

OTIMIZAÇÃO DA PREVISIBILIDADE NO DESMONTE DE ROCHA SUBTERRÂNEA

Felipe Leite (UFRGS) felipe.leite@dataminesoftware.com

Pedro Lincoln

Resumo

As etapas de planejamento de curtíssimo prazo, envolvendo desenho manual de realces e criação de planos de perfuração tem como objetivo maximizar a extração de minério do subsolo com a menor perda possível. Entretanto, em busca de aumento de produtividade de produção, ineficiências tendem a ocorrer durante as etapas de perfuração e desmonte, causando perda de minério e resultando em grandes perdas financeiras. A utilização de novas tecnologias de software com objetivo de melhorar a eficiência nas etapas de perfuração e desmonte, otimizar controle das operações unitárias visando minimização da diluição operacional e maximização do minério recuperado fazem parte do futuro da mineração e já vem sendo utilizada cada vez mais pelas empresas.

Palavras-chave: Perfuração em Leque; Otimização de Desmonte; Aegis; Underground Mining

Abstract

The short-term planning stages, involving manual design of stopes and the creation of detailed ring designs, aims to maximize the extraction of ore from the underground mine, with minimum loss. However, in search of increased production productivity, inefficiencies tend to occur during the drilling and blasting stages, causing ore loss, and resulting in large financial losses. The use of new software technologies with the objective of improving efficiency in the drilling and blasting plans, optimizing control of unit operations aiming at minimizing operational dilution and maximizing the ore recovery from mining stopes are part of the future of mining and are already being implemented by mining companies.

Keywords: Ring Design; Blast Optimization; Aegis; Underground Mining

INTRODUÇÃO

O processo de perfuração e desmonte de rochas subterrânea, em especial os realces para produção de minério utilizando o método *sublevel stopping* envolvem uma série de complexas atividades, envolvendo diferentes setores da empresa como geologia de curto prazo, geotecnia, planejamento de mina e operação. Todos os setores devem estar bem informados e trabalhando em sincronia para que a perfuração, o desmonte e consecutivamente a lavra do minério sejam otimizadas. É natural que pequenos erros ocorram durante as etapas, resultando em perda de minério no realce, lentidão e baixa produtividade durante as operações unitárias, excesso de diluição operacional que por fim acabam impactando consideravelmente a eficiência da operação, resultando em baixa aderência do plano e o não cumprimento de metas de produção.

Para que erros sejam minimizados durante a etapa de perfuração e desmonte, é essencial que haja um planejamento detalhado dos leques de perfuração. O software Aegis possui funcionalidades que visam solucionar este problema, sendo possível a execução detalhada de planos de perfuração de forma semi-automática, economizando tempo de preparação do plano, onde este tempo extra pode ser utilizado para detalhamento e refino técnico, aumentando as chances de sucesso. Além disso, no Aegis é possível a partir de informações geotécnicas das rochas (densidade, módulo de *Young*, resistência à compressão uniaxial, etc) e parâmetros dos explosivos (velocidade de detonação, densidade do explosivo, etc) e a partir de diferentes equações empíricas, a criação de um modelo de realce planejado, que seja mais próximo do realce lavrado, com grande aderência e assim aumento de confiabilidade e da previsibilidade do plano de lavra proposto.

Overview mina Vazante

A mina Vazante pertence à Nexa Resources, tem como principal minério o silicato de zinco e como subproduto sulfeto de chumbo e prata. A mineralização é extensa e possui cerca de 10km, na direção de *strike* SW-NE, com profundidade de cerca de 500m a partir da superfície. O minério é composto por lentes com mergulho médio entre 50 a 70 graus.

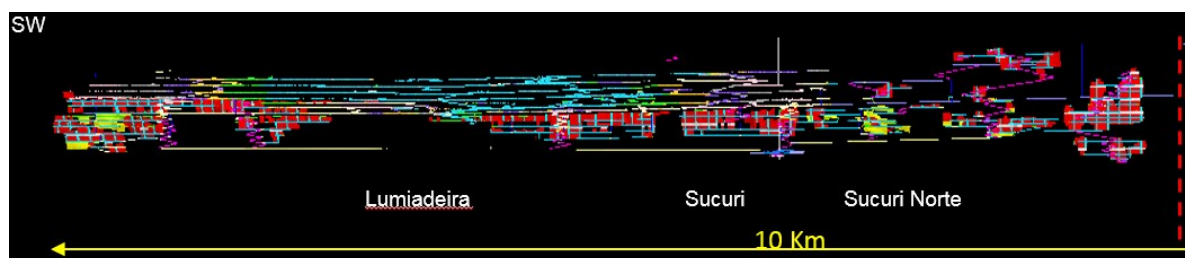


Figura 1 - Layout mina Vazante

Os realces de lavra são explotados pelo método de lavra VRM (*Vertical Retreat Mining*) e Realces Abertos (*Open Stopping*), cuja produtividade é em média 4200 toneladas por dia a um teor médio de 11% Zn. O ciclo de lavra também inclui a atividade de enchimento de realces, utilizando estéril do próprio desenvolvimento da mina, o chamado *Rockfill*.

Toda a operação é 100% mecanizada e realizada por funcionários diretos da Nexa.

O Aegis é um software fornecido pela Datamine, no qual é possível a construção de planos de perfuração, desmonte e temporização de forma rápida e automática, resultando em uma redução significativa de tempo para criação dos planos, possibilitando melhor análise de cenários, visando aumento de eficiência dos processos.



O Aegis Designer permite a criação dos planos de perfuração e desmonte, além de criação de relatórios automáticos e customizáveis, facilitando o entendimento do plano por parte da equipe de perfuração que irá executar o trabalho. Segue abaixo outras características importantes do Aegis Designer:

- O Aegis Analyzer permite o modelamento e a simulação do processo de detonação, permitindo verificar os resultados da qualidade dos planos desenhados. O modelo simulado, uma vez calibrado corretamente permite prever informações como underbreak, overbreak e diluição planejada, permitindo aos engenheiros ajustar os desenhos dos realces para aperfeiçoar os resultados, permitindo uma melhor previsão dos limites finais do realce a ser lavrado.

- Criação de stopes a partir de modelos matemáticos de detonação (*blast solids*), realizado a partir de ajustes do sólido escaneado (CMS) do desmonte anterior, visando a maior aderência e melhoria contínua entre o realce planejado x realizado;

- Utilizando informações como curva de atenuação da rocha, curva de VoD do explosivo, velocidade de onda S, onda P da rocha, resistência de ruptura à tração da rocha, é possível dar uma nota para a qualidade do plano de fogo, visando dimensionamento de malha de perfuração ótima;
- Possibilita o melhor gerenciamento de custo de cada desmonte, levando em conta preço dos insumos (explosivos, acessórios), preço por metro perfurado, etc.

OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a utilização do software Aegis visando o aumento da previsibilidade do desmonte, aumento da aderência e cumprimento dos planos de produção.

Além disso, um objetivo secundário é utilizar o Aegis para escolha da melhor malha de perfuração, visando um aumento de qualidade no material desmontado e consequentemente maior produtividade.

METODOLOGIA

A metodologia consiste em utilizar o software Aegis como principal ferramenta para a criação de planos de perfuração, planos de desmonte, otimização de malha de perfuração e simulação de realce de lavra a partir dos planos de perfuração, para avaliar se há um aumento da aderência de lavra e otimização da previsibilidade no desmonte.

Ela foi dividida em 4 etapas.

1. Avaliação de ganhos de produtividade da equipe de planejamento ao executar a criação de planos de perfuração e desmonte, além de facilidades ao criar o plotagem a ser enviado para a equipe de operação que irá executar o plano em campo. Para este caso foi avaliado usando o stope 255 BL 12400S.
2. Avaliação de aumento de aderência e cumprimento do plano, ao utilizar o Aegis para simulação de sólidos de lavra (*blast solids*) a partir de um plano de perfuração criado. Os sólidos são criados a partir de equações empíricas internas do Aegis e podem ser escolhidos entre 3 modelos empíricos diferentes: Kleine Field, Holmberg Persson e Liu-Katsabanis.
3. Avaliação, dimensionamento e seleção da malha ótima de perfuração, a partir de informações do maciço rochoso como curva de atenuação da rocha, velocidade de onda P e S da rocha e resistência à compressão uniaxial da rocha, e informação dos explosivos como densidade do explosivo e velocidade de detonação.
4. Criação de um plano de desmonte e carregamento de explosivos, a partir de furos escaneados (perfilados) já realizados. O objetivo é conseguir criar um plano de carregamento que possa corrigir concentração de carga em alguns furos devido à desvios de furos durante a execução do plano de perfuração.

Na 1ª etapa, foi escolhido o realce 255 BL1 12400S pela equipe de planejamento de mina para a realização dos testes. A partir de um sólido de realce planejado (Figura 3), foi criado um plano de perfuração e desmonte utilizando o Aegis, com o propósito de avaliar ganhos de produtividade e economia de tempo por parte da equipe de planejamento de mina durante a elaboração do plano. Além disso, ao término da elaboração do plano, foi avaliado a rapidez na qual o arquivo de plotagem é criado para ser entregue à equipe de operação de mina para execução do plano, e a possibilidade de criação de fórmulas automáticas como quantidade de explosivo a ser carregado, tamanho do tampão a ser utilizado e inserção automática de dados como ângulo de perfuração, comprimento de cada furo, nome dos furos, dentre outros.

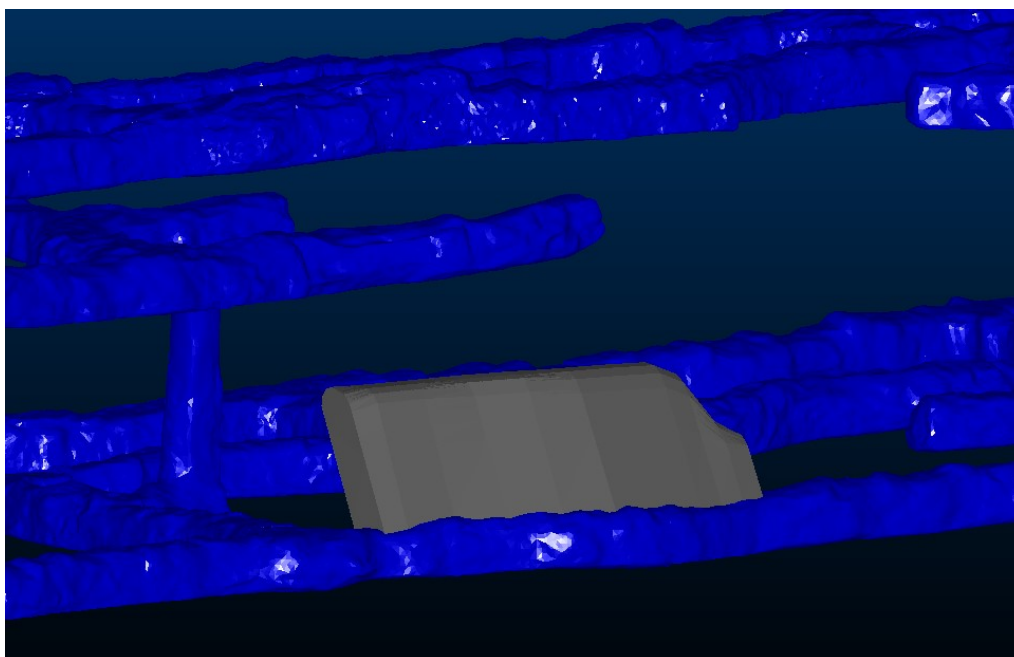


Figura 3 – Realce planejado 255 BL1 12400 S

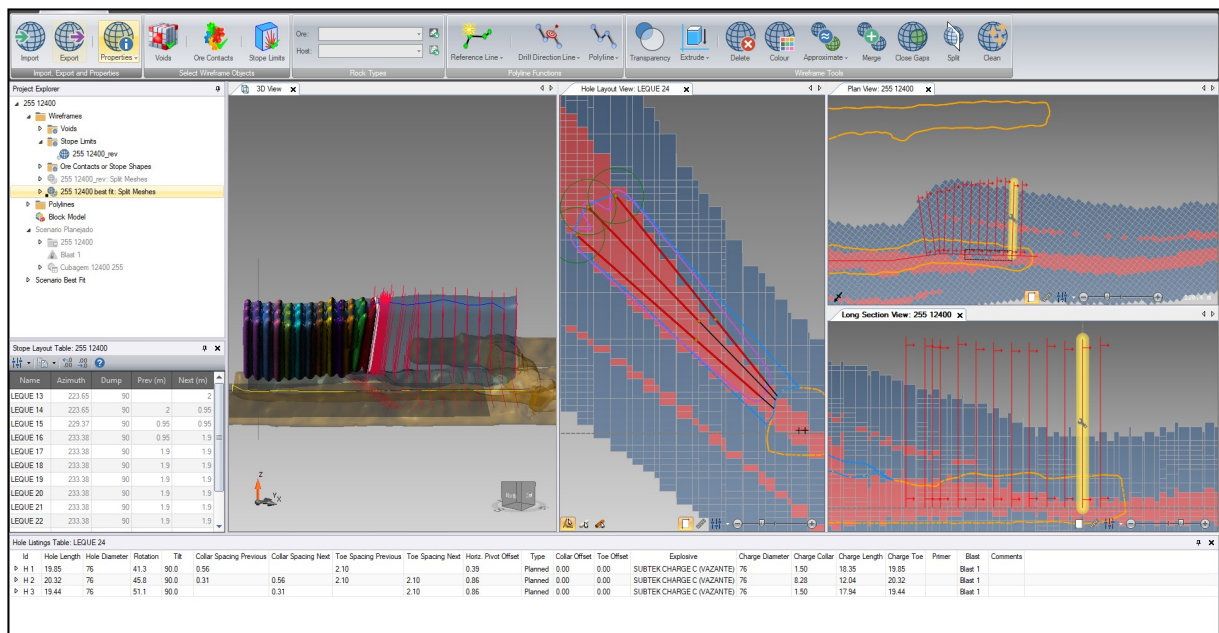


Figura 4 – Criação plano de perfuração usando Aegis

Na 2ª etapa dos testes, foi utilizado a funcionalidade de *Advanced Blasting* do Aegis para criação de stopes a partir de modelos matemáticos empíricos de detonação (*blast solids*). Para isso, a partir de uma região onde o realce já tivesse sido lavrado, e houvesse informação a respeito do sólido planejado (antes da lavra) e o sólido escaneado (depois da lavra), é possível utilizar o Aegis para calibrar quais parâmetros da equação empírica escolhida seria utilizado para modelar a outra região a ser lavrada. O realce 255 BL1 12500S que já havia sido lavrado e escaneado foi escolhido, e com isso pôde ser calibrado o Aegis para utilização no realce 255 BL1 12400. Acreditamos que podemos utilizar o mesmo parâmetro calibrado no primeiro realce para modelar o segundo realce devido à proximidade dos mesmos, portanto acreditamos que as mesmas condições geotécnicas se aplicam aos dois realces.

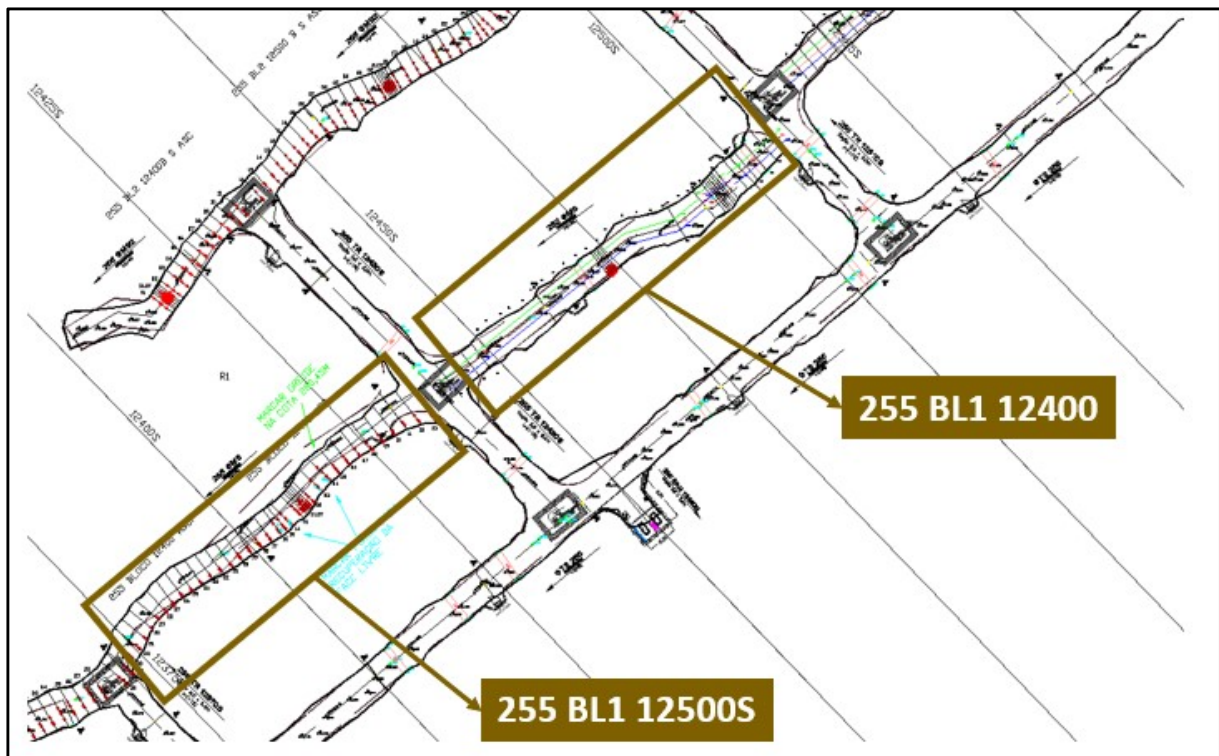


Figura 5 - Vista em planta dos realces escolhidos

São possíveis a escolha entre 3 modelos empíricos diferentes, cada um com suas características próprias:

1. Kleine Field (Razão de carga 3D)
2. Holmberg Persson (velocidade de pico de partícula)
3. Liu Katsabanis

O modelo de Kleine, leva em consideração principalmente a posição espacial da carga de explosivo ao longo do furo, e se houver outro furo próximo também com carga de explosivo a razão de carga 3D irá aumentar e consecutivamente haverá impacto no sólido a ser modelado. A razão de carga 3D, no modelo de Kleine é definida como a somatória de todo fator que contribuem com aumento de da razão de carga de todos os furos carregados dentro de um plano de fogo planejado [1].

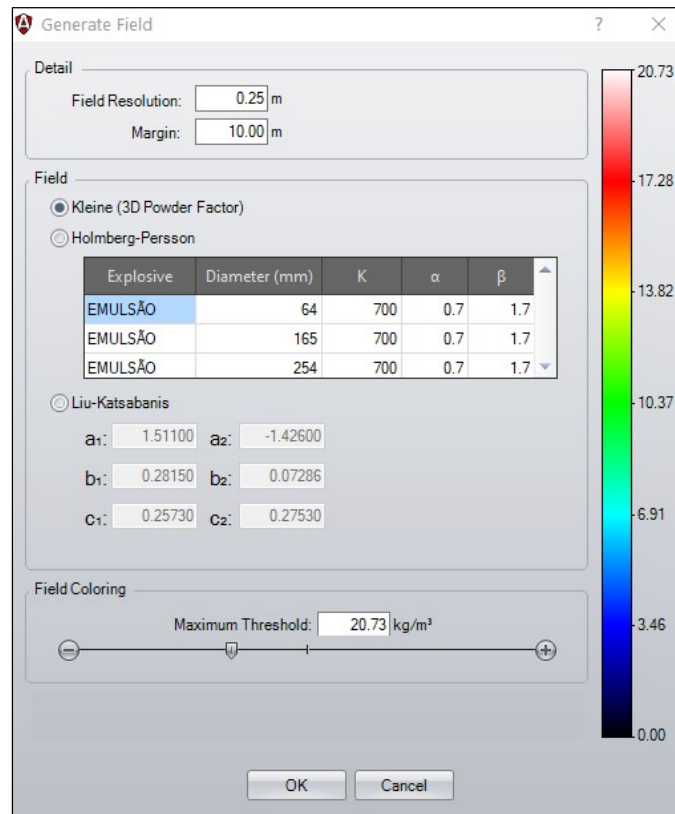


Figura 6 - Criação de sólidos a partir do modelo matemático a ser escolhido

O modelo de Holmberg-Persson leva em consideração a quantidade de massa de explosivo ao longo do furo, sendo sensível às alterações de configuração do tipo de explosivo (velocidade de pico de partícula, densidade do explosivo) e da distância entre furos e do diâmetro de cada furo.

O modelo de Liu-Katsabanis estabelece uma relação entre Tensão Máxima a uma distância relativa da carga de explosivo e o diâmetro de explosivo em relação ao diâmetro do furo, e da tensão de choque inicial dentro do furo [2]. Na equação 1 abaixo, P_R é a Tensão Máxima, P_m é a tensão de choque inicial, R é o diâmetro de carga e R_0 é o diâmetro do furo.

Equação 1 - Relação entre Peak Stress

$$P_R = P_m \left(\frac{R}{R_0} \right)^n$$

Com isso, foi criado um plano de perfuração no Aegis a partir do sólido planejado. Em seguida, os furos planejados foram utilizados para criação do modelo matemático pelo modelo de Kleine (Razão de Carga 3D), e foi selecionado automaticamente pelo software qual parâmetro empírico foi calibrado para se obter a maior aderência ao se comparar o sólido e os furos planejados com o sólido já lavrado e escaneado.

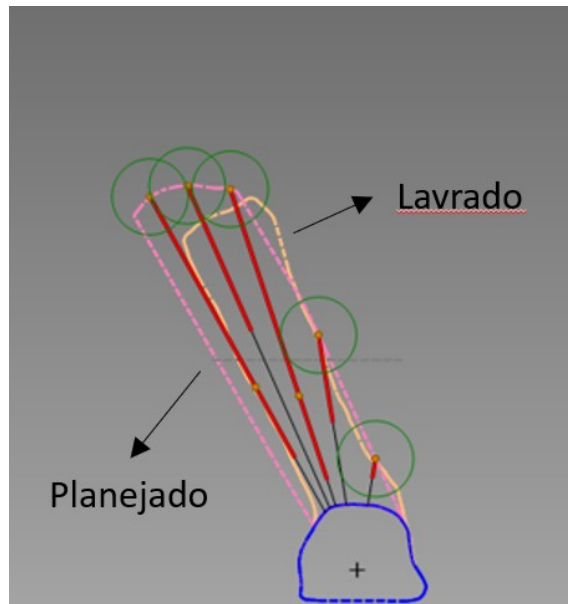


Figura 7 - Sólido Planejado x Sólido Lavrado

O modelo de Kleine configurado, encontrou o melhor que equivale a cerca de 50% em aderência ao sólido lavrado. O valor encontrado é de 17.68 kg/m^3 . Uma vez definido o parâmetro para modelar o sólido simulado a partir da modelos matemáticos, podemos aplicar o parâmetro para criação de um modelo matemático planejado para o outro realce a ser lavrado 255 BL1 12400

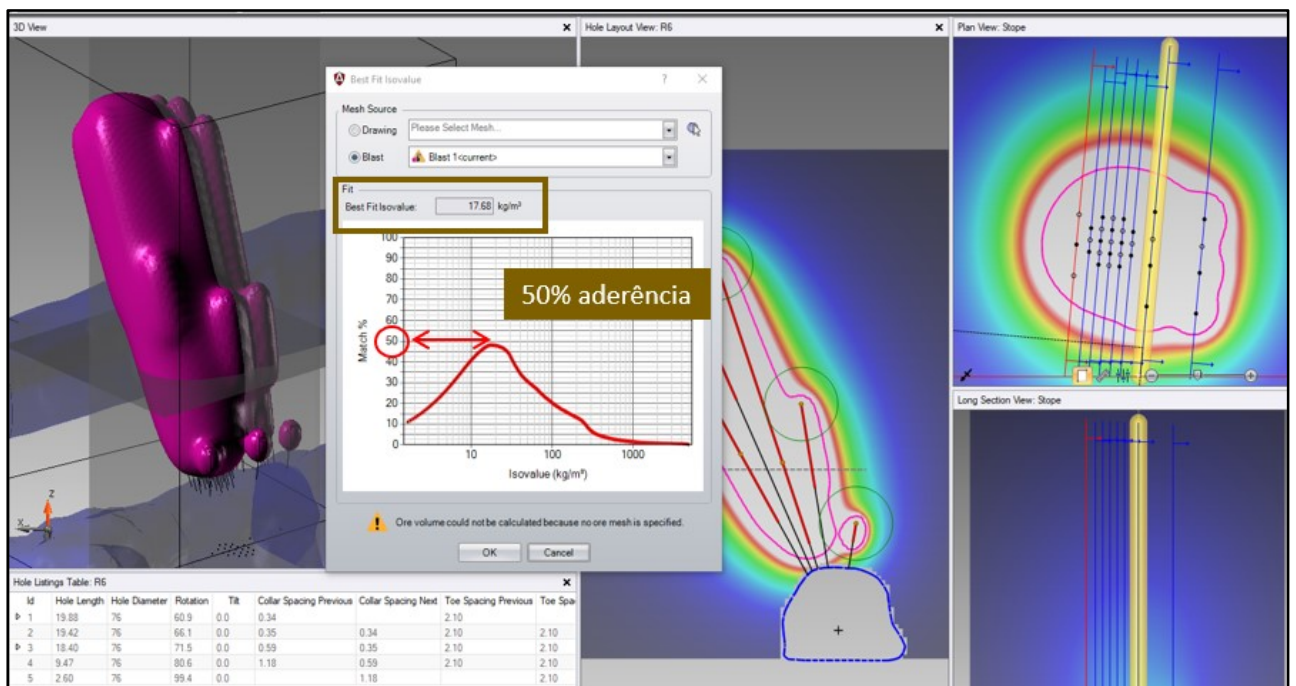


Figura 8 - Calibrar parâmetro Aegis para criação de sólido simulado (blast solid)

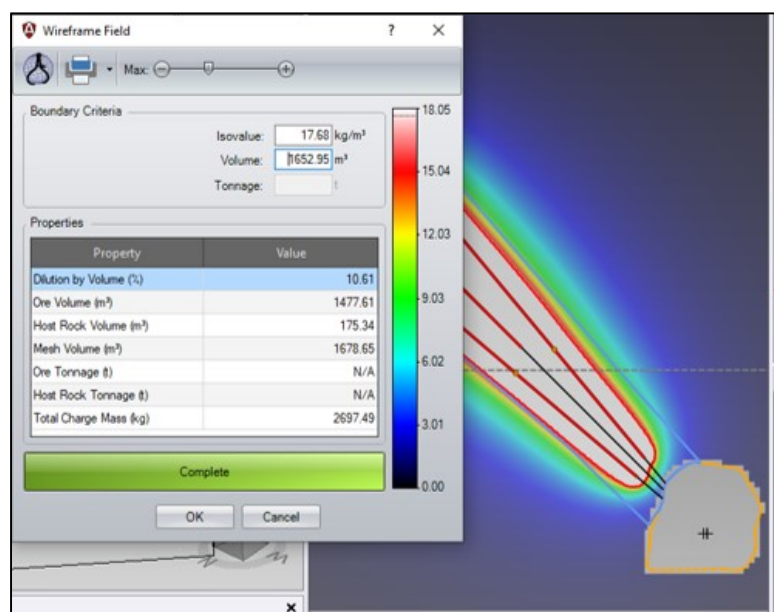


Figura 9 - Parâmetro do Modelo de Kleine

Sendo assim, foi aplicado no realce 255 BL1 12400 o mesmo parâmetro empírico definido ao realizar o modelamento usando o realce já lavrado 255 BL1 12500S. O Aegis modelou o sólido planejado usando o modelo de Kleine para simular o sólido planejado de acordo com o modelo matemático. Na Figura 10 abaixo, é possível fazer uma comparação visual entre o sólido planejado desenhado pela equipe de planejamento de mina e o sólido simulado utilizando o Aegis Analyzer.

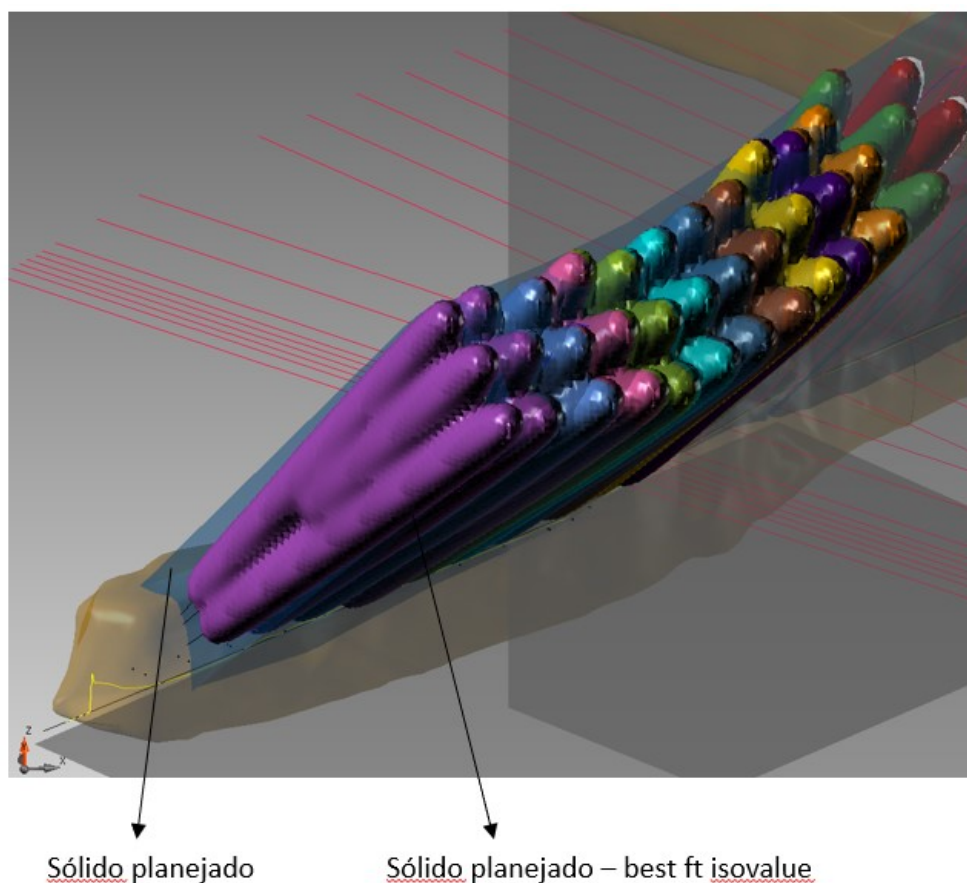


Figura 10 - Comparação entre sólido planejado x sólido simulado

Na 3ª etapa, a fim de avaliar qual a melhor malha de perfuração para se adequar ao tipo de rocha e tipo de explosivo da mina Vazante, foram colhidas informações juntamente com a equipe de mecânica de rochas a respeito dos parâmetros geotécnicos da mina. Os dados seguem na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Parâmetros da rocha (mina Vazante)

Bickers (2001) / Lilly (1996)		
	Extremo Norte	Vazante
CE (kg EMUL/t)	0.25	0.22
CE (kg ANFO/t)	0.27	0.24
BI (<i>blastability index</i>)	66	59
RMS	62	52
JPO	30	30
SGI	35	30
RSI	5.5	5.5
dens. (t/m³)	3.4	3.2
RCS (MPa)	110	110
López Jimeno (2003)		
CE (kg EMUL/m³)	1.46	1.32
CE0 (kg EMUL/m³)	0.8	0.7
CE0 (kg EMUL/t)	0.25	0.22
L	17.4	17.4
AV	4	4
Ø (inch)	3	3
Ø (cm)	7.6	7.6
q1 (kg/m)	5.2	5.2
Ae	3.6	4.0
S/B	1.155	1.155
Afastamento (B)	2.0	1.9
Espaçamento (S)	2.25	2.1

Dados como Resistência à Compressão Uniaxial, RMR, densidade da rocha, densidade de explosivos, velocidade de onda S e P da rocha são importantes parâmetros de entrada para que o Aegis possa, a partir de algoritmo interno dar uma nota para a qualidade do plano de fogo, e assim realizar o dimensionamento da melhor malha de perfuração.

Produto	Subtek Velcro TM
Densidade (g/cm³) ⁽¹⁾	0,95 – 1,20
Diâmetro mínimo de furos (mm)	38
VOD típico (km/s) ⁽²⁾	5,0
Energia Relativa Efetiva (REE) ⁽³⁾	
Força Relativa em Peso - RWS	72 – 98
Força relativa em volume - RBS	72 - 147
Tempo de Espera	7 dias

Figura 11 - Parâmetros de explosivos (mina Vazante)

Na 4ª etapa dos testes, foram analisados os furos perfilados do realce já lavrado (370 9175). A partir dos furos reais, é possível criar um plano de carregamento de explosivos customizado, que levando em conta eventuais desvios entre os furos pudesse evitar

concentração de carga caso os furos estivessem mais próximos que o planejado, e se fosse necessário, colocar mais explosivos em furos que estivessem mais afastados do que o planejado.

Sendo assim, foram importados os furos perfilados para o Aegis, e em seguida foi criado um plano de carregamento detalhado. O objetivo é avaliar em quanto tempo seria possível realizar esse estudo, com o objetivo de criação da seguinte rotina:

1. Criação de plano de perfuração
2. Execução da perfuração
3. Execução da perfilagem dos furos
4. Análise e importação dos dados dos furos perfilados para Aegis
5. Criação de plano de carregamento detalhado e customizado
6. Carregamento de explosivo dos furos a partir do plano criado a partir dos furos reais

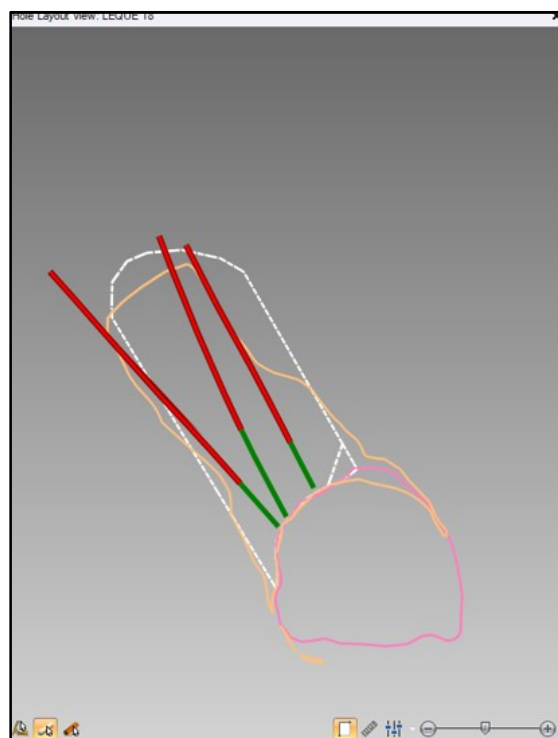


Figura 12 - Criação de planos de carregamento a partir de furos perfilados

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Ao utilizar o software Aegis para criação dos planos de perfuração e desmonte para a mina de Vazante, foram avaliados diversos critérios para averiguar ganhos reais de produtividade, e aumento da previsibilidade no desmonte de rocha subterrânea.

Na 1ª etapa do teste, o plano de perfuração foi criado 100% utilizando Aegis, em substituição do software usado anteriormente (AutoCAD). Foi observada considerável rapidez de adaptação da equipe à nova ferramenta, com uma rápida curva de aprendizagem. Além disso, no Aegis é possível verificar o stope a ser planejado em 3 diferentes seções, além da vista em 3D, que se mostrou bem funcional e intuitivo para

ajudar o posicionamento dos furos em situações galerias em curva. Outro ponto positivo observado é a criação de furos automático pelo Aegis permite ganho de tempo, pois ainda que ajustes devam ser feitos para a criação do plano de perfuração final, o tempo gasto é menor do que a criação manual de todos os furos do realce planejado, especialmente em realces muito grandes, com muitos leques. No realce utilizado como teste, todo o processo de criação do plano de perfuração, criação do *blast solid*, cubagem do realce e exportar o arquivo de plotagem levou cerca de 2 horas, enquanto o processo tradicional levaria entre 4 e 6 horas, sendo possível observar uma economia de tempo de execução do projeto de cerca de 50% a 66%.

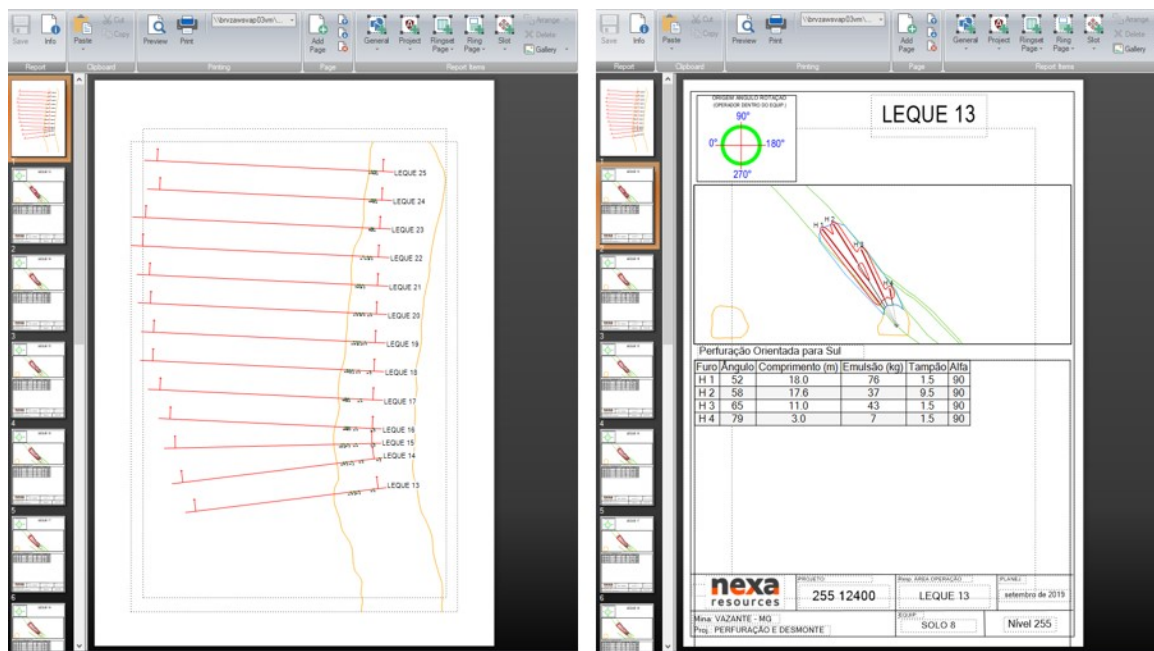


Figura 13 - Arquivo de plotagem com fórmulas customizadas.

Outra vantagem observada é a possibilidade de criar relatórios customizados com fórmulas prontas de forma a adequar à maneira que cada mina trabalha, e qual informação é importante ser repassada para os operadores que irão executar a perfuração, como na Figura 13 acima. A criação de templates automáticos proporciona grande agilidade para exportar as informações necessárias, evitando erros manuais que eventualmente aconteciam ao utilizar a metodologia anterior.

Durante a 2ª etapa do teste, foi realizado a criação de um sólido simulado do realce 255 BL1 12400 a partir do plano de perfuração criado, e utilizando o modelo de Kleine, com o parâmetro que foi coletado do realce lavrado anteriormente (255 BL1 12500), numa mesma região da mina com as mesmas características geomecânicas, como ilustrado pela Figura 10. Na Figura 14, é possível visualizar uma seção comparativa entre o sólido escaneado após a lavra (laranja) em comparação com o sólido inicialmente desenhado pela equipe de planejamento de mina (vermelho). A aderência geométrica entre os 2 sólidos foi de 84%, calculada segundo a Equação 2 abaixo:

Equação 2 - Fórmula aderência geométrica

$$\text{Aderência geométrica} = \frac{PR}{(PR + RNP)}$$

PR = Planejado e Realizado

RNP = Realizado não Planejado

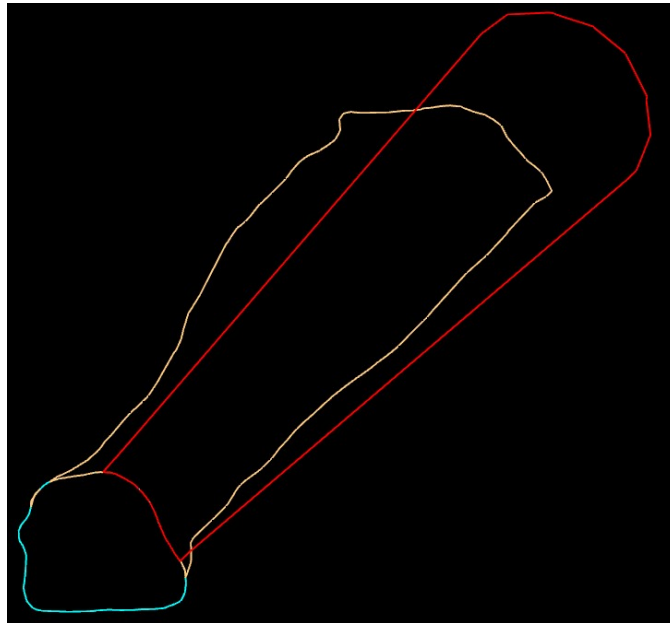


Figura 14 - Sólido Escaneado x Sólido Planejado

Ao calcular a aderência geométrica do sólido simulado utilizando o modelo de Kleine, foi obtido o valor de 64%. A comparação visual entre a seção do sólido escaneado e do sólido simulado pode ser observada na Figura 15 a seguir. É também notável que parte desta perda de aderência provavelmente é causada pois no sólido modelado, a parte do furo onde não há carregamento de explosivos (tampão) não é modelada pelo modelo de Kleine, pois o modelo leva em conta a Razão de Carga 3D. Sendo assim, talvez por essa limitação do modelo a aderência geométrica no exemplo verificado foi menor no sólido simulado que no planejado.

Outros testes ainda devem ser realizados para concluir sobre a robustez do modelo, pois foi feita apenas 1 calibragem, e o modelo vai sendo refinado quanto mais vezes ele é utilizado, até se chegar ao parâmetro ótimo para criação do modelo simulado, num processo de melhoria constante.



Figura 15 - Sólido Escaneado x Sólido Simulado

Na 3ª etapa dos testes, foram avaliadas 2 diferentes malhas de detonação, a fim de averiguar qual receberia a melhor nota pelos critérios estabelecidos pelo módulo Aegis Analyzer, utilizando a função *Break Workbook*. [3]

Na Tabela 1, segue o resultado do ábaco de resultado para a malha de 2.25m por 2m. Nele são contidos 7 critérios, dentre os quais 3 estão dentro da faixa aceitável e 4 estão fora da faixa considerada ótima.

Tabela 2 - Avaliação malha 2.25m x 2m

Statistics	Range	Value	Parameter Gauge	Result
Break Overlap Burden	2% - 12%	0.0%		✗
Break Overlap Spacing	2% - 12%	0.0%		✗
Reflection Point	21.76 MPa - 340.91 MPa	141.93 MPa		✓
Ratio of Radial Break t...	45% - 75%	52.81%		✓
Break Angle	80° - 90°	80.27°		✓
Powder Factor Mass	0.4 kg/tonne - 0.8 kg/tonne	0.37 kg/tonne		✗
Energy Factor Mass	1.27 MJ/tonne - 2.54 MJ/tonne	1.17 MJ/tonne		✗

Na Tabela 2, segue o ábaco de resultado do Aegis para a malha de 1.90m por 2.1m. Dos 7 critérios analisados para avaliar a qualidade da malha de detonação, 5 estão na faixa ótima, 1 está na faixa limítrofe e apenas 1 critério está fora da faixa aceitável

Tabela 3 - Avaliação malha 1.9m x 2.1m

Statistics	Range	Value	Parameter Gauge	Result
Break Overlap Burden	2% - 12%	1.0%		
Break Overlap Spacing	2% - 12%	1.8%		
Reflection Point	21.76 MPa - 340.91 MPa	164.65 MPa		
Ratio of Radial Break t...	45% - 75%	61.14%		
Break Angle	80° - 90°	81.69°		
Powder Factor Mass	0.4 kg/tonne - 0.8 kg/tonne	0.48 kg/tonne		
Energy Factor Mass	1.27 MJ/tonne - 2.54 MJ/tonne	1.51 MJ/tonne		

Na 4ª e última etapa analisada, foi possível analisar que são necessárias 24 horas para realizar a perfilagem dos furos, uma vez concluído o plano de perfuração. Uma vez levantados esses dados, em cerca de 2-3 horas a equipe de planejamento de mina consegue fazer o tratamento dos dados coletados em campo e importar para o Aegis, a fim de realizar o plano de carregamento de explosivos detalhado em cima dos furos reais, e assim conseguir adequar o carregamento de acordo com a disposição espacial real dos furos.

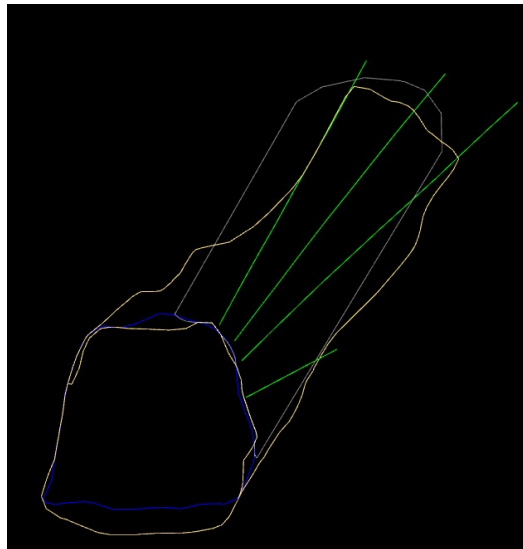


Figura 16 - Seção furos perfilados

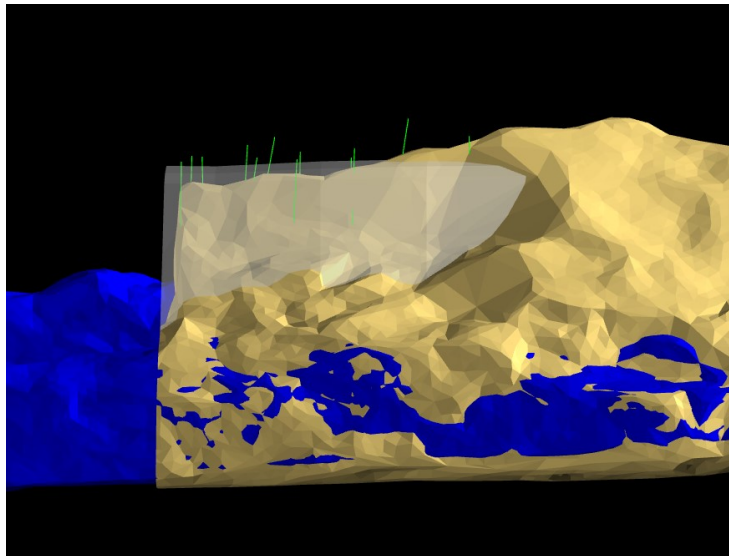


Figura 17 - Seção longitudinal furos perfilados em relação ao stope lavrado

CONCLUSÃO

Com a evolução da indústria de software para a mineração, cada vez mais a tecnologia permite que análises e estudos de otimização possam ser realizados e implementados no dia a dia da rotina operacional da mina, num processo de melhoria constante.

A partir dos 4 testes realizados, é possível concluir de uma forma global que a utilização do software contribui com a produtividade dos planos de perfuração e desmonte, pois oferece:

- ✓ Interface interativa 3D para design de planos de perfuração;
- ✓ Relatórios customizáveis e facilidade para exportar a informação criada no software para outros formatos, incluindo plotagem;
- ✓ Utilização do *Break Model* para avaliar qual a melhor malha de perfuração com critérios objetivos estabelecidos;
- ✓ A utilização de equações empíricas usadas para a criação de um modelo simulado de *blast solid*, ou sólido planejado a partir de parâmetros que possam ser continuamente refinados, a fim de se ter um sólido planejado que seja o mais próximo possível do realizado, trazendo previsibilidade e confiabilidade ao plano de lavra.

O estudo foi analisado em apenas 1 área da mina para a configuração do melhor modelo matemático a ser utilizado. Acreditamos que para próximos passos, diferentes áreas da mina, com diferentes características geológicas possam ser mapeadas e continuamente validadas, buscando usar sempre o melhor parâmetro de modelo simulado na mina Vazante.

Próximos Passos

Como sugestão de oportunidade de melhoria na busca de maior previsibilidade da lavra, foi mapeado a funcionalidade disponível no software Aegis na qual é possível exportar o plano de perfuração em arquivo .xml, contendo a posição de cada furo a ser perfurado pelo sistema de padrão internacional IREDES. Este formato de arquivo é reconhecido por grande parte das perfuratrizes/fandrilh do mercado, de forma que ela reconhece o arquivo e faz os furos na posição correta de forma automática, minimizando o fator de erro humano, responsável por eventuais desvios na perfuração e consecutivamente aumentando a probabilidade de ter um ganho de aderência ao plano, na busca de aumento de previsibilidade no desmonte de rocha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Liu Q, Katsabanis P.D. A Theoretical approach to the Stress Waves Around a Borehole and their Effect on Rock Crushing. *Fragblast* 4,1993, 1 pp9-16
2. Manual completo Aegis
3. [https://www.iring.ca/ Knowledgebase/](https://www.iring.ca/Knowledgebase/)