



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



**OTIMIZAÇÃO DE REALCES OPERACIONAIS PARA UM DEPÓSITO DE OURO
POR CÂMARAS E PILARES**

DAYS JULIANA BARBOSA DE SOUZA

Ouro Preto, 2021

DAYS JULIANA BARBOSA DE SOUZA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP, MG), como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Felipe Ribeiro Souza

Ouro Preto, 2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729o Souza, Days Juliana Barbosa de.
Otimização de realces operacionais para um depósito de ouro por câmaras e pilares. [manuscrito] / Days Juliana Barbosa de Souza. - 2021. 55 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e recursos minerais - Planejamento. 2. Lavra subterrânea. 3. Otimização matemática. I. Souza, Felipe Ribeiro. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.272:624.131

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



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e um dias do mês de dezembro de 2021, às 19h30min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Days Juliana Barbosa de Souza**, matrícula 17.1.1228, intitulado: **OTIMIZAÇÃO DE REALCES OPERACIONAIS PARA UM DEPÓSITO DE OURO POR CÂMARAS E PILARES**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza, Me. Tiago Mozart Gonçalves Leite, Eng.º Minas João Vítor Araújo Sales. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu à discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Eng.º Minas João Vítor Araújo Sales, segundo, o Me. Tiago Mozart Gonçalves Leite. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou à discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão da discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovada por unanimidade, com a nota 9,5 (Nove), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. A discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 21 de dezembro de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza

Membro: Me. Tiago Mozart Gonçalves Leite

Membro: Eng.º Minas João Vítor Araújo Sales

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder saúde, força e capacidade de realizar o sonho que a graduação sempre representou para mim.

Aos meus pais, Maria e José, por terem sido o meu alicerce e terem auxiliado da maneira que conseguiram durante esses cinco anos.

Agradeço também ao Deraldo, meu pai de alma, por ter sido o meu maior incentivador desde a infância, tenho certeza de que onde quer que esteja agora, está comemorando essa conquista que trilhamos juntos.

Aos meus amigos que acompanharam o meu crescimento até aqui e fizeram desta caminhada um trajeto mais leve e feliz, principalmente, os meus colegas do 17.1 que foram o meu suporte técnico e emocional.

À Datamine pela oportunidade de crescimento profissional, técnico e humano. Além de todos os laços que fiz dentro da empresa que foram fundamentais para o meu aprendizado constante.

Aos professores que tive o privilégio de conhecer por partilharem o conhecimento comigo e contribuírem de maneira efetiva para a profissional que me tornei.

RESUMO

Este trabalho apresenta a otimização dos realces de um depósito mineral subterrâneo de ouro de uma mineradora por meio do *software* MSO da empresa Datamine. O objetivo do estudo é realizar uma análise comparativa dos *stopes* gerados de forma manual com os resultantes da otimização do *software* e analisá-los quanto a geometria, operacionalidade e economicidade. Para o trabalho foram estudadas as características geológicas, geomecânicas e econômicas para serem utilizadas como premissas da otimização e ponderadas para a determinação do método de lavra adequado para o corpo mineralizado. As considerações feitas resultaram em realces matemáticos condizentes com o esperado, sendo que a geometria favoreceu que fossem mais operacionais que os manuais gerados inicialmente. O MSO se mostrou ser uma ferramenta robusta para a avaliação da potencialidade dos recursos lavráveis e que facilita o trabalho do profissional da área, trazendo mais assertividade e segurança nas atividades.

Palavras-chave: Realces. Otimização. Planejamento. Operacional.

ABSTRACT

This work presents the optimization of the stopes of an underground gold mineral deposit from company X using the MSO software from the company Datamine. The objective of the study was to carry out a comparative analysis of manually generated stopes with those resulting from the optimization of the software and analyze them in terms of geometry, operability and economy. For this work, the geological, geomechanical and economic characteristics were studied to be used as assumptions for optimization and weighted to determine the appropriate mining method for the mineralized body. The considerations made resulted in mathematical stopes consistent with what was expected, and the geometry favored them to be more operational than the manuals generated initially. The MSO proved to be a robust tool for evaluating the potential of mineable resources and that facilitates the work of professionals in the area, bringing more assertiveness and security to their activities.

Keywords: Stopes. Optimization. Planning. Operational.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: RECURSOS E RESERVAS (JORC, 1999).	17
FIGURA 2: <i>WIREFRAMES</i> ABERTAS E FECHADAS.....	18
FIGURA 3: MODELO DE BLOCOS.....	19
FIGURA 4: PAINÉIS E <i>STOPE</i>	20
FIGURA 5: <i>STRINGS</i> DE UMA RAMPA DE ACESSO.	21
FIGURA 6: MERGULHO, DIREÇÃO DE MERGULHO E <i>STRIKE</i> (ADAPTADA DE DUNG, 2014).	22
FIGURA 7: POTÊNCIA DE UM CORPO MINERAL (ADAPTADA DE TATIYA, 2014).....	23
FIGURA 8: <i>HANGING WALL</i> E <i>FOOTWALL</i>	24
FIGURA 9: GEOMETRIA DOS DEPÓSITOS (ADAPTADA DE MOSER E WIMMER, 2018).	24
FIGURA 10: TIPOS DE DILUIÇÃO (ADAPTADA DE DATAMINE, 2020).	25
FIGURA 11: MÉTODOS DE LAVRA SUBTERRÂNEA (SILVA, 2020).	26
FIGURA 12: CÂMARAS E PILARES (HAMRIN, 1986).....	27
FIGURA 13: <i>INPUTS</i> E RESULTADOS DO MSO (DATAMINE, 2020).....	29
FIGURA 14: SEÇÕES PARA AVERIGUAÇÃO DO <i>DIP</i>	30
FIGURA 15: SUPERFÍCIE DE CONTROLE.	31
FIGURA 16: <i>FRAMEWORKS</i> ROTACIONADAS (DATAMINE, 2020).	34
FIGURA 17: <i>FRAMEWORK</i> E O MODELO DE BLOCOS.	35
FIGURA 18: PLANO DE ORIENTAÇÃO XY DO CORPO DE MINÉRIO (DATAMINE, 2020).	36
FIGURA 19: GRADIENTE <i>STRINGS</i> . (DATAMINE SOFTWARE, 2020).	37
FIGURA 20: REALCES MANUAIS E <i>STRINGS</i> DE CONTROLE.....	40
FIGURA 21: REALCES MANUAIS E CORPO DE MINÉRIO EM VISTAS DE PLANTA (A) E OESTE (B).....	41
FIGURA 22: SEÇÃO VERTICAL NOS REALCES E NO MODELO DE BLOCOS.	42
FIGURA 23: REALCES GERADOS ABAIXO DO <i>CUT-OFF</i>	43
FIGURA 24: GALERIAS DE PRODUÇÃO USADOS COMO <i>STRINGS</i> DE CONTROLE.....	44
FIGURA 25: FORMA DOS REALCES E TEOR DE CORTE.....	45

FIGURA 26: SÓLIDOS GERADOS DE ACORDO COM O TEOR DE CORTE E AS GALERIAS DE PRODUÇÃO.	45
FIGURA 27: REALCES GERADOS NO CENÁRIO 2 POR TEOR DE CORTE.	46
FIGURA 28: REALCES OTIMIZADOS COM A <i>WIREFRAME</i> DE CONTROLE. ...	47
FIGURA 29: REGIÕES DE OTIMIZAÇÃO SEM REALCES.....	47
FIGURA 30: CENÁRIO SUB-ECONÔMICO.....	48
FIGURA 31: REALCES SUB-ECONÔMICOS.....	49
FIGURA 32: COMPARAÇÃO DE TEORES DOS CENÁRIOS MANUAL E AUTOMÁTICO.	50
FIGURA 33: GEOMETRIA DOS REALCES DO MSO E DO <i>DESIGN</i> MANUAL. .	51
FIGURA 34: DISTRIBUIÇÃO DE MASSAS E TEORES DOS CENÁRIOS.....	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: MERGULHO POR SEÇÃO.....	30
TABELA 2: QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO POR SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA (EMPRESA X, 2021).....	33
TABELA 3: DIMENSÕES DA <i>FRAMEWORK</i>	35
TABELA 4: ÂNGULOS DE <i>DIP</i> E <i>STRIKE</i> PERMITIDOS.....	39
TABELA 5: PARÂMETROS PARA A OTIMIZAÇÃO.....	43
TABELA 6: TEORES RECALCULADOS COM A DILUIÇÃO.....	49
TABELA 7: CUBAGEM DOS CENÁRIOS.	52

SUMÁRIO

1. INTODUÇÃO	13
1.1. Informações iniciais	13
1.2. Objetivos.....	14
2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Planejamento de mina	15
2.2. Recursos e reservas	16
2.3. <i>Wireframe</i> e modelo de blocos	18
2.4. Definições: <i>Realces</i> , <i>stopes</i> e <i>strings</i>	20
2.5. MSO (Mineable Shape Optimizer)	21
2.6. Elementos de um corpo subterrâneo	22
2.7. Seleção do método de lavra subterrânea	25
2.7.1. Câmaras e pilares (<i>Room and pillar</i>)	26
3. METODOLOGIA	29
3.1. MSO	29
3.2. Parâmetros iniciais	29
3.3. Seleção do método de lavra	31
3.4. Definição dos parâmetros econômicos	33
3.5. Delimitação da <i>framework</i>	33
3.6. Definição da geometria dos <i>realces</i>	35
3.7. Controle de parâmetros	38
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	40
4.1. <i>Realces</i> manuais	40
4.2. Otimização no MSO - Cenário 1	43
4.3. Otimização no MSO - Cenário 2	45
4.4. Otimização no MSO - Cenário 3	48

4.5. Comparação entre o <i>design</i> manual e a otimização no MSO	50
5. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

1.1 Informações iniciais

Atualmente, a lavra de jazidas a céu aberto apresenta um número muito maior de minas em detrimento das minerações subterrâneas. Entretanto, Koppe (2015) diz que tem crescido cada vez mais o número de minas em subsolo em decorrência da escassez de recursos aflorantes, que já foram ou estão sendo lavrados, e dos corpos mineralizados estarem cada vez mais profundos.

Desenvolver condições econômicas, operacionais e seguras para a exploração destes depósitos profundos é um dos maiores desafios deste tipo de lavra. De acordo com Alford (2007), realizar o desenho de uma mina subterrânea é um problema conceitual muito mais difícil do que de uma mineração a céu aberto. A complexidade do problema se dá, principalmente, devido às dependências entre as atividades, ao número de variáveis e à grande incerteza geológica que é peculiar aos depósitos profundos em decorrência do alto custo de sondagem.

Devido à complexidade destes fatores, Sales (2019) afirma que, atualmente, baseados em modelos geológicos, diversos algoritmos vêm sendo desenvolvidos pelas empresas para determinar matematicamente os recursos lavráveis de um corpo em profundidade. Esses algoritmos, definem a forma dos realces de acordo com características geológicas, geotécnicas, operacionais e, essencialmente, econômicas. O uso de *softwares* para estimar a potencialidade da lavra, no caso de um estudo preliminar no longo prazo ou para o acompanhamento do que está sendo extraído no curto e médio e prazo, contribui para uma melhor assertividade das empresas quanto ao planejamento estratégico.

Nesse sentido, foi descoberto no Brasil, um novo depósito mineral em profundidade pela empresa estudada, que é referência no mercado brasileiro pela extração de minério em corpos profundos. Para um estudo preliminar do recurso, a organização determinou, de maneira manual, os realces lavráveis. Todavia, não conseguiu um resultado em que a geometria dos *stopes* tivessem compatibilidade operacional e nem que o VPL (Valor Presente Líquido) do empreendimento fosse maximizado considerando a principal premissa econômica, o teor de corte. Portanto, a aplicação de algoritmos é uma

alternativa para a determinação de realces mais compatíveis com a realidade operacional e econômica do negócio.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar a otimização de um corpo mineral de ouro utilizando o *software* MSO da Datamine Software, a fim de demonstrar a potencialidade do depósito e efetuar uma estimativa dos recursos lavráveis disponíveis. Além disso, definir os realces matemáticos lavráveis com dimensões e geometria mais operacionais que os *stopes* manuais gerados anteriormente pela organização e realizar uma análise comparativa entre os cenários manuais e os otimizados pelo MSO.

2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

2.1 Planejamento de mina

Planejar é programar as atividades de um cenário futuro e, especificamente no caso de um projeto de lavra de minas, o projeto de lavra e seus estudos pertinentes são desenvolvidos simultaneamente, em uma sequência de processos administrativos para a obtenção dos documentos legais junto às agências de fiscalização e controle da atividade (CURI, 2017).

O planejamento pode ser entendido como uma forma de organizar detalhadamente uma tarefa utilizando métodos apropriados para determinar as ações e etapas que devem ser seguidas para o alcance de metas estipuladas por uma empresa, organização ou órgão.

O planejamento de lavra então, segundo Faria (2016), deve ser realizado de modo que vise o melhor aproveitamento dos recursos minerais, recuperando-os de forma organizada e otimizando a quantidade dos recursos extraídos em função da maximização do lucro.

Para Hustrulid (1994) e Kuchta (2006), o planejamento é a fase de um projeto responsável por determinar a economicidade de um depósito mineral. O resultado dessa etapa é composto pela realização de um relatório de viabilidade, no qual se decide a viabilidade da extração, ou seja, se a lavra do corpo mineral é rentável ou não.

É possível definir ainda o planejamento de lavra como um plano de trabalho detalhado que descreve a programação e a organização das tarefas para a exploração de jazidas de forma eficiente e otimizada, que maximizem os recursos disponíveis e os lucros associados à extração, de maneira a atingir as metas propostas pelos *shareholders* da atividade.

No caso de uma mina subterrânea, o planejamento se constitui como um elemento importante para alcançar os objetivos de empreendimentos no cenário atual que é altamente competitivo. Esse planejamento se torna essencial em função das particularidades das minas subterrâneas, da dificuldade de se conhecer o corpo em profundidade e da locação das escavações subterrâneas (CURI; NEME; SILVA, 2011).

Devido a esta complexidade de realizar a lavra de depósitos em profundidade, os *softwares* disponíveis atualmente no mercado são ferramentas importantes para a obtenção de informações sobre os corpos mineralizados e, conseqüentemente, realizar um planejamento mais assertivo.

Realizar o planejamento por meio de ferramentas computacionais gera uma série de benefícios para a mina, como uma maior eficiência de informações relacionadas à localização, geometria e ao acesso do corpo, o que contribui para as fases subsequentes ao planejamento, sendo que a operação será mais bem direcionada e, por existir mais conhecimento sobre a jazida, também será mais segura.

Dentro do planejamento operacional de lavra existe uma segmentação em três tipos que se referem a uma ordem cronológica e temporal: planejamento de longo prazo (estratégico), planejamento de médio prazo (tático) e planejamento de curto prazo (operacional).

- **Planejamento de longo prazo:** está relacionado às atividades estratégicas que uma empresa realiza para alcançar seus objetivos. Nesse sentido, segundo Thorley (2012), esse tipo de planejamento é iniciado nos estudos de pré-viabilidade e se estende ao longo de toda a vida útil da mina, buscando sempre maximizar o retorno financeiro associado à exploração do minério.
- **Planejamento de médio prazo:** tem como finalidade principal o uso eficiente dos recursos disponíveis para atingir objetivos previamente definidos em uma estratégia, isto é, são as metas e ações decompostas da estratégia do planejamento de longo prazo (ALMEIDA, 2017)
- **Planejamento de curto prazo:** tem como objetivo o controle de qualidade do material mássico, a alimentação das usinas de beneficiamento, controle de custos e a utilização de equipamentos. Por isso é considerado o planejamento operacional em que as atividades são organizadas e planejadas em segmentos progressivos diários, semanais, mensais, trimestrais e anuais (ALMEIDA, 2017).

2.2 Recursos e reservas

Os recursos e reservas minerais são conceitos importantes para vários profissionais, especialmente os engenheiros de planejamento de mina, geólogos e os *shareholders*.

Recursos podem ser definidos, como menciona Jorc (1999), como uma concentração de material natural com qualidade e /ou teor que sejam razoavelmente aproveitáveis de forma econômica e factível na atualidade ou no futuro. Os recursos são

classificados de acordo com o nível de informação e confiabilidade dos dados em três tipos: inferido, indicado e medido.

Assim, o recurso inferido é aquele que em se tem a menor quantidade de informações e a amostragem é limitada, tendo um menor índice de confiabilidade. O recurso indicado é aquele em que as estimativas são confiáveis e corretamente espaçadas, sendo que a amostragem normalmente ocorre em regiões de afloramento, trincheiras e poços. Enquanto o recurso medido é o mais confiável de todos devido suas estimativas serem diretas e com uma malha densa de amostragem, comprovando a permanência das propriedades (JORC, 1999).

Uma reserva mineral é um recurso que apresenta viabilidade técnica e econômica para a produção, ou seja, à medida que os fatores modificadores do meio, como economia, tecnologia, meio ambiente e outros, vão se transformando, os recursos podem virar reservas. Entretanto, devido ao recurso inferido não possuir um bom nível de confiabilidade, ele não é considerado na conversão para reserva, apenas os recursos indicado e medido (Figura 1).

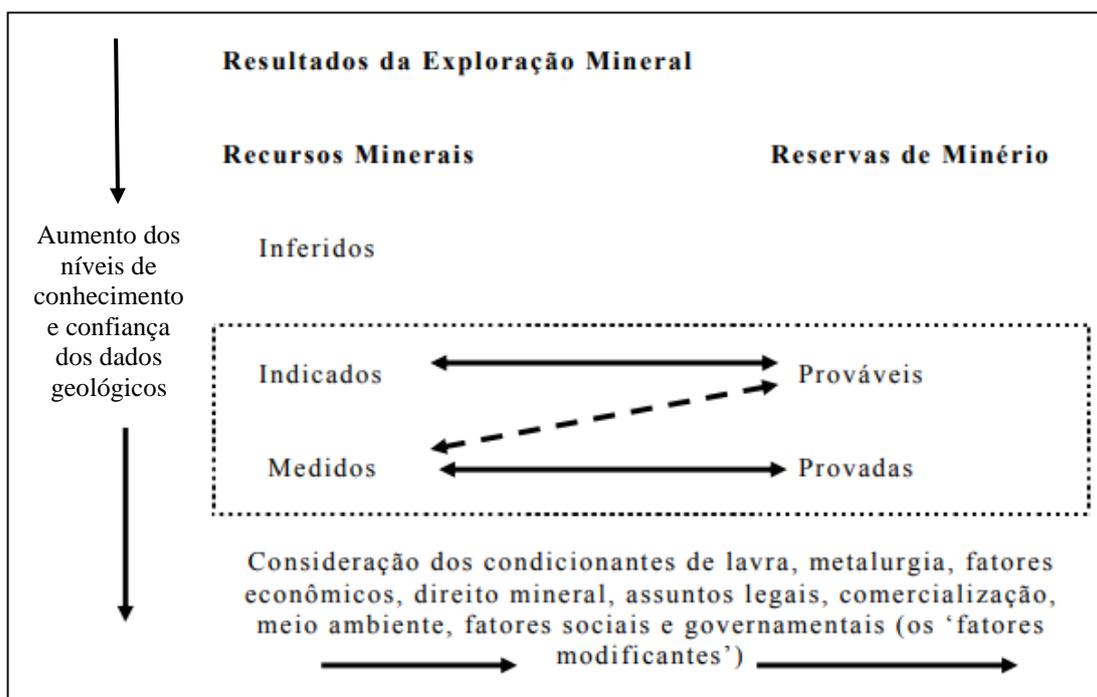


Figura 1: Recursos e reservas (JORC, 1999).

As reservas também podem ser segmentadas em subtipos, a provável e a provada, que também estão correlacionadas ao grau de confiança dos dados usados para as estimativas do depósito. Assim, a reserva provável pode ser oriunda de recursos indicados

e medidos, enquanto a reserva provada se origina apenas de recursos medidos, já que estes possuem informações geológicas mais confiáveis.

2.3 *Wireframe* e modelo de blocos

De acordo com a Datamine (2020), uma *wireframe* é um modelo geométrico que descreve uma superfície 3D. Nos *softwares* da empresa, um objeto geométrico é desenhado com linhas de forma semelhantes a um modelo feito de arame, por isso o termo *wireframe*, cuja tradução é “estrutura de arame”.

Embora modelos geométricos possam usar polígonos complexos, como hexágonos, as *wireframes* do formato Datamine usam polígonos simples (triângulos). Esses triângulos são ligados entre si para formar uma superfície contínua.

As *wireframes* podem ser do tipo fechadas, quando são sólidos fechados, ou do tipo abertas, quando são superfícies, como ilustra a Figura 2.

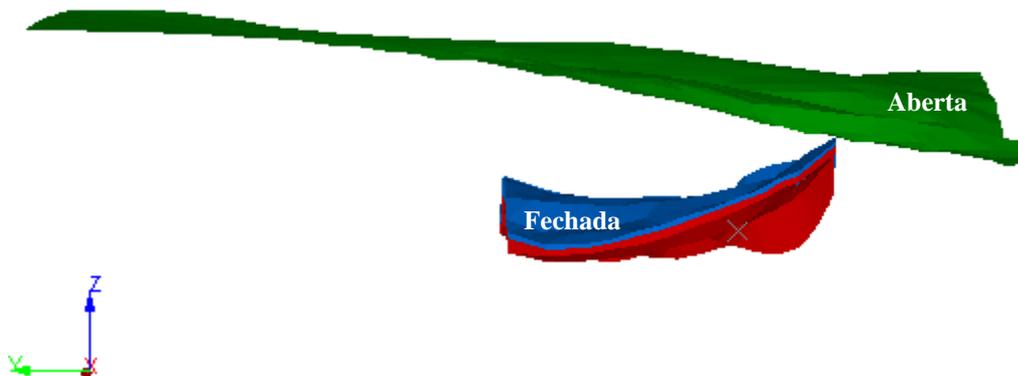


Figura 2: *Wireframes* abertas e fechadas.

Wireframes podem representar diversos aspectos e estruturas relacionadas à lavra:

- Superfícies topográficas;
- Sólidos de lavra;
- *Stopes*;
- Estruturas de acessos e desenvolvimento (rampas, galerias, *raise*);

- Características geológicas modeladas ou interpretadas, como superfícies de falhas, de contatos litológicos e volumes de corpos de minério;
- Cavas planejadas.

Para a construção das *wireframes* são consideradas informações geológicas levantadas em campo por meio de ensaios de amostragens e por furos de sondagem, por exemplo. A partir dos dados é realizado o modelamento geológico por meio da interpretação de seções geológicas que possibilitam ao profissional limitar interativamente as litologias presentes no depósito.

A partir da *wireframe* criada que delimita o corpo de minério, é criado o modelo de blocos, isto é, a *wireframe* é preenchida com blocos de tamanhos regulares definidos. O modelo de blocos é então uma representação tridimensional de uma mina ou depósito mineral, subdividido em blocos (AMARAL, 2008).

A discretização do modelo em blocos, de acordo com Neto (2017), é um pilar para a utilização de *softwares* para a estimativa de reservas, planejamento e sequenciamento da lavra. Fazer a segmentação de um modelo em blocos significa atribuir informações de teor, densidade, receita, custos, entre outros, para cada bloco gerado e isso facilita o trabalho na etapa de valoração dos blocos e definição dos limites lucrativos de lavra.

As dimensões dos blocos variam de acordo com as características do depósito mineral e a especificidade dos parâmetros posteriores que farão a lavra se tornar operacional, todavia, são comumente regulares.

Na Figura 3 é mostrado um modelo de blocos gerado a partir de uma *wireframe* de um corpo mineralizado.

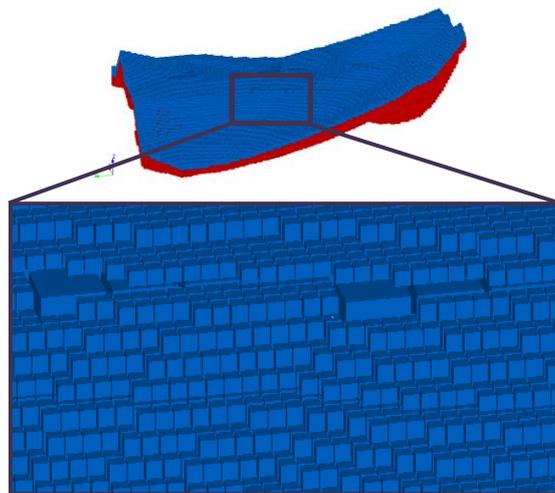


Figura 3: Modelo de blocos.

2.4 Definições: *stopes*, *realces* e *strings*

Os realces ou *stopes* na língua inglesa, são as formas que representam os sólidos que serão lavrados em profundidade. As dimensões dos realces são definidas de acordo com o método de lavra, as características geotécnicas do maciço rochoso e o tamanho dos equipamentos.

Normalmente, especialmente em lavras por *sublevel stope*, os sólidos do corpo de minério são segmentados em painéis e esses painéis são subdivididos em *stopes*, como mostra a Figura 4.

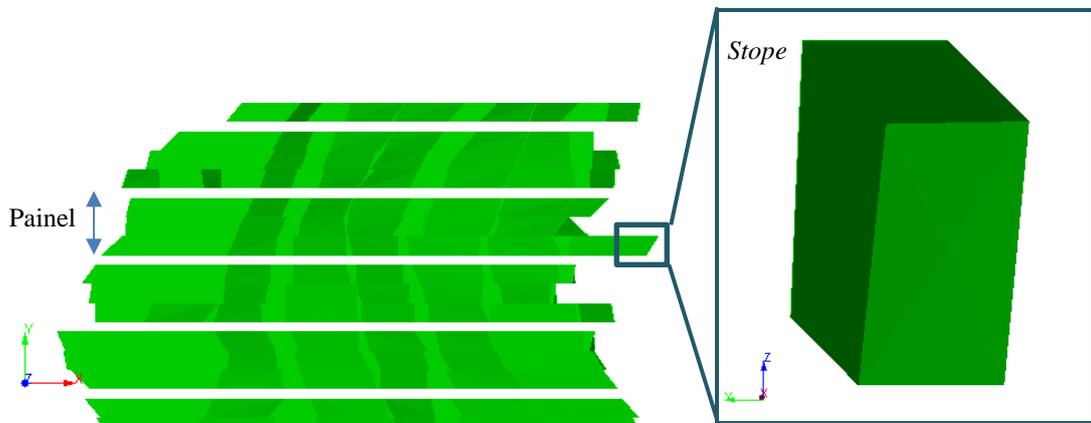


Figura 4: Painéis e *stope*.

Outro conceito importante dentro dos *softwares* da Datamine é o de *strings*, que são linhas utilizadas no espaço tridimensional para representar realces, estruturas de desenvolvimento e ventilação de minas. As *strings* são, normalmente, base para a geração de superfícies e sólidos. Na Figura 5 são representadas *strings* de uma rampa de acesso em uma mina subterrânea.

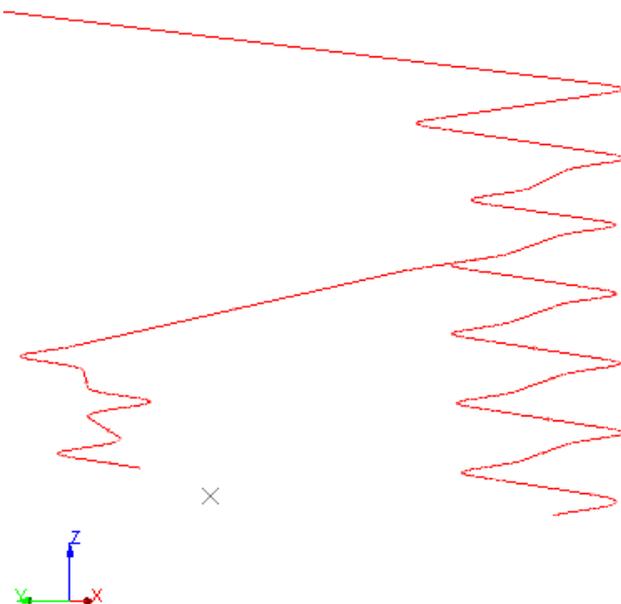


Figura 5: *Strings* de uma rampa de acesso.

2.5 MSO (Mineable Shape Optimizer)

O Mineable Shape Optimizer é usado para produzir formas de *stope* a partir de um modelo de blocos que representa espacialmente a localização da mineralização. Os algoritmos do MSO contam com um modelo de blocos de subcélula para definir a localização espacial da mineralização (geralmente definida a partir de um *wireframe* geológica).

O MSO simula o que um engenheiro racional faria, gerando *strings* em seções, vinculando-as para criar uma forma de *wireframe* e, em seguida, avaliando as *wireframes* em relação a um modelo de blocos. O MSO fornece um formato de *stope* que maximiza o valor do recurso recuperado acima de um corte, ao mesmo tempo que fornece parâmetros de mineração práticos, como largura mínima e máxima, diluições de paredes previstas, ângulos mínimos e máximos da parede, distâncias de separação mínimas entre realces paralelos e subparalelos, alturas e larguras mínimas e máximas, etc.

No MSO existem dois métodos de otimizações: a prismática e a por *slice*. O Método do Prisma é tipicamente aplicável a corpos de minério maciços ou depósitos largos cujos *stopes* tendem a ser projetados em um padrão de grade. Já o Método do Slice é aplicado a corpos de minério que vão desde estreitos a largos do tipo tabular, que podem ser subverticais a sub-horizontais e também é adequado para múltiplas lentes de minério paralelas a subparalelas e / ou aberturas.

2.6 Elementos dos corpos subterrâneos

Como os corpos de minério são variáveis e, muitas vezes, heterogêneos, para uma melhor compreensão do comportamento dos depósitos em profundidade, é necessário entender quais os elementos geológicos e geométricos os compõem.

O *strike* é a orientação espacial conhecida como a extensão de um corpo mineralizado, isso significa que, conforme Dang (2014), é definido como a linha formada pela intersecção da superfície de fratura com um plano horizontal imaginário.

De acordo com Dang (2014), o *dip direction* ou direção de mergulho é o ângulo positivo formado com a direção norte, que é medido no sentido horário até a projeção horizontal da linha de queda ao olhar para baixo. A direção de mergulho é sempre perpendicular ao *strike*, por isso, Dang (2014) diz que ela pode ser definida como:

$$dip\ direction = strike + 90^\circ$$

Hamrin (1986) e Dang (2014) afirmam que o *dip* (mergulho) é o ângulo que representa a inclinação do corpo mineralizado, isto é, o ângulo entre o plano de fratura do minério e o plano horizontal. A Figura 6 esquematiza o mergulho, direção de mergulho e o *strike* de um corpo mineralizado.

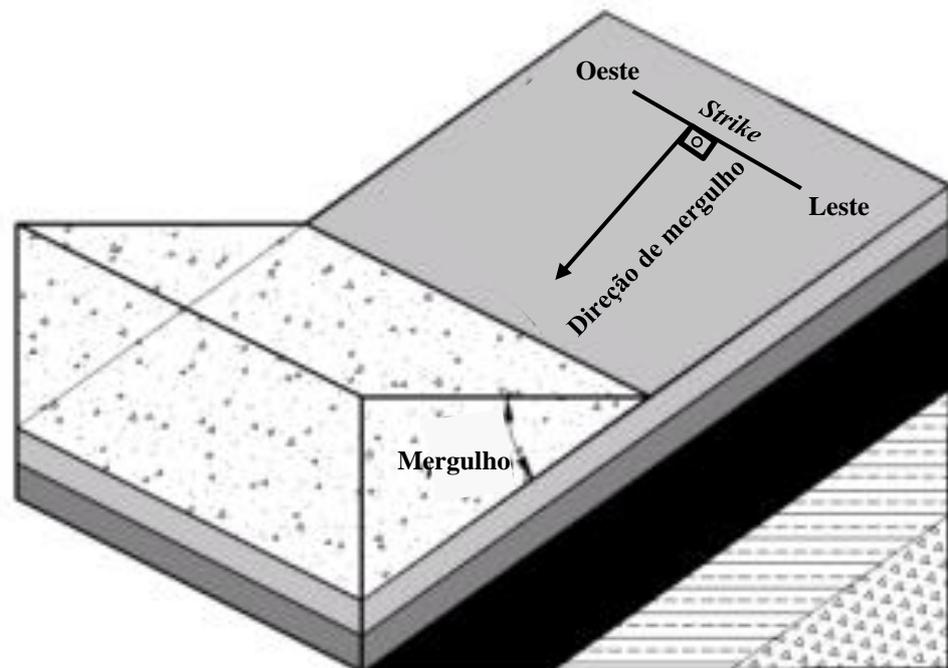


Figura 6: Mergulho, direção de mergulho e *strike* (Adaptada de Dung, 2014).

A potência pode ser definida como a espessura de um depósito mineral. Existem dois tipos de potência, a verdadeira e a aparente, sendo a primeira medida perpendicularmente ao *strike* e a segunda verificada como uma distância horizontal (Figura 7).

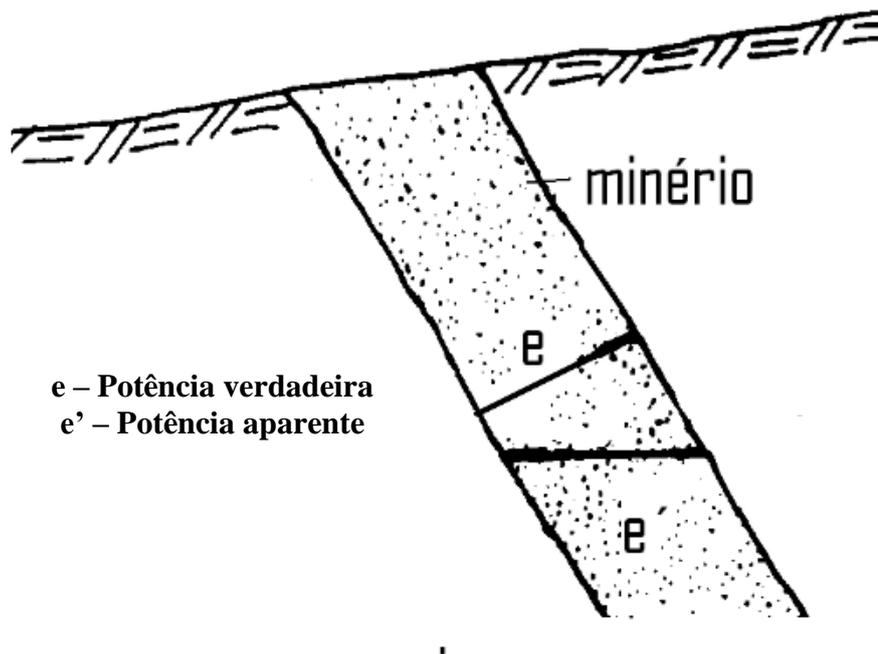


Figura 7: Potência de um corpo mineral (Adaptada de Tatiya, 2014).

Outros elementos importantes dos corpos subterrâneos são o *hanging wall* e o *footwall*, popularmente conhecidos no Brasil como capa e lapa, respectivamente. Hamrin (1986) conceitua o *hanging wall* como toda a rocha existente acima e o *footwall* como toda rocha encaixante presente abaixo do depósito mineral. Na Figura 8 é apresentado um desenho esquemático com os elementos explicados acima.

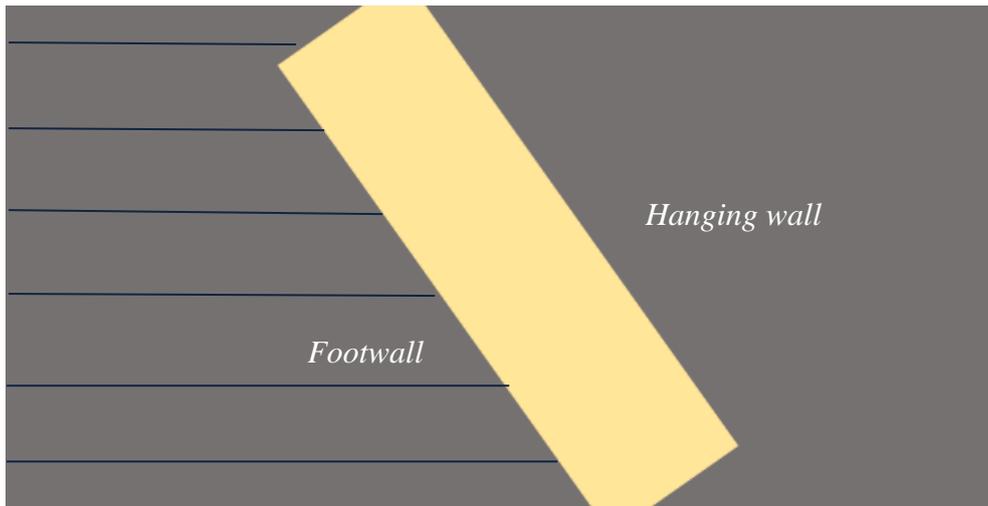


Figura 8: *Hanging wall* e *footwall*.

Quanto a geometria dos corpos de minério, eles podem ser tabulares ou massivos, sendo que os tabulares podem apresentar diferentes mergulhos, que são classificados segundo Moser e Wimmer (2018) como baixo, médio e alto (Figura 9).

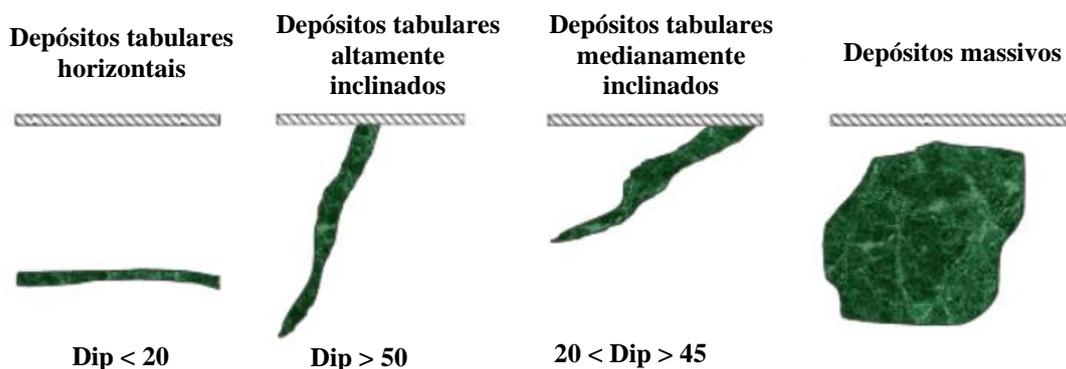


Figura 9: Geometria dos depósitos (Adaptada de Moser e Wimmer, 2018).

Um elemento que também serve como parâmetro decisor na escolha do método de lavra é a diluição. Para Silva (2020), a diluição representa a quantidade de estéril (rocha encaixante) que contamina o minério, podendo ser planejada, não planejada e operacional (Figura 10). Essa quantidade, normalmente expressa em porcentagem, influencia na seletividade e na recuperação do método de lavra adotado e, conseqüentemente, impacta os custos de produção.

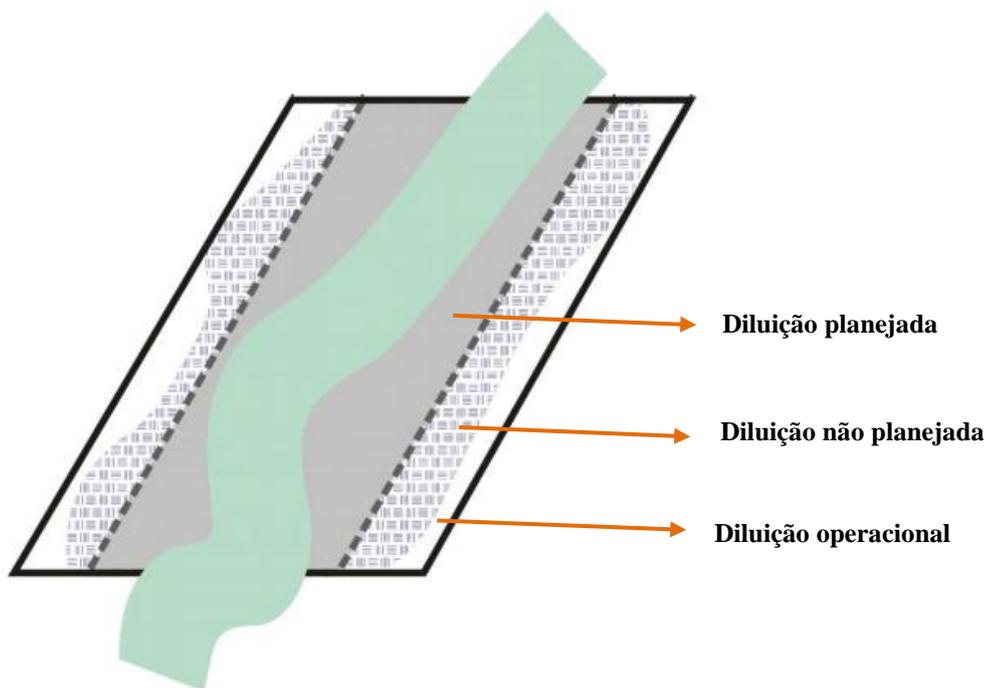


Figura 10: Tipos de diluição (Adaptada de Datamine, 2020).

2.7 Seleção do método de lavra subterrânea

Para executar a exploração em profundidade existem diversos métodos de lavra. A classificação desses métodos é fundamentada em três princípios básicos que consideram a sustentação, a geotecnia e a deformação das aberturas subterrâneas: abandono de pilares, enchimento e abatimento.

Curi (2017) diz que o abano de pilares é um princípio em que o desmonte do minério acontece de maneira parcial, sendo que uma parte da reserva é usada como pilares para promover a sustentação das aberturas e, normalmente, não é recuperada. O autor afirma ainda que o enchimento ocorre quando todo o minério é desmontado e, à medida que a lavra acontece, o vazio deixado pelos alargamentos é preenchido com material estéril que dará suporte às rochas encaixantes. E no princípio do abatimento é permitida ou induzida a deformação e a ruptura do maciço rochoso de forma controlada.

Na Figura 11 são esquematizados os princípios e a distribuição dos métodos de lavra subterrânea.

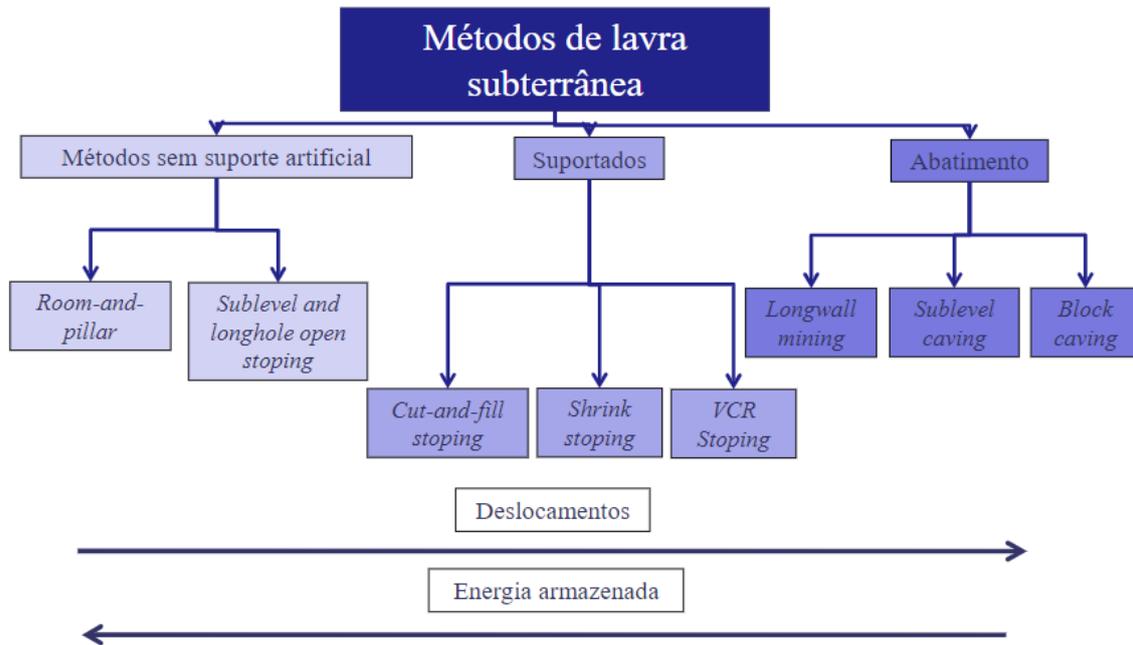


Figura 11: Métodos de lavra subterrânea (Silva, 2020).

A escolha pelo método de lavra adequado impacta diretamente a produtividade, recuperação, segurança e os custos de lavra. Em função disso, a análise para determinar o método que melhor se aplica ao depósito é desafiadora por envolver aspectos de todo o empreendimento mineiro, para que a lavra seja ao final lucrativa.

2.7.1 Câmaras e pilares (*Room and pillar*):

O método de câmaras e pilares (C&P) utiliza-se do princípio do abandono de pilares para a lavra do minério. Segundo Hamrin (1986) esse método é aplicado para depósitos tabulares com baixo mergulho e com espessura limitada, além de usar pilares verticais para sustentar o material existente no *hanging wall*. A lavra é normalmente realizada em *stopes* abertos.

Os pilares naturais são formas prismáticas constituídas de material de minério que não são lavrados, temporariamente ou de forma permanente, e sustentam as aberturas feitas para a exploração (câmaras). As dimensões dos pilares, como altura e área basal, são definidas de acordo com as características de resistência geomecânica do maciço rochoso e com a profundidade do depósito.

Curi (2017) afirma que pelo método preservar a superfície do teto e manter os terrenos superiores intactos, ele assegura a estabilidade de estruturas superficiais e preserva o curso d'água, vias de acesso e galerias. Todavia, ainda de acordo com o autor,

não são só pelas características geométricas e geotécnicas do corpo que o método é aplicado. O custo é o fator mais importante e que determina, na maioria das vezes, pela adoção dessa técnica. O C&P possui um custo baixo associado quando se comparado com os outros métodos com fundamentos no enchimento e no abatimento, ainda que o no câmaras e pilares aconteça o abandono parcial da reserva.

O C&P é indicado, por não lavrar totalmente a jazida, para corpos que não possuam um grande valor econômico agregado, como carvão, gesso, calcários e ardósias, mas pode ser empregado para materiais metálicos também.

A Figura 12 exhibe uma aplicação do *room and pillar* em depósito tabular. É nítido que conforme vai acontecendo a lavra por meio das galerias de produção, que neste caso são as câmaras, os pilares de sustentação vão sendo abandonados. Como diversas aberturas podem ser construídas de maneira simultânea, é possível realizar a exploração por mais de uma frente de avanço ao mesmo tempo, o que demonstra a alta capacidade de produção do método.

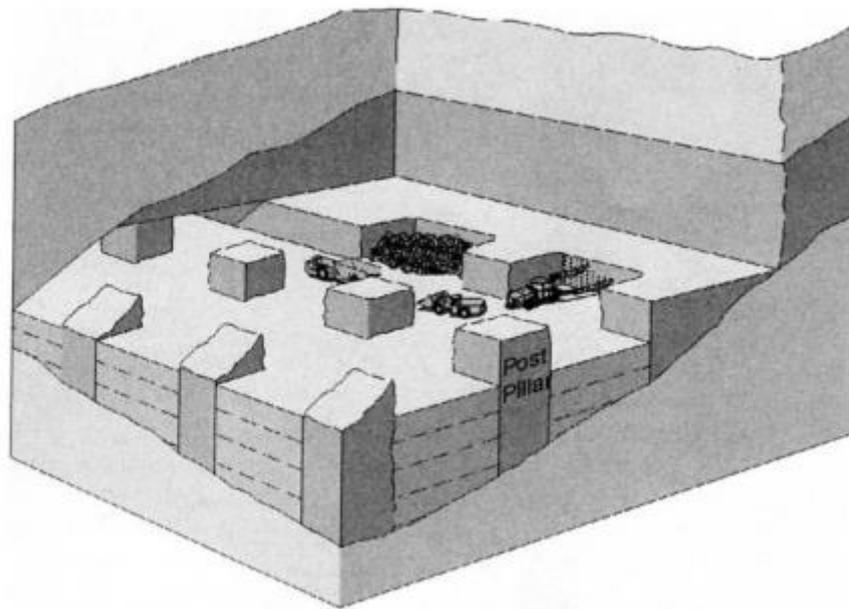


Figura 12: Câmaras e pilares (Hamrin, 1986).

Para a aplicação adequada do C&P, alguns parâmetros limitadores devem ser analisados (CURI, 2017):

- **Resistência do minério:** moderada a baixa.
- **Resistência da rocha encaixante:** moderada a alta.
- **Forma dos depósitos:** preferencialmente tabular.

- **Inclinação dos depósitos:** preferencialmente horizontal ou sub-horizontal, admitindo um mergulho geral máximo de 15° e 40°, respectivamente.
- **Tamanho e potência da jazida:** grande extensão com potência máxima de 5 metros.
- **Teor:** moderado.
- **Profundidade:** rasa a moderada, sendo no máximo 500m.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a otimização dos realces com *design* mais operacionais que os criados inicialmente pela organização, foi a aplicação do *software* MSO ao modelo de blocos seguindo alguns parâmetros econômicos, geométricos e geológicos.

3.1 MSO (Mineable Shape Optimizer)

De maneira geral, o otimizador usa como *input* um modelo de blocos geológico, isto é, um modelo gerado com informações geológicas assinaladas, como teor, tonelagem, volume e recurso. Após a definição dos parâmetros financeiros, geotécnicos e operacionais, que variam de acordo com as características do corpo mineralizado e os objetivos da empresa, e a aplicação deles no modelo de blocos, o *software* disponibiliza como resultado uma *wireframe* com os realces ótimos (Figura 13), que representam os *stopes* de minério disponíveis para a lavra de acordo com as premissas estabelecidas. Outros *outputs* são as *strings* que delimitam os realces e os relatórios de cubagem.

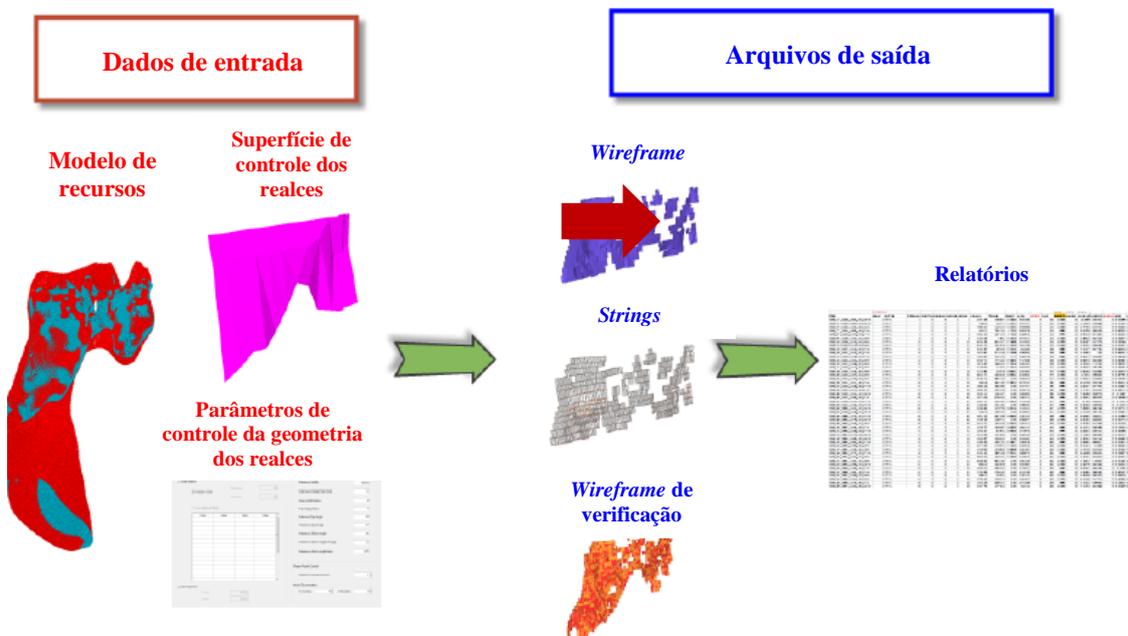


Figura 13: *Inputs* e resultados do MSO (Datamine, 2020).

3.2 Parâmetros iniciais

Como a lavra em profundidade por ser feita por diversos métodos de lavra, inicialmente, são identificadas as características morfológicas do corpo mineralizado, como mergulho, potência, *strike* e forma, que serão utilizadas como parâmetros de referência para a geração dos realces no MSO.

Para a definição do mergulho médio do corpo, foram utilizados dados fornecidos pela empresa X, em que foram criadas quatro seções ao longo do *strike* do corpo, ilustradas na Figura 14, e calculado *dip* perpendicular em cada seção (Tabela 1).



Figura 14: Seções para averiguação do *dip*.

Tabela 1: Mergulho por seção.

Seção	<i>Dip</i> (graus)
1	20
2	18
3	16
4	15

Através dos mergulhos verificados acima, foi calculado o *dip* médio do corpo e obteve-se um valor em graus de 17.25, sendo usado no MSO o valor de 17.

Com o modelo de blocos, outras informações usadas foi uma densidade média de 2.7 g/cm³ e um teor de AU *default* igual a 0. Este teor inicial é definido para os blocos presentes no modelo que não apresentem um valor de teor associado a ele, e é igualado a zero para que não aconteça uma superestimação do potencial do depósito.

Outro parâmetro que pode auxiliar na otimização do MSO é o uso de uma superfície de controle para definir a localização espacial do corpo mineralizado. A superfície de controle, normalmente, é uma *wireframe* geológica utilizada em conjunto com o modelo de blocos para definir a orientação geral esperada para os *stopes*. Caso a *wireframe* seja excessivamente complexa com as orientações reversas do mergulho e o *strike* com distâncias curtas, a orientação da superfície pode ficar em desacordo com a orientação prática do *stope*.

A *wireframe* geológica utilizada era uma superfície que, inicialmente, continha informações sobre o *hangwall* e o *footwall* do corpo de minério (Figura 15 parte A). Como o objetivo era controlar os limites do *footwall* para que os realces fossem mais operacionais no que se refere ao trânsito dos equipamentos e a direção de otimização é no eixo Z, a superfície foi segmentada e utilizada apenas para limitar o piso dos realces (Figura 15 parte B).

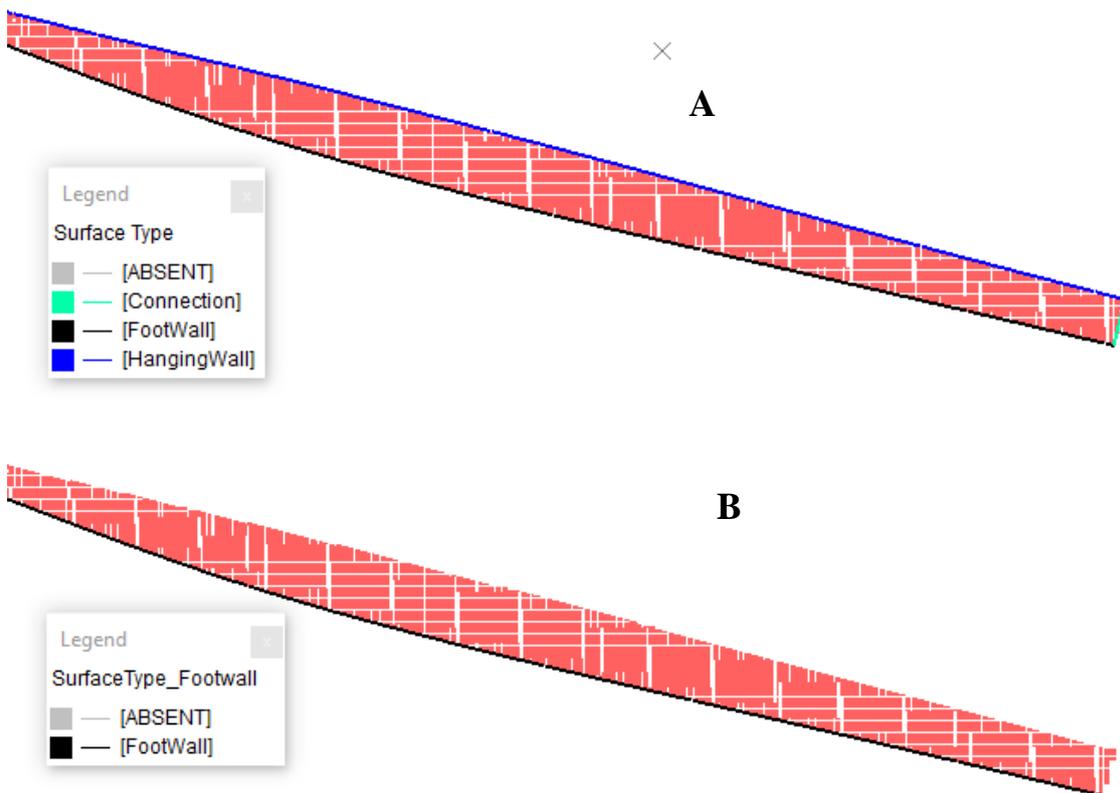


Figura 15: Superfície de controle.

3.3 Seleção do método de lavra

Para a seleção do método, são comumente utilizados parâmetros operacionais, geotécnicos e econômicos, como custo, produtividade, recuperação, diluição, seletividade, estabilidade, dentre outros. Como o objetivo geral é determinar a potencialidade do depósito, isto é, dimensionar a quantidade de material que é recurso para lavra, não serão analisados com demasiada minúcia esses fatores e sim consideradas as informações sobre o corpo mineralizado.

Desse modo, o MSO permite a otimização de corpos tabulares e massivos, com alta e baixa potência, com orientações diversas de *strikes* e até mesmo corpos com dobras. Então é necessário averiguar essas informações para que a otimização seja realizada da maneira mais assertiva possível.

O depósito apresenta forma tabular e é de grande extensão, além de ser sub-horizontalizado, sendo que sua inclinação média é 17°, e possui potência média de 6 m.

Outra característica importante é qualidade de suporte da rocha de minério e da encaixante, isto é, a capacidade de resistência delas. Para isso, a empresa X realizou um estudo preliminar das características geotécnicas do depósito e esses dados foram utilizados como critérios na seleção do método de lavra.

Neste estudo, foram consideradas as propriedades das rochas de minério, a do *hanging wall* e a do *footwall*. A análise foi realizada considerando dois sistemas de classificação geomecânicos, o Rock Mass Rating (RMR) e o Rock Quality Designation (RQD), parâmetros que auxiliam na determinação da resistência do maciço rochoso.

O RQD é um índice desenvolvido por Deere e Miller (1966) que estima o grau de compartimento do maciço e serve de complemento para a determinação do RMR, parâmetro desenvolvido por Bieniawski (1972) que auxilia na classificação do maciço quanto a sua estabilidade.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da averiguação e, segundo a classificação de Bieniawski (1989) (BARTON *et al.*, 1974), a rocha encaixante, ou seja, o *hanging wall* e o *footwall*, apresentam qualidade de regular para boa e o minério apresenta uma qualidade ruim.

Tabela 2: Qualidade do maciço rochoso por sistemas de classificação geomecânica (Empresa X, 2021).

MATERIAL	RMR	RQD
<i>Hanging wall</i>	51	82
<i>Ore</i>	30	42
<i>Footwall</i>	51	87

Desse modo, as características apresentadas atendem, de maneira geral, as premissas para a aplicação do método de câmara de pilares. Isso porque o a potência média de 6 m é razoável, já que o limite estimado é de 5 m (CURI, 2017); o corpo é tabular, com grande extensão e sub-horizontalizado (*dip* médio de 17°); a qualidade da rocha encaixante de regular a boa também se adequa ao esperado que era de boa a alta (CURI, 2017); e a qualidade do minério é baixa, o que também está de acordo com as premissas estipuladas pela literatura.

3.4 Definição dos parâmetros econômicos

O principal fator econômico para a viabilização de um recurso, ou seja, tornar um recurso medido ou indicado em uma reserva, é o teor dos blocos presentes no modelo. Como o intuito geral da mina é a maximização do lucro por meio do aumento do valor associado a cada bloco e a redução dos custos, quanto maior o teor, maior será o valor agregado de minério.

No MSO existem maneiras diversas de definir o teor de corte: por valores discretos; valores variáveis de acordo com a altura, tonelagem e elevação do *stope*; e pela definição de uma função benefício, que considera o teor, o preço de venda e os custos, e é normalmente aplicada para corpos poli metálicos.

Para o projeto em questão foi usado um *cut-off* com valor discreto igual 2 g/t, valor estabelecido pela organização de acordo com a realidade da mina e do depósito mineral.

3.5 Delimitação da *Framework*

As *frameworks* são espaços tridimensionais em formato de um cuboide utilizados para delimitar o modelo de blocos inicialmente especificado para a geração dos *stopes*. Normalmente, as dimensões da *framework* se estendem além das extensões do modelo em cada direção, encapsulando-o totalmente.

É possível definir configurações de orientação independentes para cada cenário que for especificado. Além disso, se o modelo de blocos de entrada for girado ou o corpo possuir uma inclinação mesmo dentro do modelo, também é possível rotacionar a *framework* para acompanhar a mesma inclinação (Figura 16).

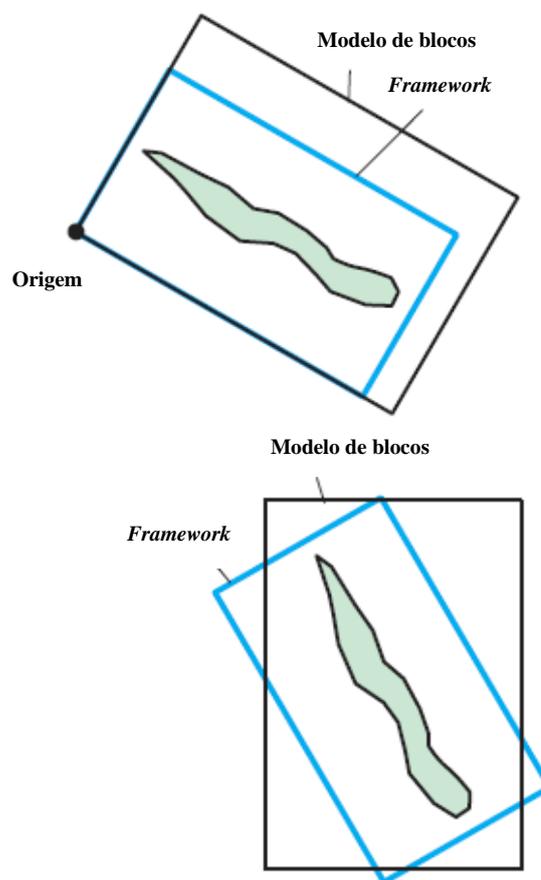


Figura 16: *Frameworks* rotacionadas (Datamine, 2020).

Os *stopes* resultantes da otimização serão gerados dentro do cuboide delimitado pela *framework*, por isso é comum que as dimensões da *framework* sejam estendidas para além do modelo para garantir que todos os possíveis realces sejam criados.

Para o corpo de minério trabalhado, as extensões da *framework* são mostradas na Tabela 3 e ilustradas na Figura 17. A coordenadas e rotação da *framework* foram definidas considerando a orientação do *strike* do corpo mineralizado.

Tabela 3: Dimensões da *framework*.

Eixo	Origem	Máximo	Distância	Ângulo de rotação (°)
X	339690	340050	360	-10
Y	8382050	8382690	340	0
Z	-300	0	600	0

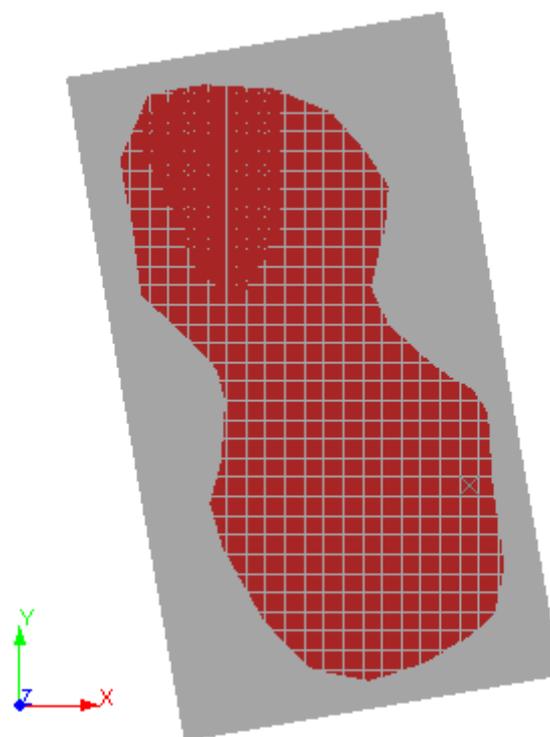


Figura 17: *Framework* e o modelo de blocos.

3.6 Definição da geometria dos realces

No caso do depósito de AU estudado, as características do corpo mineralizado (sub-horizontal, tabular e com uma baixa potência) indicam que o método que deve ser adotado é o por *slice*.

No Método de Slice, é importante definir em qual plano o corpo de minério está localizado para que o terceiro eixo de orientação seja usado como a direção de otimização. Desse modo, segundo a Alford Mining Systems (2020), empresa fornecedora do *software*, o corpo de minério pode estar localizado no espaço nesse método em três categorias:

- Vertical: quando a orientação do corpo de minério é XZ ou YZ.
- Horizontal: quando a orientação do corpo de minério é XY ou YX.
- Transversal: quando a orientação do corpo de minério é XZ ou YZ e a otimização dos realces é transversal ou vertical.

As *frameworks* com orientação XY | YZ | XZ | YZ são convencionalmente mapeadas com os seguintes eixos de direção:

- U (X): é considerada a direção primária dos *stopes*, sendo a direção do *strike*.
- V (Y): é considerada a direção secundária (altura quando é vertical e largura quando é horizontal).
- W (Z): é a direção transversal terciária (largura para vertical e espessura para horizontal).

Então, como o corpo mineralizado possui um mergulho de 17°, é considerado horizontal e seus eixos de direção são no plano XY, como exhibe a Figura 18.

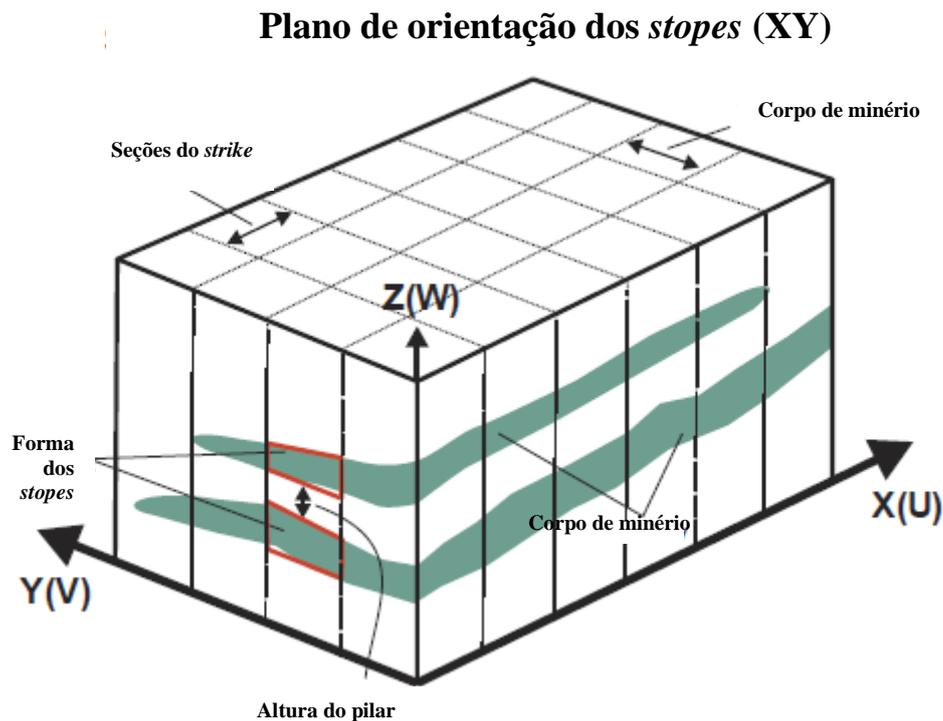


Figura 18: Plano de orientação XY do corpo de minério (Datamine, 2020).

Outro aspecto definido para controlar a forma dos realces foram as dimensões dos *stopes* nas direções X e Y, sendo que a dimensão na direção Z seria resultado da otimização. Na direção de X, sentido de extensão do corpo mineral, foi estabelecido um

valor de 5 m para os realces, enquanto em Y foram usadas *strings* de controle para limitar os realces.

As *strings* de controle são utilizadas quando se deseja delimitar a geometria ou posição do corpo em uma direção, sendo que podem ser aplicadas para formas fixas ou variáveis.

Há algumas maneiras de usar esse método para restringir os *stopes* verticalmente e horizontalmente. Na Figura 19 são mostradas *gradient strings*, aplicadas normalmente para corpos de grande extensão e com uma diferença de nível significativa, que delimitam a face dos *stopes* no eixo V (Y) ao longo do *strike* no eixo U (X). É perceptível que, os realces obedecem ao formato e à inclinação das *strings*.

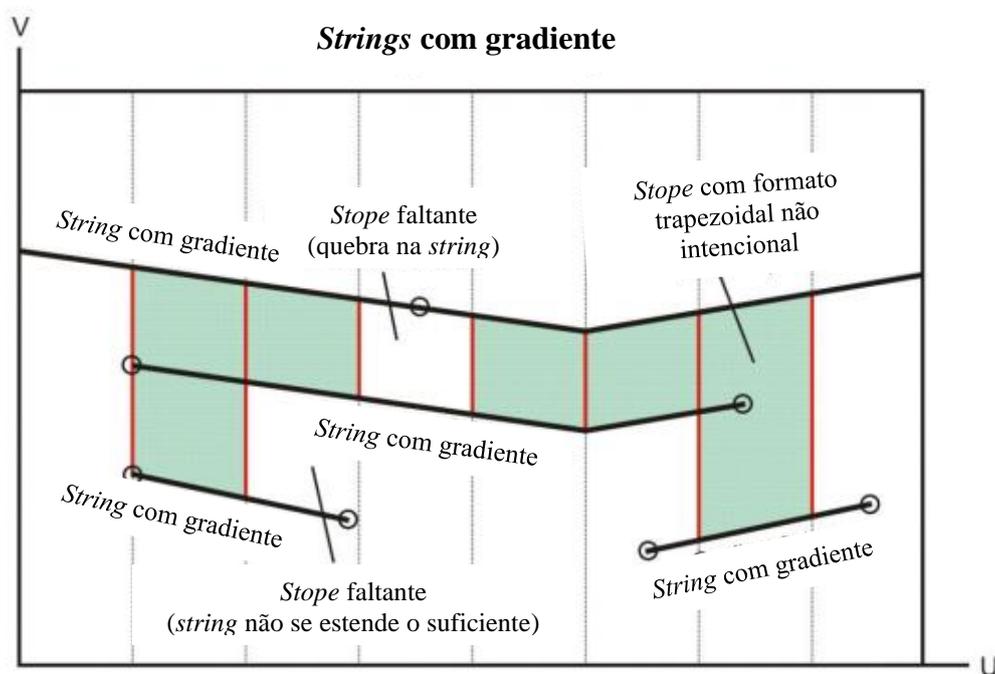


Figura 19: *Gradient strings*. (Datamine Software, 2020).

Os pilares de sustentação da mina, que podem existir ou não de acordo com o método de lavra adotado, também são definidos nesta etapa. Isso ocorre de maneira simultânea a definição das dimensões dos realces. Neste corpo de minério, como o método de exploração é o de câmara e pilares, ocorre o abandono de pilares verticais que servirão de suporte natural para as aberturas.

Como o intuito geral é uma análise de recursos e para a definição dos pilares e das câmaras é necessário um estudo de dimensionamento dessas estruturas, a otimização foi realizada sem a atribuição da dimensão dos pilares. As câmaras, como serão a própria

lavra do minério, possuem o mesmo tamanho das dimensões dos *stopes* (delimitados pelas *strings* de controle na direção de Y e com 5 m em X).

3.7 Controle de parâmetros

Para que a otimização ocorra de maneira ainda mais eficiente, é importante o controle de alguns parâmetros, como a potência mínima exigida, a distância mínima entre os *stopes* paralelos e a variação do *dip*.

A potência mínima utilizada foi definida pela empresa de acordo com os equipamentos de operação da mina, sendo um valor de 1.5 m. Isso significa que, como a potência é variável ao longo do corpo de minério, o *software* realiza a otimização de modo que não sejam gerados *stopes* com potências inferiores a 1,5m, isso considerando a diluição máxima permitida. No MSO é possível usar para dimensões de potência, a aparente e a verdadeira, neste caso, foi utilizada a potência aparente.

Um fator relevante também é a distância mínima entre *stopes* paralelos, definida nesse projeto como 5m, em que são gerados pilares para garantir que a separação entre os realces ocorra de forma segura. Quando os realces do corpo mineralizado estão próximos ou paralelos, há uma preocupação com a estabilidade da região durante a lavra, pois o desenvolvimento de aberturas impacta na redistribuição de tensões no maciço rochoso e deve-se manter uma distância dimensionada de acordo com as características geotécnicas da rocha.

A diluição é um aspecto que impacta diretamente a economicidade do depósito devido a diminuição de teor de minério e o aumento de massa de estéril. Além do fator econômico, a diluição exerce influência no formato dos *stopes* gerados, pois a medida em que seu valor percentual é acrescido, ocorre um aumento na massa englobada em cada realce e uma diminuição do teor médio.

No corpo de minério em estudo há uma *wireframe* de controle restringindo o *footwall*, o que implica que os realces gerados não podem ultrapassar esse limite. Como a potência do corpo é baixa ao longo de toda a sua extensão, delimitar a diluição com um valor muito baixo poderia ocasionar na não geração dos sólidos em algumas regiões com potências menores. Por este fato, foi utilizada uma diluição de 100%, o que significa que o *software* pode otimizar a altura diluindo o *stope* ao máximo para viabilizar a lavra em questão de altura, mas isso respeitando a altura mínima e o *cut-off* determinados inicialmente.

Os ângulos estabelecidos para o *dip* e o *strike* também são parâmetros que podem ser controlados durante a otimização. Na prática, é permitido que esses ângulos oscilem dentro de um intervalo limitado (Tabela 4) para que na geração de *stopes* vizinhos, caso a forma dos realces não sejam as mesmas, não ocorra uma mudança abrupta na forma de um *stope* para o seu adjacente.

Tabela 4: Ângulos de *dip* e *strike* permitidos.

<i>Strike</i> (°)		<i>Dip</i> (°)	
Mínimo	-30	Mínimo	0
Máximo	30	Máximo	90
Variação	10	Variação	10

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Realces Manuais

Inicialmente, como um estudo de pré-viabilidade, foi realizada pela empresa a modelagem dos realces possivelmente econômicos. Esta modelagem foi feita de maneira manual, isto é, quando é utilizado os conhecimentos técnicos do engenheiro responsável, que considera parâmetros econômicos, geotécnicos e operacionais, para definir a geometria dos realces.

O modelamento manual também utilizou as *strings* das galerias de produção como referência para delimitar a dimensão de profundidade (eixo Y) dos *stopes* e o seu comportamento ao longo do *strike* do corpo (eixo X).

Na Figura 20 são exibidos, em vista de planta, os realces manuais criados e as estruturas de desenvolvimento e ventilação para o corpo de minério.

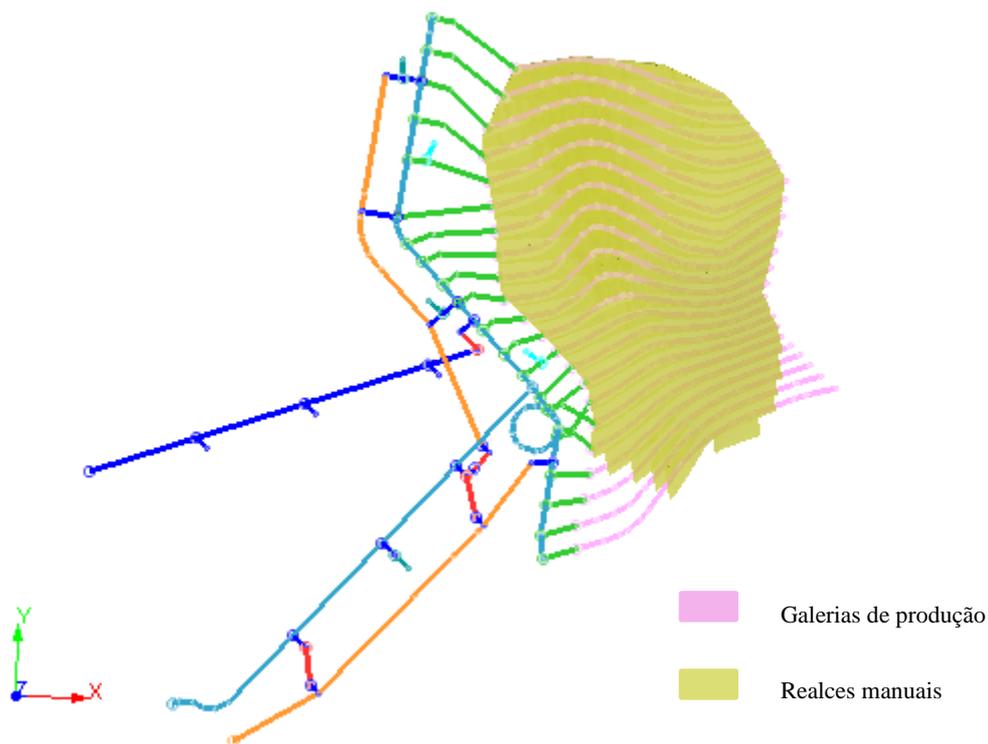


Figura 20: Realces manuais e *strings* de controle.

O sólido gerado manualmente não abrange toda a área do modelo de blocos (Figura 21 parte A), sendo localizado nas regiões mais ao norte e centrais do corpo de

minério, cujo teor de AU é mais elevado. Além disso, é possível notar que foram gerados *stopes* somente até o limite da última galeria de produção, como mostra Figura 21 na parte B.

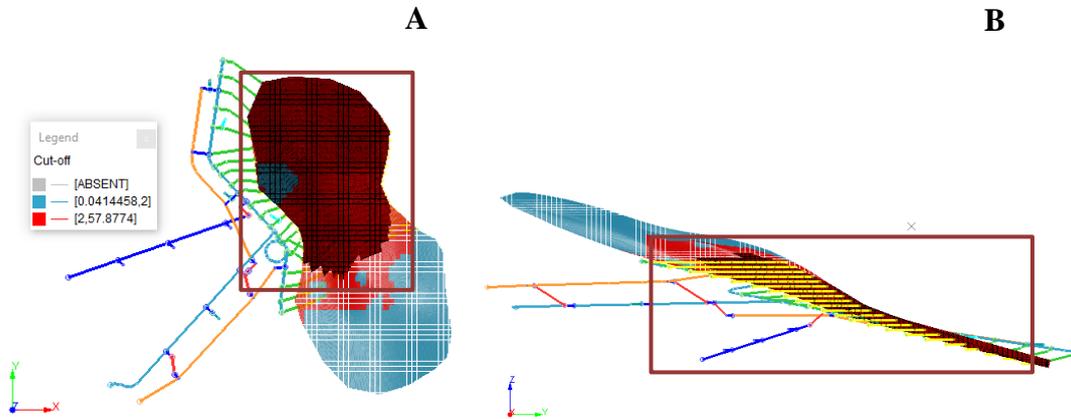


Figura 21: Realces manuais e corpo de minério em vistas de planta (A) e oeste (B).

Apesar do *design* manual apresentar resultados satisfatórios mostrando que os sólidos compreendem toda a região do modelo em extensão e obedecem ao desenvolvimento da mina, há fatores que tornam a sua utilização inviável, como a geometria dos realces, especialmente a altura em algumas regiões, e o teor de corte não respeitado em determinados locais.

No planejamento de qualquer mina existem aspectos que são cruciais para que a otimização ocorra de forma econômica, segura e operacional. Neste caso, os realces gerados não apresentam uma geometria operacional, pois a dimensão de altura obtida é inclinada e não vertical como o esperado.

Analisando uma seção vertical é notório que para realizar a operação de lavra por meio das galerias de produção (esquematizadas em rosa na Figura 22), uma parte do minério ficará imobilizada por causa do formato dos realces e, conseqüentemente, haverá uma redução da recuperação mássica o que pode influenciar para a inviabilização da exploração.

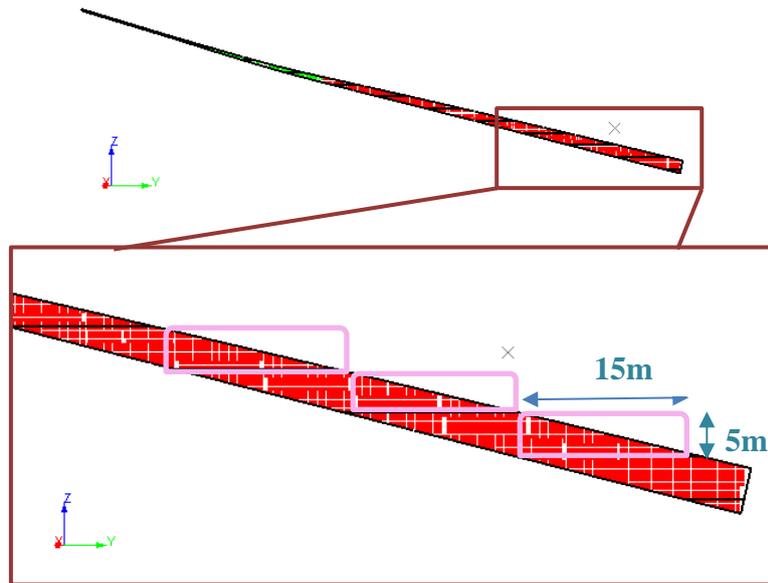


Figura 22: Seção vertical nos realces e no modelo de blocos.

Outro aspecto importante é que em alguns níveis do corpo de minério a altura do *stope* não atinge 1 m, o que implica na não operacionalidade dessas regiões, uma vez que foi assumido como premissa uma altura mínima de 1,5 m. Neste sentido, essa dimensão mínima exigida está relacionada com o dimensionamento dos equipamentos da mina em questão e, caso não seja atendida, resulta na impossibilidade da extração do minério.

Um fator econômico muito relevante para a otimização é o *cut-off* que, neste caso, é igual a 2 g/t. Na Figura 23 são evidenciados realces manuais gerados mesmo em locais cujo teor de ouro é inferior ao *cut-off*. Extrair material nessas circunstâncias pode acarretar prejuízo para o empreendimento mineiro, pois o conteúdo metálico da recuperação associada aquela região não trará benefício, ou seja, o valor agregado considerando o teor não será suficiente para suprir os custos e gerar lucro.

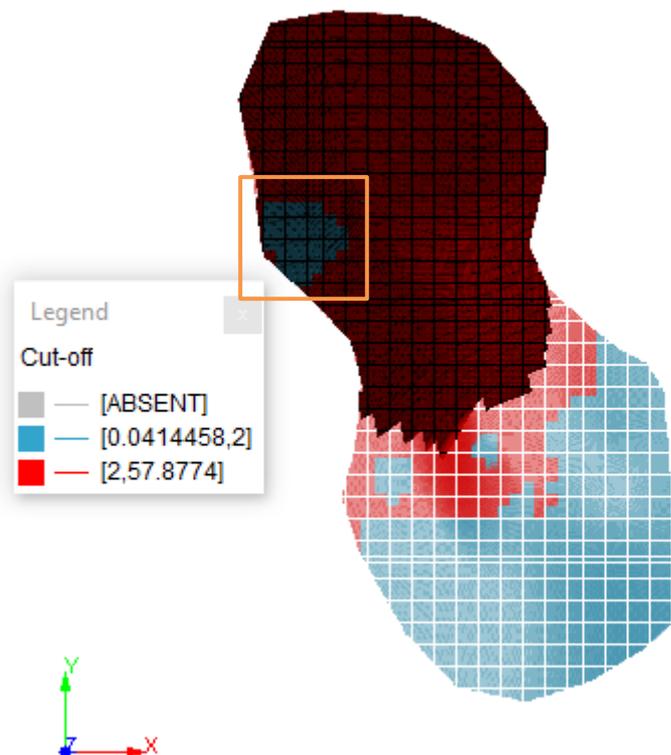


Figura 23: Realces gerados abaixo do *cut-off*.

4.2. Otimização no MSO – Cenário 1

No cenário 1 foram utilizados como parâmetros para a otimização os dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros para a otimização.

<i>Dip</i> médio	<i>Cut-off</i>	Altura mínima	Diluição Máxima	Densidade	Extensão (X)
17°	2 g/t	1,5 m	100%	2.7 g/cm ³	5 m

Além dos dados mostrados acima, também foram usadas as galerias de produção como *strings* de controle.

No caso deste corpo de minério, as *strings* do desenvolvimento são utilizadas como gradientes para definir os níveis do corpo mineralizado. Desse modo, as galerias superiores e inferiores funcionam como limites para o teto e o piso dos realces, respectivamente. O esperado, nesta situação, é que os sólidos sejam criados com a sua

altura variando entre as galerias de produção que crescem em direção ao *strike* (Figura 24), respeitando as variações de inclinação e formatos presentes nela.

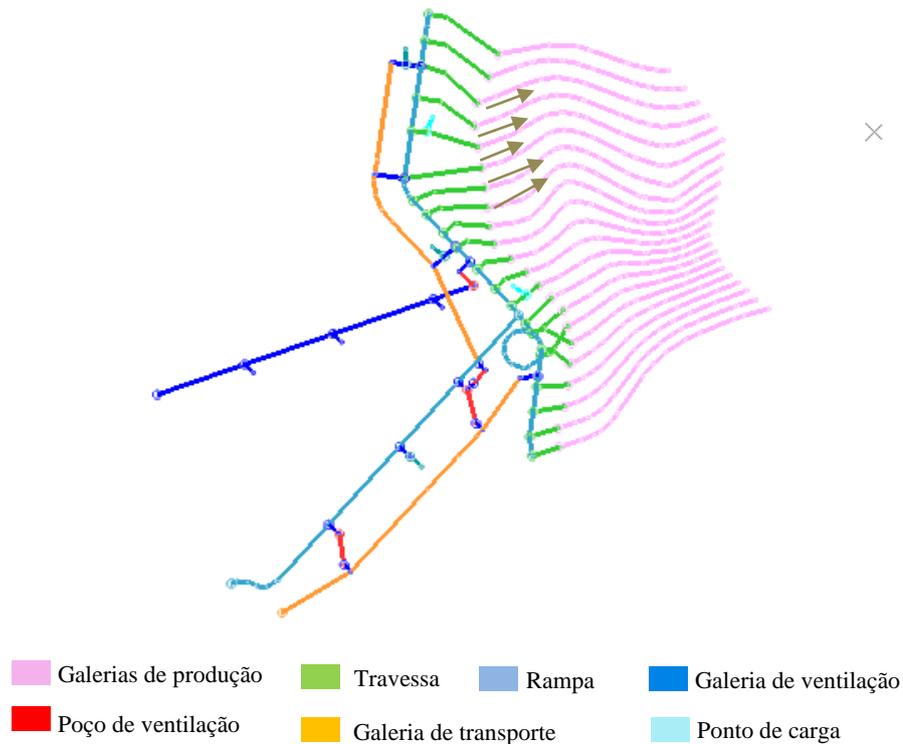


Figura 24: Galerias de produção usados como *strings* de controle.

Neste primeiro cenário não foi utilizada uma *wireframe* de controle para limitar a otimização em uma direção. Assim, como o eixo de otimização é o Z, significa que o *software* considera como fixas as dimensões definidas nos eixos X e Y e varia a altura na direção de Z de acordo com os fatores definidos no *input* e sem uma superfície que restrinja o *footwall* ou o *hangwall*.

O resultado da otimização demonstra que, como a *wireframe* de controle não foi utilizada, há uma variabilidade na forma de alguns realces e, apesar de esperada devido a direção de otimização, o fato de a base do realce não respeitar a superfície, implica em um problema operacional (Figura 25 parte A). Neste sentido, se o piso do *stope* não respeita o *footwall* delimitado pela *wireframe*, aquela região não é funcional para o trânsito dos equipamentos.

É verificado também que a altura dos *stopes* são verticais e as galerias de produção conseguem acessar a todo o corpo mineralizado, como mostra a Figura 25 na parte B.



Figura 25: Forma dos realces e teor de corte.

A otimização foi eficiente no que se refere ao parâmetro econômico, em que nos locais com teores inferiores ao teor corte, marcados em verde na Figura 26 parte A, não foram gerados sólidos de lavra. Há uma área em que, mesmo com o teor superior ao *cut-off*, os realces não foram criados (Figura 26 parte B). Isto pode ser explicado pelo uso das galerias para limitar a divisão dos níveis, sendo que o último realce gerado está delimitado pela *string* final de controle.

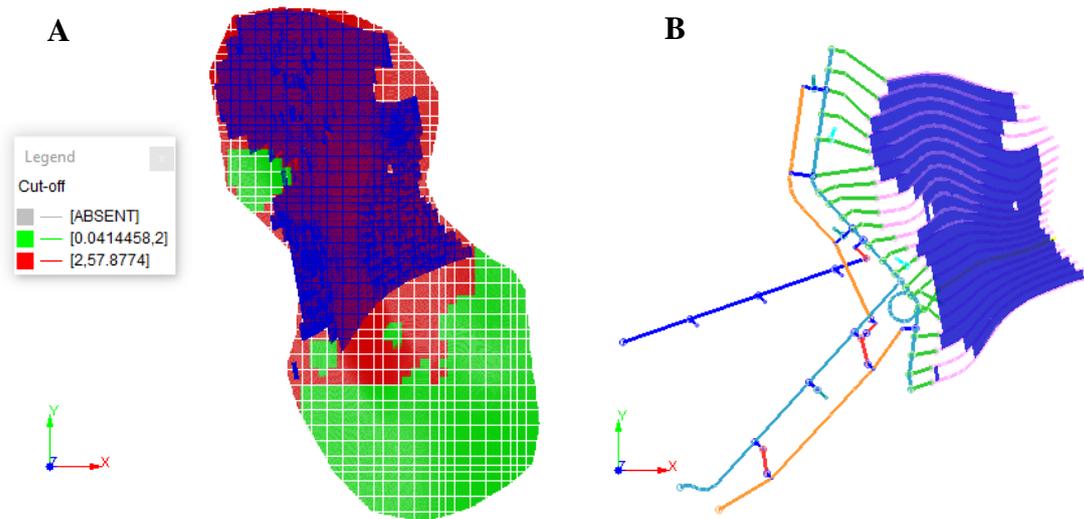


Figura 26: Sólidos gerados de acordo com o teor de corte e as galerias de produção.

4.3. Otimização no MSO – Cenário 2

Os dados utilizados como *input* no cenário 2 foram os mesmos que o do cenário 1 (Tabela 5) e também foram aplicadas as *strings* para controlar a separação dos painéis.

A principal diferença entre os cenários 1 e 2, em termos de configuração de parâmetros, é o uso da superfície no cenário 2 para limitar o formato dos realces no eixo

Z. Como o cenário 1 apresentou problemas operacionais com alguns *stopes* gerados com bases não aderentes à superfície, a aplicação da *wireframe* foi realizada com o objetivo de restringir a otimização no *footwall*.

O resultado obtido demonstra que, assim como no cenário 1, no cenário 2 o MSO foi eficiente para gerar sólidos apenas nos locais em que os teores de AU são superiores ao teor de corte (Figura 27). Além disso, as *strings* conseguiram restringir os painéis e não foram gerados realces para fora dos limites demarcados por elas.

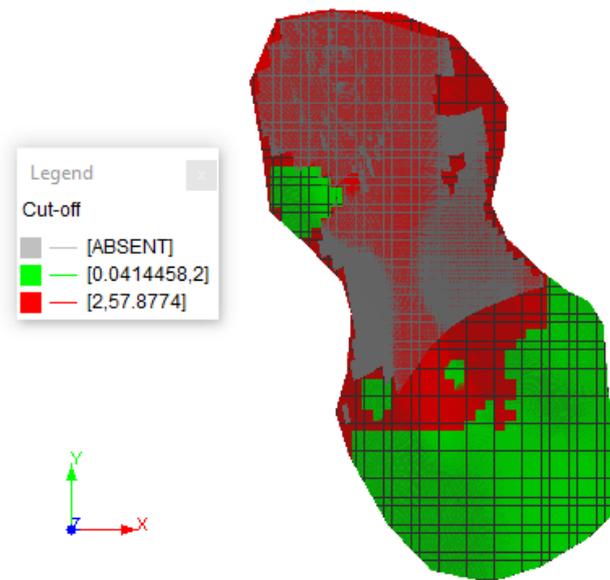


Figura 27: Realces gerados no cenário 2 por teor de corte.

O formato dos realces ficou operacional tanto no que se refere à altura gerada quanto em relação ao piso dos sólidos. As estruturas de produção ilustradas na Figura 28 mostram que todo o minério será retirado na lavra respeitando a geometria definida pelas galerias. A linha marcada em preto é uma interseção da *wireframe* de controle com os realces otimizados (exibidos em azul) e, como se pode notar, a base dos *stopes* estão extremamente aderentes à superfície geológica.

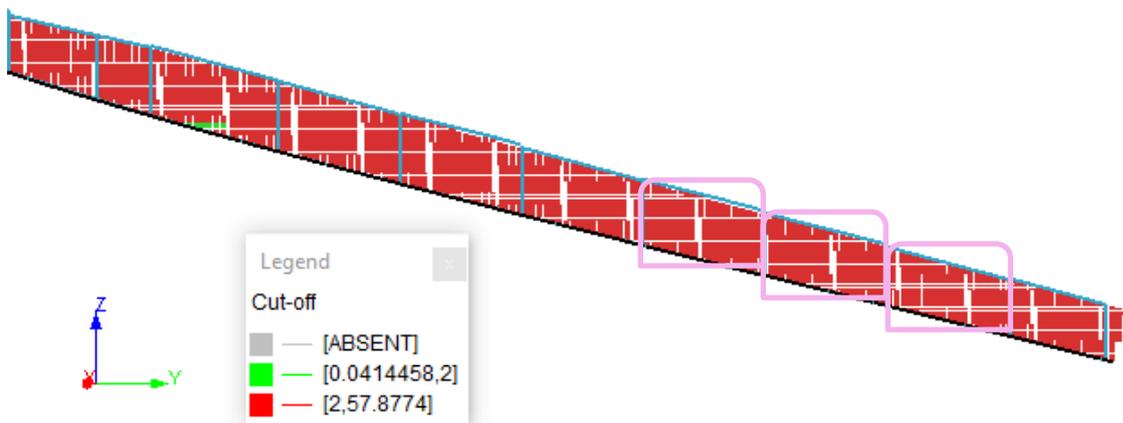


Figura 28: realces otimizados com a *wireframe* de controle.

Uma questão considerável de ser discutida são as regiões centrais em que não foram gerados realces nos cenários 1 e 2 (Figura 29). É visível que, nos dois panoramas, as regiões de minério a oeste resultaram em sólidos com grande semelhança, entretanto, no sentido leste do corpo a primeira otimização conseguiu gerar mais realces que a segunda. Isto pode ser explicado pela presença da superfície que limita o piso dos *stopes* no segundo resultado, enquanto no inicial a ausência da *wireframe* permite uma oscilação maior nas dimensões otimizadas, mas considerando a altura mínima de 1,5 m.

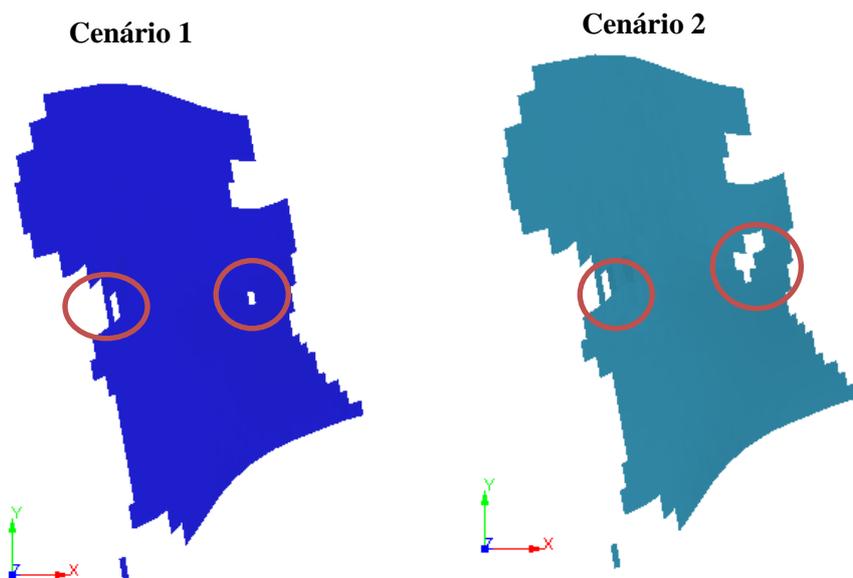


Figura 29: regiões de otimização sem realces.

4.4. Otimização no MSO – Cenário 3

Para tentar identificar a motivação do *software* não ter criado sólidos nos locais mostrados, foi gerado um terceiro cenário com os mesmos *inputs* do cenário 2, mas com determinações sub-econômicas. Assim, nos resultados da otimização, foram concebidas *wireframes* que enfatizaram as áreas que não eram econômicas para aquelas configurações realizadas.

A Figura 30 exibe a terceira otimização com as regiões questionáveis e a *wireframe* (indicada em laranja) que demarca a sub-economicidade de alguns locais, inclusive os realces que foram gerados inclusos como sub-econômicos. Caso o parâmetro econômico da otimização seja alterado, pode ocorrer das regiões serem viabilizadas, este aspecto utilizado é o teor de corte, isto é, o *cut-off* teria que ser diminuído para a tentativa de gerar os sólidos de lavra nas zonas faltantes.

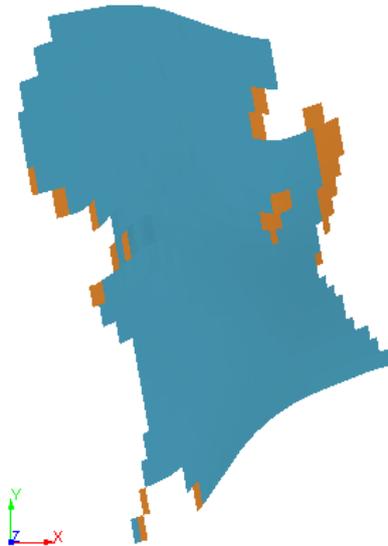


Figura 30: Cenário sub-econômico.

O ideal para confirmar se o resultado mostrado pelo cenário sub-econômico é verídico ou se aconteceu alguma falha na otimização, seria a verificação do teor das zonas com falhas nos realces. Desta maneira, foi feita uma cubagem dos sólidos faltantes, ilustrados na Figura 31, e obtidos os teores médios de cada um deles com uma diluição associada.



Figura 31: Realces sub-econômicos.

Com as informações de teores e diluição, foram recalculados os teores médios por meio da razão mostrada na Equação 1.

$$\text{Teor médio diluído} = \frac{\text{teor médio}}{1 + \text{diluição}} \quad (1)$$

Então, como exibe a Tabela 6, foram determinados os teores considerando a diluição. É notório que, na maioria dos *stopes*, o teor está abaixo do *cut-off* definido (2 ppm) e, portanto, não são gerados sólidos, respeitando a premissa econômica. No entanto, os *stopes* 1 e 4 não otimizados, possuem teor acima do *cut-off* e, para que esse minério seja lavrado, uma solução seria o *design* manual das regiões citadas por meio de CXS (*Complex Solids*).

Tabela 6: Teores recalculados com a diluição.

<i>Stope</i>	Teor de AU (ppm)	Diluição (%)	Teor de AU recalculado (ppm)
1	3.82	123.15	3.43
2	4.45	154.74	1.71
3	4.71	131.72	1.75
4	3.61	87.04	2.03
5	3.84	111.61	1.93
6	4.28	132.73	1.81
7	4.46	146.89	1.84
8	3.46	0.98	1.81

4.5. Comparação entre o *design* manual e a otimização no MSO

Os resultados encontrados no cenário realizado de forma manual diferem dos cenários otimizados no MSO em aspectos como a operacionalidade e a economicidade dos *stopes* e o melhor aproveitamento do depósito mineral.

Na Figura 32 é visível que o cenário manual abrange uma parte maior do modelo de blocos que o cenário 3 otimizado no MSO, isto é, foram gerados mais realces no *design* manual. Isto aparenta implicar que o primeiro caso foi mais eficiente que o segundo devido ao maior volume de minério englobado e, conseqüentemente, maior lucro associado a lavra. No entanto, quando se é avaliado o teor de corte do modelo, é perceptível que a definição manual dos realces não respeita o valor definido e gera sólidos em zonas com teores inferiores ao *cut-off*, enquanto no cenário 3 isso quase não acontece.

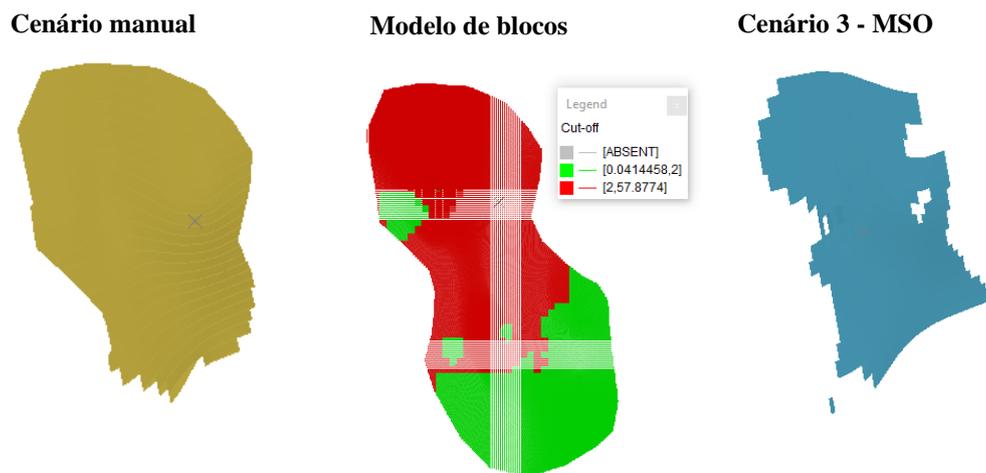


Figura 32: Comparação de teores dos cenários manual e automático.

Observar a distribuição de teores no corpo mineralizado é imprescindível para efetuar uma análise empírica e potencial do depósito no que se refere a lucratividade, uma vez que existem custos relacionados a lavra dos realces e, caso o teor de minério contido não seja suficiente para gerar uma receita superior ou igual aos custos, a lavra da região ocasionará prejuízos para o empreendimento.

Um aspecto extremamente importante para a lavra em profundidade é a dimensão e geometria dos *stopes* a serem lavrados, sendo que, na maioria dos métodos de lavra subterrânea, as aberturas para a exploração são realizadas dentro do próprio corpo de

minério. Assim, as dimensões e formas dos realces devem ser o mais operacional possível para permitir o trânsito dos equipamentos com eficiência e segurança.

Neste contexto, a perspectiva apontada pelos cenários do MSO é mais eficiente. Nas otimizações feitas, os sólidos obtidos têm a geometria retangular enquanto no *design* manual a forma é de um paralelogramo irregular. Na Figura 33 fica nítido que quando os realces possuem as paredes laterais verticais, se tornam mais operacionais por coincidirem com a orientação das galerias que são perpendiculares a altura. Já nos manuais, como as faces possuem uma angulação menor que 90° , as galerias não conseguem compreender toda a região do realce, ficando assim minério sem ser lavrado.

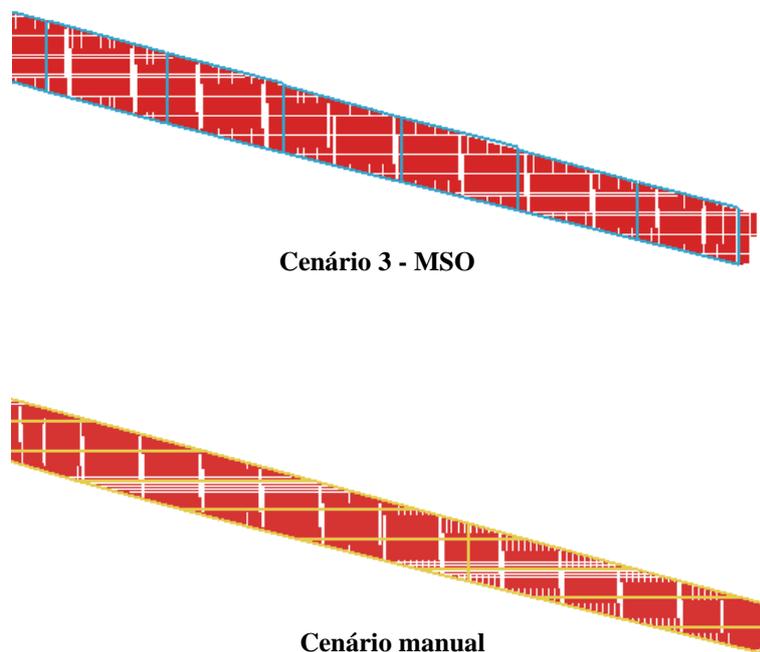


Figura 33: Geometria dos realces do MSO e do *design* manual.

A otimização realizada no MSO para este corpo de AU está voltada para uma estimativa de recursos, isto é, realizar o levantamento do material disponível para a lavra de acordo com as premissas econômicas e geotécnicas definidas. Normalmente, quando se objetiva determinar também a reserva associada ao depósito mineral, é realizada novamente a otimização no *software* com premissas complementares e é usado o *design* manual para realizar ajustes mais específicos nas formas dos realces, de forma que potencialize a operacionalidade.

Nesse sentido, o *design* manual quando realizado de maneira adequada, é uma ferramenta de auxílio para que os *stopes* atendam a melhor realidade da mina de acordo

com a dimensão dos equipamentos e das estruturas de lavra e desenvolvimento, o que não ocorre no cenário manual feito pela empresa.

O fato de o otimizador conseguir rodar cenários simultâneos é outro benefício relevante para o engenheiro de planejamento de mina, que otimiza o seu tempo ao gerar diferentes realces no mesmo tempo em que faria apenas um manual. Ademais, o MSO possibilita ao profissional analisar perspectivas divergentes de acordo com os parâmetros aplicados e tomar uma decisão mais assertiva sobre a lavra do minério.

Na Tabela 7 são exibidas as cubagens dos cenários otimizados. É perceptível que o cenário manual possui cinco vezes mais massa de minério que o cenário 3 quando analisados os intervalos com o teor menor que o teor de corte. Isso ocorre pelo fato de o manual não respeitar o *cut-off* definido, assim gera realces em mais áreas com o teor inferior ao de corte e, conseqüentemente, tem mais massa de minério disponível.

Tabela 7: Cubagem dos cenários.

		Tonelagem	Teor de	Densidade	Metal
		(t)	AU (g/t)	(g/cm³)	Contido (oz)
Cenário Manual	< que o teor de corte	16,092	1.11	2.7	576
	≥ que o teor de corte	529,212	5.84	2.7	99,697
	Total	545,307	5.7	2.7	100,273
Cenário 1 - MSO	< que o teor de corte	2,964	1.47	2.7	141
	≥ que o teor de corte	505,816	187,339	2.7	97,573

	Total	508,780	5.95	2.7	97,714
Cenário 2 - MSO	< que o teor de corte	3,387	1.46	2.7	160
	≥ que o teor de corte	503,222	5.93	2.7	96,261
	Total	507,109	5.90	2.7	96,421
Cenário 3 - MSO	< que o teor de corte	3,387	1.46	2.7	160
	≥ que o teor de corte	503,222	5.93	2.7	96,261
	Total	507,109	5.90	2.7	96,421

Quando se observa a tonelagem total dos dois cenários, manual e 3 (Figura 34), também se nota que o primeiro possui mais material disponível para a lavra que o segundo, em decorrência do teor médio de cada um. Como o teor é maior no cenário 3, significa que a massa nele será menor devido à redução de material disponível com teores mais elevados.

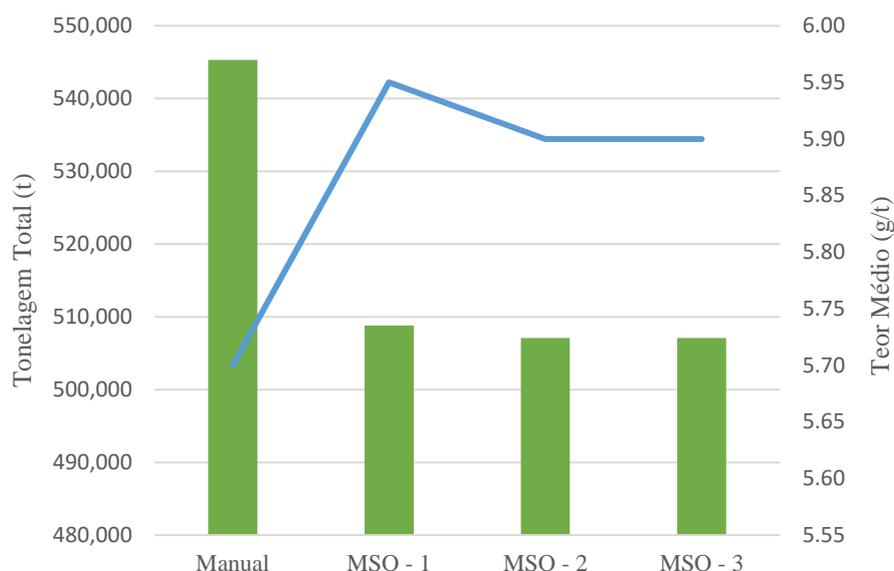


Figura 34: Distribuição de massas e teores dos cenários.

Um ponto relevante observado que explica a diferença entre as massas dos cenários além do teor associados a eles, são os formatos dos realces gerados. Os *stopes* manuais gerados não foram operacionais e não obedeceram às restrições econômicas e geométricas definidas, contribuindo para que os realces abrangessem áreas não viáveis.

Ainda de acordo com a Figura 34, quando se é feita a comparação entre os três cenários otimizados no MSO (1, 2 e 3), fica nítido que há uma pequena variabilidade do primeiro para o segundo, mas o segundo e terceiro apresentam cubagens iguais. No horizonte um, os realces foram otimizados sem a utilização da superfície de controle o que implica na geração de sólidos com geometrias que não respeitam o *footwall* e, consequentemente, apresenta uma tonelagem maior que o segundo.

Os panoramas 2 e 3 apresentam cubagens iguais por terem sido otimizados com os mesmos parâmetros de *input*, sendo que a única diferença entre eles foi o uso da opção sub-econômica no terceiro para que as regiões próximas a economicidade fossem delimitadas.

5. CONCLUSÃO

De acordo com o estudo realizado, foi possível otimizar os realces matemáticos do corpo mineralizado descoberto pela empresa X por meio do *software* MSO. Os resultados dos cenários otimizados mostraram que o *software* é uma ferramenta robusta para a determinação dos realces lavráveis, respeitando premissas econômicas, geotécnicas e operacionais.

A análise feita comparando os *stopes* gerados manualmente e aqueles otimizados pelo MSO demonstraram que os sólidos resultantes do *software* apresentaram maior operacionalidade, essencialmente quando se compara a alocação das galerias de produção em relação ao formato dos realces, sendo que nos manuais parte da reserva fica impossibilitada de ser lavrada, reduzindo a recuperação e, portanto, o retorno financeiro.

Outro aspecto em que o otimizador se mostrou vantajoso foi na definição da premissa financeira, neste caso o teor de corte, em que só foram gerados realces nas regiões com teor de AU acima do *cut-off*, enquanto nos realces manuais o parâmetro não foi obedecido, o que pode destruir valor e reduzir o retorno financeiro do projeto.

O MSO se mostrou, portanto, uma ferramenta que auxilia os engenheiros de planejamento de mina subterrânea de maneira efetiva e proporciona que o profissional tenha maior assertividade nas suas tomadas de decisão.

Como sugestões futuras para a continuidade do estudo, poderia ser realizada a estimativa dos tipos de recursos presentes no depósito na transformação de recursos em reservas. Além disso, o reajuste dos realces de forma manual a partir das *outlines* geradas pelo MSO poderia contribuir para que os sólidos de lavra fiquem ainda mais operacionais. E ainda, poderiam ser atribuídos custos para a extração do minério e para a construção das estruturas de desenvolvimento a fim de realizar uma validação econômica e analisar quais realces realmente seriam rentáveis quando se considerados os custos citados.

Ao final, uma análise também relevante, é a investigação minuciosa das causas da não geração de alguns realces pelo MSO em regiões que o teor de ouro estava acima do teor de corte definido a fim de maximizar a reserva e os lucros com a lavra do minério.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, W, E. **Uma análise da importância do plano de aproveitamento econômico no processo de tomada de decisão na mineração.** Dissertação de Pós-Graduação – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2017.

ALFORD, C. **Optimization in underground mine design.** 25th APCOM AusIMM, 1995.

CAMPOS, P, H, A. **Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra: sequenciamento direto de blocos vs. Planejamento tradicional.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2017.

Curi, A. (2017). **Lavra de Minas.** São Paulo: Oficina de Textos.

CURI, A., SILVA, J. M., & NEME, M. B. (2011). **Realização de projeto de lavra de mina subterrânea com utilização de aplicativos específicos.** *Escola de Minas.*

DATAMINE. **Apostila Wireframes.** Julho, 2020, 13p.

SYSTEMS, A, M. **User Manual MSO.** Outubro, 2020.

DUNG, T, T. **Application of Photogrammetry for measuring dip and dip direction and creating 3D model for slope and face of underground works.** Hanoi University of Mining and Geology, 2014.

FARIA, L. R. D. E. **Disposição de estéril em cava – um estudo de caso.** Dissertação de Pós-Graduação – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2016.

FREITAS, S, B, N. **Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em Taludes do Funchal.** Dissertação de Mestrado – Universidade da Madeira, 2011.

HAMRIN, H. **Underground mining methods and application.** 1986.

HUSTRULID W.; KUCHTA M., **Open Pit Mine Planning & Design Volume 1,** Publisher: A Balkema Publishers; Student ed. edition 1994.

KOPPE, J, C. **A lavra e a indústria mineral no Brasil.** Estado da arte e tendências tecnológicas, Capítulo 1, 2015.

MOSER, P.&Wimmer, M.2018.**Underground Mining.**Leoben.

NETO, J, A, S. **Análise de sensibilidade dos limites da cava final ótima com base na variação do preço de mercado do fosfato.** Trabalho de Conclusão de Curso – CEFET, Araxá – MG, 2017.

SALES, J, V, A. **Determinação da profundidade de transição entre lavra a céu aberto e lavra subterrânea para uma mina de ouro.** Trabalho de Conclusão de Curso – UFOP, Ouro Preto – MG, 2019.

SILVA, N, C, S. **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais.** Tese apresentada à Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2008.

SILVA, J. M. **Lavra de Mina Subterrânea.** Disciplina – Universidade Federal de Ouro Preto – MG, 2020.

TATIYA, R, R. **Surface and Underground Excavations,** p.528-554,620-632;2ed-2013.

THORLEY, U. **Open Pit Mine Planning: Analysis and System modeling of conventional and oil sands applications.** PHD thesis. Queen's University Kingston, Ontario, Canada. September, 2012, 77p.