



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

RAFAEL MARRA MARIANO

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO
DESMONTE DE ROCHAS PARA ITABIRITOS COMPACTOS**

OURO PRETO - MG

2018

RAFAEL MARRA MARIANO
rafaelmarra93@gmail.com

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO
DESMONTE DE ROCHAS PARA ITABIRITOS COMPACTOS**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Professor Orientador: Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Co-Orientador: Aurélio Manço Garcia

Co-Orientador: Davi Bastos Martins de Oliveira

OURO PRETO – MG

2018

M333d

Mariano, Rafael Marra.

Determinação de parâmetros geométricos no desmonte de rochas para itabiritos compactos [manuscrito] / Rafael Marra Mariano. - 2018.

62f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Desmonte de rochas. 2. Perfuração (Minas). 3. Minérios de ferro. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.23

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO DESMONTE DE
ROCHAS PARA ITABIRITOS COMPACTOS**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Profa. Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Hermínio Arias Nalini Júnior

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

Chefe

Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

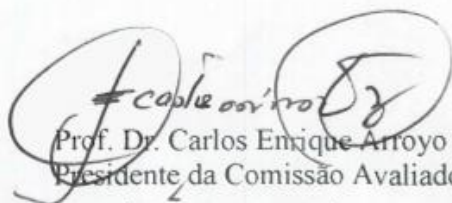
Aos 13 dias do mês de julho de 2018, às 16h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO DESMONTE DE ROCHAS PARA ITABIRITOS COMPACTOS”**, pelo aluno **Rafael Marra Mariano**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (Orientador)**, **Prof. Dr. Elton Destro** e **Prof. M.Sc. Flávia Gomes Pinto**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela *Aprovação* do candidato, com a nota *8,5* concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas sugeridas pela banca.

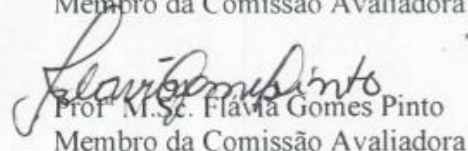
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 13 de julho de 2018.


Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador


Prof. Dr. Elton Destro
Membro da Comissão Avaliadora


Prof. M.Sc. Flávia Gomes Pinto
Membro da Comissão Avaliadora

Rafael Marra Mariano


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda

Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

Dedico este trabalho à minha família, principalmente minhas avós, meus Pais Licínio e Ednamar e minha irmã Maíra por serem meus maiores incentivadores. À Rayane pelo carinho, paciência e companheirismo, e a todos os meus colegas de trabalho da Anglo American pela disponibilidade, prontidão e aprendizado adquirido.

Ao Aurélio Garcia e Davi Oliveira pela amizade e oportunidade de introdução à Anglo American.

A todos os colegas de trabalho da Anglo American, em especial Agnus Delgado, Vinícius Madeira, George Aires, Jorge Alex, Jakeline Silva, Janice Figueiredo, Alexandre Rocha, Elson Egídio, Thales Fernandes, Clélio Junior e Luana Carvalho pela contribuição em meu crescimento pessoal e profissional.

A UFOP e aos professores e mestres que tive a oportunidade de conhecer, pelo ensino gratuito e de qualidade.

A meu orientador Dr Carlos Arroyo, por toda prontidão, conhecimento e energia que proporcionaram a realização deste trabalho.

À minha família, por serem sempre minha maior base.

À república Verdes Mares, lugar onde vivi os melhores anos de minha vida, por todo crescimento pessoal e amizades conquistadas.

“O desenvolvimento humano depende fundamentalmente da invenção. Ela é o produto mais importante de seu cérebro criativo. Seu objetivo final é o completo domínio da mente sobre o mundo material e o aproveitamento das forças da natureza em favor das necessidades humanas. ”

Nikola Tesla.

RESUMO

O presente estudo tem como proposta determinar os parâmetros geométricos apropriados para realizar o desmonte de rochas em maciços rochosos competentes e de difícil mapeamento presentes na Mina do Sapo, ativo da empresa Anglo American plc. A mina objeto do estudo realiza a extração de minério de ferro e se situa nos municípios de Conceição do Mato Dentro e Alvorada de Minas, na região central do estado de Minas Gerais. A lavra na mina do sapo é realizada a céu aberto e o minério é explorado da rocha itabirito que ocorre em três principais litologias: itabirito compacto (IC), itabirito semi-compacto (ISC) e itabirito friável (IF). Com o avanço vertical da lavra, e consequente abertura de bancos com menor cota, o corpo mineralizado tende a ficar cada vez mais compacto devido às características do depósito mineral de enriquecimento supergênico onde a mina opera, o que leva a novas demandas e consequentemente novas premissas para garantir a qualidade do processo de desmonte de rochas por explosivos.

Através da realização de estudos e simulações dos parâmetros presentes no desmonte de rocha, foi proposta a mudança de diâmetro das perfuratrizes de produção de 7 ½” para 9 ½” e redução da malha de perfuração de itabirito compacto. Possíveis impactos ambientais e efeitos colaterais provenientes desta modificação serão monitorados continuamente, e caso sejam observados, serão realizados estudos de maneira a serem minimizados ou erradicados. O objetivo do trabalho é determinar os parâmetros geométricos mais apropriados de forma a manter a qualidade do desmonte de rochas praticado nas demais litologias, impactando o mínimo possível nos custos do processo e o valor em horas de trabalho das frotas de perfuração.

Palavras-chave: Mina do Sapo. Minério de ferro. Itabirito. Redução da malha de perfuração. Mudança de diâmetro. Desmonte

ABSTRACT

The study has as its purpose to determine the adequate geometrical parameters to perform rock blasting on competent and difficult mapping rock masses presents on Mina do Sapo, which belongs to Anglo American plc. The mine, object of the study, extracts iron ore and is located on the municipalities of Conceição do Mato Dentro and Alvorada de Minas, on the central region of Minas Gerais. Mina do Sapo uses open pit mining, and the iron ore is extracted from itabirite, which occurs in three main lithologies: compact itabirite (IC), semi compact itabirite (ISC) and friable itabirite (IF). The vertical advance of mining, and consequent opening of banks in lower quota, makes the rock tend to be more compact, due to the characteristics of supergenic mineral deposit where the mine operates, which leads to new demands, and consequently new premises to ensure the quality of the rock blasting process.

Through the conducting of studies and computer simulations of drilling and blasting parameters, it was proposed to change the diameters of the drillers from 7 ½” to 9 ½” and to reduce the drilling pattern of compact itabirite. Possible environmental impacts and side effects of these modifications will be continuously monitored, and if observed, studies will be carried out in order to minimize or eradicate it. The objective of the work is to maintain the quality of the rock blasting process practiced on the other lithologies, through the presentation of changes that do not abruptly affect the costs of the process and the demand for the drillers' worked hours.

Keywords: *Mina do Sapo. Iron ore. Itabirite. Reduce of the drilling pattern. Diameter change. Blast*

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANFO – Ammonium Nitrate and Fuel Oil

cm – centímetro

DF – Disponibilidade Física

DTH – *Down the hole*

g – gramas

h – Hora

HC – Horas Calendário

HT – Horas trabalhadas

IC – Itabirito Compacto

IF – Itabirito Friável

ISC – Itabirito Semi-Compacto

km- Quilômetros

m - metro

m³ - metro cúbico

mm – milímetro

RO – Rendimento operacional

rpm – rotações por minuto

t – Tonelada

tms – tonelada métrica seca

UF - Utilização Física

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método de perfuração rotopercussiva.....	5
Figura 2 - Método de perfuração rotativa com broca tricônica	7
Figura 3 - Malha de perfuração do tipo quadrada	9
Figura 4 - Malha de perfuração do tipo retangular	9
Figura 5 - Malha de perfuração do tipo estagiada	9
Figura 6 - Demonstração das possíveis conseqüências do dimensionamento inadequado da malha de perfuração.....	10
Figura 7-Influência da sub perfuração no processo de desmonte.....	12
Figura 8-Exemplo de aplicação de perfuração inclinada.....	14
Figura 9-Cronograma da mudança de diâmetro das perfuratrizes DML.....	19
Figura 10: Localização do município de Conceição do Mato Dentro	20
Figura 11-Vista aérea da região da Mina do Sapo.....	21
Figura 12-Vista aérea do Porto de Açú, em São João da Barra - RJ	21
Figura 13-Colunas estratigráficas da região entre São Sebastião do Bom Sucesso e Itapanhocanga.....	22
Figura 14-Perfuratriz Atlas Copco DM30	24
Figura 15-Perfuratriz Atlas Copco DML.....	25
Figura 16 - Perfuratriz Caterpillar MD 6420.....	25
Figura 17 – Bit de 9 ½“ utilizado na perfuração do tipo roto-percussiva.....	26
Figura 18 – Broca utilizada na perfuração tipo rotativa	26
Figura 19 - Polígonos de perfuração criado pela equipe de planejamento de mina.	27
Figura 20 - Plano de perfuração criado pela equipe de topografia	28
Figura 21 - Amarração de furos feita pelo software BlastLogic	28
Figura 22-Proporção em toneladas de cada litologia desmontada no ano de 2017	29

Figura 23-Proporção em toneladas de cada litologia desmontada no primeiro trimestre de 2018	30
Figura 24-Massa de itabirito compacto desmontada e massa de blocos gerada em 2017	30
Figura 25-Massa de itabirito compacto desmontada e massa de blocos gerada no primeiro trimestre de 2018	31
Figura 26-Paradas da britagem por motivo de blocos e produtividade do britador.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Indicadores de perfuração coletados do sistema de despacho eletrônico.....	18
Tabela 2-Malhas de perfuração e razões de carga antes do estudo de tradeoff.....	18
Tabela 3 - Proporção de cada litologia a ser desmontada no ano de 2018, em massa e porcentagem.....	32
Tabela 4-Informações de malha, aplicação de explosivos e altura do banco	32
Tabela 5-Razão de aplicação de explosivos por litologia.....	32
Tabela 6-Relatório do sistema de despacho utilizado para estimativa de horas trabalhadas não produtivas	33
Tabela 7-Simulador de indicadores e metragem perfurada por cada frota em 2018	34
Tabela 8-Simulador de consumo de explosivos e acessórios de detonação	35
Tabela 9-Comparação entre os valores orçados e o cenário 1.....	36
Tabela 10-Comparação entre os valores orçados e o cenário 2.....	37
Tabela 11 - Comparação entre o orçamento e os cenários 1 e 2.....	37
Tabela 12-Malhas de perfuração e razões de carga após o estudo de adequação.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do problema	2
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Objetivo geral	3
1.3.2	Objetivos específicos.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Perfuração de rochas.....	4
2.1.1	Métodos de perfuração de rocha.....	4
2.2	Variáveis geométricas da perfuração.....	7
2.2.1	Diâmetro de perfuração	7
2.2.2	Malha de perfuração	8
2.2.3	Afastamento	10
2.2.4	Espaçamento	11
2.2.5	Subperfuração	12
2.3	Perfuração inclinada	12
2.4	Razão de carga	14
2.5	Apresentação de indicadores operacionais.....	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1	Construção de simuladores.....	17
4	ESTUDO DE CASO	20
4.1	Objeto do estudo	20
4.2	Apresentação da Geologia do Depósito da Mina	22
4.3	Apresentação das frotas de perfuração	24
4.4	Apresentação do processo de desmonte praticado na Mina do Sapo	27
4.5	Análise do histórico recente de desmonte	29
4.6	Simulações realizadas.....	31
4.6.1	Premissas utilizadas.....	31
4.6.2	Simulação do impacto na Utilização Física.....	33
4.6.3	Simulação do aumento no consumo de explosivos	34

4.7	Apresentação dos cenários simulados	36
4.8	Comparação entre cenários e escolha da melhor alternativa	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
5.1	Análise de indicadores operacionais.....	39
5.2	Benefícios práticos da padronização de diâmetros de perfuração	41
6	CONCLUSÃO.....	42
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

O processo de perfuração e desmonte é uma técnica usualmente aplicada à extração de rochas em áreas competentes, nas quais os meios mecânicos não são aplicáveis e/ou economicamente viáveis (ALONSO et. Al, 2013). O desmonte de rochas é um processo que possui grande importância para a cadeia produtiva, sendo este responsável pela fragmentação de blocos maciços de rocha para produzir blocos menores, com o objetivo de atender a granulometria necessária para o transporte e beneficiamento do minério, algo que não seria possível caso a rocha estivesse *in situ* (DUARTE, 2014). De acordo com Morais (2004), a fragmentação proveniente do desmonte afeta diretamente os processos subsequentes da cadeia de produção, como o carregamento, transporte, britagem e moagem, por isto, deve-se buscar o ótimo neste processo para inferir melhorias no sistema como um todo.

Segundo Jimeno (2003), a perfuração é parte fundamental deste processo, e tem como finalidade criar furos no maciço rochoso com geometria e distribuição adequadas para posteriormente serem alojadas cargas de explosivos e acessórios de detonação. Dentro do processo de perfuração existem algumas variáveis que são determinantes para otimização de resultados e seguimento do material desmontado na cadeia produtiva, das quais pode-se destacar a malha de perfuração, o diâmetro dos furos, altura da bancada, entre outros. A razão de carga é variável dependente das anteriores, e está diretamente atrelada ao resultado do desmonte. Conhecer a geologia local e as propriedades atuais do maciço rochoso do depósito mineral é de suma importância para otimizar e adaptar o processo de perfuração às premissas atuais de uma mina a céu aberto. Em maciços de rocha competente, o processo de perfuração é mais complexo e demorado, já que a produtividade das perfuratrizes é reduzida e o desgaste em ferramentas de perfuração é maior, o que pode vir a ser um ponto de atenção e demandar algumas adequações nos parâmetros geométricos caso venham a ocorrer em grandes proporções.

Este trabalho apresenta um estudo de caso desenvolvido na Mina do Sapo, propriedade da empresa Anglo American plc, e é composto por revisão bibliográfica de conceitos básicos de perfuração e desmonte, análise recente do histórico de desmonte, apresentação do processo de desmonte praticado e estudos de melhorias. A mina em questão explora minério de ferro da rocha Itabirito que ocorre em três principais litologias: compacto (com resistência à compressão uniaxial de 270-301,8 MPa), semi-compacto (resistência à compressão de 5-50 MPa) e friável (resistência à compressão de 0,25-5 MPa). O estudo foi desenvolvido com o objetivo de

encontrar soluções economicamente viáveis e que garantissem o desempenho das etapas posteriores do processo, mesmo com o alto índice de material compacto planejado para perfuração no ano de 2018, através da variação dos parâmetros geométricos na perfuração para esta litologia. Os possíveis efeitos colaterais e impactos ambientais provenientes desta alteração nos padrões foram considerados e, caso ocorram, estudos e ações serão aplicados de forma a minimizá-los.

1.1 Formulação do problema

Com o avanço vertical da lavra, que opera no fim de sua segunda fase de operação (Step 2) e trabalha na implementação e viabilização de acessos para obter a licença de operação para a próxima fase (Step 3), grande parte do material a ser lavrado no programa de produção para o ano de 2018 é rocha compacta e isto impactará diretamente na produtividade dos equipamentos de perfuração, pois uma vez que este material apresenta maior resistência, menor é a produtividade das perfuratrizes e mais tempo é necessário para a conclusão dos projetos de perfuração. A maior quantidade de material compacto é explicada pelo tipo de enriquecimento supergênico do depósito onde a mina opera, em que quanto maior a profundidade da cava, maior a competência da rocha.

Nos primeiros meses de 2018 a previsão da área de planejamento de lavra se confirmou, e com o alto índice de material compacto a ser perfurado, veio a demanda por novos estudos afim de criar soluções que mantivessem a qualidade do desmonte anteriormente praticado, de forma a afetar o mínimo possível os custos do processo e o valor planejado de utilização física (UF) das perfuratrizes.

1.2 Justificativa

Atribuir um padrão eficiente de malha e diâmetro de perfuração é essencial para garantir a eficiência do processo de desmonte de rochas, padrão este que varia conforme novas premissas vão surgindo ao longo da vida de uma mina a céu aberto. Estudos de melhorias e adequações, portanto são sempre necessários, e com o auxílio da tecnologia embarcada presente na Mina do Sapo, as simulações e projetos desenvolvidos se aproximam de maneira satisfatória da realidade praticada, aumentando assim a credibilidade e confiabilidade dos trabalhos realizados com tais dados.

Trabalhar segundo as atuais premissas advindas das novas proporções de litologias da mina é fundamental para garantir o padrão produtivo aplicado anteriormente, além de proporcionar maior assertividade para o planejamento de lavra.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Realizar estudos que permitam adequar os parâmetros geométricos de perfuração às novas demandas de compacidade na Mina do Sapo, apresentar uma opção que seja economicamente viável e represente uma mudança pouco agressiva aos padrões operacionais atualmente praticados, visando evitar resultados indesejados no processo de desmonte que possam gerar atrasos nos processos subsequentes da cadeia produtiva (Tais como a formação de blocos, backbreak, impactos na produtividade da britagem).

1.3.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos do projeto:

- Estudar detalhadamente a malha utilizada para perfuração de itabirito compacto, visando um aumento da qualidade no desmonte para esta litologia;
- Analisar o histórico de massa desmontada por litologia na Mina do Sapo, observar tendências e situações semelhantes já vivenciadas;
- Adequar o processo de perfuração às proporções de cada litologia previstas no plano de lavra de 2018;
- Definir um padrão de perfuração mais eficiente, considerando alterações nas malhas de perfuração e diâmetro de perfuratrizes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Perfuração de rochas

A perfuração de rochas, dentro do campo dos desmontes é a primeira operação a ser realizada e tem como finalidade abrir furos no maciço rochoso segundo uma distribuição e geometria adequada, com o intuito de alojar cargas de explosivos e acessórios de iniciação (JIMENO, 2003). A detonação destes explosivos fornece a energia necessária para a fragmentação do maciço rochoso de interesse. As técnicas de perfuração são utilizadas em inúmeras outras aplicações além dos desmontes da mineração, como sondagens, drenagem, suporte, entre outros.

A perfuração de rochas vem evoluindo ao longo do tempo com o desenvolvimento de novas tecnologias, e os métodos mais usuais atualmente se baseiam em sistemas mecânicos à rotação e percussão. Existe uma relação intrínseca entre perfuração e detonação, e pode-se afirmar com certeza que uma perfuração bem executada possibilita um resultado satisfatório no processo de detonação (ALONSO et. Al, 2013).

2.1.1 Métodos de perfuração de rocha

Existem três principais métodos de perfuração de rochas para o desmonte aplicados à mineração, cada um com suas particularidades e aplicabilidades, sendo eles: método rotopercussivo (Down the Hole,), perfuração rotativa com brocas tricônicas (Roller Bit) e martelo de superfície (Top-Hammer, método rotopercussivo);

Na Mina do Sapo quatro perfuratrizes utilizam o método rotopercussivo (Down the Hole) e uma perfuratriz utiliza o método rotativo (Holler Bit), logo, apenas estes dois métodos serão discutidos nesta seção.

- **Perfuração rotopercussiva- Down the hole**

A perfuração rotopercussiva possui dois sistemas de acionamento básicos: a rotação e percussão. Estas duas forças são transmitidas através da haste para a coroa de perfuração, e as ondas de choque causadas pelo pistão do martelo juntamente com a rotação fornecida pelo motor são responsáveis por fragmentar a rocha, enquanto é feita a limpeza do furo através de ar comprimido. Os martelos de fundo de furo foram criados na década de 50 com o objetivo de aumentar a taxa de penetração em rochas de alta compacidade. Neste método o martelo e o bit de perfuração permanecem sempre no fundo do furo, o que elimina as perdas de energia ao

longo da coluna de perfuração. (SILVA, 2004). A figura 1 representa a perfuração do tipo rotopercussiva:

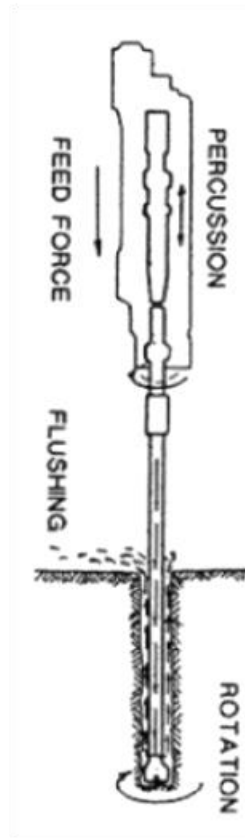


Figura 1 - Método de perfuração rotopercussiva (FONTE: MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS, 2003.)

Segundo Silva (2004), este método é principalmente aplicado na perfuração de rochas duras, quando são usadas brocas/bits de 152mm (6") a 229 mm (9"). Para estes diâmetros, os rolamentos das brocas tricônicas são demasiadamente pequenos para suportar grandes cargas verticais (pressão de avanço), o que resulta em baixa taxa de penetração e elevação nos custos, além de possíveis quebras e danos no equipamento. Este método possui as seguintes características:

- Evita a perda de energia ao longo das hastes de perfuração, devido ao fato de o martelo e a broca/bit estarem posicionados no fundo do furo;
- Necessita de menor força de avanço (250 a 500 lbf/in de diâmetro de bit) se comparada com o método rotativo (3000 a 7000 lbf/in). Elimina a necessidade de hastes pesadas e altas pressões de avanço;
- Não é a melhor escolha para perfuração em rochas não consolidadas ou muito fraturadas, pois os impactos produzidos pelo pistão do martelo no fundo do furo

podem provocar o desmoronamento, causando travamento da coluna de perfuração e redução do comprimento do furo (afetando a qualidade do desmonte);

- Demanda menor torque de rotação, e a velocidade de rotação (rpm) é muito menor se comparado ao método rotativo. A faixa comum de operação é de 10 a 60 rpm.

- **Perfuração rotativa (broca tricônica)**

Este método foi inicialmente desenvolvido para perfuração de petróleo, e atualmente é também usado em furos para detonação em minas, perfuração de chaminés verticais de ventilação e abertura de túneis. Esse método é recomendado em rochas de menor compacidade/competência. Neste método de perfuração são usadas brocas tricônicas, e a energia é transmitida pelo motor para a broca pela haste da perfuratriz, o que a faz que girar e pressiona os botões contra a rocha, o que causa seu faturamento (SILVA, 2004).

A perfuração rotativa pode ser subdividida em duas etapas: o corte rotativo e a trituração rotativa. O corte rotativo cria o furo através da força de cisalhamento, a trituração se dá através do atrito das inserções de ligas de material duro da broca com a rocha, e a energia de rotação para quebrar a rocha é fornecida pelo torque da haste de perfuração. A compressão rotativa da broca quebra a rocha, e o bit, do tipo tricônico equipado com botões de carboneto de tungstênio também rotaciona e elimina os fragmentos de rocha com o auxílio de ar comprimido.

As perfuratrizes usadas para perfuração rotativas costumam ser grandes e pesadas, pois seu peso auxilia na força exercida para perfuração da rocha. A força necessária é atingida com o uso do peso da própria coluna de perfuração e a rotação é aplicada por motor elétrico ou hidráulico diretamente na haste de perfuração. Os diâmetros para este método usualmente variam de 8” a 17,5”, e a faixa comum de operação pode variar de 50 até 120 rpm. Suas desvantagens ficam por conta da limitação na realização de furos inclinados, sendo recomendadas para perfuração com um ângulo máximo de 18° (ATLAS COPCO, 2008). Um esquema genérico de perfuração do tipo rotativa é ilustrado na figura 2:

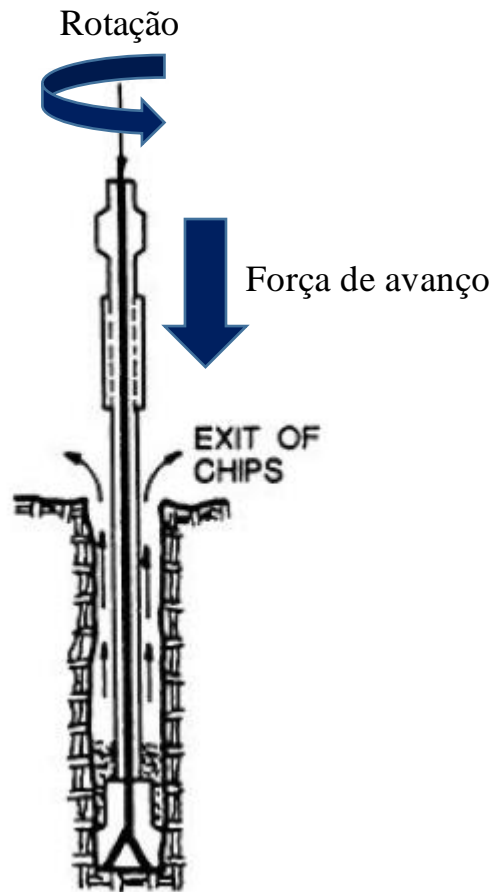


Figura 2 - Método de perfuração rotativa com broca tricônica (FONTE: ADAPTADO DE MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS, 2003.)

2.2 Variáveis geométricas da perfuração

2.2.1 Diâmetro de perfuração

Segundo Silva (2004), o diâmetro do furo depende da finalidade para o qual estará destinado. No caso de furos para detonações, há vários fatores que influem na escolha do diâmetro, como, o tamanho desejado dos fragmentos pós detonação; o tipo de carga explosiva a ser utilizado, a vibração proveniente da detonação admissível na área, entre outros. Em minerações a céu aberto de maior porte, furos de grande diâmetro apresentam menores custos de perfuração e detonação por m³ ou tonelada de rocha escavada. Já em operações de menor porte, o tamanho do equipamento disponível para perfuração, carregamento e transporte pode ser decisivo na escolha do melhor diâmetro de furo.

Em grandes minas a céu aberto, a opção por furos de grande diâmetro é geralmente uma escolha economicamente viável, uma vez que pode minimizar o custo total de lavra. Além de representar menor custo por tonelada desmontada, esta escolha implica em um menor número de furos a serem realizados em um plano (as malhas de perfuração de furos com grande

diâmetro tendem naturalmente a ser mais espaçadas), logo, amortece os gastos com acessórios de detonação (escorvas, iniciadores e retardos) e mão-de-obra para carregamento do fogo. No entanto, em geral, os custos de explosivos tendem aumentar com os maiores diâmetros, e são necessárias razões de carga mais altas para conseguir o mesmo grau de fragmentação dos diâmetros menores, principalmente em rochas resistentes.

A vantagem dos furos de menor diâmetro se resume à melhor distribuição da energia fornecida pelos explosivos no maciço rochoso causado pela menor concentração de carga, já que haverá mais furos no plano. Os resultados de uma detonação tendem a variar em função do diâmetro de perfuração, mesmo com valores iguais de razões de carga. Furos com diâmetro menor também resultam em melhor quebra do topo da bancada, uma vez que as cargas geralmente estão mais próximas da superfície devido ao menor comprimento de tampão, sendo também uma vantagem em rochas duras (MORAIS, 2004).

Quando as descontinuidades dividem o maciço rochoso em grandes blocos, a fragmentação é mais eficiente quando cada bloco é interceptado por um furo, o que geralmente demanda o uso de furos de menor diâmetro e malha de perfuração mais densa. Em rochas com descontinuidades pouco espaçadas, a fragmentação tende a ser controlada estruturalmente uma vez que sua estrutura contínua não contribui por si só na formação de matacões e favorece a opção pelos maiores diâmetros neste caso. (MORAIS, 2004). De acordo com Torres (2005), o diâmetro de perfuração ideal pode ser calculado pelas seguintes fórmulas:

$$D = 79,4 * \ln P_{mh} - 350,6$$

Para rochas com $\sigma_c \leq 120 \text{ MPa}$, ou

$$D = 57,4 * \ln P_{mh} - 174,0$$

Para rochas com $\sigma_c > 120 \text{ MPa}$

Em que D é o diâmetro de perfuração (mm) e Pmh representa a capacidade de produção *in situ* (m³).

2.2.2 Malha de perfuração

Segundo Silva (2004), as malhas de perfuração podem ser quadradas, retangulares, estagiadas, triângulo equilátero ou alongadas. Cada uma possui suas particularidades, um padrão de aplicabilidade e suas vantagens e desvantagens com relação às outras. Os principais tipos são descritos a seguir:

- **Malha Quadrada / retangular**

Devido à sua geometria, as malhas quadradas (figura 3) e retangulares (figura 4) são de fácil perfuração devido ao menor tempo de locomoção furo a furo pela perfuratriz, mas sua distribuição de energia é inferior ao tipo estagiada. A malha quadrada, como o próprio nome sugere, possui o espaçamento igual ao afastamento, enquanto a malha retangular pode variar um destes parâmetros em função do outro.

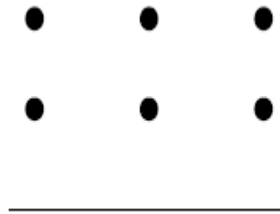


Figura 3 - Malha de perfuração do tipo quadrada (FONTE: SILVA, 2004)

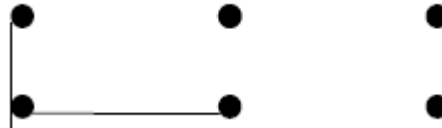


Figura 4 - Malha de perfuração do tipo retangular (FONTE: SILVA, 2004)

- **Malha estagiada**

As malhas estagiadas (figura 5) possuem a vantagem de distribuir melhor a carga explosiva –e conseqüentemente a energia- no maciço rochoso, porém, seu deslocamento furo a furo é mais demorado devido à geometria alternada dos furos, o que dificulta o processo de perfuração. Resultados de modelagem de desmonte e experiência em operações mineiras têm demonstrado que este tipo de malha geralmente resulta em melhoras na fragmentação e na produtividade de operações de carregamento, se comparadas aos outros tipos (Cameron & Hagan, 1996).



Figura 5 - Malha de perfuração do tipo estagiada (FONTE: SILVA, 2004)

A distribuição da malha de perfuração é algo muito importante, pois uma malha demasiadamente fechada pode gerar o excesso de partículas finas, enquanto uma malha muito espaçada pode levar à formação excessiva de blocos (matacões), como ilustrado pela figura 6:

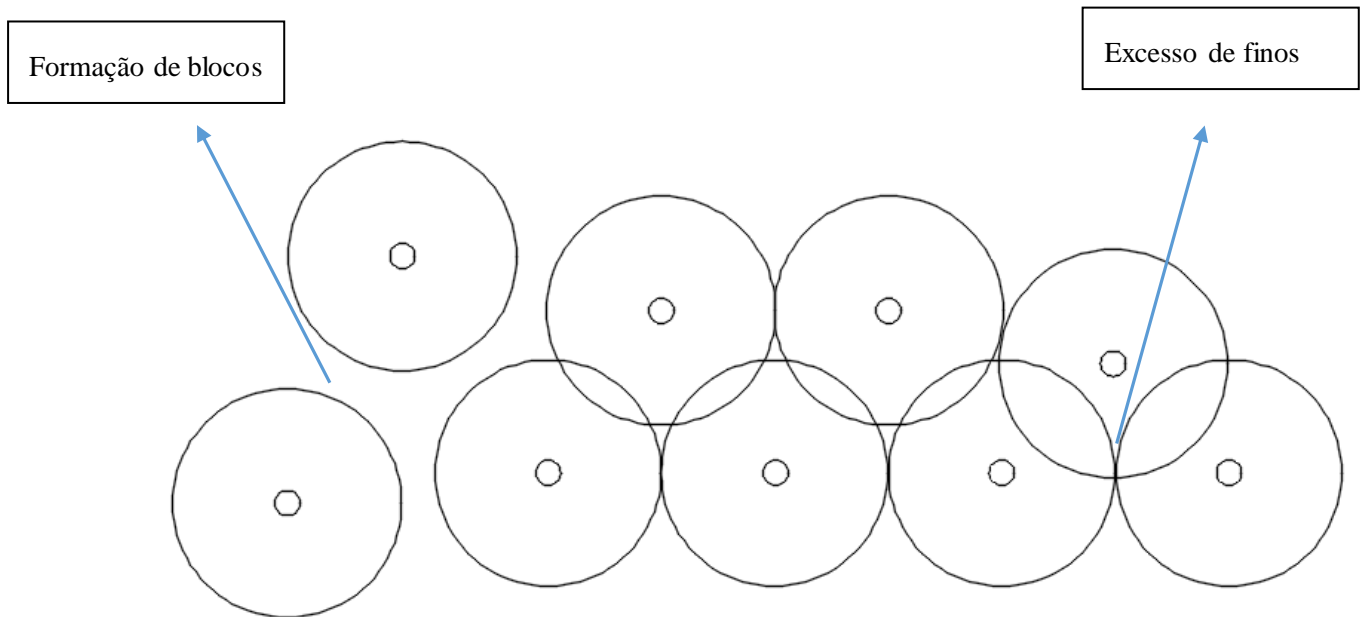


Figura 6 - Demonstração das possíveis consequências do dimensionamento inadequado da malha de perfuração. (FONTE: SILVA, 2004)

As malhas de perfuração são compostas por espaçamento e afastamento (em metros), e tais conceitos são descritos nos tópicos seguintes.

2.2.3 Afastamento

De acordo com Herrmann (1968), dá-se o nome de afastamento a distância entre o furo e a face livre da bancada, ou a distância entre as linhas da detonação. O valor do afastamento é função das propriedades da rocha, diâmetro do furo e do tipo de explosivo utilizado. Métodos empíricos vêm demonstrando que a carga explosiva é mais eficiente quando o afastamento possui medida entre 25 e 35 vezes o diâmetro do furo.

Das dimensões de um plano de fogo, o afastamento é a mais importante. Quando esta variável excede muito a seu valor ótimo, o processo de desmonte pode ter como consequências uma granulometria grosseira (que prejudica o processo de carregamento e transporte), aumento no *back break* e vibrações no terreno, além de possibilidade de instabilidade no pit final. (MORAIS, 2004). Isto se deve à falta de movimentação do material rochoso, que faz com que ocorra grande perda de energia proveniente dos explosivos com intensas vibrações e prejudica o rompimento e fragmentação da rocha.

Um afastamento muito inferior ao valor ótimo é também prejudicial, uma vez que agrega mais custos ao processo devido à quantidade maior de furos, além da possibilidade de causar ultra lançamentos, geração excessiva de finos e projeções violentas de fragmentos causados pelo excesso de energia fornecida pelas cargas explosivas (OLIVEIRA, 2017). O afastamento ideal pode ser calculado através da seguinte fórmula empírica (SILVA, 2004):

$$B = 0,0123 \times \left[2 \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \times D_e$$

Onde B é o afastamento (m), ρ_e e ρ_r são respectivamente a densidade do explosivo e da rocha (g/cm^3) e D_e é o diâmetro do explosivo (m) (para explosivos bombeáveis, utiliza-se o diâmetro do furo).

2.2.4 Espaçamento

O espaçamento é dado em metros e representa a distância existente entre dois furos da mesma fileira. Esta variável é usualmente definida em função do afastamento, variando entre 1,1 e 1,5 vezes o valor do afastamento. De acordo com Oliveira (2017), a razão entre o afastamento e espaçamento afeta diretamente na qualidade do resultado do processo de desmonte. Um valor alto no espaçamento tende a diminuir a regularidade da distribuição granulométrica e causar irregularidades no pé do banco. Por outro lado, um espaçamento demasiadamente baixo pode causar formação de matações entre duas linhas devido ao contato prematuro entre as fraturas formadas em volta dos furos, e também levar a irregularidades no pé do banco. O espaçamento também pode ser calculado através da seguinte fórmula empírica (SILVA, 2004):

$$S = 0,23 \times (H + 2B)$$

Em que S representa o espaçamento (m), H a altura do banco (m) e B o afastamento (m).

Segundo Morais (2004), é importante verificar a razão S/B para um melhor resultado do desmonte. Quando as malhas de perfuração utilizam esta razão demasiadamente alta, o processo tende a resultar em uma má fragmentação na linha média dos espaçamentos. Em rochas com resistência à compressão superior a 100MPa, é recomendada uma relação S/B ente 1,15 e 1,3, e em rochas friáveis pode-se adotar malhas alongadas com relação S/B superior a 1,75.

2.2.5 Subperfuração

É chamado de subperfuração o comprimento perfurado abaixo da cota a qual pertencerá o novo piso da bancada a ser atingido após o processo de desmonte. Esta técnica é importante para evitar o surgimento dos chamados repés, os quais de acordo com Oliveira (2017) são porções de rocha de pobre fragmentação e resistentes ao processo de escavação, localizadas no pé do banco. A subperfuração é definida em função das propriedades do maciço rochoso, tipo de explosivo utilizado como carga de fundo, diâmetro e inclinação do furo e da região de iniciação da coluna de explosivos. Em maciços rochosos resistentes, é recomendado uma subperfuração de oito vezes o diâmetro do furo.

Uma subperfuração excessiva deve ser evitada, já que leva a desperdícios de perfuração e explosivos (causando um aumento de custos), aumento na vibração do terreno e destruição indesejada no piso bancada, podendo causar problemas na perfuração da bancada inferior. A figura 7 ilustra o papel da subperfuração no processo de perfuração e desmonte:

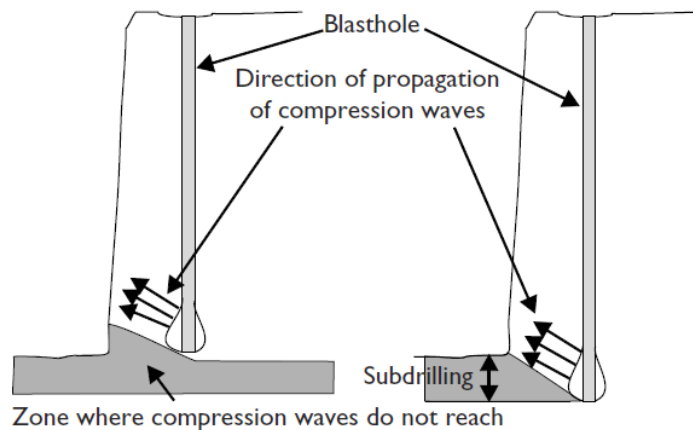


Figura 7-Influência da sub perfuração no processo de desmonte. (GOKHALE, 2011)

2.3 Perfuração inclinada

Geralmente, as minas a céu aberto priorizam furos verticais para desmontes de produção, pois além de serem mais precisos, a perfuração inclinada é de mais difícil realização, e nem todas as perfuratrizes possuem a capacidade de perfurar com inclinação (ALONSO et. al, 2013).

No entanto, furos inclinados possuem a vantagem de distribuir melhor a carga explosiva no maciço rochoso, o que aumenta a fragmentação no pé do banco e reduz a ocorrência dos chamados *back breaks* (processo que consiste na quebra excessiva da bancada). A perfuração

inclinada também resulta na melhor liberação das pilhas devido ao melhor deslocamento (MORAIS, 2004).

De acordo com Silva (2004), são listadas a seguir as principais vantagens e desvantagens da perfuração inclinada:

Vantagens:

- Melhora na fragmentação;
- Permite uma pilha maior no resultado do desmonte;
- Maior lançamento de material desmontado;
- Maior estabilidade na face da bancada;
- Diminuição das ocorrências de repé devido à melhor distribuição das ondas de choque no pé da bancada;
- Permite redução na razão de carga.

Desvantagens:

- Produtividade inferior da perfuratriz, se comparado ao método vertical;
- Maior custo de perfuração;
- Maior desgaste de ferramentas de perfuração;
- Maior risco de ultra lançamentos;
- Maior comprimento de furo para uma determinada altura da bancada.

A perfuração inclinada é principalmente recomendada nas linhas próximas à crista do banco a ser desmontado, de forma a acompanhar de maneira mais próxima possível o ângulo da face do talude, como ilustrado pela figura 8:

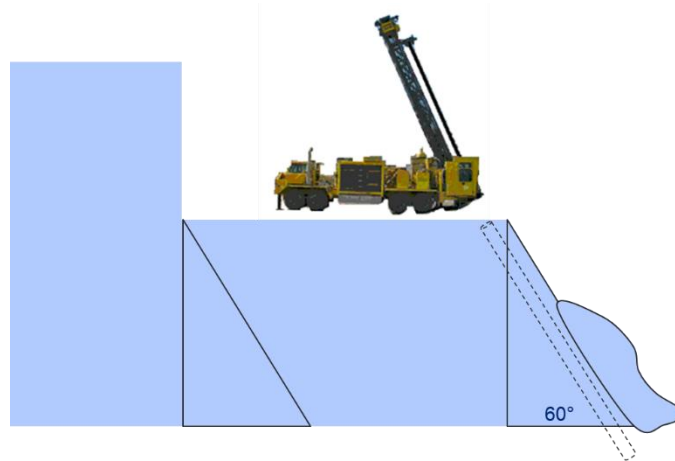


Figura 8-Exemplo de aplicação de perfuração inclinada

2.4 Razão de carga

A razão de carga, ou razão de carregamento é a quantidade em massa de carga explosiva utilizada para se desmontar um certo volume de rocha (BRITANITE, s.d.). É normalmente representada em g/m^3 ou g/t , e pode ser obtida a partir das seguintes expressões:

$$R_c = \frac{1000 \times Q_e}{B \times S \times H}, \text{ para } g/m^3$$

ou

$$R_c = \frac{1000 \times Q_e}{B \times S \times H \times d}, \text{ para } g/t$$

Onde R_c é a razão de carga, Q_e é a massa de explosivo por furo (kg), B é o afastamento (m), S é o espaçamento (m), H é a altura do banco (m) e d é a densidade da rocha (g/cm^3) (MORAIS, 2004).

A razão de carga tem ganhado muita importância como critério para um plano de fogo, pois está diretamente atrelada à qualidade de um desmonte. Uma baixa razão de carga em uma rocha com alto índice de compactidade levará a um resultado pobre do desmonte com alto índice de formação de matacões, enquanto uma razão de carga excessivamente alta pode levar à geração excessiva de finos (materiais de granulometria inferior à desejada), além do risco de ultralançamentos, *backbreaks* e custo excessivo do processo por desperdício de energia (BRITANITE, s.d.).

2.5 Apresentação de indicadores operacionais

De acordo com Oliveira (2017), indicadores operacionais são funções de valores dispersos ao longo do tempo através das quais é possível medir a qualidade de determinados processos e produtos. Os indicadores são compostos por: um padrão de medida, uma metodologia para obtenção deste padrão, um referencial comparativo e uma meta.

O presente estudo utilizou da análise de alguns indicadores operacionais coletados no sistema de despacho eletrônico para mapear oportunidades e propor melhorias. Todos os indicadores utilizados são apresentados nesta seção:

- **Disponibilidade Física (DF)**

A disponibilidade física é um indicador de tempo que depende da manutenção, da forma de operação e da condição do equipamento. Segundo Borges (2013), a disponibilidade física é dada em porcentagem e se refere à parcela das horas programadas em que o equipamento está apto para operação, ou seja, não está em manutenção. Por exemplo, um equipamento que esteve em manutenção por 12 horas em um dia terá sua DF de 50% neste mesmo dia, enquanto um equipamento que não esteve em manutenção terá sua DF em 100%.

- **Utilização física (UF)**

A utilização física representa o percentual de tempo aproveitado para produção em relação às horas disponíveis (horas calendário ponderadas pela DF). Este indicador é calculado pela razão entre as horas trabalhadas e as horas disponíveis, e depende de parâmetros operacionais e do nível de otimização do processo. Deve-se sempre buscar um valor alto de UF para maior rendimento. De acordo com Borges (2013), alguns fatores que interferem na utilização de um equipamento:

- Falta de operador;
- Condições climáticas desfavoráveis;
- Preparação das frentes de lavra;
- Paralisação de outros equipamentos;
- Tipo de desmonte de rocha na mina.

- **Rendimento operacional (RO)**

O rendimento operacional é o produto da utilização física pela disponibilidade física, e representa a relação entre as horas efetivamente trabalhadas e as horas programadas (BORGES, 2013).

- **Produtividade**

A produtividade de qualquer equipamento é a razão de produção em função do tempo. Pode ser dada em várias unidades (sempre relacionadas ao tempo), sendo que neste trabalho é encontrada em metros por hora (m/h) no caso das perfuratrizes ou tonelada métrica seca por hora (tms/h), no caso da produtividade do britador primário.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o estudo de adequação dos padrões geométricos de perfuração em itabirito compacto, e posteriormente simular cenários, foram pré-estabelecidas 3 etapas.

Na primeira etapa, foram reunidos e estudados dados e informações do processo de perfuração desmonte de rochas praticado na Mina do Sapo, tais como razão de aplicação de explosivos, diâmetro e malhas de perfuração, frotas e métodos de perfuração utilizados, com o intuito de identificar pontos de melhoria.

Na segunda etapa, foi feita uma consulta no sistema de despacho eletrônico com o objetivo de compilar dados das frotas de perfuração obtidos pelos sistemas embarcados, tais como produtividade das perfuratrizes em cada litologia, valores de utilização física (UF) e disponibilidade física (DF), horas de trabalho produtivas e não produtivas, entre outros. Estes dados serviram posteriormente para a construção dos simuladores abordados no tópico seguinte.

Na terceira e última etapa, foram reunidos as informações de proporções das litologias a serem desmontadas no ano de 2018 com a equipe de planejamento de mina, e de posse dos dados reunidos nas etapas anteriores e com auxílio do software Microsoft Excel, foram criados dois modelos de simuladores para propor cenários: um que estima a quantidade de horas de trabalho das frotas de perfuração (e conseqüentemente a UF), e outro que estima a quantidade de aplicação de explosivos para os desmontes, parte fundamental na constituição dos custos do processo. Após esta etapa, dois cenários foram simulados e apresentados à gerência de operação de mina em reunião pela equipe de perfuração e desmonte, sendo escolhido por unanimidade o cenário mais conveniente.

Para avaliação e medição dos resultados imediatos, foram utilizados os sistemas de despacho eletrônico e monitoramento da britagem para reunião de dados. Os benefícios operacionais serão mensurados futuramente, quando as mudanças sugeridas pelo cenário escolhido entrarem totalmente em vigor.

3.1 Construção de simuladores

Através da coleta de dados do sistema de despacho eletrônico e por meio do software Microsoft Excel, foram criados dois modelos de simuladores. O primeiro possui a finalidade de estimar o valor de horas de trabalho e Utilização Física (UF) das frotas de perfuração através de *inputs* de dados reunidos nos sistemas embarcados, enquanto o segundo tem como objetivo

simular a quantidade de explosivos a ser consumida no ano de 2018 e seus *inputs* são o diâmetro dos furos, as malhas de perfuração e razões de carga praticados. A tabela 1 apresenta um exemplo de relatório com indicadores de perfuração utilizados na construção do primeiro simulador:


intellimine Reporting
 Anglo American Minas-Rio
Disponibilidade de equipamento por frota

Início de turno 27-ABR-2018 Madrugada

Fim de turno 27-ABR-2018 Tarde

Equipamento	Hora trabalhada produtiva (h)	Hora trabalhada não produtiva (h)	Disponibilidade (%)	Utilização (%)	Uso da disponibilidade (%)
Frota DM30					
PF-4801	4,9	1,7	100,0	74,1	74,1
Total de frotas	4,9	1,7	100,0	74,1	74,1
Frota DML					
PF-4501	2,6	0,6	85,4	42,9	36,7
PF-4502	1,7	0,8	100,0	27,4	27,4
PF-4503	3,3	0,6	71,4	60,7	43,4
Total de frotas	7,6	2,0	85,6	41,8	35,8
Frota MD6420					
PF-4901	3,2	0,9	76,1	59,4	45,2
Total de frotas	3,2	0,9	76,1	59,4	45,2
Total para	15,7	4,6	86,6	52,4	45,4

Relatório gerado em quarta-feira, 23 de maio de 2018

Gerado por ANGLO\mariano

Tabela 1-Indicadores de perfuração coletados do sistema de despacho eletrônico

Por meio dos simuladores desenvolvidos, foram criados alguns cenários visando aumentar a razão de carga impactando o mínimo possível nos custos do processo e parâmetros operacionais. Foram consideradas alterações na malha de perfuração e diâmetro de perfuratrizes. A tabela 2 apresenta as malhas de perfuração adotadas e suas respectivas razões de carga praticadas na Mina do Sapo antes do estudo de tradeoff:

Desmonte	CAT MD6420			DML			DM30		
	IC - 9 7/8	ISC - 9 7/8	IF - 9 7/8	IC - 7 1/2	IFC - 7 1/2	IF - 7 1/2	IC - 6 3/4"	ISC - 6 3/4"	IF - 6 3/4"
Altura do Banco (m)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Afastamento (m)	4,50	5,00	7,60	4,00	4,50	6,00	3,80	4,30	5,70
Espaçamento (m)	6,00	6,60	10,10	5,10	6,00	7,70	5,00	5,70	7,50
E/A	1,33	1,32	1,33	1,28	1,33	1,28	1,32	1,33	1,32
Subfuração (m)	1,00	1,00	1,40	0,80	0,80	1,00	0,80	0,80	1,00
Tampão (m)	4,00	4,50	5,00	3,20	3,60	4,20	2,90	3,30	3,80
Malha estagiada (Y/N)	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Razão de Carga (g/t)	441	349	154	354	261	152	313	238	137

Tabela 2-Malhas de perfuração e razões de carga antes do estudo de tradeoff

Após esta etapa, foi escolhido o cenário que mais se adequasse aos requisitos citados. As alterações na malha de perfuração foram aplicadas de forma imediata, enquanto a mudança de diâmetro das perfuratrizes foi alinhada com a área de manutenção de equipamentos para ocorrer segundo o seguinte cronograma, representado na figura 9:

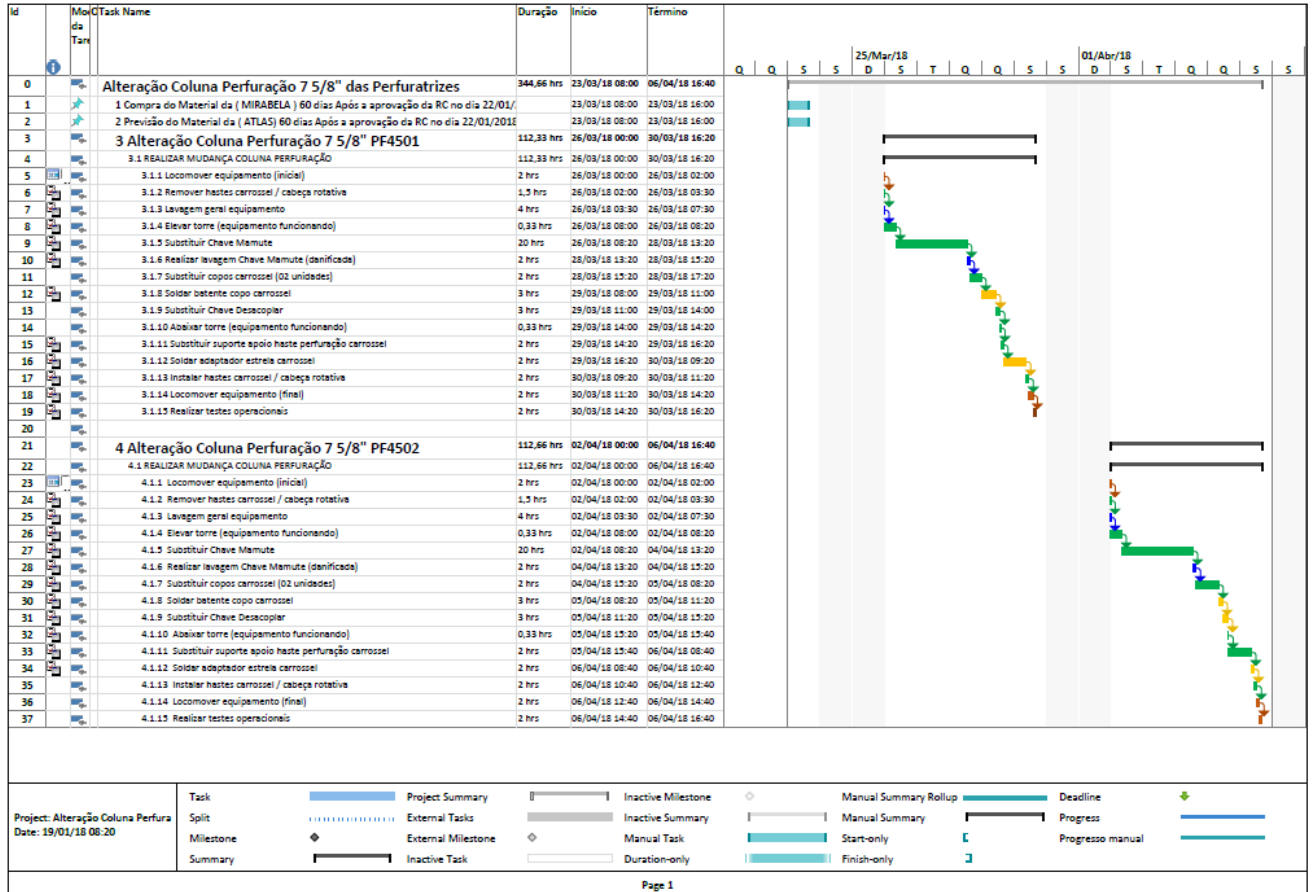


Figura 9-Cronograma da mudança de diâmetro das perfuratrizes DML

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Objeto do estudo

O presente estudo foi realizado na mina do Sapo, pertencente à empresa Anglo American plc, que realiza extração de minério de ferro e faz parte do sistema Minas-Rio. A mina se situa nos municípios de Conceição do Mato Dentro e Alvorada de Minas, na região central do estado de Minas Gerais. A figura 10 representa a localização do município de Conceição do Mato Dentro.



Figura 10: Localização do município de Conceição do Mato Dentro (WIKIPEDIA,2018)

O projeto iniciou sua operação em 2014 e sua capacidade nominal é de 26,5 milhões de toneladas de *pellet feed* de alto teor de ferro (67-68%) por ano. O minério é transportado da mina e usina de beneficiamento até o porto em São João da Barra (RJ) por um mineroduto de 529km de extensão que atravessa 33 municípios. As figuras 11 e 12 representam respectivamente uma vista aérea da região da mina e do porto de embarque.



Figura 11-Vista aérea da região da Mina do Sapo (GOOGLE MAPS, 2018)



Figura 12-Vista aérea do Porto de Açú, em São João da Barra - RJ (GOOGLE MAPS, 2018)

A mina conta com a tecnologia sistemas embarcados de despacho eletrônico e GPS de alta precisão em parte das frotas de operação (caminhões, escavadeiras, carregadeiras de grande porte e perfuratrizes), além de software avançado de controle de perfuração e desmonte. Tais

tecnologias são responsáveis por gerar uma grande quantidade de dados, que são utilizados principalmente para um melhor e mais detalhado controle do processo em geral e/ou específico das frotas, e para projetos de otimização e melhoria contínua.

4.2 Apresentação da Geologia do Depósito da Mina

Segundo Rolim (2010), a geologia local caracteriza-se por um conjunto de metassedimentos depositados em uma bacia intra-continental que evoluiu para uma margem passiva. Os sedimentos são compostos por: clásticos grosseiros (onde se encaixam os conglomerados e arenitos), clásticos finos (argilas) e sedimentos químicos, onde se incluem as formações ferríferas bandadas e rochas carbonáticas.

De acordo com Almeida e Abreu (1989), as formações ferríferas são compostas basicamente por hematita e quartzo, e podem ultrapassar 200 metros de espessura. A figura 13 apresenta a coluna estratigráfica citada. Os minérios dos depósitos da Serra do Sapo e Itapanhoacanga podem ser divididos em três tipos: compacto, friável e semi compacto.

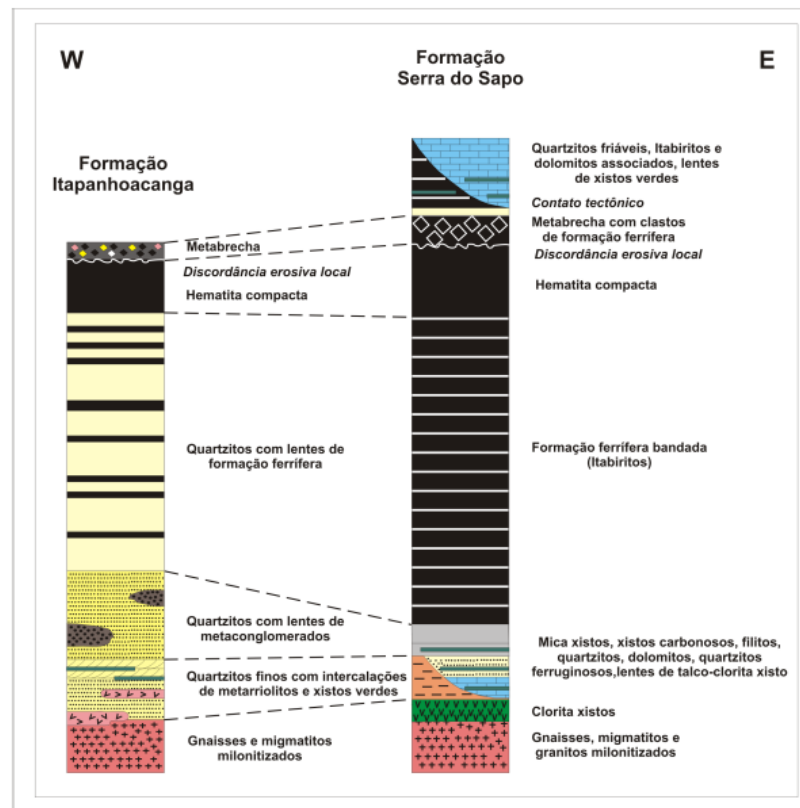


Figura 13-Colunas estratigráficas da região entre São Sebastião do Bom Sucesso e Itapanhoacanga. (ZACCHI et al., 2010).

Rolim (2010) afirma que o teor de ferro dos itabiritos compactos presentes se aproxima muito dos valores comuns em formações ferríferas sedimentares, indicando a baixa ação de processos de enriquecimento hipogênico na região. Esta pequena participação de fluidos hidrotermais na gênese dos depósitos mineralizados é comprovada pelos baixos teores dos contaminantes (alumina e fósforo) e pelas simples características mineralógicas dos itabiritos, que são compostos por: quartzo, hematita especular, tabular, globular e magnetita.

A gênese dos corpos de hematitas é relacionada à presença de falhas de empurrão, pois elas são encontradas xistificadas e comumente próximas a zonas de falhamentos com veios de quartzo associados.

O teor de ferro dos itabiritos friáveis indica a ação de mecanismos supergênicos de enriquecimento, que podem ser confirmados pela a relação inversa observada entre profundidade e teor. (ROLIM, 2010)

Segundo Suita (2011), depósitos supergênicos são formados após reprecipitação dos constituintes do minério por meio de soluções descendentes no perfil de alteração intempérica. Ocorre a neoformação de fases minerais a baixa temperatura, portanto, o corpo mineralizado tende a ser mais rico e friável em sua superfície, uma vez que a ação do intemperismo foi maior. Quanto mais se avança em direção à rocha-mãe, maior será a compactidade e menor o teor do corpo devido à baixa ou nula ação do intemperismo.

O itabirito possui algumas particularidades que dificultam o mapeamento do corpo mineralizado, pois, por se tratar de uma rocha sedimentar com alto grau de alteração, é difícil mapear os contatos entre suas litologias. Quando é feita a sondagem da área, são analisadas as litologias presentes, e de acordo com o comprimento das camadas de itabirito semi-compacto e compacto encontradas, a equipe de qualidade e geologia de mina aplica uma penalização (apenas para fins de perfuração e desmonte) que consiste em considerar toda aquela área vertical como litologia mais competente. Por exemplo, se um furo de sondagem de encontra uma camada de compacto de 5 metros, mesmo que encontre outras litologias, toda a área de influência deste furo passa a ser considerada como compacto, sendo então adotada a malha de perfuração e razão de carga para esta litologia.

Esta prática tem o objetivo de assegurar a qualidade da etapa de perfuração e desmonte, porém, torna o processo mais oneroso devido à maior necessidade de aplicação de explosivos e demanda de perfuratrizes, uma vez que as litologias mais compactas exigem uma maior razão de carga e menor malha de perfuração. O alto grau de alteração também prejudica o

dimensionamento de perfuração, construção de malhas e aquisição de ferramentas devido à adoção de um cenário mais conservador.

4.3 Apresentação das frotas de perfuração

A Mina do Sapo possui em sua frota cinco perfuratrizes com finalidade de produção, segundo os seguintes diâmetros:

- 1 perfuratriz *Atlas Copco DM30* com diâmetro de perfuração de 6 ¾” (Figura 14)
- 2 perfuratrizes *Atlas Copco DML* com diâmetro de perfuração de 7 ½” (Figura 15)
- 1 Perfuratriz *Atlas Copco DML* com diâmetro de perfuração de 9 ½”
- 1 Perfuratriz *Caterpillar MD6420* com diâmetro de perfuração de 9 ½” (Figura 16)

A perfuratriz *Atlas Copco DML* de diâmetro 9 ½” é idêntica às outras com a frota de mesmo nome, por isto não foi representada.



Figura 14-Perfuratriz Atlas Copco DM30 (FONTE: Catálogo Atlas Copco)



Figura 15-Perfuratriz Atlas Copco DML



Figura 16 - Perfuratriz Caterpillar MD 6420

As perfuratrizes Atlas Copco DM30 e DML utilizam o método de perfuração roto-percussivo DTH, enquanto a perfuratriz Catterpillar MD6420 utiliza o método rotativo na maioria do tempo, podendo operar também com DTH. As figuras 17 e 18 são respectivamente um bit e uma broca utilizados para perfuração na Mina do Sapo.



Figura 17 – Bit de 9 ½“ utilizado na perfuração do tipo roto-percussiva



Figura 18 – Broca utilizada na perfuração tipo rotativa

4.4 Apresentação do processo de desmonte praticado na Mina do Sapo

O processo de desmonte praticado atualmente na Mina do Sapo tem o objetivo de ser organizado e bem estruturado, de forma que cada etapa esteja bem delimitada e tenha sua própria equipe envolvida. O processo não deve ser analisado apenas pela detonação em si, mas sim pelas etapas anteriores e subsequentes à estas, que englobam desde as equipes de topografia e planejamento de lavra até a área de operação de mina. O processo tem seu início na área de planejamento de mina, que através do software MineSight delimita a geometria dos polígonos de perfuração de acordo com os parâmetros de avanço de lavra e necessidades atuais da mina, e cria os polígonos como exemplificado na figura 19.

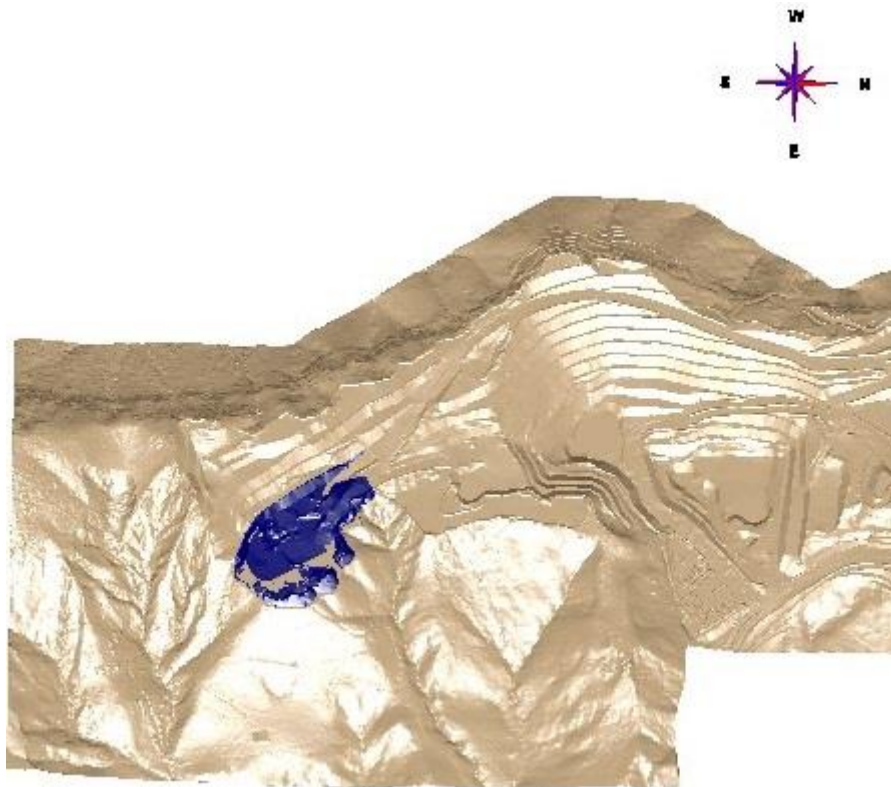


Figura 19 - Polígonos de perfuração criado pela equipe de planejamento de mina.

Na etapa seguinte, os polígonos são enviados à equipe de topografia para criação do projeto de perfuração e posterior importação dos furos no sistema de despacho. O diâmetro da perfuração é decidido junto à equipe de perfuração e desmonte, e cada frota de perfuratriz possui sua própria malha de acordo com a litologia a ser perfurada. O resultado é o plano de perfuração apresentado na figura 20:

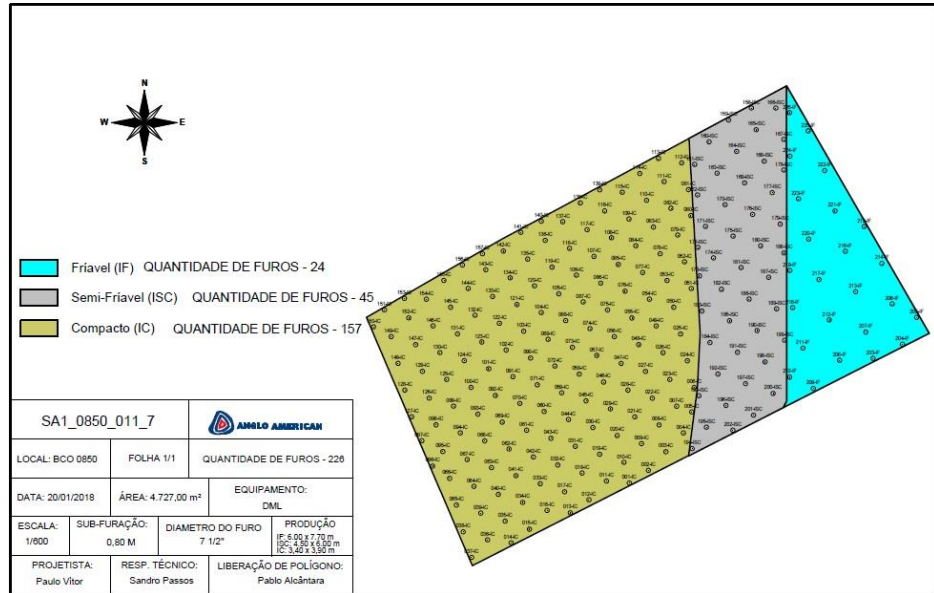


Figura 20 - Plano de perfuração criado pela equipe de topografia

As perfuratrizes possuem acesso ao sistema de despacho e recebem as coordenadas dos furos a serem realizados via GPS de alta precisão. Depois da realização dos furos em campo, a equipe de perfuração e desmonte importa os dados do plano de perfuração do sistema de despacho, e com o auxílio do software BlastLogic define o plano de carregamento e a temporização de detonação dos furos e simula o processo, observando a carga máxima por espera (furos detonando no mesmo instante) de modo a evitar vibrações e ruídos além dos permitidos. A figura 21 representa um exemplo deste processo:

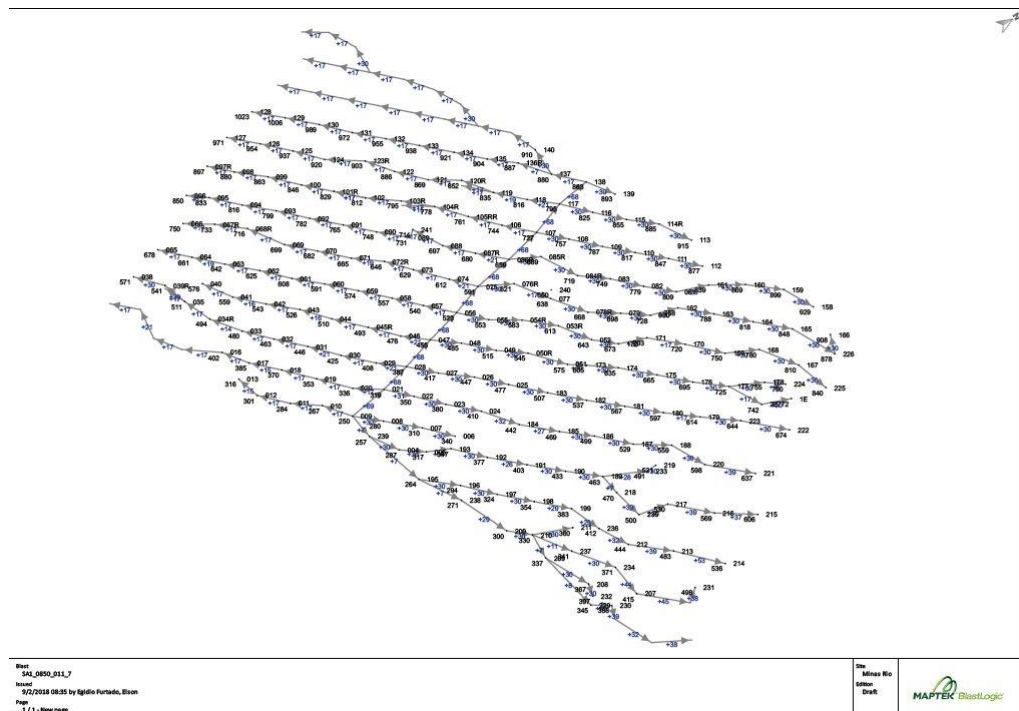


Figura 21 - Amarração de furos feita pelo software BlastLogic

Após a detonação, a equipe de desmonte realiza uma inspeção visual na área para avaliar os resultados, observando o formato da pilha de material desmontado, a presença de matacos e overbreaks. Posteriormente são tiradas fotografias com o intuito de serem analisadas por software de fotoanálise, que fornece informações sobre a granulometria e a qualidade do resultado do processo.

4.5 Análise do histórico recente de desmonte

Antes de iniciar um estudo sobre qualquer alteração no processo de desmonte de rochas, é imprescindível que seja analisado um período anterior, com a finalidade de observar situações semelhantes presenciadas e aprendizados. Primeiramente foi feito um levantamento das litologias desmontadas e a tonelagem de matacos gerados pelo desmonte no ano de 2017. Na Mina do Sapo são considerados matacos fragmentos com mais de 850mm, os quais não podem ser britados pois excedem no tamanho a capacidade do britador primário. A figura 22 apresenta o histórico em toneladas das litologias desmontadas no ano de 2017.

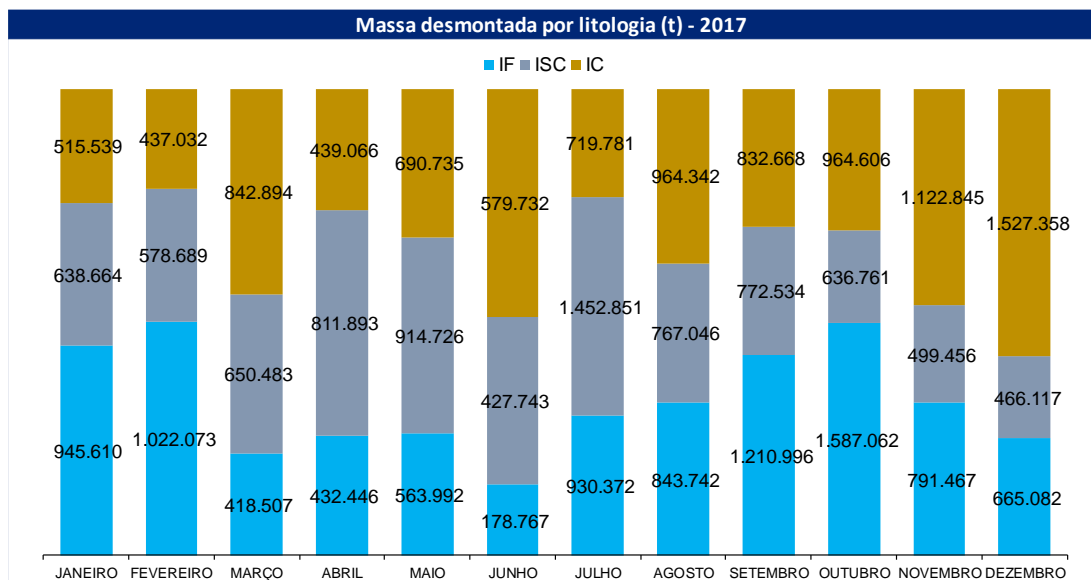


Figura 22-Proporção em toneladas de cada litologia desmontada no ano de 2017

É notável que nos últimos três meses de 2017, o índice de itabirito compacto aumentou consideravelmente, chegando a alcançar mais de metade de todo o material desmontado no mês de dezembro. Dada a formação geológica da região e os estudos de sondagem, concluiu-se que este índice tenderia a aumentar, o que foi confirmado nos primeiros meses de 2018, como apresentado na figura 23:

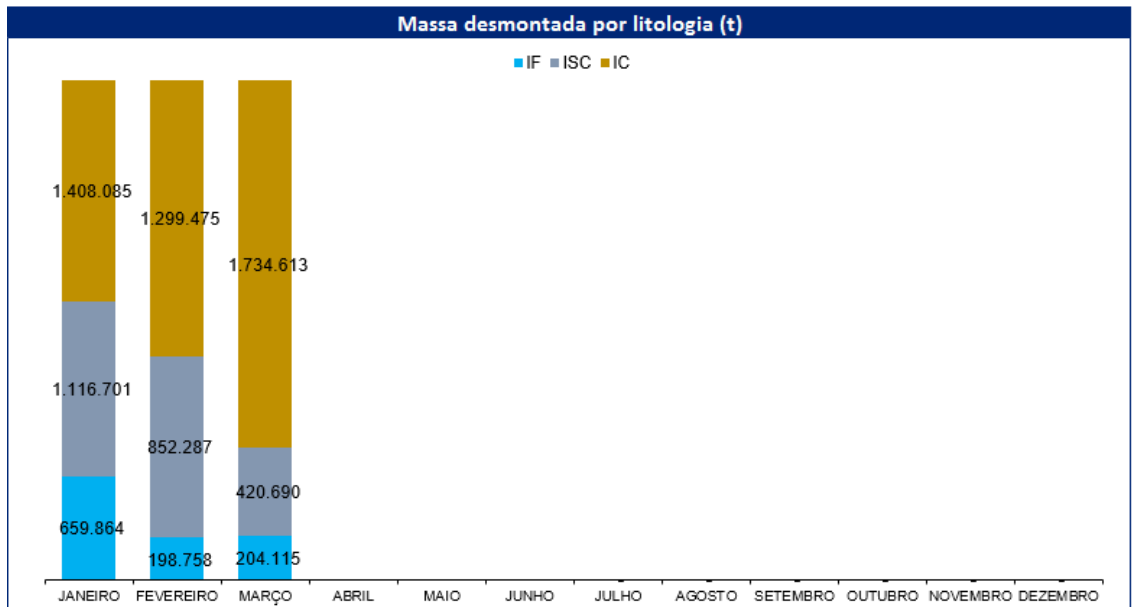


Figura 23-Proporção em toneladas de cada litologia desmontada no primeiro trimestre de 2018

As figuras 24 e 25 apresentam respectivamente a análise da comparação entre a massa de itabirito compacto desmontada no ano de 2017 e primeiro trimestre de 2018, bem como a massa de blocos gerada, por mês:

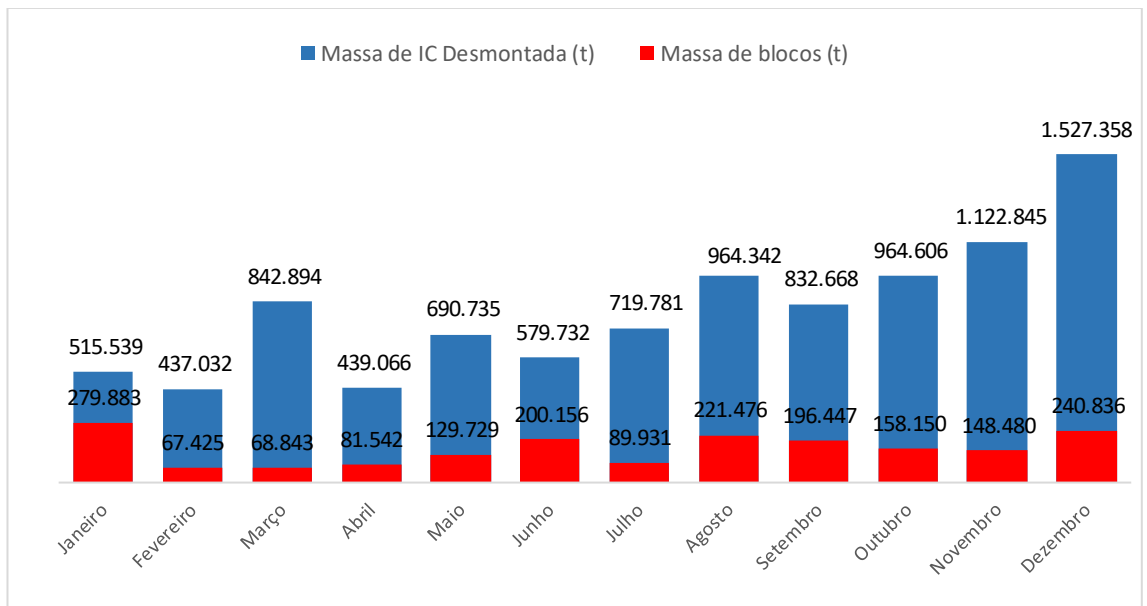


Figura 24-Massa de itabirito compacto desmontada e massa de blocos gerada em 2017

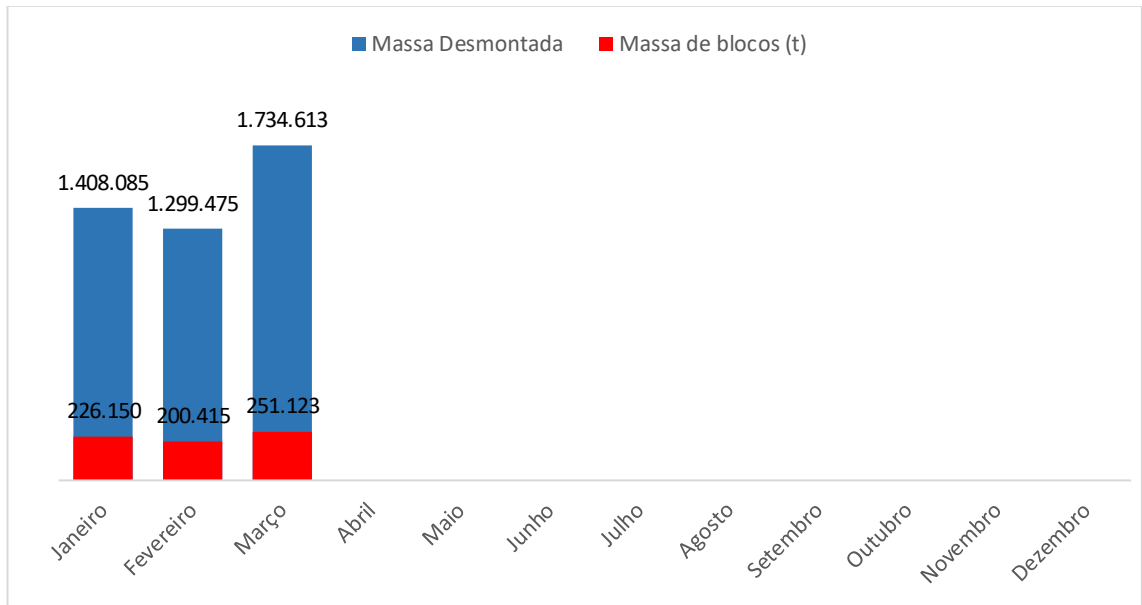


Figura 25-Massa de itabirito compacto desmontada e massa de blocos gerada no primeiro trimestre de 2018

A formação de blocos no resultado do desmonte deve ser evitada ao máximo pois dificulta o processo de carregamento e transporte, pode danificar a estrutura dos equipamentos e gera material não britável, que atrapalha na movimentação e produtividade planejadas. Para manter a qualidade dos desmontes praticados nos meses anteriores a outubro, onde a litologia compacta aparecia em menor proporção, fez-se necessário aumentar a razão de carga através da alteração da malha de perfuração no itabirito compacto e do diâmetro das perfuratrizes DML 7 ½". Foram então acionados os simuladores para estimar cenários e medir o impacto no processo atualmente praticado.

4.6 Simulações realizadas

4.6.1 Premissas utilizadas

Como citado anteriormente, é esperado um grande volume de material compacto para o ano de 2018. A área de planejamento de mina estima que aproximadamente 90% do material a ser desmontado será de itabirito semi compacto e itabirito compacto, como visto na tabela 3. Percebe-se que para o mês de dezembro não foi planejado o uso de massa desmontada, e isto se deve à expectativa de que a pilha de minério gerada na implantação da terceira fase de operação (*Step 3*) seja retomada à partir deste mês.

Massa desmontada em 2018 (t)				
LITOLOGIAS	IF	ISC	IC	TOTAL
JANEIRO	327.827	968.806	722.529	2.019.161
FEVEREIRO	205.174	886.303	1.304.341	2.395.819
MARÇO	368.507	1.331.955	1.194.918	2.895.380
ABRIL	251.710	851.068	1.030.880	2.133.658
MAIO	155.233	976.831	788.211	1.920.275
JUNHO	348.908	1.390.755	1.809.634	3.549.297
JULHO	191.389	1.220.814	1.694.235	3.106.438
AGOSTO	238.995	756.803	1.302.531	2.298.330
SETEMBRO	333.786	1.126.018	643.197	2.103.001
OUTUBRO	401.827	1.547.683	903.234	2.852.744
NOVEMBRO	304.167	1.668.775	693.733	2.666.676
DEZEMBRO	-	-	-	-
ANO	3.127.524	12.725.812	12.087.443	27.940.778
%	11%	46%	43%	

Tabela 3 - Proporção de cada litologia a ser desmontada no ano de 2018, em massa e porcentagem

Para as simulações necessárias de impacto na UF e aumento no consumo de explosivos, tomou-se como base os diâmetros de perfuração praticados, suas respectivas malhas, (descritos na tabela 4) e razões de aplicação de explosivos, (apresentadas na tabela 5), em cada litologia. As porcentagens na tabela 5 são referentes ao comprimento do furo a ser carregado com cada tipo de explosivo.

Litologia	CAT MD6420			DML			DM30		
	IC	ISC	IF	IC	ISC	IF	IC	ISC	IF
Altura do Banco (m)	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Afastamento (m)	4,30	5,00	7,60	4,00	4,50	6,00	3,80	4,30	5,70
Espaçamento (m)	5,00	6,60	10,10	5,10	6,00	7,70	5,00	5,70	7,50
Total Explosivo por furo (kg)	583,93	522,11	461,81	353,74	319,56	275,79	291,82	263,82	229,75

Tabela 4- Informações de malha, aplicação de explosivos e altura do banco

Razões de aplicação de explosivos		
Litologia	ANFO	Blendado 70/30
Compacto	50%	50%
Semi Compacto	70%	30%
Friável	0	100%

Tabela 5- Razão de aplicação de explosivos por litologia

De posse dos dados apresentados acima foi possível simular novos parâmetros e elaborar cenários.

4.6.2 Simulação do impacto na Utilização Física

Simular a UF é de extrema importância no tradeoff estudado, uma vez que seu valor deve ser factível e alinhado com a atual capacidade e limitações da mina e dos equipamentos. Escolher um cenário muito otimista pode ser ruim, pois se os valores de UF estiverem além dos limites da mina o planejamento de lavra não será assertivo, causando falta de otimização no processo e conseqüentemente, perda de performance, além do risco de serem estabelecidas metas que não podem ser atingidas. Um cenário conservador também provoca a falta de alinhamento com o planejamento, e como subestima a capacidade das frotas, pode-se perder em produção.

A quantidade total de horas trabalhadas das frotas de perfuração é variável principal na composição da Utilização física, e depende totalmente da produtividade, que por sua vez está atrelada à malha de perfuração, diâmetro utilizado e litologia perfurada. De posse do modelo e das proporções das litologias foi possível variar estes parâmetros e medir os impactos causados nos custos e no valor da UF. O valor de Horas Trabalhadas (HT) é composto por horas trabalhadas produtivas e não produtivas. O valor de horas **não produtivas** das frotas foi estimado através do histórico de 2017 de cada frota. A tabela 6 representa o relatório do sistema de despacho utilizado para estimativa das horas trabalhadas não produtivas.



intellimine Reporting

Anglo American Minas-Rio

Disponibilidade de equipamento por frota

Início de turno

01-JAN-2017 Madrugada

Fim de turno

31-DEZ-2017 Tarde

Equipamento	Hora trabalhada produtiva (h)	Hora trabalhada não produtiva (h)
Frota DM30		
PF-4801	3.443,2	466,7
Total de frotas	3.443,2	466,7
Frota DM1L		
PF-4501	3.656,9	631,7
PF-4502	3.767,3	692,1
PF-4503	885,3	32,2
Total de frotas	8.309,6	1.356,1
Frota MD6420		
PF-4901	3.421,7	454,6
Total de frotas	3.421,7	454,6
Total para	15.174,5	2.277,4

Tabela 6-Relatório do sistema de despacho utilizado para estimativa de horas trabalhadas não produtivas

Ao analisar o histórico de 2017, concluiu-se que o valor de horas trabalhadas não produtivas corresponde a **14,7%** do valor das horas trabalhadas produtivas, através da seguinte fórmula, onde Hnp significa horas não produtivas e Hp significa horas produtivas.

$$\% = \frac{Hnp}{Hp}$$

Fixando esta porcentagem, foi possível então simular as horas trabalhadas, e consequentemente a UF das frotas. A tabela 7 apresenta o simulador do valor de horas trabalhadas de perfuratrizes, que serviu como base para estimar os demais parâmetros. Os dados inseridos são reais e foram utilizados em um dos cenários considerados:

Simulação de indicadores de perfuração - 2018						
	LITOLOGIAS	METROS PERFURADOS	Nº DE FUIROS	Taxa perfuração (teoria) (m/h)	HT produtiva	HT não produtiva
DM30	IF	8.685	543	45	193,0	533,6
	ISC	36.393	2.275	35	1039,8	
	IC	43.070	2.692	20	2153,5	
	TOTAL	88.148	5.509		3.386	
DML	IF	32.568	2.036	45	723,7	2000,9
	ISC	136.473	8.530	35	3899,2	
	IC	161.512	10.095	20	8075,6	
	TOTAL	330.553	20.660		12.699	
CAT	IF	12.159	760	45	270,2	747
	ISC	50.950	3.184	35	1455,7	
	IC	60.298	3.769	20	3014,9	
	TOTAL	123.407	7.713		4.741	
	TOTAL GERAL	542.107	33.882		20.826	3.282

Tabela 7-Simulador de indicadores e metragem perfurada por cada frota em 2018

De posse do valor das horas trabalhadas e metragem perfurada por cada frota, e fixando o valor da DF, foi possível estimar o valor da UF segundo a seguinte fórmula:

$$UF = \frac{Ht}{Df \times Hc}$$

Onde Ht são as horas de trabalho das frotas, DF a disponibilidade física e Hc as horas calendário.

4.6.3 Simulação do aumento no consumo de explosivos

Um dos principais fatores que interferem na qualidade do desmonte é a razão de carga praticada, e alterar diâmetro e malhas de perfuração significa alterar diretamente a razão de carga. Esta, por sua vez é uma mudança mais delicada, pois um aumento brusco na razão de

carga significa um acréscimo considerável aos custos do processo de desmonte e geração excessiva de materiais de granulometria abaixo da desejada (finos), enquanto uma razão de carga baixa resulta em maior formação de blocos e prejudica o processo de britagem. Com a alta ocorrência de material compacto, viu-se necessário aumentar a razão de carga, e para isto, foi criado um simulador para estimar o consumo de explosivos.

Para esta estimativa foram considerados os diâmetros das perfuratrizes, as razões de aplicação de carga de fundo e carga de coluna em cada litologia e o volume do tampão aplicado. Primeiramente, calculou-se o volume da coluna de explosivos aplicada no furo, através uso da seguinte fórmula:

$$C = \pi * \left(\frac{d^2}{4} \right) * (h - t)$$

Onde:

- C = Volume da coluna de explosivos
- d = diâmetro do furo
- h = comprimento do furo
- t = comprimento da coluna de tampão

Após o cálculo do volume de explosivos, utilizando as razões de aplicação em cada litologia e de posse da densidade de cada explosivo e do número total de furos foi possível calcular, através do simulador apresentado na tabela 8, o consumo total de explosivos e acessórios de detonação segundo as premissas do item 4.3.1, para os diferentes cenários:

	LITOLOGIAS	Tampão (m)	Volume do furo (m³)	volume do tampão (m³)	Nº DE FUROS	QTDE blendado (t)	QTDE ANFO (t)	iniciador eletrônico (un.)	Iniciador ñ eletrônico (un.)	Booster (un.)
DM30	IF	3,8	0,369	0,08773	543		125,4	543	543	543
	ISC	3,3	0,369	0,07619	2.275	230,1	382,8	2.275	2.275	2.275
	IC	2,9	0,369	0,06695	2.692	468,1	333,8	2.692	2.692	2.692
	TOTAL				5.509	698,2	842,0	5.509,2	5.509,2	5.509,2
DML	IF	4,2	0,456	0,11971	2.036		561,4	2.036	2.036	2.036
	ISC	3,6	0,456	0,10261	8.530	1040,0	1730,4	8.530	8.530	8.530
	IC	3,2	0,456	0,09121	10.095	2117,6	1509,9	10.095	10.095	10.095
	TOTAL				20.660	3.157,6	3.801,7	20.659,6	20.659,6	20.659,6
CAT MD6420	IF	5	0,732	0,22865	760		313,5	760	760	760
	ISC	4,5	0,732	0,20579	3.184	577,8	961,3	3.184	3.184	3.184
	IC	4	0,732	0,18292	3.769	1189,1	847,9	3.769	3.769	3.769
	TOTAL				7.713	1.766,9	2.122,6	7.712,9	7.712,9	7.712,9

Tabela 8-Simulador de consumo de explosivos e acessórios de detonação

4.7 Apresentação dos cenários simulados

A equipe responsável pela área de perfuração e desmonte da empresa Anglo American se reuniu com a gerência e apresentou os cenários elaborados, com o intuito de definir estratégias para atingir o objetivo descrito anteriormente. Os principais cenários são descritos a seguir:

- **Cenário I: Fechamento da malha de perfuração para Itabirito Compacto (IC)**

Neste cenário foi considerada a mudança da malha de perfuração de itabirito compacto para uma malha mais fechada, o que acarretaria em um aumento de razão de carga. Os possíveis resultados deste cenário foram bem vistos, mas esta mudança aumentaria em aproximadamente 33% nos custos do processo, além de demandar 23% mais horas de trabalho das frotas de perfuração. O valor da UF para a frota de 5 perfuratrizes também se mostrou alto, com o valor de quase 72%. Uma vez que a compra de uma nova perfuratriz está fora de questão, a viabilidade deste cenário foi questionada, e foi preciso buscar uma outra alternativa além da mudança na malha. A tabela 9 apresenta a comparação entre os valores orçados antes do tradeoff e os estimados pelo cenário 1:

	Orçamento agosto	Cenário I	Diferença
Metragem perfurada (m)	364.269	475.132	110.863 (+30,43%)
HT 2018 (h)	16.403	20.197	3.794 (+23,12%)
UF (%)	61,81	71,80	(+9,99%)
Custo Total (BRL)			+33,98%

Tabela 9-Comparação entre os valores orçados e o cenário 1

- **Cenário II: Fechamento da malha de perfuração para Itabirito Compacto e mudança de diâmetro da frota de perfuratrizes DML para 9 ½”**

Neste cenário, além do fechamento de malha de perfuração de itabirito compacto, foi considerada também a mudança de diâmetro das perfuratrizes DML de 7 ½” para 9 ½”. Esta mudança de diâmetro foi proposta para oferecer um cenário menos agressivo do que o anterior, buscando os mesmos resultados. A malha de perfuração para 9 ½” é naturalmente mais espaçada do que a malha de 7 ½”, logo, este cenário apresentou um menor aditivo em custos (15%) e horas de trabalho de perfuratrizes se comparado ao cenário anterior. A tabela 10 apresenta a comparação entre o cenário 2 e o orçamento.

	Orçamento agosto	Cenário 2	Diferença
Metragem perfurada (m)	364.269	408.658	44.388 (+12,19%)
HT 2018 (h)	16.403	17.027	624 (3,8%)
UF (%)	61,81	62	0,19%
Custo total (BRL)	+15,23%		

Tabela 10-Comparação entre os valores orçados e o cenário 2

4.8 Comparação entre cenários e escolha da melhor alternativa

Malhas de perfuração mais fechadas tendem a distribuir melhor a energia dos explosivos pelo maciço como um todo, porém, ao modificar a malha para itabirito compacto e manter o diâmetro de 7 ½ “ (cenário I), notou-se que os aditivos em custos e UF foram demasiadamente altos. O cenário II busca o meio termo, pois apesar de deixar de utilizar o diâmetro de 7 ½”, também fecha a malha de perfuração para itabirito compacto, assim, espera-se que este cenário obtenha resultados satisfatórios. Além disto, este cenário foi consideravelmente menos agressivo, já que reduziu em menos da metade os aditivos em custos do processo e horas de trabalho das frotas de perfuração se comparado ao cenário I, além do valor de UF apresentar mudanças quase insignificantes. Por este motivo, o cenário II foi escolhido para ser adotado. A tabela 11 apresenta uma comparação entre o orçamento e os cenários 1 e 2:

	Orçamento agosto	Cenário I	Cenário II
Metragem perfurada (m)	364.269	475.132 (+30,43%)	408.658 (+12,19%)
HT 2018 (h)	16.403	20.197 (+23,12%)	17.027 (+3,8%)
Custo total (BRL)	-	+33,98%	+15,23%
UF (%)	61,81	71,8	62
Número de Diâmetros de Perfuração Utilizados	3	2	2

Tabela 11 - Comparação entre o orçamento e os cenários 1 e 2

A alteração na malha de perfuração de itabirito compacto no diâmetro de 9 ½” foi adotada logo após a opção pelo segundo cenário e comunicada a todos os colaboradores envolvidos no processo. Esta medida foi tomada de forma imediata, pois foi sentida a necessidade de um aumento na razão de carga para esta litologia, o que se justifica pelo alto índice de material compacto percebido na análise de proporção de litologias desmontadas nos últimos meses de 2017. A mudança de diâmetro das perfuratrizes da frota DML para 9 ½” é um processo mais complexo e demorado, pois necessita-se fazer a troca de toda a coluna de perfuração, portanto a decisão foi comunicada à diretoria e às áreas de manutenção e compra, que auxiliarão neste processo ao longo dos próximos meses. Espera-se que o aumento na razão

de carga para itabirito compacto alcançado pelo fechamento da malha de perfuração e a mudança de diâmetro sejam suficientes para gerar material que atenda as demandas da usina de processamento para cumprimento do plano de produção do ano de 2018. A tabela 12 apresenta as novas malhas de perfuração e razões de carga após as mudanças aplicadas pelo cenário 2:

Desmonte	CAT MD6420 + DML			DM30		
	IC - 9 1/2"	ISC - 9 1/2"	IF - 9 1/2"	IC - 6 3/4"	ISC - 6 3/4"	IF - 6 3/4"
Altura do Banco (m)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Afastamento (m)	4,30	5,00	7,60	3,80	4,30	5,70
Espaçamento (m)	5,00	6,60	10,10	5,00	5,70	7,50
E/A	1,16	1,32	1,33	1,32	1,33	1,32
Subfuração (m)	1,00	1,00	1,40	0,80	0,80	1,00
Tampão (m)	4,00	4,50	5,00	2,90	3,30	3,80
Malha estagiada (Y/N)	Y	y	y	y	y	y
Razão de Carga (g/t)	554	349	154	313	238	137

Tabela 12-Malhas de perfuração e razões de carga após o estudo de adequação

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise de indicadores operacionais

O aumento na razão de carga alcançado pela alteração na malha de perfuração do itabirito compacto aplicado em janeiro gerou alguns resultados imediatos no processo de desmonte. Tais resultados podem ser medidos através da análise de alguns indicadores operacionais coletados nos sistemas de monitoramento da britagem e de despacho. Esta seção apresenta a justificativa de escolha de tais indicadores, bem como sua análise.

- **Paradas do britador primário devido a blocos (matacos) e produtividade da britagem**

Pode-se dizer que a britagem primária é a área mais impactada – tanto positiva quanto negativamente - pelos resultados do desmonte. A produtividade da britagem é dada em tms/h e se refere à razão de material britado pelo tempo, e sua análise é um dos parâmetros que auxiliam na medição da qualidade do desmonte, uma vez que este indicador tende a crescer à medida que a granulometria da alimentação se torna mais fina. Deve-se, porém, atentar ao fato de que tanto a britagem quanto a usina de beneficiamento da Mina do Sapo foram projetados para tratar material majoritariamente friável, portanto, um alto índice de material resistente na alimentação pode prejudicar a produtividade do britador primário. Logo, este indicador operacional não deve ser analisado separadamente, mas pode ser expressivo para a captação de resultados deste estudo caso seja analisado juntamente com outros fatores.

A usina de beneficiamento possui um sistema de monitoramento de operação que registra, dentre vários outros dados, todas as paradas e interrupções da britagem primária. Quando ocorre a parada do britador por qualquer motivo, um apontamento é registrado e fica armazenado neste sistema. Na Mina do Sapo, são considerados blocos materiais que possuam mais de 850mm de espessura, e quando um bloco é basculhado no britador, a britagem é interrompida até o bloco ser removido ou rompido, o apontamento é gerado e pode ser facilmente consultado no sistema.

É viável então, reunir o histórico de paradas da britagem causadas por blocos para auxiliar também na análise os resultados dos desmontes. Deve-se também ter cautela ao analisar este indicador separadamente, uma vez que caso o operador de máquina de carga perceba uma alta incidência de material grosseiro ao carregar o caminhão, deve contatar a equipe que opera o sistema de despacho eletrônico, que por sua vez orienta o operador do caminhão a basculhar a carga no estoque de material grosseiro presente na mina com o objetivo de não parar a

britagem. Neste caso, apesar de o bloco ter sido gerado como resultado do desmonte, nenhum apontamento é registrado neste sistema e pode mascarar as análises.

Conclui-se então que os apontamentos de parada no sistema de monitoramento e a produtividade da britagem primária não são indicadores que devem ser observados separadamente, mas se analisados em conjunto pode-se dizer que são representativos.

Para a análise de resultados imediatos na qualidade do desmonte foi realizado levantamento da produtividade da britagem e de paradas do britador por motivo de blocos no período de outubro de 2017 a março de 2018, afim de verificar mudanças imediatas, uma vez que a redução de malha foi aplicada no mês de janeiro. Este levantamento é apresentado na figura 26:

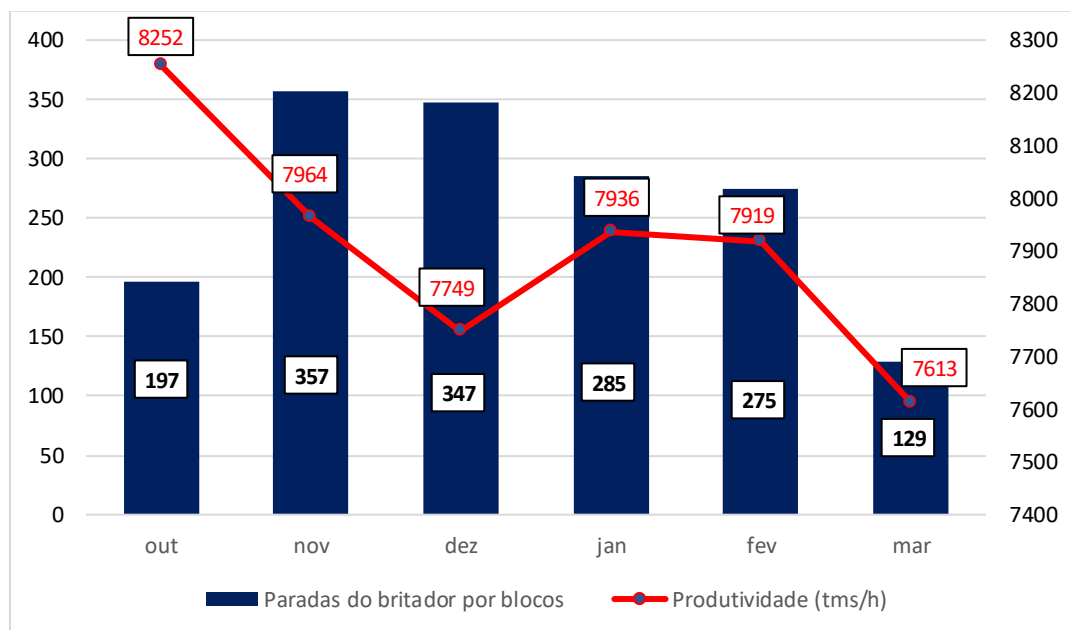


Figura 26-Paradas da britagem por motivo de blocos e produtividade do britador

Ao analisar o gráfico acima, percebe-se que a partir de janeiro, as paradas da britagem por blocos diminuíram mesmo com o aumento significativo do índice de material compacto desmontado (Vide figuras 22 e 23). A produtividade da britagem também foi mantida mesmo com o crescente volume de material compacto, mas no mês de março apresentou o menor valor de todo o período descrito. Isto se deve ao fato já citado de que o britador primário da Anglo American em Conceição do Mato Dentro foi projetado para tratar material majoritariamente friável, e como visto na figura 23, no mês de março o índice de compacto desmontado foi de

mais de 70%, passando de 1,7 milhões de toneladas -o maior de todo o período analisado neste estudo- logo, é possível justificar a baixa produtividade da britagem neste mês.

Após esta análise conjunta dos dois indicadores, é possível concluir, portanto que a mudança da malha de perfuração em Itabirito compacto, por si só, foi efetiva para a melhoria da qualidade do processo de desmonte.

5.2 Benefícios práticos da padronização de diâmetros de perfuração

Quando concluída a mudança dos diâmetros das perfuratrizes DML de 7 ½” para 9 ½”, a frota de perfuração da Mina do Sapo contará com quatro máquinas de mesmo diâmetro, uma vez que dentro do processo, os diâmetros de 9 7/8” e 9 ½” se comportam da mesma forma. Atualmente, cada diâmetro de perfuração possui sua própria malha e razão de aplicação de explosivos, o que dificulta o trabalho de várias perfuratrizes em um mesmo plano. A redução do número de malhas de perfuração praticadas é considerada benéfica neste sentido, uma vez que permite este trabalho em conjunto sem complicar o acompanhamento e dimensionamento de explosivos, além de simplificar o planejamento de perfuração e as decisões das equipes de turno, diminuindo assim a complexidade do processo em geral. A padronização também é benéfica na questão de aquisição de ferramentas de perfuração, pois oferece oportunidade de ganho nos contratos de fornecimento devido ao maior volume consumido de ferramentas para um tipo específico de coluna de perfuração, além de gerar maior rotatividade, consequentemente reduzindo seu volume em estoque, o que otimiza também o processo de compra.

Os ganhos acima, assim como outros benefícios operacionais da padronização de diâmetro ainda não puderam ser mensurados, já que a alteração das colunas de perfuração das perfuratrizes DML ainda estava em implementação no momento da publicação deste trabalho.

6 CONCLUSÃO

Uma mina a céu aberto apresenta mudanças constantes em seus padrões e características, que podem variar de acordo com o tipo de depósito mineral em que está instalada, avanço vertical da lavra, demandas da área de planejamento a longo e curto prazo, necessidade de retorno financeiro, dentre outros inúmeros fatores que incentivam a busca pela melhoria contínua e otimização nos processos.

Uma rápida análise do histórico recente da Mina do Sapo comprova esta metamorfose e prova que sempre deve-se estar atento às novas premissas para manter a operação da mina da forma mais produtiva, rentável e segura o possível. A abordagem sistêmica de uma cadeia produtiva pode resultar em melhorias nos custos, produtividade e qualidade, que dificilmente seriam alcançadas caso o sistema fosse examinado com uma visão separada de cada processo. A etapa de perfuração e desmonte, assim como toda etapa de uma cadeia de produção não deve ser analisada de forma individual, e sim dentro de uma abordagem global. Seus resultados são primordiais para assegurar a qualidade do processo e afetam diretamente as etapas subsequentes de carregamento, transporte, britagem e moagem, por isto se deve sempre buscar o ótimo e alinhar-se com as premissas do processo e as demandas produtivas.

O presente trabalho apresentou um estudo de adequação dos parâmetros geométricos no processo de perfuração de rochas que se mostrou necessário devido ao alto índice de material compacto apresentado no fim do ano de 2017 e previsto para 2018. Foram simulados e apresentados dois cenários variando a malha de perfuração do itabirito compacto e o diâmetro das perfuratrizes da frota DML, com o objetivo de eleger o que se mostrasse mais viável, ou seja, impactasse da menor forma possível o processo praticado anteriormente e não apresentasse demasiada adição nos custos. Foi escolhido o segundo cenário apresentado, que altera o diâmetro das perfuratrizes *Atlas Copco DML* de 7 ½” para 9 ½” e fecha a malha de perfuração no itabirito compacto para este novo diâmetro.

A alteração da malha de perfuração vem demonstrando alguns resultados que puderam ser mensurados como efeito recente desta mudança por meio dos sistemas de tecnologia embarcada, devido ao aumento da razão de carga em material compacto. Espera-se que com a alteração de diâmetro das perfuratrizes DML prevista para os meses seguintes os resultados operacionais e práticos citados neste trabalho também surjam, e contribuam ainda mais na busca pelo objetivo principal.

Possíveis efeitos colaterais e impactos ambientais são de conhecimento da equipe responsável pelo desmonte de rochas, e serão monitorados continuamente através de medidores de ruído instalados em pontos estratégicos do site e medições de vibração realizadas por empresa terceirizada, que geram relatórios que são enviados constantemente para análise. Caso seja encontrada alguma anormalidade, a equipe entrará em ação de forma a minimizar as adversidades.

Através das mudanças descritas no processo de perfuração, e algumas alterações também em outros setores, pode-se afirmar que o objetivo do trabalho de adequar os parâmetros às premissas recentes da Mina do Sapo no ano de 2018 foi cumprido, enquanto a mina opera no fim de sua segunda fase de operação e trabalha na implantação para conseguir a licença de operação da terceira fase (step 3).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA - ABREU, P.A.; RENGER, F.E. **Serra do Espinhaço Meridional: Um Orógeno de Colisão do Mesoproterozóico**. Revista Brasileira de Geociências, edição 32 (1), 2002. p. 1 – 14.

ALONSO, J. B.; GÓMEZ, J. C.; HERBERT, J. H. **Perforación y Voladura de Rocas en Minería**. Politécnica, Madrid, 2013. 264p.

ATLAS COPCO. **Atlas Copco Blasthole Drills DM30 II- Series**. 2018. 4p. Disponível em :< https://www.epiroc.com/content/dam/atlas-copco/mining-and-rock-excavation-technique/drilling-solutions/documents/DM30_II_US_high%20res.pdf>: Acesso em 25/06/2018

ATLAS COPCO. **Surface Drilling**. Fourth edition, 2008. p. 9. Disponível em :< <https://www.fing.edu.uy/iq/SurfaceDrilling.pdf>> Acesso em 15/06/2018

BORGES, T. C. **Análise dos Custos Operacionais de Produção no Dimensionamento de Frotas de Carregamento e Transporte em Mineração**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2013. 116p.

BRITANITE. **Manual básico de utilização de explosivos**. 20-?. P. 25

CAMERON, A. & HAGAN, T. **Curso Internacional: Tecnologia de desmonte de rochas com Explosivos para minas a céu aberto e subterrâneas**. Belo Horizonte: IBRAM, 1996. 146p.

DUARTE, C. **Curso de perfuração e desmonte de rochas**. Faculdade Kennedy, 2014. 61p

GOKHALE, B. V. **Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines**. Taylor e Francis Group, London, UK, 2011. 777 p.

GOOGLE MAPS. **Visão Aérea da Mina do Sapo**. Disponível em :< <https://www.google.com.br/maps/@-18.8813956,-43.4307607,3472m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>>: Acesso em: 14/06/2018

GOOGLE MAPS. **Visão Aérea do Porto do Açú**. Disponível em :< <https://www.google.com.br/maps/place/Porto+do+A%C3%A7u/@-21.8341137,-41.0469799,5348m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0xbe61020a0f7977:0xe186b74856d3d964!8m2!3d-21.8363444!4d-41.0414028?hl=pt-BR>>: Acesso em: 14/06/2018

HERRMANN, C. **Manual de Perfuração de Rocha**. 2ª edição. São Paulo: Editora Polígono, 1968. 411p.

JIMENO, C. L. et. al. **Manual de Perforación y Voladura de Rocas**. Instituto Geológico y Minero de España. 2003. 778p.

MORAIS, J. L. **Simulação da Fragmentação dos Desmontes de Rochas por Explosivos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 224p.

OLIVEIRA, D. B. M. **Projeto de Melhoria de fragmentação em Desmonte de Rochas**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Minas). Universidade Federal de Ouro Preto, 2017. 133p.

ROLIM, V. K. **Mapeamento geológico estrutural de detalhe da Serra do Sapo e Entorno de Itapanhoacanga**, 2010. 45p

SILVA, V. C. **Apostila do Curso MIN 112 – Operações Mineiras**. Ouro Preto, 2004. 91p.

SUITA, M. T. **Curso de Geologia Econômica**. Ouro Preto, 2011.24p

WIKIPEDIA. **Localização do Município de Conceição do Mato Dentro**. Disponível em <: https://pt.wikipedia.org/wiki/Concei%C3%A7%C3%A3o_do_Mato_Dentro:> Acesso em 05/06/2018

ZACCHI, E. N. P. et. al. **Análise Integrada de Dados Multifonte e sua Aplicação no Mapeamento Geológico das Formações Ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG**. Revista Brasileira de Geofísica, Volume 28, Número 4, São Paulo, Dezembro, 2010.