAS, L. S. **Avaliação dos minérios itabiritos compactos e semi-compactos em um circuito de britagem da Samarco mineração S/A.** 2014. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2014.

FREITAS, M. **Contribuições no desenvolvimento e validação de monitores de cintilação gps: uma abordagem alternativa de baixo custo para uso em larga escala.** 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) – Universidade Estadual do Maranhão - São Luiz, 2019.

FOX, Brian. **Automação uma potente ferramenta em mudanças.** Disponível em <https://www.epiroc.com/pt-br/customer-stories/2019/automation-a-powerful-tool-for-change>. Acesso em 15 de janeiro de 2022.

FROLOV, V. et al. Identifying core functions of asset management In: AMADI– ECHENDU, J. E. et al. **Definitions, Concepts and Scope of Engineering Asset Management.** Engineering Asset Management Review, 2010, Volume 1, Part II, p. 19- 29, DOI: 10.1007/978-1-84996-178-3\_1

GANDELMAN, R. **Predição da rop e otimização em tempo real de parâmetros operacionais na perfuração de poços de petróleo offshore.** 2012. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

GERALDI, J.L.P. **O ABC das Escavações de Rocha.** Rio de Janeiro. Ed. Interciência, 2011

HASSANI, F. HAMED, R. **Drilling signals analysis for tricone bit condition monitoring.** Science Direct, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268620309599>. Acesso em 15 de janeiro de 2022.

IFEKAIIBEYA, W. **Estudo da influência da taxa de penetração de broca de perfuração nos custos da construção de poços de petróleo.** 2011. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de engenharia mecânica e instituto de geociências. Campinas, 2011.

INDEXMUNDI. **IndexMundi- Country Facts.** [S.I.], 2020, il. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/commodities/>>. Acesso em: agosto de 2020.

JARDIM, T. **Análise de desempenho de brocas triconicas 9 7/8.** Ouro Preto, 2017. Trabalho de Graduação 41f– Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2017.

JESUS, Leandro de. **Dimensionamento de equipamento e custo operacional.** São Paulo: Baraúna, 2013. 92p.



JUNIOR, C. **Conheça os equipamentos mais utilizados na mineração.** Cristal, 2019. Disponível em: <https://cristaljr.com/equipamentos-mais-utilizados-na-mineracao/>. Acesso em 30 de novembro de 2021.

KOPPE, J. C. A Lavra e a Indústria Mineral no Brasil – Estado da Arte e Tendências Tecnológicas. In: FERNANDES, F.; CASTILHOS, Z.; LUZ, A. B.; MATOS, G.(eds.), **Tendências Tecnológicas - Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral**, CETEM-Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro. 2007.

LEITE, D. **O que são bolhas de plasma no espaço e por que estragam o GPS brasileiro.** Tilt, 2019. Disponível em: <https://www.uol.com.br/tilt/noticias>. Acesso em 12 de março de 2022.

LIMA, R. M. F.; LOPES, G. M.; GONTIJO, C. F. **Aspectos mineralógicos, físicos e químicos na flotação catiônica de minérios de ferro de baixos teores, do Quadrilátero.** Ferrífero-MG. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo, v. 8, n. 2, p. 126-131, 2011.

LUO, L.; ZHANG, J.; YU, Y. Recovering limonite from Australia iron ores by flocculation-high intensity magnetic separation. **Journal of Central South University of Technology.** China, v. 1.

MAJIDI, R; ALBERTIN, M; LAST, N. **Pore-Pressure Estimation by Use of Mechanical Specific Energy and Drilling Efficiency.** SPE Drilling & Completion. 32, 2017. 10.2118/178842-PA.

MAYER, Z.; KAZAKIDIS, 2007 V. **Decision Making in Flexible Mine Production System Design using Real Option.** Journal Of Construction Engineering & Management, 133(2), 169-180. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:2(169).

MIRIM, V. **Inteligência artificial, exploração mineral e o geólogo.** Revista Minérios & Minerales. São Paulo. Dezembro de 2019. Disponível em: < In <https://revistaminerios.com.br/inteligencia-artificial-exploracao-mineral-e-o-geologo/>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

MORAIS, J. Abordagem Mine to Mill e o desmonte de rochas. Institute Minere. E-bok 55f. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: < <https://institutominere.com.br/materiais/ebook-mine-to-mill-desmonte-rocha>>. Acesso em 11 de agosto de 2022.

MORRIS, R. C. **A textural and mineralogical study of the relationship of iron ore to banded iron- formation in the Hamersley iron Province of Western Australia.** Economic Geology. Australia, v. 75, p. 184-209, 1980.

MUNARETTI, E. **Projeto FRAGCON.** Relatório Técnico ano 1. 133 F. Porto Alegre, 2013

NAVARRO, J., SEIDL, T., HARTLIEB, P. et al. **Blastability and Ore Grade Assessment from Drill Monitoring for Open Pit Applications.** Rock Mech Rock Eng 54, 3209–3228 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02354-2>.

PACOLA, E. **Disponibilidade mecânica, eficiência operacional e taxa de utilização - uma definição.** LinkedIn, 2016. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/disponibilidade-mec>. Acesso em 13 de abril de 2021.

PAGNIMI, M. **Tendências de Digitalização no Setor de Mineração.** Consultdss, 2019.

Disponível em: <https://www.consultdss.com.br/digitalization-mining>. Acesso em 16 de março de 2021.

PAIVA, G. **Aplicação de tecnologias de informação e automação em minas subterrâneas: desafios e perspectivas**. 2016, 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. São Paulo, 2016.

PIRES, F. R. M. **Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira iron formation in MG, Brazil**. In ACADEMIA BRASILEIRA DE GEOCIÊNCIAS. Anais 67(1), p.77- 105, 1997.

PIXFORCE. **Entenda como mecanismos de Inteligência Artificial promovem competitividade na Mineração**.

Disponível em: < <https://www.pixforce.com.br/post/entenda-como-mecanismos-de-intelig%C3%Aancia-artificial-promovem-competitividade-na-mineracao>>.

Acesso em: 10 ago. 2022.

POHLMANN, Otto. **Por que a tecnologia ainda assusta as empresas no Brasil?**

Disponível em: <https://www.baguete.com.br/noticias/22/01/2021/por-que-a-tecnologia-ainda-assusta-as-empresas-no-brasil>. Acesso em 20 de fevereiro de 2022.

PORTER, M.E. & NORTON, V. E. **How Information Gives You Competitive Advantage**. Harvard Business Review. 1985.

QUAGLIO, O. A. **Otimização da perfuração e da segurança nos desmontes de agregados através dos sistemas laser profile e boretrak**. 2003. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

QUAGLIO, O. A. **Adequação do índice de blastabilidade de modelos de fragmentação ao desmonte de rochas em pedreiras de brita**. 2020. 235 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

QUEIROZ, L. A. **Caracterização de minérios da mina de Brucutu – Vale focada na previsibilidade das operações de concentração mineral**. 2008. 430 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2008.

RICARDO, H.S.; CATALANI, G.; **Manual Prático de Escavação (Terraplenagem e Escavação de Rocha)**. 3. ed. São Paulo. Editora Pini, 2007.

ROBERTO, J. B. **Influência dos diversos tipos litológicos nas operações de concentração da instalação de beneficiamento de Brucutu**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2010.

ROCHA, J. M. P. **Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A. – Minas Gerais**. 2008. 460 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, Belo Horizonte, 2008.

ROCHA, L.A.S., AZEVEDO, C. T., **Projetos de Poços de Petróleo**. Editora Interciência. Edição: 3. 696 páginas, Rio de Janeiro, 2019.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero**

Ferrífero- Uma visão geral e discussão. **Geonomos** [S. I], v. 8, n. 2, p. 27-43, 1996. SALES, C. G. **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu**. 2012. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2012.

SACHS, P. F. T.; **Cadeia de valor mineral e tecnologia da informação: alinhamento estratégico como gerador de eficácia em empresas de mineração**. São Paulo, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-11082010-154822>. Acesso em: 15 de maio de 2021.

SALES, G. C. **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu**. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Ouro Preto, 2014.

SANTOS, M. **O Que é Mineração?** Jazida, 2019. Disponível em: <https://blog.jazida.com/o-que-e-mineracao>. Acesso em 12 de setembro de 2021.

SANTOS, P. A. **Estudo de densidade de rochas e comparação de técnicas de medição na região do Quadrilátero Ferrífero**. Minas Gerais, Brasil. 2006. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Instituto Superior de Educação de Itabira – ISEI, Itabira, 2006.

SILVA, M. B.; LUZ, J. A. M. Magnetic scavenging of ultrafine hematite from itabirites. **Revista Escola de Minas REM**. Ouro Preto, v. 66, n. 4, p. 499-505, 2013.

SILVA, M. S. S.; LIMA, M. M. F; GRAÇA, L. M.; LIMA R. M. F. **Bench-scale calcination and sintering of a goethite iron ore sample**. International Journal of Mineral Processing. 150, p. 54-64, abril, 2016.

SILVA, T. **Métodos de lavra a céu aberto**, 2018. 89 slides. Disponível em: <[https://aedmoodle.ufpa.br/pluginfile.php/418162/mod\\_resource.2018](https://aedmoodle.ufpa.br/pluginfile.php/418162/mod_resource.2018)>. Acesso em: 15/04/2021.

SITONIO, F. **Avaliação de plugs de tamponamento para detonação visando segurança & otimização operacional em desmontes a céu aberto de pedreiras localizadas em áreas urbanizadas**/Tarsila Tenório Luna da Silva. 2017. 73 folhas.

SMITH, A. J. B.; BEUKES, N. J. **Palaeoproterozoic banded iron formation hosted high-grade hematite iron ore deposits of the Transvaal Supergroup, South Africa**. Episodes In: Journal of International Geoscience. Coreia, v. 39, n. 2, p. 269-284, Junho, 2016.

SOOFASTAEI, Ali. **Data Analytics Applied to the Mining Industry. Digital transformation of mining**. Boca Raton, Estados Unidos da América, 2020. CRC press. V 1, 272 páginas.

TEALE, R. **The concept of specific energy in rock drilling**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 2, Issue 1, 1965, Pages 57-73, ISSN 0148-9062, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(65\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(65)90022-7).

TOMI, G. **O futuro da mineração em um mundo carbono zero**. Brasil Mineral, 2021. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias>. Acesso em 31 de janeiro de

2022.

WARDLAW, H. **Drilling Performance Optimization and Identification of Overpressure Formations**. Society of Petroleum Engineers. Richardson, 1969.  
<https://doi.org/10.2118/2388>.

WIPO. Índice Global de Inovação 2021. Resumo executivo. Wipo, 2021. 14ª edição. Genebra, Suíça. Disponível em:  
[https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/pt/wipo\\_pub\\_gii\\_2021\\_exec.pdf](https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/pt/wipo_pub_gii_2021_exec.pdf). Acesso em 26 de março de 2022.

WOLPP, L. **Caracterização e classificação geomecânica de um talude da santa helena mineração ltda**. Araxá, Minas Gerais, 2018. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Centro Federal de educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG. Araxá, 2018.

ZAPAROLLI, D. **Mineração digital. Uso de tecnologias proporciona mais produtividade e segurança a uma atividade insalubre e de alto risco**. Revista Pesquisa FAPESP Edição 289, 2020. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/mineracao-digital>. Acesso em 05 de novembro de 2021.

ZHANG, X; LUO, Y; FAN, L; PENG, J; YIN, K. **Investigation of RC-DTH air hammer performance using CFD approach with dynamic mesh method**. Journal of Advanced Research, v. 18. 2019. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/>. Acesso em 21 de fevereiro de 2022.

## APÊNDICE

### O PROBLEMA DA ESCOLHA DOS EQUIPAMENTOS DE PERFURAÇÃO

#### INTRODUÇÃO

Pesquisa Operacional (PO) é a área de conhecimento que estuda, desenvolve e aplica métodos analíticos avançados para auxiliar na tomada de melhores decisões nas mais diversas áreas de atuação humana.

O termo Pesquisa Operacional, remete às origens da área, cujo interesse primário era a gestão eficiente de operações (tipicamente de logística militar). No entanto, o avanço metodológico e computacional, aliado a constantes demandas de outras áreas, a PO se modernizou e ampliou seu campo de atuação. Atualmente o termo Pesquisa Operacional é também utilizado como uma tradução do termo em inglês *Business Analytics* (BA).

## INTRODUÇÃO



Fonte: Sobrabo(2019)

3

## OBJETIVOS

- ✓ Especificar o número mínimo de Equipamentos de Perfuração;
- ✓ Apontar a melhor opção na escolha do modelo e quantidade de Equipamentos de Perfuração, de modo a Minimizar o investimento Inicial;
- ✓ Apontar a melhor opção na escolha do modelo e quantidade de Equipamentos de Perfuração, de modo a Minimizar o Investimento Total ao longo da vida útil da Mina.

4

## ATIVIDADE PROPOSTA

Uma companhia de Mineração que explora minérios calcários resolveu investir na sua expansão com um aumento de 38% na sua produção que era de 7.000 ton por mês. Com a tomada desta decisão a empresa terá que primarizar a sua função unitária de Perfuração e Desmonte. A fim de escolher a melhor opção capaz de permitir uma eficiente operação e um menor custo total, dentre os modelos de Equipamentos de Perfuração abaixo apresentados deve-se tomar a melhor decisão.

- 1) Quantidade de Equipamentos necessários para fazer o desmonte e produção anual após a expansão da Mina?
- 2) Escolher o modelo de Equipamento mais atraente de modo que o investimento inicial (ano 1) seja o menor possível.
- 3) Optar pelo modelo de Equipamento cujo o investimento total (gastos ao longo da vida útil da Mina) seja o menor possível.

Nota:

Os dados serão apresentados no slide seguinte..

**Dica!**

**Usar o conceito de perfuração específica**

5

## INTRODUÇÃO

Dados Gerais:

- ❖ Valor do litro de diesel - \$0,69
- ❖ Altura da bancada da Mina - 15 m
- ❖ Diâmetro do furo - 9 7/8"
- ❖ Rocha = Dolomítica
- ❖ Densidade = 2,9 t/m<sup>3</sup>
- ❖ Resistência à compressão = 200 Mpa
- ❖ Produção mensal antes da expansão = 7.000 t
- ❖ Vida útil da Mina = 9 anos

Modelos	Diâmetro de Trabalho (pol)	Força de Avanço (Klbs.F)	Produtividade Média (m/h)	Custo Horário sem combustível (\$)	Consumo de combustível (l/h)	Vida útil (h)	Disponibilidade (%)	Preço para aquisição (M\$)	Nível de Automação
DM50	6 a 9	50000	30	180	96	45000	86	1	0
DML	6 a 10	60000	31	195	104	48000	86	1,3	0
PV235D	6 a 10	65000	35	198	78	58000	86	2,4	1
PV275D	7 a 10,5	77000	38	309	80	70000	86	3	1
PV271D	7 a 10,5	70000	46	304	118	70000	86	3,2	1

6

## RESOLUÇÃO

### MODELO

#### Variáveis de Decisão

$N_p$ : Número de Máquinas de Perfuração (UN);

$P_t$ : Produção Total Anual (t/ano);

$C_p$ : Custo Total de Propriedade (\$);

$C_a$ : Custo de aquisição de equipamento (\$);

$C_d$ : Custo anual com combustível (\$);

$C_h$ : Custo total operacional - sem combustível (\$);

$V_m$ : Vida útil das máquinas (anos);

$M_p$ : Total de Metragem a ser perfurada no ano - produção (m);

$M_q$ : Metragem horária por máquina (m);

#### Função Objetivo

Min  $X =$

#### Sujeito a:

$N_p \times M_q - M_p = 0 \rightarrow$  para encontrar a quantidade de máquinas em função da produção

$(C_h + C_d) \times N_p + C_a \times N_p - C_p = 0 \rightarrow$  para encontrar o custo Total de Propriedade

7

## RESOLUÇÃO

### Relações

$N_p \times M_q - M_p = 0 \rightarrow$  para encontrar a quantidade de máquinas em função da produção em metros lineares.

$(C_h + C_d) \times N_p + C_a \times N_p - C_p = 0 \rightarrow$  para encontrar o custo Total de Propriedade.

8



## RESOLUÇÃO

### MODELO

#### Dados de Entrada:

**E:** Conjuntos de modelos de Equipamentos de Perfuração

**K:** Conjuntos de parâmetros e especificações para os Equipamentos

$E_{ij}$ : Custos  $i$  no Equipamento  $j$ ;

**Mq:** Capacidade de produção por Equipamento ( $m$ ) ou metros perfurados por Equipamento;

#### Variáveis de Decisão:

$X_E$ : Quantidade de Equipamentos  $j$  (Un)

#### Função Objetivo:

**Min X**

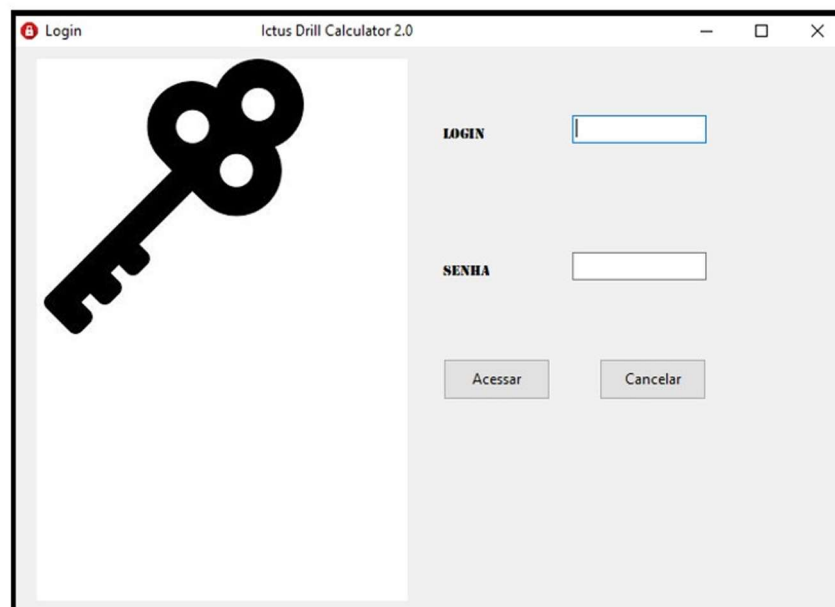
#### Sujeito a:

$$\sum_{j \in E} X_E Mq = 809441$$

$$\sum_{j \in E} X_E E_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in K$$

9

## RESOLUÇÃO – Perfuração Específica



Fonte: Próprio autor (2020)

10



## RESOLUÇÃO – Investimento Inicial – Lavra ano 1 – Restrição Diâmetro de Perfuração – 9 7/8” (251 mm)

Problema da Escolha de Equipamentos de Perfuração						
Dados:						
Abreviaturas		Modelos de Máquinas				
		DM50	DM1	PV235D	PV275D	PV271D
Pd	Máximo Pull Down (KLbs.F)	50000	60000	65000	75000	75000
D	Diâmetro (mm)	229	254	254	270	270
Tp	Taxa de Produtividade (m/h)	30	31	35	38	46
Vu	Vida Útil (h)	45000	50000	65000	70000	70000
Df	Disponibilidade Física (%)	86	86	86	86	86
Hp	Horas Produtivas (h)	7534	7534	7534	7534	7534
Mq	Metros Perfurados por máquina (m) Mq	226008	233542	263676	286277	346546
Cl	Combustível (l/h)	96	104	78	80	118
Cd	Gasto com combustível (\$/ano)	499026	540611	405458	415855	613386
Co	Custo Horário - sem combustível (\$)	180	195	198	300	304
Ch	Custo total operacional anual - sem combustível (\$)	1356048	1469952	1491812,8	2260080	229214,4
Ca	Custo de Aquisição (\$)	1000000	1300000	2400000	3000000	3400000
Cp	Custo Total de Propriedade Primeiro ano (\$)	0	0	6324640	8354070	0
NP	Quantidade de Máquinas (X)	0	0	1	1	0
It	Investimento Inicial - ano 1 (\$)	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 6.324.639,59	R\$ 8.354.069,88	R\$ 0,00
iv						<b>Investimento R\$ 14.678.709</b>
Ve	Vida Útil dos Equipamentos (anos)	Modelos de Máquinas				
		DM50	DM1	PV235D	PV275D	PV271D
Re	Reposição de Equipamentos	0	0	1	1	1
Na	Nível de Automação	0	0	2	1	1
Pt	Produção (t/ano)	115920				
Pv	Produção (m³/ano)	39972				
Mp	Metragem a ser perfurada (m)	809441				
Sujeito a:						
0 (produção)						0
14678709,48 (investimento)						0
0 (numero maq)						0
Função Objetivo:						
FO						R\$ 14.678.709

13

## RESOLUÇÃO – Investimento Total – Lavra ano 9

Problema da Escolha de Equipamentos de Perfuração						
Dados:						
Abreviaturas		Modelos de Máquinas				
		DM50	DM1	PV235D	PV275D	PV271D
Pd	Máximo Pull Down (KLbs.F)	50000	60000	65000	75000	75000
D	Diâmetro (mm)	229	254	254	270	270
Tp	Taxa de Produtividade (m/h)	30	31	35	38	46
Vu	Vida Útil (h)	45000	50000	65000	70000	70000
Df	Disponibilidade Física (%)	86	86	86	86	86
Hp	Horas Produtivas (h)	7534	7534	7534	7534	7534
Mq	Metros Perfurados por máquina (m) Mq	226008	233542	263676	286277	346546
Cl	Combustível (l/h)	96	104	78	80	118
Cd	Gasto com combustível (\$/ano)	499026	540611	405458	415855	613386
Co	Custo Horário - sem combustível (\$)	180	195	198	300	304
Ch	Custo total operacional anual - sem combustível (\$)	1356048	1469952	1491812,8	2260080	229214,4
Ca	Custo de Aquisição (\$)	1000000	1300000	2400000	3000000	3400000
Cp	Custo Total de Propriedade Nono ano (\$)	0	0	30404397	41708822	0
NP	Quantidade de Máquinas (X)	0	0	1	1	0
It	Investimento Total ao longo da vida útil da M	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 30.404.397,47	R\$ 41.710.822,33	R\$ 0,00
iv						<b>Investimento R\$ 72.115.220</b>
Aquisições		2	2	1	1	1
Ve	Vida Útil dos Equipamentos (anos)	Modelos de Máquinas				
		DM50	DM1	PV235D	PV275D	PV271D
Sf	Substituição de frota Sim	1	1	0	0	0
Na	Nível de Automação	0	0	1	3	2
Pt	Produção (t/ano)	115920				
Pv	Produção (m³/ano)	39972				
Mp	Metragem a ser perfurada (m)	809441				
Sujeito a:						
0 (produção)						0
72115219,8 (investimento)						0
0 (numero maq)						0
Função Objetivo:						
FO						R\$ 72.115.220

14

## RESOLUÇÃO – Investimento Total – Lavra ano 9

Problema da Escolha de Equipamentos de Perfuração							
Dados:							
Abreviaturas	Modelos de Máquinas					Cálculos Auxiliares	
	DM50	DML	PV235D	PV275D	PV27ID	Produção	11520
Pd	50000	60000	65000	75000	75000	M (m)	809441
D	229	254	254	270	270	Litro Diesel (\$)	0,69
Tp	30	31	35	38	46	Vida Útil da Mina (anos)	9
Vu	45000	50000	65000	70000	70000	Altura da Bancada (m)	15
Df	86	86	86	86	86	Perfuração Específica (m	0,0494
Hp	7534	7534	7534	7534	7534	Ano	9
Mq	228008	233542	263676	288277	348546	Afastamento (m)	4,5
Cs	86	104	78	80	118	Equipamento (m)	5,65
Cd	493026	540611	405458	415855	613386	Sub-furação (m)	1,95
Co	180	195	189	300	304	Comprimento do Furo (m	19,5
Ch	156048	1483952	149852,8	2260080	2290214,4	Densidade (t/m³)	2,9
Ce	3000000	1300000	2400000	3000000	3400000		
Cp	0	0	30404397	41708222	0		
NP	0	0	1	1	0		
ii	Investimento Total ao longo da vida útil da M	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 30.404.397,47	R\$ 41.710.822,33	R\$ 0,00	
iv	Aquisições	2	2	1	1	1	Investimento R\$ 72.115.220
Ve	Modelos de Máquinas						
	DM50	DML	PV235D	PV275D	PV27ID		
Sf	6	7	9	9	9		
Nia	1	1	0	0	0		
Pt	0	0	1	3	2		
Pv	11520	39972					
Mp	803441						
Sujeito a:							
0 [produção]						0	
72115218,8 [investimento]						0	
0 [numero max]							
Frota Objetivo:							
FD						R\$ 72.115.220	

15

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

O que é Pesquisa Operacional. In: <https://www.sobrapo.org.br>.


Acesso em: 27/01/2021.

BEZERRA, C. A. Técnicas de Planejamento, programação e controle da produção e introdução à programação linear. Intersaberes, Curitiba, 2014. [disponível em: Biblioteca Virtual/UFOP – E-Books BVirtual]


16

<b>Atividade:</b>  <b>Perfuração de Rocha com Perfuratriz Tele Remota/autônoma –          Procedimento Operacional</b>	<b>Código do PO:</b>	<b>MIN-PO-1637</b>
	<b>Revisão do PO:</b>	<b>01</b>
	<b>Data de revisão do PO:</b>	<b>12/05/2022</b>

1 – TÍTULO		
<b>Departamento</b>	Perfuração e Desmonte (Controle Operacional)	<b>Critério de elaboração do PO</b>
<b>Gerência</b>	Mineração	<input checked="" type="checkbox"/> Atividade de Risco Não Aceitável
<b>Executantes (Funções)</b>	Operadores de perfuratriz tele remota	<input type="checkbox"/> Atividade periculosa
<b>Responsável da Tarefa</b>	Instrutor de operação	<input type="checkbox"/> Atividade relacionada ao cianeto
<b>Aprovador</b>	Gerente e área de perfuração	<input type="checkbox"/> Qualidade
<b>Frequência da Atividade</b>	Diária	

2 – INTRODUÇÃO	
Realizar atividade de perfuração de rocha tele remota com segurança observando as normas abrangentes (NR 22).	
	Figura: PV271

3 – ANEXOS	
Número	Título
N.A	N.A

4 – RECURSOS	
Materiais/Ferramentas	Perfuratriz; Caminhão munck; Broca, hastes, bit sub, top sub, caminhão pipa;
EPI'S para atividade	Capacete de segurança; Óculos de proteção; Botina de segurança; Camisa de manga comprida e calça comprida; colete refletivo; Protetor auditivo tipo concha; Máscara respiratória pff-2; Luva; Capa de chuva; Protetor solar.
Documentos Relacionados	- Manual do fabricante, cheque liste, Procedimento operacional MIN-PO-1604-Perfuração de Rocha com Perfuratriz; MIN-PO-1806 - Abastecimento e lubrificação com o comboio; Checklist-MIN-PRO-047-AN18
<b>Emergência</b> 	1 - Em caso de incêndio, pare de imediato o equipamento, aplique o freio de estacionamento e desligue o motor. 2 - Se necessário, acione manualmente o supressor de incêndio de dentro da cabine ou fora do equipamento; 3 - Puxe o pino junto ao lacre e pressione para baixo a botoeira do sistema de incêndio; 4 - Comunique via rádio (faixa 1) emergência por três vezes, informando o ocorrido e pedindo o apoio necessário; 5 - Ao ouvir a mensagem de emergência por 3 vezes todos deverão parar as atividades até receber orientações do supervisor para retomar as atividades; 6 - A partir deste momento o líder da equipe (supervisor/técnico/controlador) deverá avaliar a situação e verificar a necessidade de acionamento do posto médico e/ou da brigada de emergência através da faixa 16 do rádio; - Brigada de emergência: ramal 1002 ou canal de rádio faixa 16; - Posto médico: ramal 1001 ou canal de rádio faixa 16.

--	--

## 5 - SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE

### MEIO AMBIENTE



ASPECTOS	IMPACTOS
Geração de particulados	Alteração da qualidade do ar
Emissão de fumaça preta	Alteração da qualidade do ar
Consumo de Recursos Naturais	Desperdícios de recursos naturais
Geração de Efluentes Líquidos	Alteração da qualidade da água e do solo
Emissão de Ruído	Perturbação do conforto da comunidade

### SAÚDE E SEGURANÇA


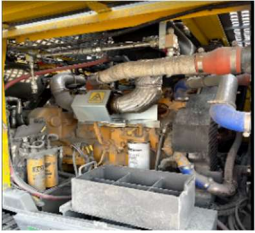

CONDIÇÃO PERIGOSA	EVENTO INDESEJÁVEL	LESÃO OU DANO
Falha/falta de informações	Acidente	Danos a integridade física
Manuseio/utilização de ferramentas manuais	Corte	Danos a integridade física e danos materiais
Falha/falta de equipamentos/materiais	Acidentes	Danos à saúde ocupacional e danos a integridade física
Abertura no piso, canaleta, vala	Queda	Danos à saúde ocupacional e danos a integridade física
Colisão/abaloamento de veículo e pessoas	Esmagamento ou cortes	Danos à saúde ocupacional e danos a integridade física
Movimentação/posição anti-ergonômica	Esforço físico	Danos à saúde ocupacional e danos a integridade física
Atingido por carga suspensa	Esmagamento de membros	Danos à saúde ocupacional e danos a integridade física
Ataque de animais / insetos	Mordidas	Danos à saúde ocupacional e danos a integridade física
Escada / plataforma	Queda de diferente nível	Danos à saúde ocupacional e danos a

		integridade física
Ruído	Exposição	Danos à saúde ocupacional

## 6 – TAREFA

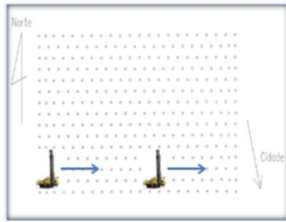

Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
01	Início de Turno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ao chegar no posto de trabalho operador da sala de controle e de campo devera buscar os EPI's e em seguida encher a garrafa com água potável;</li> <li>- Participar do DDS com a equipe e supervisão;</li> <li>- O supervisor deverá orientar o operador de campo e da sala de controle sobre os problemas enfrentados no último turno e os planos para o próximo.</li> <li>- O operador da sala de controle irá revisar o diário de turno e verificar anotações anteriores. O diário deve conter informações gerais praça, entrada e saída de pessoas, parada para manutenção e abastecimento.</li> <li>- As trocas de turno serão realizadas em banco quente, ou seja, as perfuratrizes permanecerão operando durante as trocas de turno e sempre com a presença de um operador na sala de controle</li> </ul>		
02	Entrada de praça de Perfuração	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toda entrada de praça de perfuração é procedimento colocar placa, cones, leira, estacionamento, luminária e somente uma entrada;</li> <li>- Toda entrada na praça das máquinas autônomas, só poderá ser autorizada pelo o operador da sala de controle, este deverá avaliar a real necessidade da entrada, se sim, autorizar a entrada.</li> <li>- Sempre ficar em contato com a sala de controle vai radio na faixa 15.</li> <li>- Qualquer pessoa que precisar adentrar a praça, deverá solicitar via faixa 15 a entrada e aguarda autorização do operador de campo, ficando proibido a entrada sem a autorização do mesmo;</li> <li>- É obrigatório uso individual do Tag de segurança para acesso de pessoas na praça de perfuração;</li> <li>- É obrigatório o uso de capacete, máscara, botina, óculos e abafador nas áreas operacionais;</li> </ul>	 	



6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
03	Inspeção da área de perfuração	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Todo início de turno o operador de campo deverá inspecionar a área (praça de perfuração);</li> <li>-- Devendo inspecionar os itens citado no procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 03 - Inspeção da área de perfuração)</li> </ul>		
04	Realizar a inspeção da perfuratriz conforme Check-list.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Todo início de turno é obrigatório a inspeção das maquinas;</li> <li>- Todo início de turno e obrigatório o preenchimento do Check-list digital ou físico, ficando proibido a operação sem o preenchimento.</li> <li>- Se for constatado no Check-list algum não conforme nos itens impeditivo, para o equipamento de imediato em manutenção e solicitar a correção, ficando proibido a operação.</li> <li>- O operador de campo deverá inspecionar as maquinas autônomas;</li> <li>- O operador de campo deverá solicitar ao operador de sala a parada da máquina que irá iniciar a inspeção;</li> <li>- Devendo inspecionar os itens citado no procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 04 - Realizar a inspeção da perfuratriz conforme Check-list.)</li> <li>-</li> </ul>		
05	Subir e Descer Do Equipamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sempre que o operador de campo ou outra pessoa precise subir no equipamento;</li> <li>- O operador de campo deverá solicitar a parada da máquina especifica para o operador de sala,</li> <li>- Após a confirmação da parada, o operador de campo ira até a máquina especifica e deverá desligar a chave seletora de autônoma para a posição manual, feito isto autorizar a subir/subida;</li> <li>- Devendo seguir o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 05 - Subir e Descer Do Equipamento)</li> </ul>		




6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
06	Equipamento em manutenção ou liberado pela manutenção.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O operador de sala de controle devera informa o problema da máquina específica para a equipe de manutenção;</li> <li>- Quando a equipe de manutenção chegar na praça de perfuração devera informa e aguarda o operador da sala de controle autorização de entrada;</li> <li>- O operador da sala de controle devera para a máquina específica, após a parada informa e autorizar a entrada da equipe de manutenção via faixa 15;</li> <li>- Após a confirmação da parada, a manutenção ira até a máquina específica e deverá desligar a chave seletora de autônoma para a posição manual;</li> <li>- O operador da sala de controle deverá avaliar se o local que a perfuratriz está segura para a manutenção, mantendo uma distância de 25 metros das demais, se sim, seguir para o próximo passo;</li> <li>- Se o local não for seguro, o operador da sala de controle deverá locomova a perfuratriz para um local seguro para a manutenção;</li> <li>- Feito isto autorizar a entrada da equipe de manutenção;</li> <li>- Após a liberação a manutenção deverá voltar a chave seletora para o modo autônomo, se afasta da mesma e avisa para o operador de sala de controle que a máquina específica já está liberada e pode entrar em operação;</li> <li>- Quando finalizar a manutenção da perfuratriz a manutenção deverá sai da praça, ficando proibida a permanencia na praça após a liberação;</li> <li>- Após a saída da praça a equipe de devera informa e liberar a praça para o operador de sala de controle;</li> </ul>		
07	Patolamento	O operador de sala de controle deverá seguir o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 08 - Patolamento)		
08	Operação da perfuratriz.	O operador de sala de controle deverá seguir todo o procedimento operacional vigente de perfuração		




6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
		de rocha de número MIN-PO-1604 (item 09 - Operação da perfuratriz) - Deverá seguir todas as recomendações conforme treinamento aplicado de operação de máquinas tele remota (autônomas)		
09	Iniciar Furo	- O operador de sala de controle deverá seguir todo o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 10 - Iniciar Furo) - Seguindo todas as recomendações quanto a embocamento de furo e parâmetros operacionais vigentes;		
10	Sequência de Perfuração	- O operador de sala de controle deverá seguir todo o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 11 - Sequência de Perfuração) - Sempre mantendo uma distância de segurança de 15 metros de uma máquina da outra; - Todo deslocamento entre furos ou linhas deverá ser feito de tal maneira que a esteira do equipamento não passe sobre o colar do furo; - Toda manobra para mudança de linha ou furos deverá ser feita preferencialmente em regiões que não foram perfuradas;		
11	Abastecimento de diesel	- Realizar o abastecimento conforme descrito no MIN-PO-1806 Abastecimento e lubrificação com o comboio; - O operador deverá fazer balizamento do comboio entre as linhas dos furos já feitos até a perfuratriz, para evitar que o mesmo passe por cima dos furos; - Todo acesso entre linhas deverá ser sinalizado, para orientar a direção que os veículos deverão seguir.		

6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- O operador de sala de controle devera programar o abastecimento junto ao comboio e a prioridade de abastecimento;</li> <li>- Quando o comboio chegar na praça de perfuração devera informa e aguarda o operador da sala de controle a autorização de entrada;</li> <li>- O operador da sala de controle devera para a máquina específica, após a parada informa e autorizar a entrada do comboio via faixa 15;</li> <li>- Após a confirmação da parada, o operador do comboio irá até a máquina específica e deverá desligar a chave seletora de autônoma para a posição manual;</li> <li>- O operador da sala de controle deverá avaliar se o local que a perfuratriz está é seguro para abastecimento, mantendo uma distância de 25 metros das demais, se sim, seguir para o próximo passo;</li> <li>- Se o local não for seguro, o operador da sala de controle deverá locomova a perfuratriz para um local seguro para a abastecimento;</li> <li>- Feito isto autorizar a entrada do comboio e acompanha o abastecimento;</li> <li>- Quando finalizar o abastecimento o operador do comboio deverá voltar a chave seletora para o modo autônomo, se afasta da mesma e avisa para o operador de sala de controle que a máquina específica já está liberada e pode entrar em operação;</li> <li>- Seguir os mesmos passa para o abastecimento das demais perfuratrizes na praça;</li> <li>- Após a saída o operador do comboio deverá informar e liberar a praça para o operador de sala de controle, ficando proibido a permanencia na praça durante a operação da perfuratriz;</li> </ul>		

6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
12	Abastecimento de Água	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O operador de sala de controle devera programar o abastecimento de água junto ao pipa e informa para o operador de campo;</li> <li>- Quando o pipa chegar na praça de perfuração deverá informar e aguarda o operador da sala de controle a autorização de entrada;</li> <li>- O operador da sala de controle deverá informar ao operador do pipa qual será a primeira perfuratriz que irá abastecer;</li> <li>- Aguarda a confirmação do operador de sala de controle via faixa 15 de rádio,</li> <li>- O operador da sala de controle deverá avaliar se o local que a perfuratriz está é seguro para abastecimento, mantendo uma distância de 25 metros das demais, se sim, seguir para o próximo passo;</li> <li>- Se o local não for seguro, o operador da sala de controle deverá locomova a perfuratriz para um local seguro para o abastecimento de água;</li> <li>- Feito isto autorizar a entrada do pipa para o abastecimento;</li> <li>- O operador do pipa deverá para sempre na lateral da perfuratriz e mantendo uma distância de 10 metros da mesma;</li> <li>- Quando finalizar o abastecimento o operador do pipa e deverá se afastar da mesma e avisa para o operador de sala de controle que a máquina especifica já está liberada do abastecimento;</li> <li>- Seguir os mesmos passa para o abastecimento das demais perfuratrizes na praça;</li> <li>- O operador de sala de controle fica proibido a locomoção durante o abastecimento, esta operação só poderá ser feita após a liberação do operador do pipa;</li> <li>- Após a saída do pipa o operador do pipa deverá informar e liberar a praça para o operador de sala de controle, ficando proibido a permanencia após a liberação;</li> </ul>		

6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- O operador deverá fazer balizamento do pipa entre as linhas dos furos já feito até a perfuratriz, para evitar que o mesmo passe por cima dos furos;</li> </ul>		
13	Deslocamento nos acessos da mina	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toda locomoção entre praças deverá ser feita no manual pelo operador de campo;</li> <li>- O operador deverá receber a solicitação do operador da sala de controle a prioridade de mudança de praça;</li> <li>- Após receber a solicitação o operador de campo devera se dirigir a praça e aguarda a autorização/ confirmação que a máquina já está parada e que pode adentrar a praça;</li> <li>- Após a confirmação da parada, o operador de campo ira até a máquina especifica e deverá desligar a chave seletora de autônoma para a posição manual;</li> <li>- E deverá fazer a locomoção manual, o operador de campo deverá seguir todo o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 14 - Deslocamento nos acessos da mina)</li> <li>- Feito a locomoção, seguir o procedimento para as demais perfuratrizes;</li> </ul>		
14	Troca de broca da perfuratriz	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O operador de sala de controle devera programar e informa a necessidade da máquina a troca de broca para o operador de campo;</li> <li>- Após receber a solicitação o operador de campo devera se dirigir a praça e aguarda a autorização/confirmação que a máquina já está parada e que pode adentrar a praça;</li> <li>- Após a confirmação da parada, o operador de campo irá até a máquina especifica e deverá desligar a chave seletora de autônoma para a posição manual;</li> <li>- O operador de campo devera avaliar se o local que a perfuratriz está é seguro para a troca, mantendo uma distância de 25 metros das demais, se sim, seguir para o próximo passo;</li> </ul>		

6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se o local não for seguro, o operador de campo deverá locomover a perfuratriz manualmente para um local seguro para a troca mantendo uma distância de 25 metros das demais perfuratrizes;</li> <li>- Feito isto iniciar a troca de broca no manual, o operador de campo deverá seguir todo o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 16 - Troca de broca da perfuratriz)</li> <li>- Quando finalizar a troca o operador de campo deverá voltar a chave seletora para o modo autônomo, se afasta da mesma e avisa para o operador de sala de controle que a máquina específica já está liberada e pode entrar em operação;</li> <li>- Seguir os mesmos passos para a troca de broca das demais perfuratrizes na praça;</li> <li>- Quando finalizar a troca de todas as perfuratrizes o operador de campo deverá saída da praça;</li> <li>- Após a saída da praça o operador de campo deverá informar e liberar a praça para o operador de sala de controle.</li> </ul>		
15	Troca de haste e bit sub.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O operador de campo deverá avaliar se o local que a perfuratriz está é seguro para a troca, mantendo uma distância de 40 metros das demais, se sim, seguir para o próximo passo;</li> <li>- Se o local não for seguro, o operador de campo deverá locomover a perfuratriz manualmente para um local seguro para a troca mantendo uma distância de 40 metros das demais perfuratrizes;</li> <li>- Feito isto iniciar a troca no manual, o operador de campo deverá seguir todo o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 17 - Troca de haste e bit sub)</li> <li>- Quando finalizar a troca o operador de campo deverá voltar a chave seletora para o modo autônomo, se afasta da mesma e</li> </ul>		


6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
		<p>avisa para o operador de sala de controle que a máquina específica já está liberada e pode entrar em operação;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Quando finalizar a troca das perfuratrizes específica o operador de campo deverá acompanhar saída dos equipamentos auxiliares da praça;</li> <li>- Após a saída da praça o operador de campo deverá informar e liberar a praça para o operador de sala de controle.</li> </ul>		
16	Perca de Material de desgaste de perfuração no Furo	O operador de campo deverá seguir todo o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 19 - Perca de Material de desgaste de perfuração no Furo).		
17	Parada por condições climáticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Durante a incidência de raios inferior a 8 km, fica proibido a parada da máquina se a mesma estiver trabalhando no modo tele remota (autônoma)</li> <li>- O operador de campo e sala de controle deverá seguir todo o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 22 - Parada por condições climáticas), caso a máquina esteja perfurando no modo manual.</li> </ul>		
18	Protetor de furo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O operador de sala de controle devera programar e informa a necessidade do tamponamento de furos o operador de campo;</li> <li>- Após receber a solicitação o operador de campo devera se dirigir a praça;</li> <li>- Após a liberação e acesso a praça, devera sinalizar uma área fora do raio de ação das perfuratrizes com uma distância mínima de 25 metros das máquinas;</li> <li>- Feito isto, iniciar a proteção com o protetor de furo, o operador de campo deverá seguir todo o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 27 - Tamponamento de furo)</li> </ul>		



6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quando finalizar o tamponamento o operador de campo deverá sair da praça;</li> <li>- Após a saída da praça o operador de campo deverá informar e liberar a praça para o operador de sala de controle;</li> </ul>		
19	Teste de Trinca	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O operador de sala de controle devera programar e informa a necessidade da máquina que precisa ser feito o teste de trinca para o operador de campo;</li> <li>- Após receber a solicitação o operador de campo devera se dirigir a praça e aguarda a autorização/confirmação que a máquina já está parada e que pode adentrar a praça;</li> <li>- Após a confirmação da parada, o operador de campo irá até a máquina especifica e deverá desligar a chave seletora de autônoma para a posição manual;</li> <li>- O operador de campo deverá avaliar se o local que a perfuratriz está é seguro para o teste, mantendo uma distância de 25 metros das demais, se sim, seguir para o próximo passo;</li> <li>- Se o local não for seguro, o operador de campo devera locomover a perfuratriz manualmente para um local seguro para a troca mantendo uma distância de 25 metros das demais perfuratrizes;</li> <li>- Feito isto iniciar o teste no manual, o operador de campo deverá seguir todo o procedimento operacional vigente de perfuração de rocha de número MIN-PO-1604 (item 33 - Teste de Trinca)</li> <li>- Quando finalizar o teste o operador de campo deverá voltar a chave seletora para o modo autônomo, se afasta da mesma e avisa para o operador de sala de controle que a máquina especifica já está liberada e pode entrar em operação;</li> <li>- Seguir os mesmos passos para o teste nas demais perfuratrizes na praça;</li> <li>- Quando finalizar o teste de todas as perfuratrizes o operador de campo deverá saída da praça;</li> </ul>		



6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
		- Após a saída da praça o operador de campo deverá informar e liberar a praça para o operador de sala de controle;		
20	Obrigações do operador de sala de controle e de campo	<p><b>Operação tele remota – sala de controle</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- O operador da sala de controle deverá checar visualmente pelas câmeras a condição do equipamento e as condições gerais da praça de operação.</li> <li>-O operador de campo e o operador da sala de controle deverão checar os dados de saúde da máquina e os planos de perfuração para garantir que não há nenhum problema que impacte na operação da perfuratriz.</li> <li>-O operador da sala de controle deve coordenar junto ao operador de campo as atividades necessárias, como abastecimento de água ou diesel, troca de consumíveis (brocas, hastes, top sub, bit sub e bucha guia) e teste de trinca, a fim de minimizar os atrasos operacionais.</li> <li>-Em caso de falha do equipamento o operador da sala de controle deve comunicar o time de manutenção, o operador de campo e supervisor de turno. Caso necessário, o operador de campo deverá desligar o equipamento de forma local.</li> <li>-O operador da sala de controle fará o devido apontamento do código relativo à falha.</li> <li>-Caso o problema seja na sala de controle, o operador poderá se dirigir ao equipamento e operar de forma manual até que o problema seja resolvido.</li> </ul> <p><b>Operação tele remota – Operador de Campo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- O operador de campo deve inspecionar e verificar se os itens de segurança estão sendo seguidos (bermas, cones, sinalização, leiras e iluminação)</li> </ul> <p>Responsabilidades primárias:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Seguir todos os procedimentos operacionais</li> <li>- Comunicar-se constantemente com o operador da sala de controle</li> <li>- Garantir apenas um ponto de entrada na área de perfuração e que</li> </ul>		

6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
		<p>todas as pessoas que precisem adentrar à praça o peçam permissão</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Garantir a segurança da área de perfuração antes de permitir a entrada de pessoas</li> <li>- Coordenar as atividades junto aos times de suporte (manutenção, comboios, caminhões pipa, amostragem, equipe de medição de furos, topografia,)</li> <li>- Realizar inspeção em todas as perfuratrizes</li> </ul> <p>Realizar inspeção em todas as planilhas de perfuração</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Garantir que as perfuratrizes possuem os consumíveis necessários para operação (brocas, hastes, água, diesel etc.).</li> </ul> <p>-NOTA: Todas as pessoas devem seguir o procedimento operacional de entrada em zona de operação tele remota.</p>		
21	Consumo de Recursos Naturais	Caso perceba qualquer tipo de vazamento, pare o equipamento de imediato e solicite a correção a manutenção.		
22	Geração de Efluentes Líquidos	Caso perceba qualquer tipo de vazamento, pare o equipamento de imediato e solicite a correção a manutenção.		
23	Emissão de Ruído	Caso perceba ruído anormal, pare o equipamento de imediato e solicite a correção a manutenção.		
24	Geração de particulados	-Caso haja geração de particulados(poeira) utilizar água para elimina a mesma, caso não funcione a injeção de água pare de imediato o equipamento.		
25	Geração de fumaça preta	-Caso haja geração de fumaça preta, pare o equipamento de imediato e solicite a correção a manutenção.		
26	Operação Mista de perfuratrizes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toda praça de perfuração tele rêmora deverá ser identificada com placa específica e cones;</li> <li>- Antes da operação mista na mesma planilha o operador de campo deverá delimitar e sinalizado uma área específica com cones e placas para a perfuratriz tele remota, mantendo umas distâncias das demais de 15 metros;</li> <li>- Nesta área só poderá ser operada por máquinas tele remota, ficando proibida a entrada das demais perfuratrizes;</li> </ul>		

6 – TAREFA				
Item	O que fazer	Como fazer	Fotos (Opcional)	OPT
27	Check-list do talude	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Todo início de turno o operador deverá fazer Check-list de inspeção de talude MIN-PRO-047-AN18;</li> <li>- Caso o operador identifique um risco de queda de material, o mesmo deverá informar ao supervisor/técnico e bloquear a área com placa e aguarda;</li> <li>- Após o bloqueio esta área só poderá ser liberada pela equipe da geotécnica;</li> <li>- Fica proibido o posicionamento da máquina com a porta de acesso a cabine em direção ao talude.</li> <li>- A praça somente será considerada liberada para o trabalho após validação da Geotecnia em conjunto com responsável da área e executante da atividade</li> <li>- Somente será considerada área liberada para trabalho as que tiverem em sua entrada pontaletes de sinalização branco com faixas na cor laranja.</li> </ul>		

7 - OPT – OBSERVAÇÃO PLANEJADA DA TAREFA			
Data: ___/___/_____	Nome	Função	Assinatura
Observador:			
Participante da Tarefa:			
<b>Início da Observação:</b>			<b>S</b> <b>N</b> <b>A</b>
Todos os equipamentos/ferramentas necessárias para a tarefa estão disponíveis?			
O empregado/contratado observado está em condições físicas/mentais apropriadas para a executar a tarefa?			
O empregado/contratado observado está utilizando todos os EPIs necessários?			
<b>Durante a Observação:</b>			
As práticas observadas obedecem a todos os padrões da tarefa?			
As técnicas e métodos observados são os mais eficientes, produtivos e atingem o objetivo da tarefa?			
Todos os riscos relacionados à tarefa estão relacionados e os controles necessários identificados no procedimento?			
<b>Conclusão da Observação:</b>			
Foi identificada a necessidade de revisão do Procedimento Operacional?			
<b>Comentários Adicionais:</b>			

8 - CONTROLE DE REVISÃO			
Revisão	Item	Histórico da revisão	Data
00	Todos	Emissão Inicial	08/02/2022
01	Todos	Inserido novo documento ao campo de documentos relacionados;	12/05/2022

<b>8 - CONTROLE DE REVISÃO</b>			
<b>Revisão</b>	<b>Item</b>	<b>Histórico da revisão</b>	<b>Data</b>
		(Checklist-MIN-PRO-047-AN18); Inserido os itens 27 referentes ao Checklist de taludo; Revisão Geral nos itens referentes a tarefa.	
02	04	Inserido no item 04- Todo início de turno e obrigatório o preenchimento do Check-list digital ou físico, ficando proibido a operação sem o preenchimento. - Se for constatado no Check-list algum não conforme nos itens impeditivo, para o equipamento de imediato em manutenção e solicitar a correção, ficando proibido a operação.	

<b>ANEXOS</b>	
Título...	
Conteúdo...	

Disponível em: [https://github.com/Jadirpedroalves/Diserta-o-de-Mestrado-Jadir/blob/e3094a4c8a8bf46d9f1fe8992e8f598b920b2e54/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20aluno%20Jadir%20Pedro%20Alves%20\(rev.05%20\).docx](https://github.com/Jadirpedroalves/Diserta-o-de-Mestrado-Jadir/blob/e3094a4c8a8bf46d9f1fe8992e8f598b920b2e54/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20aluno%20Jadir%20Pedro%20Alves%20(rev.05%20).docx)