



**Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas**



## **MONOGRAFIA**

**Análise de resultado da diluição de realces projetados manualmente e os otimizados por algoritmo de software comercial**

**Gustavo Henrique Ferreira**

Ouro Preto, MG  
2023

Gustavo Henrique Ferreira

**Análise de resultado da diluição de realces projetados manualmente e os otimizados por algoritmo de software comercial**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Minas.

**Orientador:** José Margarida da Silva

Ouro Preto, MG  
2023

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F383a Ferreira, Gustavo Henrique.

Análise de resultado da diluição de realces projetados manualmente e os otimizados por algoritmo de software comercial. [manuscrito] / Gustavo Henrique Ferreira. - 2023.  
72 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Margarida Silva.

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

1. Minas e mineração - Lavra subterrânea. 2. Minérios - Diluição. 3. Software de otimização. I. Silva, José Margarida. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.272



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gustavo Henrique Ferreira**

Análise de resultado da diluição de realces projetados manualmente e os otimizados por algoritmo de software comercial

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 21 de março de 2023

### Membros da banca

Prof. Dr. José Margarida da Silva - Orientador- Universidade Federal de Ouro Preto  
Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza- Universidade Federal de Ouro Preto  
Engenheiro de Minas Bruno Nasser Arantes

José Margarida da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Jose Margarida da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/04/2023, às 11:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0503045** e o código CRC **E3F18508**.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos que moram no meu coração e que contribuíram para que esse sonho pudesse se tornar realidade.

## RESUMO

O termo diluição refere-se, na mineração, a todo material classificado abaixo do teor de corte, considerado como estéril, que por algum motivo, seja operacional ou não, é lavrado junto com o minério. Para que se obtenha diluição aceitável, deve-se planejar cuidadosamente a lavra, levando em consideração aspectos geológicos. A partir disto, este trabalho apresenta quatro cenários de projetos de realces para um depósito subterrâneo de ouro, sendo três destes otimizados com a ferramenta Deswik.SO, e um projetado manualmente. O objetivo do estudo é comparar a diluição obtida entre os projetos, bem como a aderência dos mesmos ao depósito, uma vez que esta está diretamente ligada à quantidade de estéril presente, e o desempenho do software ao variar os métodos de avaliação do teor de corte. Dessa maneira, para as configurações dos cenários, levaram-se em comparação aspectos geométricos do depósito e adotou-se o teor de corte como sendo 3,0 gramas por tonelada. Ao analisar os cenários, notou-se considerável diferença de massa de estéril do cenário projetado manualmente para os otimizados, demonstrando assim que a ferramenta Deswik.SO se mostrou bastante eficiente para a otimização de corpos subterrâneos, gerando cenários dentro dos parâmetros esperados e aderentes ao corpo de minério.

**Palavras-chave:** lavra subterrânea; diluição; projeto de realces; minério; software de otimização.

## **ABSTRACT**

The term "dilution" refers to all material classified below the cut-off grade in mining, which is considered waste and is mined together with the ore for operational or other reasons. To obtain an acceptable level of dilution, mining operations must be carefully planned, taking into account geological, economic, and geotechnical factors. This paper presents four scenarios for raising an underground gold deposit, with three of them optimized using the Deswik.SO tool and one designed manually. The aim of the study is to compare the dilution obtained between the projects and their adherence to the deposit, as this is directly related to the amount of waste present, and to evaluate the performance of the software when varying cut-off grade evaluation methods. Therefore, for the scenario configurations, geometrical aspects of the deposit were compared and the cut-off grade was set at 3.0 grams per ton. Upon analyzing the scenarios, a considerable difference in waste mass was observed between the manually designed and optimized scenarios, demonstrating that the Deswik.SO tool proved to be highly efficient for optimizing underground bodies, generating scenarios within expected parameters and adherent to the ore body.

**Keywords:** Underground mining; dilution; stope's design; ore; optimization software.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b>	Relação entre resultados de exploração, recursos e reservas .....	18
<b>Figura 2:</b>	Sistema classificatório das explorações subterrâneas e respectivos métodos de lavra, com indicação aproximada de certos aspectos geomecânicos .....	19
<b>Figura 3:</b>	Arranjo típico da lavra de realce em subníveis .....	20
<b>Figura 4:</b>	Geometria de corpos subterrâneos .....	22
<b>Figura 5:</b>	Principais características geoestruturais de um corpo de minério .....	24
<b>Figura 6:</b>	Diluições operacional e planejada em um realce .....	29
<b>Figura 7:</b>	Gráfico comparativo das equações de diluição .....	32
<b>Figura 8:</b>	Seções e sólidos formados pelo método das seções. fonte: autoria própria .....	35
<b>Figura 9:</b>	Vistas do modelo de blocos em: planta, frontal e lateral respectivamente .....	36
<b>Figura 10:</b>	Vistas da wireframe geológica em: planta, frontal e lateral .....	35
<b>Figura 11:</b>	Seções traçadas ao longo da extensão do modelo de blocos. fonte: autoria própria .....	37
<b>Figura 12:</b>	Plano de orientação yz .....	41
<b>Figura 13:</b>	Arranjo geométrico geral dos cenários. fonte: autoria própria .....	42
<b>Figura 14:</b>	Comparação entre os métodos de avaliação de teor ...	44
<b>Figura 15:</b>	Realces gerados a partir da estrutura de otimização ...	45
<b>Figura 16:</b>	Diferença na otimização a partir da estrutura de otimização rotacionada .....	45
<b>Figura 17:</b>	Comparação entre as metodologias de aplicação da diluição operacional .....	46
<b>Figura 18:</b>	Diferença entre <i>near and far convention</i> e <i>footwall and hangingwall convention</i> .....	47
<b>Figura 19:</b>	Convenções de determinação de largura .....	48
<b>Figura 20:</b>	Metodologia de cálculo para ângulo de mergulho e <i>strike</i> .....	49
<b>Figura 21:</b>	Linhas guia sobre a <i>wireframe</i> geológica .....	51
<b>Figura 22:</b>	Linhas guia .....	51
<b>Figura 23:</b>	Desenho do contorno do corpo de minério .....	52
<b>Figura 24:</b>	Sólidos representativos gerados .....	53
<b>Figura 25:</b>	Realces gerados cenário .....	54
<b>Figura 26:</b>	Vista dos realces gerados no cenário 1 e modelo de blocos. fonte: autoria própria .....	54
<b>Figura 27:</b>	Vista em corte do modelo de blocos e realces gerados no cenário .....	55
<b>Figura 28:</b>	Realces gerados cenário .....	58
<b>Figura 29:</b>	Vista dos realces gerados no cenário 2 e modelo de blocos .....	57

<b>Figura 30:</b>	Vista em corte do modelo de blocos e realces gerados no cenário .....	57
<b>Figura 31:</b>	Realces gerados cenário .....	58
<b>Figura 32:</b>	Vista dos realces gerados no cenário 3 e modelo de blocos .....	59
<b>Figura 33:</b>	Vista em corte do modelo de blocos e realces gerados no cenário .....	60
<b>Figura 34:</b>	Realces gerados, cenário 4 .....	61
<b>Figura 35:</b>	Vista dos realces gerados no cenário 4 e modelo de blocos .....	61
<b>Figura 36:</b>	Vista em corte do modelo de blocos e realces do cenário 4 .....	62
<b>Figura 37:</b>	Zona do modelo de blocos onde houve maior diferença de realces gerados entre os cenários .....	64
<b>Figura 38:</b>	Comparação de geração de realces entre os cenários .....	65
<b>Figura 39:</b>	Gráfico de comparação de massa total entre os cenários .....	66
<b>Figura 40:</b>	gráfico de comparação de massa de minério e estéril entre os cenários gerados .....	66
<b>Figura 41:</b>	Gráfico de comparação da diluição entre os cenários gerados .....	67

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b>	Teor de corte de algumas lavras subterrâneas de ouro .....	26
<b>Tabela 2:</b>	Estatísticas básicas do modelo de blocos .....	35
<b>Tabela 3:</b>	Medição do strike em cada seção .....	37
<b>Tabela 4:</b>	Medição do mergulho ao longo do modelo de blocos .....	38
<b>Tabela 5:</b>	Informações da estrutura de otimização adotada .....	46
<b>Tabela 6:</b>	Ângulos de mergulho e strike adotados .....	50
<b>Tabela 7:</b>	Cubagem realizada nos realces do cenário 1..	56
<b>Tabela 8:</b>	Cubagem realizada nos realces do cenário 2..	58
<b>Tabela 9:</b>	Cubagem realizada nos realces do cenário 3..	60
<b>Tabela 10:</b>	Cubagem realizada nos realces do cenário 4..	63

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	Informações iniciais .....	11
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
2.1	Objetivo geral .....	12
2.2	Objetivos específicos .....	12
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
3.1	Planejamento de lavra .....	14
3.2	Recursos e reservas .....	16
3.3	Seleção do método de lavra subterrânea .....	18
3.4	Realce em subníveis ( <i>Sublevel Stopping</i> ) .....	20
3.5	Geometria de depósitos subterrâneos .....	22
3.6	Teor de Corte ( <i>Cutoff grade</i> ) .....	25
3.7	Diluição .....	26
3.8	Aplicativos Comerciais .....	29
3.9	Projeto (Design) de Realces .....	31
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
4.1	Base de dados .....	34
4.2	Características do depósito .....	36
4.3	Definição do método de lavra .....	38
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>40</b>
5.1	Configuração de otimização .....	40
5.2	Geometria .....	40
5.3	Teor de Corte ( <i>Cutoff grade</i> ) .....	42
5.4	Região de Otimização .....	44
5.5	Diluição .....	46
5.6	Parâmetros Chaves .....	48
<b>6</b>	<b>PROJETO MANUAL DOS REALCES</b> .....	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>54</b>
7.1	Cenário 1 .....	54
7.2	Cenário 2 .....	56
7.3	Cenário 3 .....	58
7.4	Cenário 4 .....	61
<b>8</b>	<b>DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>68</b>
<b>10</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>70</b>

## 1. Introdução

### 1.1 Informações iniciais

Atualmente, em um contexto no qual os depósitos minerais mais superficiais estão sendo cada vez mais explorados por meio da lavra a céu aberto, verifica-se uma tendência de substituição progressiva, embora lenta, das lavras conduzidas a céu aberto pelas subterrâneas por razões econômicas, geológicas e de morfologia das jazidas. A crescente competição pelo uso da terra principalmente nas regiões mais povoadas e desenvolvidas pode tornar a lavra subterrânea a única opção plausível. (CURI, 2017).

Para garantir que a exploração subterrânea seja eficiente e rentável, deve haver um planejamento de lavra minucioso e bem feito, a fim de minimizar os custos operacionais do empreendimento e impactos ambientais da extração do minério, como poluição do ar e água, e também maximizar a produção de forma segura.

Outro fator importante é a diluição, definida por Wright (1983) como a contaminação do minério por material não classificado como minério (estéril), durante o processo de lavra. É um problema comum onde as condições podem ser mais desfavoráveis e onde é mais difícil controlar a qualidade do material extraído. Dessa maneira a diluição pode representar um aumento nos custos em um empreendimento mineiro pois, segundo Villaescusa (1998), o material de diluição pode afetar adversamente as recuperações de metal e os graus de concentrado. Além dos custos de transporte de maior quantidade de material.

Nesse contexto, a crescente dificuldade de se conseguirem minérios com altos teores, aliada à variação dos preços das commodities, nos últimos anos, tem feito com que empresas especializadas desenvolvam aplicativos capazes de otimizar o planejamento da mina em um curto espaço de tempo, o que seria quase impossível de ser feito manualmente, usando papel, prancheta, somente a mão com técnicas convencionais de desenho, ou até mesmo em softwares que não possuem ferramentas específicas para este fim

Conforme Souza (2017) os *stopes* (vazios deixados pela extração em lavra subterrânea) são planejados com o auxílio de softwares de planejamento de lavra, que otimizam as dimensões dos *stopes* para obtenção de menores valores de

diluição e possibilitam a visualização da operacionalidade da mina. Softwares comerciais de mineração atuais permitem, nesse sentido, uma visão em 3D da jazida e de toda a estrutura de mina necessária para a lavra do minério. (NEME; CURI; SILVA, 2011). Por isso, o presente trabalho visa comparar, em uma base de dados genérica de um depósito de ouro subterrâneo, diferentes formas de se gerar realces operacionais em uma mina subterrânea.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo geral comparar a diluição de realces de um depósito genérico de ouro obtidos a partir de um projeto manual e da otimização utilizando o módulo *Stope Optimizer* do software comercial *Deswik*.

### **2.2 Objetivos específicos**

Além disso, esse trabalho tem os objetivos específicos seguintes:

- 1) Comparar os métodos de avaliação de *cutoff* da ferramenta *Deswik.SO*, bem como as influências dos mesmos no projeto de realces;
- 2) Comparar diferentes cenários para a otimização dos realces;
- 3) Apresentar a maneira pela qual as informações foram tratadas dentro do software *Deswik*.

### 3. Revisão bibliográfica

Presentes na bibliografia disponível, encontram-se alguns trabalhos relacionados a lavra de depósitos subterrâneos e utilização de softwares comerciais, como é o caso da monografia de Sales (2019). Na qual é discutido, acerca de um depósito de ouro, o ponto de transição da lavra a céu aberto para a lavra subterrânea por meio da utilização de softwares comerciais específicos.

Encontra-se também a monografia de Souza (2022), na qual a autora retrata também a otimização de um depósito de ouro por câmaras e pilares por software comercial.

A dissertação de Oliveira (2012), cujo tema: dimensionamento empírico de realce em *sublevel stoping*, possui como objetivo principal buscar evidências que corroboram para a utilização dos métodos propostos para o contexto geomecânico brasileiro, através da coleta de dados de empresas que utilizam o método de lavra *sublevel stoping*, para calcular a diluição operacional para cada face dos realces analisados.

Outro trabalho relacionado é a monografia de Melo (2014), onde a autora avalia a viabilidade do método de lavra *shrink stope* para ser aplicado na mina do mamão, no município de Floresta do Araguaia-PA.

Pode-se citar também a monografia de Botelho et al. (2011), onde se trata de um projeto de pré viabilidade de um depósito subterrâneo de ouro desde a fase de sondagem até a avaliação econômica, passando pela modelagem geológica, análise geoestatística, lavra, e beneficiamento do minério deste mesmo depósito.

De Carli (2013) mostra ferramenta do programa Studio 3 para o desenho das envoltórias de teor mínimo chamada de Grade Shells. Essas envoltórias têm por objetivo fazer uma separação do minério e estéril contidos no corpo mineral, com base no teor de corte, a fim de abranger somente o material que deve ser extraído na lavra subterrânea

Por último, o trabalho de Barbosa e Corrêa (2020), pelo qual aborda-se a avaliação a resistência de pilares na mina subterrânea Pilar, que se encontra na cidade de Pilar de Goiás, Goiás.

### 3.1 Planejamento de lavra

O planejamento de lavra é o processo de planejar e organizar a extração de minerais de uma mina, de maneira eficiente e segura. Isso inclui a determinação do arranjo geral (layout) da mina, a escolha de equipamentos de mineração apropriados e a programação da produção. O objetivo do planejamento de lavra é garantir que a mina esteja operando de maneira eficiente e rentável, minimizando os riscos para os trabalhadores e o meio ambiente (KUCHTA, 2013).

Pelo motivo de o empreendimento mineiro movimentar consideráveis massas de material e modificar consideravelmente o ecossistema em que está inserido, planejá-lo torna-se um processo complexo que envolve várias etapas e considerações. Algumas das principais etapas envolvidas incluem as seguintes:

- 1) Estudo de viabilidade: o primeiro passo é avaliar se a mina é viável economicamente e ambientalmente. Isso envolve a análise do tipo de minério presente, a qualidade e a quantidade disponível, os custos de produção e os preços de mercado.
- 2) Mapeamento do depósito: o próximo passo é mapear o depósito de minério, incluindo a localização, o tamanho e a profundidade. Isso ajuda a determinar a melhor maneira de extrair o minério de maneira eficiente.
- 3) Seleção de equipamentos: depois de determinar o layout da mina, é necessário escolher os equipamentos de mineração adequados para extrair o minério. Isso inclui escolher equipamentos que sejam adequados para o tipo de minério presente e que atendam às necessidades de produção.
- 4) Programação da produção: depois de selecionar os equipamentos, é necessário programar a produção para garantir que a mina esteja operando de maneira eficiente e que se atenda às metas de produção. Isso inclui determinar a quantidade de minério a ser extraída a cada dia, semana ou mês.

O planejamento deve envolver ainda considerações de segurança e meio ambiente, para garantir que a mineração seja realizada de maneira responsável e sustentável. Isso deve incluir medidas para proteger os trabalhadores, minimizar o impacto ambiental e garantir a recuperação e reabilitação dos locais de mineração após o término da operação.

O planejamento de lavra baseia-se em planos diferenciados pelas suas finalidades e naturezas e em termos gerais; esses planos se classificam em planos a longo, médio e curto prazos. (CURI, 2014).

- 1) Plano de longo prazo: é o plano mais estratégico. Segundo CURI (2014), a sua elaboração visa aos objetivos de cubar a reserva tecnicamente lavrável; determinar o estéril a ser removido e, conseqüentemente, a relação estéril/minério; definir os limites da cava final, impedindo, assim, a construção de obras permanentes dentro desses limites; e prever as vias de acesso que se fizerem necessárias. Além do cálculo de reservas, o planejamento de longo prazo deve abordar também os projetos de pit final e pilhas de estéril, o sequenciamento de lavra e a seleção dos métodos de lavra com o correspondente dimensionamento da frota de equipamentos.
- 2) Plano de médio prazo: desenvolve planos que determinam quando cada setor da mina será lavrado e quais os efeitos disso nos resultados anuais (SILVA, 2021). Ainda nesse aspecto, Smith & Wicks (2014) estabelecem que o planejamento de médio prazo é útil para operações ativas que precisam lavar as camadas de estéril que estão sobrejacentes ao minério, uma vez que este planejamento pode ser utilizado para definir metas de produção anuais, que serão definidas posteriormente de formas trimestrais e mensais.
- 3) Plano de curto prazo: o planejamento de curto prazo destina-se a definir as ações a serem tomadas no dia-a-dia da mina, de modo que estas ações culminem no cumprimento de metas estabelecidas pelos planos de médio e longo prazo. Ou seja, os esforços de curto prazo são direcionados sob o ponto de vista operacional de mina, compreendendo as condições e necessidades para que equipamentos, geometria de mina, pessoal e sistemas envolvidos no processo produtivo alcancem adequadamente os objetivos preestabelecidos (SILVA, 2021).

Em um ambiente de mina subterrânea, o planejamento constitui elemento importante para se alcançar a realização de empreendimentos no cenário atual 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 (NEME; CURI; SILVA, 2011). A profundidade e as circunstâncias de uma mina subterrânea também interferem nos

equipamentos que vão ali operar, pois precisam ser adaptados para trabalharem em ambientes confinados e sob condições de baixa luminosidade. Por envolver escavações de poços, rampas, túneis e galerias, a lavra subterrânea pode ser mais perigosa do que a céu aberto, uma vez que os trabalhadores que ali operam estão expostos a riscos de alagamentos, incêndios, desmoronamentos e gases em ambientes com ventilação controlada, sendo assim o planejamento de lavra subterrânea deve levar em consideração esses riscos e implementar medidas de segurança adequadas.

### **3.2 Recursos e reservas**

Os conceitos de recurso e reserva mineral são de extrema importância, uma vez que ajudam a determinar a viabilidade de um projeto de mineração e a avaliar o potencial de retorno do investimento. Eles também são utilizados para avaliar a sustentabilidade de um projeto de mineração e para estabelecer os critérios para a alocação de recursos e o planejamento de longo prazo.

Os recursos minerais podem ser definidos como a concentração ou ocorrência de um material sólido de interesse econômico na superfície ou no subsolo, cuja geometria, teor (ou qualidade) e quantidade possuem perspectivas razoáveis para eventual extração econômica (SALDANHA JUNIOR, 2020). Vale ressaltar que um recurso mineral é apenas uma estimativa aproximada da quantidade de um determinado mineral presente em uma área, e pode ser sujeito a alterações com base em novas informações ou tecnologias disponíveis. Sendo assim, os recursos podem ser classificados como sendo recursos medidos, indicados ou inferidos, de acordo com o grau de conhecimento que se tem a respeito do mesmo. Segundo a Resolução Nº 94, de 7 de fevereiro de 2022 (Brasil, 2022), publicada pelo Ministério de Minas e Energia e Agência Nacional de Mineração (ANM):

- 1) **Recurso medido:** parte de um recurso mineral estimado com base em técnicas apropriadas de pesquisa derivadas de exploração, amostragem e testes detalhados e confiáveis o suficiente para confirmar a continuidade geológica, teor ou qualidade, densidade, forma e características físicas do depósito mineral entre os pontos de observação, permitindo a aplicação de fatores modificadores para o planejamento de mina detalhado e a avaliação final da viabilidade econômica do depósito. O recurso medido é aquele que possui nível

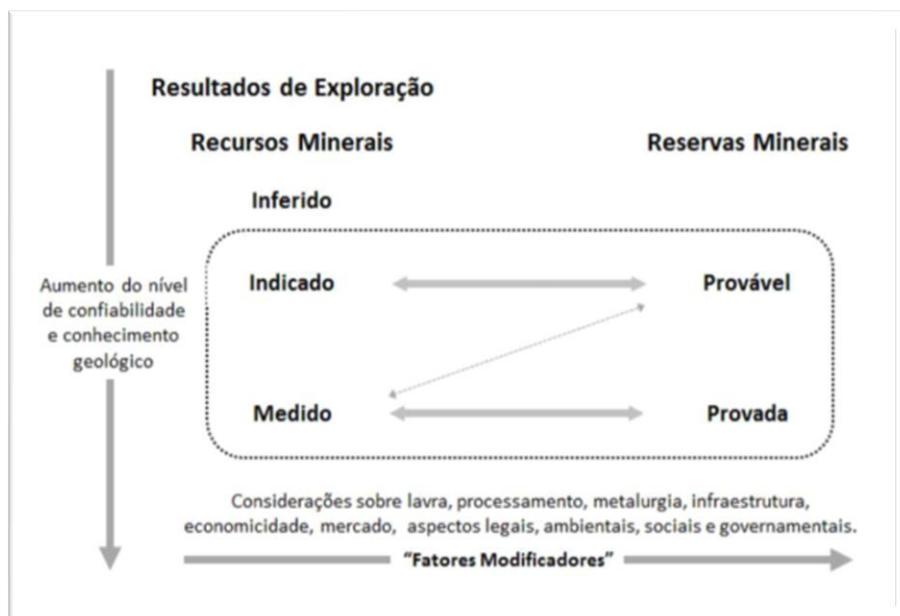
mais alto de confiabilidade geológica, em que pequenas variações na estimativa não afetam a potencial viabilidade econômica do projeto, podendo ser convertido em reserva provável ou reserva provada.

- 2) Recurso indicado: parte de um recurso mineral estimado com base em técnicas adequadas de pesquisa derivadas de exploração, amostragem e testes com detalhamento adequado, confiáveis e suficientes para assumir a continuidade geológica, teor ou qualidade, densidade, forma e características físicas do depósito mineral entre os pontos de observação, permitindo a aplicação de fatores modificadores em detalhe suficiente para embasar o planejamento da mina e a avaliação preliminar da viabilidade econômica do depósito. O recurso indicado possui nível de confiabilidade mais baixo que o recurso medido e pode ser convertido apenas em reserva provável.
- 3) Recurso Inferido: parte de um recurso mineral estimado com base em evidências geológicas, técnicas apropriadas de pesquisa e amostragem limitadas que sugerem, mas não atestam, a continuidade geológica, teor ou qualidade do bem mineral. O recurso inferido possui nível de confiabilidade mais baixo que aquele aplicado ao recurso indicado e não deve ser convertido para reserva mineral.

Já a reserva mineral pode ser definida como a parte economicamente lavrável de um recurso mineral. Saldanha Junior (2020) ainda acrescenta que inclui diluição de material e provisões de perdas, que podem ocorrer quando o material é extraído ou lavrado e é definida por estudos em nível de pré-viabilidade ou viabilidade conforme apropriado, que inclua a aplicação de fatores modificadores. As reservas podem ser definidas como prováveis e provadas.

Reservas prováveis podem ser definidas como a parte economicamente lavrável de um recurso indicado, podendo em alguns casos de recurso medido, enquanto as reservas provadas podem ser definidas como a parte economicamente lavrável de um recurso medido.

**Figura 1** - Correlação entre os recursos e reservas.



Extraído de: JORC, 2012.

### 3.3 Seleção do método de lavra subterrânea

Segundo Curi (2017), para a lavra de minas subterrâneas, há diversos métodos com muitas variantes, que se diferenciam em função das características do depósito e de sua relação com as encaixantes e das características geomecânicas dos maciços rochosos. O autor complementa ainda que são três os princípios fundamentais que norteiam a classificação dos métodos de lavra subterrânea: abandono de pilares, enchimento e abatimento, e estes se relacionam à questão geotécnica, à sustentação e ao controle das deformações nas aberturas.

No princípio de abandono de pilares, parte da reserva lavrável é usada como sustentação nos realces, conseqüentemente há uma perda de material que poderia trazer retorno financeiro. No princípio do enchimento, após a lavra do material de interesse, minério, o espaço vazio criado é preenchido com material não recuperável, estéril, à medida que ocorre o avanço de lavra. Já no princípio do abatimento, ocorre a ruptura, de forma proposital e controlada, das estruturas sustentadoras do realce. A partir destes três princípios os métodos de lavra subterrânea também podem ser divididos em três grupos, segundo Curi (2017):

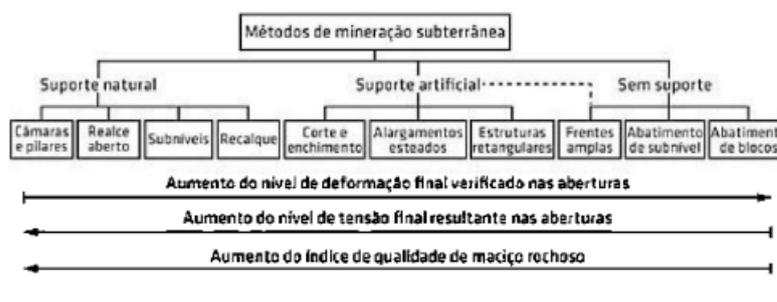
- 1) Realces autossuportados ou naturalmente suportados- as características do minério e das rochas encaixantes permitem a abertura de grandes espaços

subterrâneos sem suporte. É usado o princípio de abandono de pilares do próprio material a ser desmontado.

- 2) Realces com suporte artificial- o uso de suportes é obrigatório, o que acaba aumentando os custos e reduzindo a produtividade, retardando assim o ciclo de lavra. É usado o princípio do enchimento.
- 3) Realces abatidos- devido a certas condições concernentes à forma e à posição espacial do corpo de minério e às características mecânicas do maciço, torna-se possível a aplicação do terceiro princípio de abatimento.

De acordo com Silva (2021), esses princípios podem ainda ser combinados, o que eleva o número de possibilidades de variações dos métodos de lavra.

**Figura 2** - Sistema classificatório das explorações subterrâneas e respectivos métodos de lavra, com indicação aproximada de certos aspectos geomecânicos.



Extraído de: CURI, 2017.

No entanto, segundo Macêdo, Bazante e Bonates (2001), a maioria das minas utiliza mais de um método de lavra na sua operação. Um dado método pode ser mais apropriado para uma zona do depósito, todavia em outras partes seu emprego pode não ser a melhor opção. E, segundo Silva (2021), as mudanças de corpos no avanço em profundidade (como teor e mergulho) e fatores econômicos podem mudar a prioridade dos métodos. Várias são as metodologias disponíveis de seleção de métodos de lavra, envolvendo métodos empíricos, numéricos e multicritérios.

É fundamental que sejam analisados fatores como o tipo de mineral, geologia, as condições de segurança, os custos operacionais, dentre outros, para que se faça a escolha do método mais assertivo para cada realidade, pois terá influência decisiva na produtividade da mina, o que torna essa escolha mais difícil e imprescindível para

um empreendimento mineiro de sucesso. Será detalhado neste trabalho o método realce em subníveis, por ser utilizado no cenário aqui estudado.

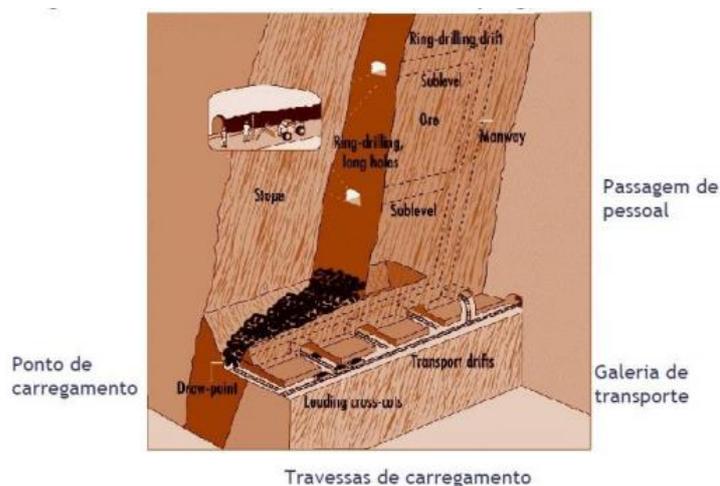
### 3.4 Realce em subníveis (*Sublevel Stopping*)

O método de lavra por realces em subníveis ou *Sublevel Stopping* envolve a criação de uma série de níveis horizontais, ou subníveis, na direção longitudinal e/ou transversal, a depender da potência do corpo, dentro da mina em diferentes elevações. Cada subnível é então desenvolvido e o minério é extraído dele usando uma série de realces (*stopes*) verticais, que são grandes aberturas criadas pela remoção de minério da rocha circundante. Este método é frequentemente usado em combinação com outras técnicas de mineração subterrânea, como *cut-and-fill* ou *drift-and-fill*, para otimizar a extração de minério e minimizar a perda de minério.

Villaescusa (2014) classifica o método como auto suportado. Aberturas subterrâneas auto suportadas são aquelas em que as cargas sobrejacentes são redistribuídas no maciço rochoso em direção às paredes laterais e aos pilares entre aberturas.

Esse método tem como reforço principal das rochas encaixantes os pilares de rocha constituídos por minério ou estéril, quando possível. Há diversos tipos de pilares estruturais, os quais subdividem o nível em câmaras, destacando-se, entretanto, o pilar de teto (*crown pillar*), o pilar-base (*sill pillar*) e os vários pilares laterais ou verticais (*rib pillar*) (CURI, 2017).

**Figura 3** - Arranjo típico da lavra de realce em subníveis.



Extraído de: HARTMAN, 2002.

Este método é aplicado quando a competência do minério é de moderada a elevada, e das encaixantes entre ligeiramente alta a alta. No que diz respeito aos depósitos, é aplicado em depósitos tabulares ou lenticulares e em que o mergulho do corpo de minério seja maior que o ângulo de repouso do minério desmontado e possua uniformidade do teor ao longo de sua extensão. É também desejável a regularidade do mesmo. (Silva, 2021)

Segundo Hartman (2002), o método de lavra por alargamento em subníveis tem alta produtividade, devido à grande mecanização. A diluição é na ordem de 20%, enquanto a recuperação pode alcançar 75%.

Dentre as operações unitárias de lavra relacionadas ao método, podemos citar: perfuração, detonação, carregamento e transporte.

Segundo Curi (2017), a perfuração pode ser descendente, ascendente ou radial, com perfuratrizes de topo ou de fundo de furo, eletro-hidráulicas ou pneumáticas, e, em torno dos subníveis, os diâmetros variam de 45 mm a 150 mm. A detonação pode ser feita por ANFO ou emulsões, sendo o carregamento dos furos por pressão pneumática ou manual. Já o carregamento é por fluxo gravitacional das aberturas para os níveis de extração e o transporte é feito por carregadeiras LHD's, caminhões ou vagões sobre trilhos, ou ainda por correias transportadoras. (Silva, 2021).

Existem ainda três variações deste método: com perfuração radial (*Blasthole Method*), com perfuração paralela? de furos longos (*Open-Ending Method*), e o *Vertical Crater Retreat (VCR) Method*. Variando entre elas a forma como se realiza a perfuração e o desmonte dos realces.

No *Blasthole Method*, a perfuração é feita em um padrão radial em cada subnível desmontando-se fatias verticais do corpo de minério. No *Open-Ending Method*, a perfuração é realizada verticalmente e, assim como no *Blasthole Method*, o desmonte é feito em fatias verticais. O VCR utiliza perfuração vertical como no *Open-Ending Method*, porém as fatias desmontadas são horizontais. (OLIVEIRA, 2012)

Segundo Hartman e Mutmansky (2002), podemos citar as vantagens e desvantagens do método por alargamento de subníveis como:

Vantagens:

- Produtividade de moderada a alta;
- Custo de lavra moderado;
- Escala de produção variando de moderada a alta;

- Presta-se à mecanização;
- Baixo custo de desmonte, e custo de movimentação desse material relativamente baixo;
- Pequena exposição a condições de perigo e fácil ventilação;
- Simultaneidade das operações unitárias;
- Boa recuperação (cerca de 75%);
- Diluição moderada.

Desvantagens:

- Desenvolvimento complicado e com custos elevados;
- Planejamento de lavra inflexível;
- Requer perfuração precisa (desvios menores do que 5%);
- Grandes desmontes podem causar vibrações significantes e dano estrutural.

### 3.5 Geometria de depósitos subterrâneos

A geometria de um corpo subterrâneo pode ser descrita a partir da forma e as dimensões do corpo. Segundo a Alford Mining Systems (AMS) (2020) os mesmos podem ser classificados como sendo em veios, tabulares, lenticulares, cilíndricos e massivos.

**Figura 4** - Geometria de corpos subterrâneos.

Nome	Classificação Geométrica		
	Seção superior	Seção Frontal	Seção Transversal
Veio			
Tabular			
Lenticular			
Cilíndrico			
Massivo			

Extraído de: ALFORD MINING SYSTEMS, 2020.

Já Curi (2017), define a geometria dos corpos de minério como isométricos, colunares, tabulares e lentes.

- Isométricos: na verdade, não são totalmente isométricos, apresentando irregularidades em todas as três direções, mas isso não impede que exibam dimensões mais ou menos iguais em todas elas. Os corpos isométricos podem ser de dois tipos: maciços (massive) ou bolsões. Os depósitos maciços têm grandes dimensões, podendo atingir vários quilômetros, enquanto os bolsões possuem dimensões limitadas a algumas dezenas de metros.
- Colunares: são bem mais extensos segundo a direção vertical.
- Tabulares: são predominantemente extensos segundo duas direções e possuem uma espessura relativamente reduzida e constante.
- Lentes: têm forma irregular e dimensões desiguais em todas as três direções.

O conhecimento destas geometrias é importante para determinar e planejar a melhor maneira de extrair e processar os minerais, avaliar a viabilidade econômica do empreendimento mineiro, bem como interferir no grau de dificuldade que se tem para realizar a estimativa de reservas. Além disso, a geometria também pode afetar a distribuição de minerais dentro do depósito, e conseqüentemente qualidade do minério.

Um depósito mineral normalmente é formado por diversos corpos de minério separados entre si por rocha estéril. Em corpos muito irregulares, a lavra se torna mais difícil. Nesses termos, o contato do depósito mineral com a rocha encaixante é um aspecto decisivo, pois um contato bem perceptível ou facilmente identificável entre as regiões mineralizadas e o estéril facilita muito a lavra. (CURI, 2017).

Dentre os elementos geométricos de um corpo mineral, podemos destacar:

- Direção de mergulho (strike): refere à direção em que as camadas ou veios do depósito inclinam-se em relação à superfície da Terra. A direção de mergulho pode ser expressa em graus e é sempre positiva. De acordo com Dang (2014), é definido como o ângulo positivo da direção Norte, que é medido no sentido horário até a projeção horizontal da linha de queda ao olhar para baixo.
- Mergulho (dip): Segundo SANTOS (2002) é a inclinação angular da superfície de um corpo mineral ou de uma camada geológica em relação

a um plano horizontal. É medido em graus a partir de uma linha perpendicular ao plano horizontal (Strike).

- Potência: segundo Curi (2017) a espessura ou potência do corpo de minério é representada pela distância normal entre as rochas encaixantes, refere-se então à espessura das camadas ou veios de minério. Podendo ser real ou verdadeira, espessura medida das camadas ou veios ao longo da direção normal, ou horizontal ou aparente, espessura medida das camadas ou veios de minério na direção horizontal.

Outros elementos importantes são a capa (*hangingwall*) e a lapa (*footwall*), definidas por Curi (2017) como sendo, as rochas encaixantes que se sobrepõem ou se sotopõem aos corpos de minério, sobretudo aqueles com maior extensão em duas dimensões (veios, lentes e camadas). A figura 5 mostra as principais características geoestruturais de um corpo de minério.

**Figura 5** - Principais características geoestruturais de um corpo de minério.



Extraído de: CURI, 2017.

### 3.6 Teor de Corte (*Cutoff grade*)

Segundo Krzanovic (2015), o teor de corte é um dos parâmetros técnicos e econômicos que mais afetam a economia de uma empresa de mineração.

Segundo Rendu (2008), o teor de corte é o valor mínimo de teor do seu material que será lavrado enviado para a usina de beneficiamento de minério que gera lucro com a venda do concentrado (RENDU, 2008).

Desta maneira, Assis (2016) diz que o teor de corte define a qualidade de minério que será lavrado, processado, transportado e vendido em um período “n” de tempo, portanto a lucratividade do empreendimento mineral é diretamente dependente da definição deste parâmetro

Rendu (2008) determina a equação para se obter o valor do teor de corte, dependendo de três fatores:

- Custo de produção por toneladas de minério;
- Preço de venda do concentrado por tonelada de minério;
- Recuperação metalúrgica.

A Equação 1 apresenta o teor de corte nominal, segundo Rendu (2008):

$$\text{Teor de corte nominal mínimo} = \frac{\text{Custos de produção (toneladas de minério)}}{r * V} \quad (1)$$

Em que:

r = recuperação metalúrgica; V = valor do concentrado;

Dessa maneira, observa-se que o teor de corte é variável de acordo com os custos de produção, recuperação metalúrgica e valor do concentrado, e esses são dependentes das condições operacionais existentes na mina e das atividades aplicadas para a obtenção do material de interesse.

O site *Mining Data Solutions* (2022) compila os dados dos relatórios anuais de lavra de várias minas do mundo. Nesse site é possível encontrar o teor de corte das minas ao longo dos anos, custos de lavra, custos de processamento, recuperação metalúrgica, além de informações sobre a geologia e produção das minas (QUEIROZ, 2022). Como exemplo, a Tabela 1 contém os valores de teor de corte para algumas

minas de ouro subterrâneas no mundo em seus últimos relatórios anuais de lavra disponíveis.

**Tabela 1** - Teor de corte de algumas lavras subterrâneas de ouro.

<b>Mina</b>	<b>Localização</b>	<b>Teor de Corte (g/t Au)</b>
Bateman - F2 Project	Ontario, Canadá	2,5
Premier-Red Mountain Project	British Columbia, Canadá	3,0
Agnew Complex	Western Australia, Austrália	2,6 – 4.6
Pinos Project	México	2,2
Palmarejo Mine	México	1,94 – 2,51

**Fonte:** Autoria Própria

### **3.7 Diluição**

Villaescusa (1998) define diluição como o material de baixo teor efetivamente medido. (resíduo ou aterro) que entra em um fluxo de minério, reduzindo seu valor. Já Shaw (2013) complementa dizendo que a diluição e perdas de minério são consequências dos limites de mineralização e são representados localmente pela forma do bloco de lavra.

A diluição de lavra pode resultar em uma diminuição na qualidade do minério final e, conseqüentemente, na rentabilidade da mina. Além disso, a diluição de lavra também pode aumentar os custos de processamento, já que mais minério precisa ser transportado e processado para obter a mesma quantidade de minério útil. Dessa forma, a diluição torna um fator importante a ser levado em consideração no planejamento de lavra.

Câmara (2013) lista alguns fatores que geram diluição de lavra: natureza dos contatos e limites do minério, zonas de limite de cava, tamanho e posição de bloco,

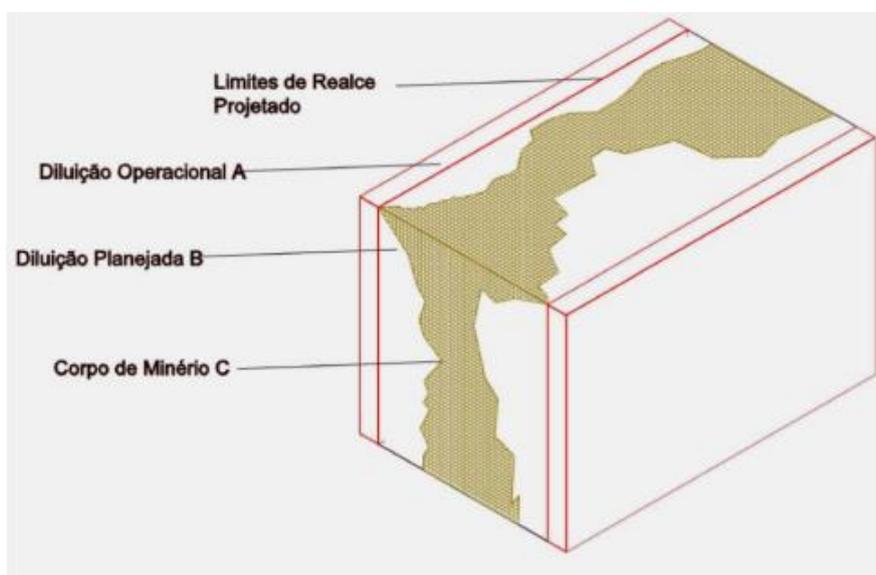
densidade amostral, complexidade geológica, seletividade da lavra e tamanho de equipamento, método de lavra e tipo de desmonte de rocha, entre outros.

A diluição pode ser classificada em duas classes: diluição planejada (interna) e diluição não planejada (externa). De acordo com Oliveira (2012), podemos definir as duas classes da seguinte maneira:

- Diluição planejada: associada ao estéril que se localiza interiormente às fronteiras do realce definidas pelo projeto. A geometria do realce é definida por características como: seletividade do método de lavra, dimensões (particularmente a potência da camada), continuidade do minério, regularidade dos contatos do corpo de minério, equipamentos de escavação, entre outros.
- Diluição operacional, não planejada ou externa: associada ao estéril desmontado no realce e transportado junto com o minério e que não se localizava internamente aos limites do realce planejado. A diluição operacional tem origens nas instabilidades das superfícies do realce, descontinuidades induzidas pelo desmonte e características intrínsecas ao maciço rochoso.

Scoble e Moss (1994) propõem a diluição total que nada mais é que a soma algébrica das diluições planejada e operacional. Figura 6 exemplifica os diferentes tipos de diluição citados:

**Figura 6** - diluições operacional e planejada em um realce.



Extraído de: SCOBLE E MOSS, 1994.

Para Ebrahimi (2013), a diluição interna ou planejada é difícil, se não, impossível de evitar. O autor, complementa que litologia e distribuição de teores são fatores importantes neste tipo de diluição. Já em relação à diluição externa ou operacional, Ebrahimi (2013) salienta que varia com base na geologia, forma do corpo de minério, técnicas de perfuração e detonação, escala de operação e tamanho do equipamento, completa ainda que este é o tipo de diluição que pode ser controlada usando equipamentos adequados e práticas de mineração.

A diluição operacional tem impactos diretos em um empreendimento mineiro, principalmente por afetar o fluxo de caixa do mesmo, responsável pela quantidade excedente de material carregado, transportado e beneficiado. Segundo Oliveira (2012), a diluição operacional pode reduzir drasticamente o teor esperado do minério, podendo afetar, inclusive, o tempo de vida de uma mina.

Embora se faça o possível para identificar e calcular todos os outros itens de custo de um projeto, por menor que seja, é comum fazer suposições gerais sobre a diluição em vez de quantificá-la. Isso geralmente ocorre devido ao orçamento insuficiente, tempo para estudos e também à falta de uma metodologia bem definida que possa ser usada. Em vez de quantificar a diluição em estudos de mineração, é comum assumir uma diluição geral como 5% para depósitos maciços e 10% para depósitos de formato tabular (EBRAHIMI, 2013).

Segundo Silva (2021), as empresas utilizam uma variedade de ferramentas para calcular, avaliar e prevê a diluição, dentre elas pode-se citar a modelagem de blocos, simulação estocásticas, softwares de mineração, análise de dados, avaliação econômica e até mesmo sensores instalados nos próprios equipamentos de operação.

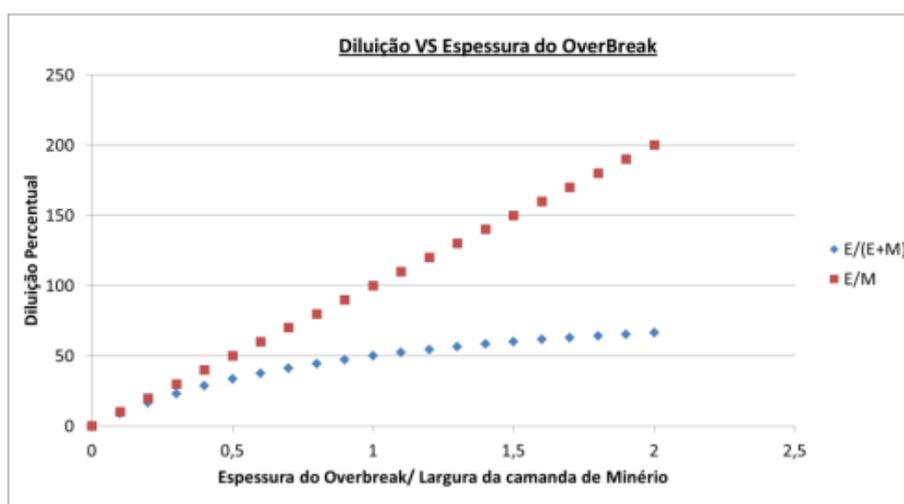
Segundo Pakalnis (1986), vários são os modelos de cálculo da diluição em minas. Scooble e Moss (1994) mostraram que as equações mais utilizadas no cenário canadense seriam as equações 2 e 3, enquanto Pakalnis et al (1995) propõem a padronização da equação 2 para o cálculo da diluição:

$$\text{Diluição} = \frac{\text{Estéril Minerado em Toneladas}}{\text{Minério Minerado em Toneladas}} \quad (2)$$

$$\text{Diluição} = \frac{\text{Estéril Minerado em Toneladas}}{\text{Minério Minerado em Toneladas} + \text{Estéril Minerado em Toneladas}} \quad (3)$$

A figura X traz a relação entre as duas equações A equação (2) é linear enquanto a equação (3), apesar de linear, tende a uma assíntota no valor máximo de 100%. (OLIVEIRA, 2012).

**Figura 7** - Gráfico comparativo das equações de diluição.



Extraído de:

### 3.8 Aplicativos Comerciais

De uma forma geral, segundo Silva (2021b), os aplicativos têm como principais módulos: banco de dados geológicos, modelagem, composição, análise, criação de modelo, projeto.

Na lavra subterrânea, a otimização do projeto e padronização das minas por meio de aplicativos comerciais está(va) menos disponível do que para a lavra a céu aberto.

Existia uma necessidade reconhecida de melhoria das ferramentas computacionais para embasar o planejamento, o projeto e a operação de minas subterrâneas (AMIRA, 2009; Alford, 1995).

Houve dramática melhoria nos softwares (Bowater, 2022).

#### 3.8.1 Programa *DESWIK*

A Deswik é uma empresa de tecnologia e consultoria multinacional que oferece soluções eficientes em todos os setores da mineração – Lavra a Céu Aberto e

Subterrânea, de carvão e de metais. O software Deswik é utilizado em mais de cinquenta países, tendo sido desenvolvido para aproveitar ao máximo as últimas tecnologias de alto desempenho e excelentes algoritmos de computação, tudo isso disponível em uma interface flexível e intuitiva. Ao evitar os problemas preexistentes de outros softwares e fornecer suporte diferenciado ao cliente, consegue-se gerar soluções completas e eficientes para as necessidades da mineração atual. (DESWIK, 2023).

### **3.8.2 Deswik.CAD**

O Deswik.CAD é uma ferramenta de CAD (desenho auxiliado por computador), sendo uma ferramenta para gerenciamento de dados e banco de dados espacial, permitindo ao usuário gerar, exibir e analisar relatórios. Constitui-se uma ferramenta de projetos em geral e é o módulo que une as ferramentas de projeto de minas da empresa (DESWIK, 2022).

Com essa ferramenta, é possível gerar sólidos, executar comando Booleanos, realizar cubagens de sólidos, criar relatórios gráficos, manipular modelos de blocos, realizar desenhos de cavas, além de combinar recursos tipo GIS (Sistema de informação geográfica) com dados de mineração tridimensionais (DESWIK, 2022).

### **3.8.3 Deswik.SO**

O Stope Optimizer (SO) é uma ferramenta cuja função é gerar o melhor cenário para a criação de stopes, por meio de uma análise dos parâmetros fornecidos por um modelo de blocos. O Deswik.SO é uma ferramenta estratégica de planejamento de mina que automatiza o design de realces para diversos métodos de escavação de realces em minas subterrâneas. O objetivo é maximizar o valor de um corpo mineralizado, considerando as restrições de um determinado método de lavra e dos parâmetros de design (DESWIK, 2023). Os outputs gerados pelo software são adequados para serem utilizados nos diferentes horizontes do planejamento de lavra, dentre eles podem-se citar:

- *Wireframe* dos realces: sólidos representativos dos realces otimizados gerados;
- *Strings* de seção dos realces: linhas de contorno e seção dos realces otimizados gerados;

- Relatórios: relatórios resumidos e detalhados acerca dos realces gerados.

Um dos principais recursos do Deswik.SO é a sua capacidade de analisar rapidamente diversos métodos de escavação ou parâmetros de realces, a fim de auxiliar os engenheiros no desenvolvimento de um plano estratégico de mina baseado em diferentes abordagens de como lavrar um corpo mineralizado, A ferramenta de gerenciamento de cenários de múltiplos processos da Deswik permite que várias opções de lavra sejam consideradas e comparadas rapidamente (DESWIK, 2023).

### **3.9 Projeto (Design) de Realces**

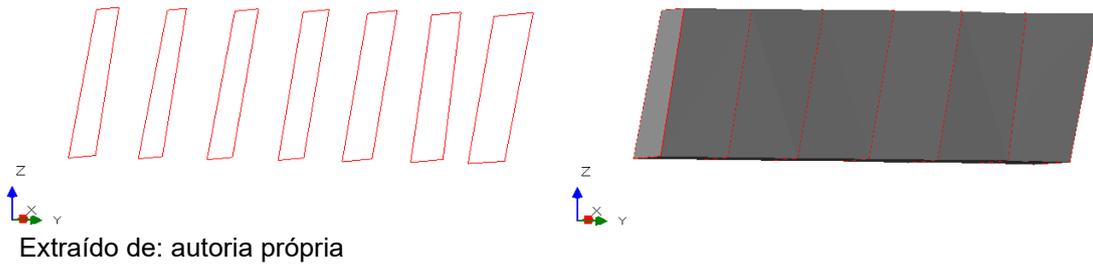
Segundo VERHOEFF (2017), otimização significa a seleção do melhor elemento (levando em consideração alguns critérios) dentre uma série de alternativas possíveis.

O design de realces de uma mina subterrânea não é uma tarefa simples, tendo em vista a dificuldade de se encontrar algoritmos realmente eficazes capazes de realizar a otimização do depósito mineral subterrâneo.

Segundo Rosado (2019), essa dificuldade maior na otimização do design para minas subterrâneas se deve à complexidade maior desses métodos. A definição do limite do realce pode ser extremamente complexa visto que é governada por fatores como: condições geomecânicas do maciço, restrições operacionais de equipamentos, posicionamento em relação às galerias de desenvolvimento, distância mínima entre realces paralelos, corpo mineral descontínuo, variação da potência do corpo de minério, entre outros.

Um dos métodos mais empregados para o design de realces de lavra é o método das seções, o qual consiste em desenhar seções verticais ao longo do strike do corpo, levando em consideração os limites de minério do depósito, posteriormente, essas seções são conectadas duas a duas, formando os sólidos e volumes a serem lavrados. Esses sólidos podem ser cubados para que seja conhecidas informações como por exemplo: tonelagem de minério e estéril, teor, densidade, dentre outras características referentes ao sólido em relação ao depósito. A Figura 8 ilustra o método das seções.

**Figura 8** - Seções e sólidos formados pelo método das seções.



Segundo Rosado (2019), apesar de ter aplicação predominante no planejamento de lavra, sobretudo para o método *Sublevel Stopping*, o método de seções não é otimizador, já que depende bastante do desenhista que está realizando o projeto. Segundo VERHOEFF (2017), relatórios mostram que 60% das minas pesquisadas têm uma taxa de produção média 30% menor que as respectivas capacidades projetadas.

Percebendo essa necessidade, e a fim de minimizar essa diferença entre projeto e produção real, várias empresas desenvolveram algoritmos com a finalidade de otimizar corpos subterrâneos.

Segundo Rosado (2019), são três os itens necessários para a otimização:

- Variáveis para tomada de decisão: são aquelas que influem no resultado final que se deseja com a otimização. Pode ser, por exemplo, um teor de interesse ou o valor econômico do bloco.
- Função objetivo: é a expressão matemática que, a partir das variáveis de interesse, permite alcançar o máximo valor para o realce desenhado.
- Restrições: são elementos que restringem o desenho do realce e influenciam, portanto, no processo de otimização.

Já em relação às restrições, também segundo Rosado (2019), podem ser classificadas em:

- Geológicas: especificação de um teor mínimo desejável do elemento de interesse ou de um teor máximo de um elemento indesejado para o processo.
- Geotécnicas: alocação de pilares laterais ou verticais para manter a estabilidade local e global. Definição do tamanho máximo do realce que possibilite uma operação estável e controle de diluição durante a operação.

- Operacionais: especificações de inclinação mínima do realce, regularidade das paredes do sólido, máximo ângulo de variação ao longo do strike e do dip, razão de área entre as faces do sólido gerado, unidade mínima de lavra, compartimentação vertical, largura mínima de lavra, entre outros.

## **4. Materiais e métodos**

Neste trabalho, a partir de uma revisão bibliográfica inicial, foram desenvolvidos diferentes cenários para o projeto dos realces para um depósito de ouro. Foi estabelecido um padrão para a geometria dos realces levando em consideração a morfologia do corpo de minério, para que assim, possa se fazer uma comparação mais assertiva da diluição obtida entre eles.

Dentre os cenários, um foi desenvolvido manualmente, com o auxílio das ferramentas de desenho presentes no módulo Deswik.CAD, pertencente ao software comercial Deswik, e os demais cenários foram otimizados variando as estratégias para o cálculo do teor de corte, utilizando o módulo Deswik.SO, pertencente ao mesmo software, para desta forma ser comparada a diluição total entre os cenários.

Neste capítulo serão detalhadas as configurações e parâmetros utilizados para os projetos dos realces, bem como a base de dados utilizada.

### **4.1 Base de dados**

Os dados necessários para a realização deste estudo foram manipulados e tratados com o auxílio do software mencionado. Para isso, foram utilizadas as seguintes bases de dados:

- Modelo de Blocos do corpo mineral de interesse;
- Wireframe geológica.

O modelo de blocos possui atributos de tamanho e localização espacial dos blocos nos eixos X, Y e Z, além de apresentar campos para o teor de ouro (Au) em gramas por toneladas e também a densidade

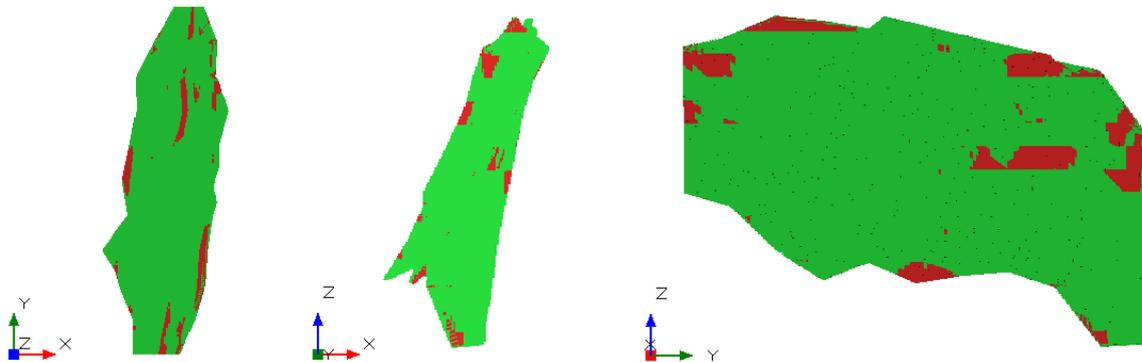
**Tabela 2** - Estatísticas básicas do modelo de blocos.

Atributo	Mínimo	Máximo	Média	Desv. Pad	Variância
AU	0,19878	16,712	7,3059	3,0546	9,3303
Density	2,9	2,9	2,9	-	-

Fonte: Autoria Própria.

Além disso, o modelo de blocos utilizado é regular e possui blocos com dimensão de 10 m em X, Y e Z respectivamente. Sua extensão total abrange apenas o corpo de minério, não contendo representação e informações acerca da capa e lapa.

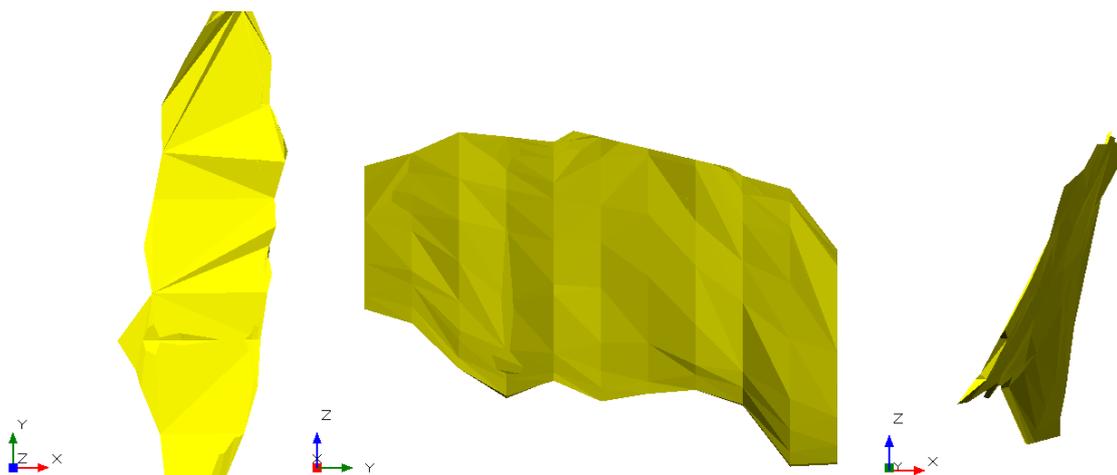
**Figura 1** - Vistas do Modelo de Blocos em: planta, frontal e lateral respectivamente.



Extraído de:

A *wireframe* geológica é o modelo geométrico, ou superfície fechada, representativa do modelo de blocos, usada como orientação local para as zonas mineralizadas para a otimização.

**Figura 10** - Vistas da wireframe geológica em: planta, frontal e lateral.



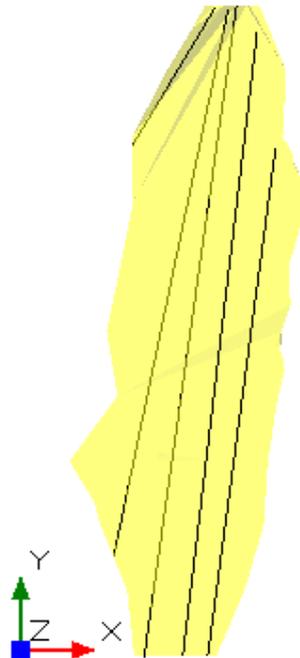
Extraído de:

## 4.2 Características do depósito

Uma etapa de extrema importância é conhecer as características e morfologia do depósito a ser estudado. O conhecimento dessas particularidades é fundamental para a definição do método de lavra e projeto de suas respectivas estruturas como por exemplo: realces, pilares e galerias. Dentre essas, foram definidas para este estudo as seguintes características: mergulho, strike, potência e forma. Sendo que destas, a última é uma característica qualitativa e as demais são quantitativas.

Para a definição do strike do depósito, em vista de topo, mediu-se o ângulo em relação a direção Norte no sentido horário. Para isso, traçaram-se diferentes seções ao longo de sua extensão no plano XY e obteve-se o valor médio do ângulo para elas. A Figura 11 e a Tabela 3 exemplifica o traçado destas seções bem como o ângulo medido em cada uma.

**Figura 11** - Seções traçadas ao longo da extensão do modelo de blocos.



Extraído de: Aatoria  
Própria.

**Tabela 2** - Medição do strike em cada seção.

<b>Seção</b>	<b>Strike (°)</b>
1	7.53
2	8.00
3	11.5
4	6.6

Fonte: Aatoria Própria

Por meio das medições realizadas, encontrou-se um valor médio para o strike de 8,41°, dessa maneira será utilizado o valor de 8° para as configurações necessárias.

O mergulho foi medido em cinco diferentes pontos ao longo do depósito utilizando uma ferramenta de Deswik.CAD própria para este fim.

**Tabela 3** - Medição do mergulho ao longo do modelo de blocos.

<b>Seção</b>	<b>Mergulho (°)</b>
1	64
2	62
3	85
4	72

Fonte: Autoria Própria

Por meio das medições realizadas, encontrou-se um valor médio para o mergulho de  $70,75^\circ$ , dessa maneira será utilizado o valor de  $70^\circ$  para as configurações necessárias.

A potência do depósito tem variabilidade ao longo de sua extensão em profundidade, porém em sua totalidade pode-se considerar como um depósito espesso, uma vez que CURI (2017) define tais depósitos como tendo espessuras entre 5 a 20 metros.

No que diz respeito a sua forma, pode-se considerar como sendo um depósito muito inclinado verticalmente, uma vez que apresenta um mergulho de  $70^\circ$ , e lenticular dada as suas características morfológicas, conforme Figura 9 - Vistas do Modelo de Blocos em: planta, frontal e lateral respectivamente.

#### **4.3 Definição do método de lavra**

A definição do método de lavra em uma mina é uma etapa que acarretará influências por toda a vida útil da mesma, para que ocorra de maneira assertiva, devem ser levadas em consideração características geomecânicas do minério e rochas encaixantes, fatores econômicos como custo e produtividade dos métodos disponíveis, o grau de seletividade e diluição, bem como a morfologia dos corpos a serem lavrados. Neste estudo, tendo em vista o objetivo de comparar a diluição em diferentes maneiras de se realizar o projeto de realces, levou-se em conta apenas parâmetros da morfologia do depósito mineral.

O corpo mineral utilizado neste trabalho foi classificado como vertical a subvertical e possui formato lenticular, características essas ideais para o método de Realces em Subníveis, no qual os realces gerados serão o objeto principal de estudo,

dessa maneira, justifica-se o emprego de tal método de lavra para o depósito em questão.

## 5. Desenvolvimento

Após definida a metodologia a ser utilizada, seguiu-se para a criação dos diferentes cenários.

### 5.1 Configuração de otimização

Nesta sessão serão demonstradas as principais configurações e parâmetros utilizados para gerar os cenários otimizados pelo Deswik.SO.

### 5.2 Geometria

As características observadas no depósito de ouro estudado (vertical a subvertical, lenticular e espesso), indicam que a metodologia a ser aplicada é o método das seções ou “slices”.

Neste método é importante que se defina em qual plano o corpo mineralizado se encontra. Dessa maneira o terceiro eixo de orientação será utilizado como o sentido em que a otimização ocorrerá. De acordo com a Alford Mining Systems – AMS (2020), produtora e fornecedora do módulo Deswik.SO, as estruturas do Método das seções são subcategorizadas em:

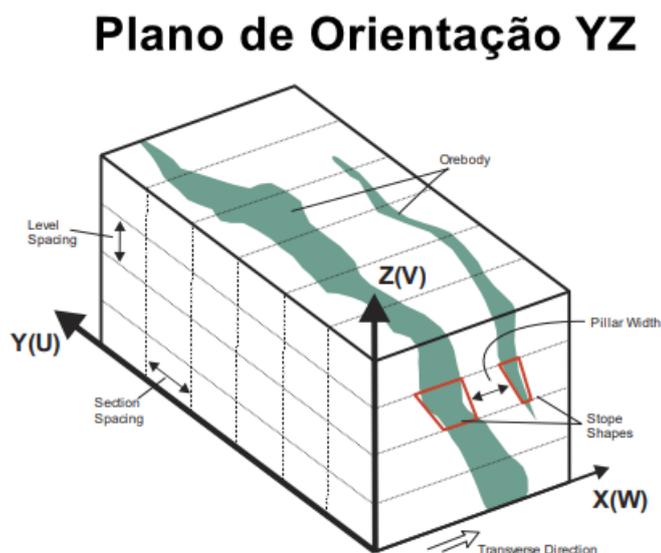
- Vertical: orientações XZ ou YZ do corpo de minério;
- Horizontal: orientações XY ou YX do corpo de minério;
- Transversal: caso especial de orientações de corpo de minério XZ ou YZ, que otimizam as formas nas direções transversal e vertical.

A estrutura das regiões otimizadoras com orientação XZ | YZ | XY | YX também podem ser mapeadas ou visualizadas com uma convenção de nomenclatura genérica relacionada à direção do eixo:

- U (Y): é a direção primária dos realces, direção do strike. (comprimento).
- V (Z): é a direção secundária dos realces, direção vertical. (altura quando vertical e largura quando horizontal).
- W (X): é a direção “transversal” terciária (largura para vertical / espessura para horizontal). Este é o eixo pelo qual o realce será otimizado.

O depósito corpo mineral objeto deste estudo possui mergulho médio de  $70^\circ$ , e é considerado vertical, sendo assim, seus eixos de direção serão no plano YZ e o eixo X será o eixo pelo qual a otimização ocorrerá. A Figura 12 exemplifica uma região com orientação YZ.

Figura 12 - Plano de Orientação YZ



Extraído de: DESWIK, 2023.

Outros parâmetros definidos, no que diz respeito a geometria dos realces, são as dimensões dos mesmos nas direções Y e Z, que foram de 20 metros e 10 metros respectivamente, enquanto no sentido X será resultado da otimização feita pelo software. Deve-se levar em conta também os pilares de sustentação, sill pillars e rib pillars, que também são definidos nesta etapa. Os mesmos, a depender do método de lavra e parâmetros geotécnicos, devem existir ou não. Os cenários comparados terão, a partir das dimensões do depósito mineral, níveis de 80 metros de altura, cada um com 4 subníveis, e entre cada nível um sill pillar de 5 metros de altura.

A Figura 13 exemplifica este arranjo citado acima:

**Figura 13** - Arranjo geométrico geral dos cenários.



Extraído de: autoria própria.

Em um ambiente real, tais parâmetros são definidos após estudos de dimensionamento, levando em consideração parâmetros geomecânicos e geotécnicos, econômicos e operacionais, de acordo com os equipamentos disponíveis para operação. Como o objetivo geral é fazer a comparação da diluição entre projetos manual e otimizados dos realces em uma base genérica, não serão levadas em consideração tais parâmetros para o projeto dos mesmos, optou-se por uma padronização das dimensões dos realces nas direções X e Y, bem como das estruturas de dimensionamento em todos os cenários, a fim de poder observar as diferenças entre os que foram desenvolvidos manualmente e os otimizados.

### **5.3 Teor de Corte (*Cutoff grade*)**

Deve-se definir também o teor de corte, um dos principais parâmetros econômicos em uma mina, uma vez que o objetivo do empreendimento é maximizar o lucro por meio do aumento da produção e a diminuição dos custos. A definição do teor de corte tem

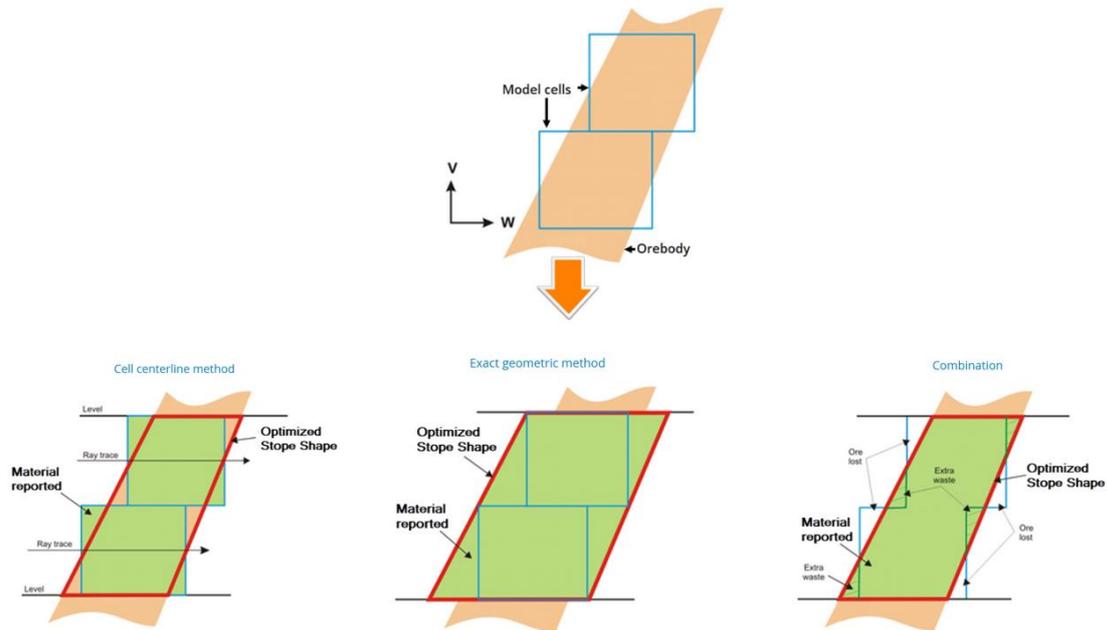
impacto direto nesse trabalho, pois é a partir dele que se define o que é minério e o que é estéril.

O Deswik.SO tem diferentes métodos de avaliação do teor de corte do realce gerado: “*Cellcenterline*”, “*Exact Geometric*” e “*Combination*”.

- *Cellcenterline*: é o método mais rápido de avaliação, consiste que usa traçado de raios para avaliação do teor. Dessa maneira o teor do realce seria o teor médio das células do modelo de blocos interceptados pelo mesmo. A estrutura do realce gerado combina com a estrutura do corpo de minério, a massa e o teor do realce correspondem ao corpo de minério.
- *Exact Geometric*: faz a interseção do formato do stope com o volume das células do modelo de blocos, de modo que uma parte do volume dessas células cairia fora do formato do realce (ou seja, diluição) e partes do formato do stope não teriam correspondentes no corpo de minério. Como resultado deste método de avaliação, um grau de diluição é aplicado a esse volume. A estrutura do realce gerado tenderá a levar todo o material de alta qualidade. No caso extremo, isso significa que a estrutura do realce terá a forma que se estende até o limite geométrico das células, gerando uma diluição adicional.
- *Combination*: este método demanda um tempo maior de processamento, pois consiste na combinação dos métodos citados anteriormente. A estrutura gerada para os realces será a mesma do método Cellcenterline, variando apenas o teor.

A figura 14 ilustra os métodos de avaliação citados:

**Figura 14** - Comparação entre os métodos de avaliação de teor.



Extraído de: DESWIK, 2023.

Na figura 14 a estrutura do corpo de minério é representado pela *Orebody*, as células do modelo de blocos, pelas *Block Model Cell*, enquanto os realces gerados, pelos *Optimized Stope Shape*.

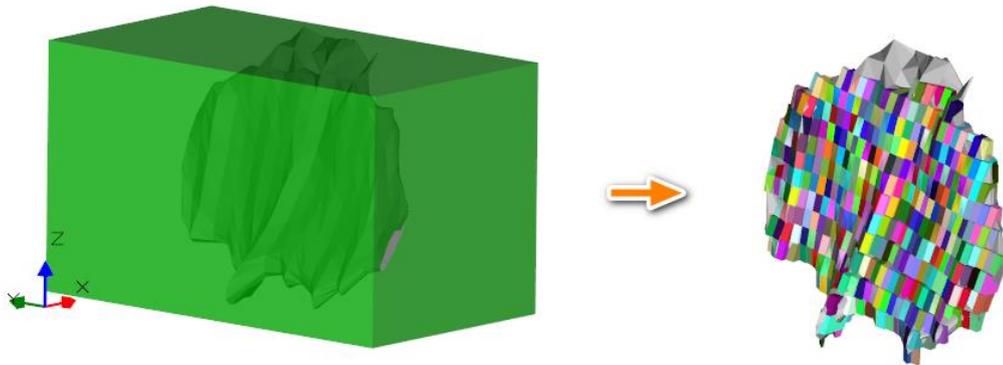
Para este trabalho, foram gerados 3 cenários utilizando cada um dos métodos descritos, enquanto o teor de corte adotado foi de 3,0 gramas por tonelada. Valor considerado coerente ao se comparar com os valores adotados em algumas minas subterrâneas de ouro, Tabela 1.

#### 5.4 Região de Otimização

A região de otimização é definida para que se delimite a região 3D ao longo do depósito mineral, representado pelo modelo de blocos, em que ocorrerá a otimização. Podendo abranger parcialmente ou completamente o modelo de blocos. Nos casos em que o corpo mineral seja rotacionado, pode-se aplicar esta rotação na região de otimização, tendo impacto nos resultados dos realces gerados.

A figura 15 apresenta a estrutura 3D da região de otimização bem como os realces gerados a partir da mesma.

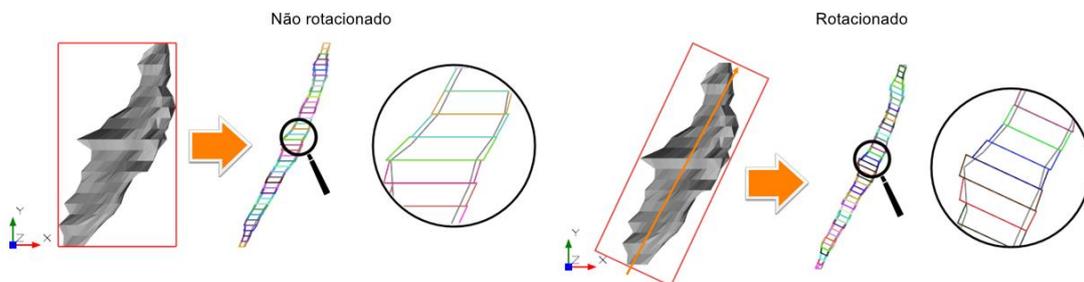
**Figura 15** - Realces gerados a partir da estrutura de otimização.



Extraído de: DESWIK, 2023.

A Figura 16 exemplifica a influência da rotação da estrutura 3D da região de otimização em um corpo rotacionado.

**Figura 16** - Diferença na otimização a partir da estrutura de otimização rotacionada.



Extraído de: DESWIK, 2023.

A origem e extensão dessa região é definida pelo usuário, apesar de poder coincidir com a origem e extensão do modelo de blocos, mas geralmente é definida um pouco além, para que se tenha a certeza de que toda a extensão do depósito será otimizada.

Para este trabalho, adotaram-se as seguintes origens e extensões levando em consideração o strike do corpo, conforme a Tabela 5.

**Tabela 4 -** Informações da estrutura de otimização adotada.

Eixo	Origem (m)	Extensão (m)	Rotação (°)
X	4637	152	0
Y	3831	420	0
Z	-79	304	8

Fonte: Autoria Própria.

## 5.5 Diluição

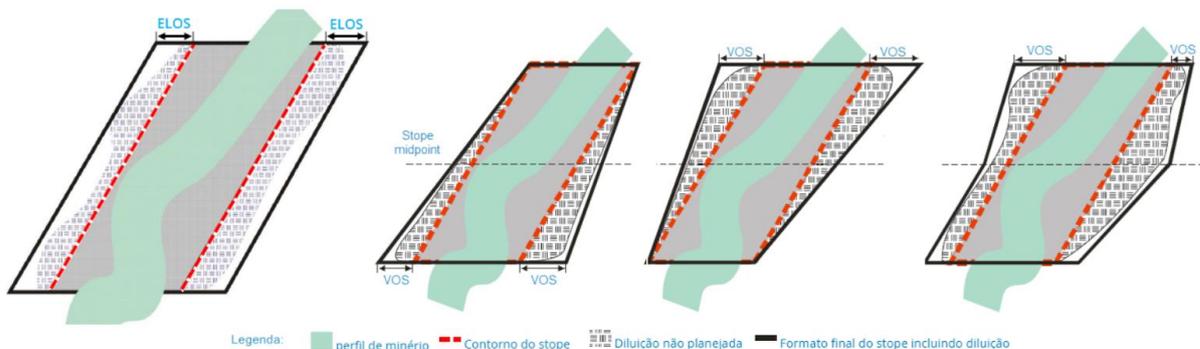
O Deswik.SO permite que o usuário defina uma diluição não planejada a ser considerada já no projeto, definindo assim um fator para o cálculo desta diluição e posterior acréscimo nos realces gerados. Dessa maneira após a otimização, o software adequará os limites do realce, aplicando uma compensação no projeto seguindo duas diferentes metodologias a ser escolhidas pelo usuário:

- *Equivalent linear overbreak slough (ELOS)*: aplicará as compensações de diluição linear em ambos os lados do realce.
- *Variable overbreak/slough (VOS)*: aplicará as compensações de diluição variáveis no topo, ponto médio e base em ambos os lados do realce

Este fator é aplicado, levando em consideração um conhecimento prévio da diluição não planejada que ocorre durante a operação na mina, devido ao estéril excedente que é desmontado e carregado junto com o material de interesse.

A Figura 17 exemplifica as duas metodologias de aplicação citadas.

**Figura 17 -** Comparação entre as metodologias de aplicação da diluição operacional.



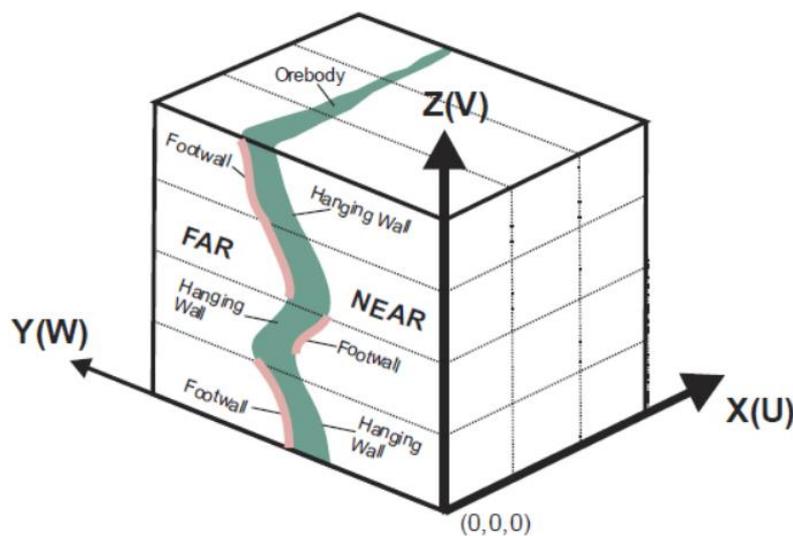
Extraído de: DESWIK, 2023.

Além das duas metodologias de se aplicar a diluição aos realces, existem duas outras diferentes convenções para a aplicação desta diluição, no que diz respeito à posição e nomenclatura das rochas encaixantes no corpo de minério:

- *Hanging wall/footwall convention*: o fator de diluição será especificado para a capa (“*Hanging wall*”) e lapa (“*footwall*”) respectivamente. As rochas que ocupam a capa e a lapa mudam a depender se inclinação do corpo mudar de inclinação ao longo da profundidade.
- *Near and far convention*: especificam-se os fatores de diluição para as paredes próxima e distante, tendo como referência as coordenadas ao longo da direção primária do corpo de minério. Os lados considerados como “próximos” e “distantes” do corpo de minério nunca mudam, mesmo que o corpo mude de inclinação ao longo da profundidade.

Na Figura 18 tem-se a diferença entre ambas as convenções.

**Figura 18** - Diferença entre "Near and Far convention" e "Footwall and hangingwall convention".



Extraído de: DESWIK, 2023.

Além de se definir a diluição não planejada a ser considerada no projeto, pode-se também definir um fator máximo de diluição total a ser aplicado no realce. Desta forma, o realce gerado não ultrapassará este limite definido.

$$\text{Fator de diluição} = \frac{\text{Volume de estéril diluído a ser acrescido no realce}}{\text{Volume do realce diluído}} \quad (4)$$

Para este trabalho, foi escolhida a metodologia *equivalent linear overbreak slough* (ELOS), bem como a convenção *hanging wall/footwall convention*. Já para o fator de diluição não planejada aplicada, foi definido o valor de 0,3.

## 5.6 Parâmetros Chaves

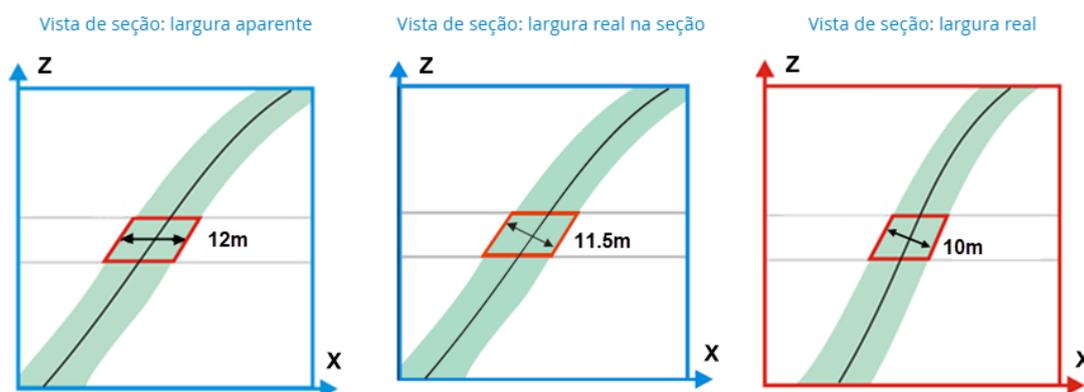
Para que a otimização ocorra de maneira mais precisa, é necessário estabelecer alguns parâmetros chaves, que determinarão por exemplo as larguras máximas e mínimas para os realces otimizados, a variação de mergulho e strike.

No DeswikSO é possível determinar qual convenção de largura será considerada durante a otimização, dentre as seguintes.

- Largura Aparente: distância mínima no plano horizontal na seção do realce ao longo do eixo X;
- Largura verdadeira na seção: é medida em relação ao mergulho médio do realce, em seu centroide.
- Largura real: é medida em relação ao mergulho médio e strike do realce, em seu centroide, no plano vertical que então define a direção de mergulho.

A Figura 19 exemplifica as diferentes maneiras de se definir a largura do realce.

**Figura 19** - Convenções de determinação de largura. (DESWIK, 2023)

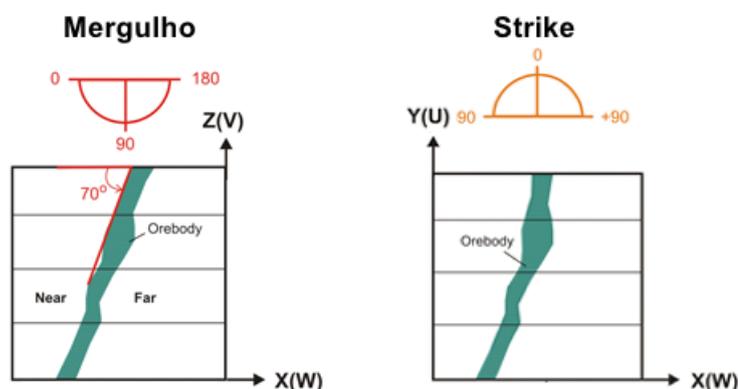


Extraído de: DESWIK, 2023.

Deve-se definir também o mergulho e strike padrão a serem utilizados na otimização. O Deswik.SO define o mergulho como o ângulo medido como  $0^\circ$  do eixo horizontal, do lado esquerdo, conforme se olha ao longo do eixo de ataque primário (U) e aumenta, no sentido anti-horário, para  $+90^\circ$  verticalmente para baixo e  $+180^\circ$  para o eixo horizontal do lado direito. A faixa do ângulo de mergulho é de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .

Já o *strike* é medido, no sentido horário positivo, a partir do eixo do curso primário (eixo U, direção positiva) da orientação/plano da estrutura do realce selecionado. Em outras palavras, em  $0^\circ$  se estaria olhando ao longo do eixo de direção na direção da coordenada positiva, em  $+90^\circ$  se estaria olhando, no sentido horário, em ângulos retos, a partir do plano do eixo de direção positivo e em  $-90^\circ$ , se estaria olhando no sentido anti-horário, em ângulos retos, a partir do plano do eixo de ataque positivo. A faixa do ângulo de ataque é de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ . A figura 20 exemplifica a forma de cálculo para mergulho e strike adotadas pelo Deswik.SO.

**Figura 20** - Metodologia de cálculo para ângulo de mergulho e strike.



Extraído de: DESWIK, 2023.

Para os cenários gerados neste estudo, foram definidos para mergulho padrão o valor de  $70^\circ$  e para o strike padrão,  $8^\circ$ , e a convenção utilizada para a medição da largura foi a de Largura Aparente.

Além disto, foi utilizada a *wireframe* geológica para definir a orientação geral esperadas nas zonas mineralizadas do corpo de minério. Será utilizada como controle e terá prioridade sobre o mergulho e strike padrão. Dessa maneira os realces otimizados terão uma maior aderência se comparados com o corpo mineralizado.

Foi necessário também definir os valores para o mergulho e strike máximos e mínimos permitidos, bem como a variação total em um mesmo realce. Ficando assim definidos conforme a Tabela 6.

**Tabela 5** - Ângulos de mergulho e strike adotados

<b>Mergulho (°)</b>		<b>Strike (°)</b>	
Mínimo	50	Mínimo	-10
Máximo	90	Máximo	15
Variação Total	30	Variação Total	20

Fonte: autoria própria.

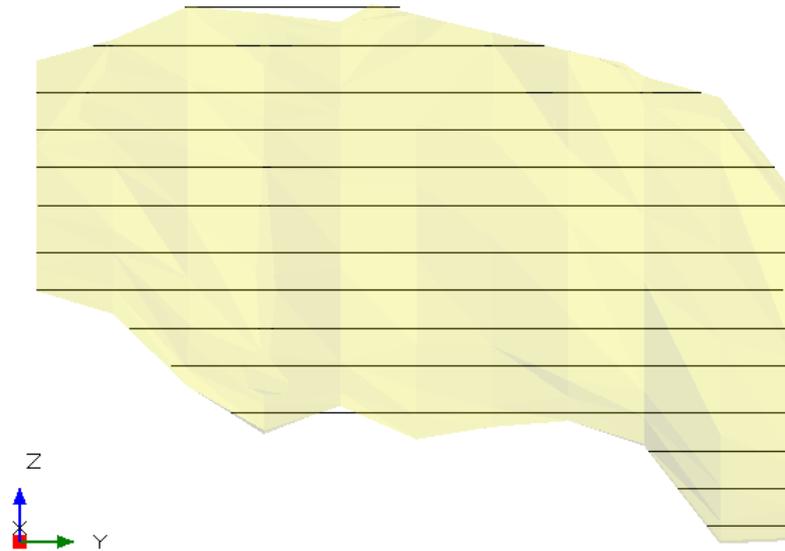
## 6. Projeto Manual dos Realces

Para o projeto manual dos realces, foi utilizado o método das seções, seguindo a geometria padrão definida para os cenários. Uma vez que os realces terão 20 metros de altura, traçou-se uma linha 10 metros acima da cota mais baixa do depósito, servindo de guia para o desenho das seções, posteriormente foram desenhadas as demais linhas guias, para os níveis restantes, levando em consideração os *sill pillars* de 5 metros.

Cada linha guia foi desenhada seguindo os limites da *wireframe* geológica em cada cota correspondente, sendo a linha de menor cota situada a -65 metros e a de maior cota situada a 210 metros.

A Figura 21 apresenta as linhas guias desenhadas a partir da *wireframe* geológica.

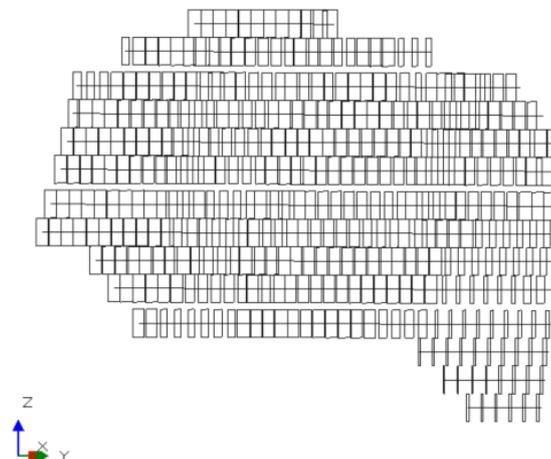
**Figura 21** - Linhas guia sobre a *wireframe* geológica.



Extraído de: autoria própria.

Após o desenho das linhas guias, partiu-se para gerar as seções, pelas quais posteriormente os sólidos representativos dos realces serão gerados, traçou-se então as linhas guias, com formato retangular de 20 metros de comprimento, a cada 10 metros ao longo de cada linha. Essas linhas guias serão utilizadas para identificar a localização onde deverá ser feita cada contorno no corpo de minério, que após conectados dois a dois, formarão o realce. A Figura 22 apresenta as linhas guias desenhados a partir das linhas.

**Figura 22** - Linhas guia.

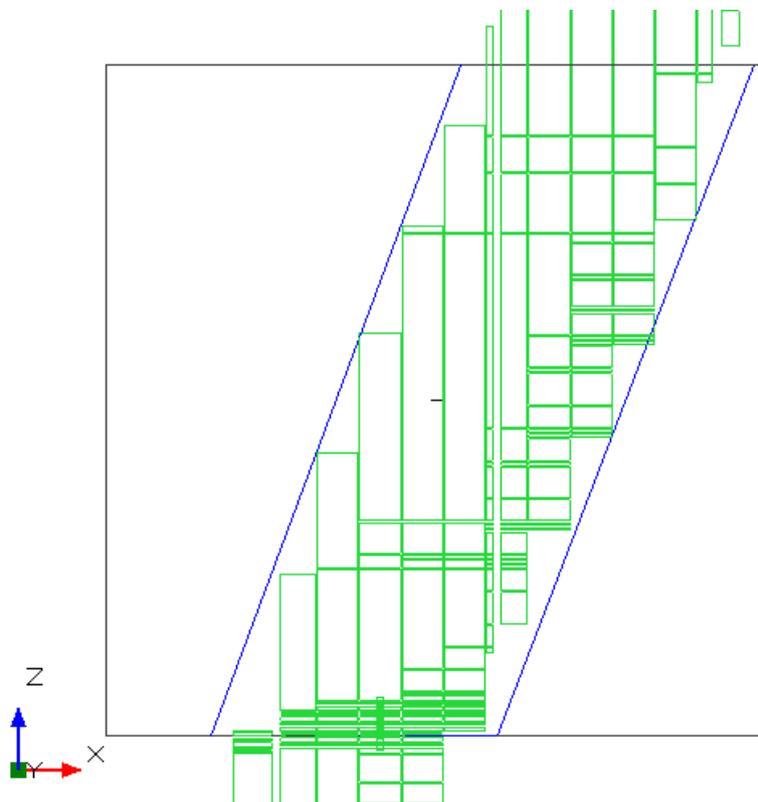


Fonte: autoria própria.

Posterior ao desenho das linhas guia, desenharam-se os contornos no corpo de minério, com base nos modelos de blocos. Com isso, posicionou a visualização de forma frontal, deixando visíveis o corpo de minério e cada retângulo separadamente. Dessa forma os desenhos dos contornos foram feitos, passando por cada linha guia, o contorno foi desenhado utilizando 4 pontos dentro do limite da linha guia, para que obedeça à altura de 20 metros, buscando enquadrar o minério dentro do mesmo e evitando extrapolá-lo na tentativa de diminuir o máximo (possível) a diluição.

A Figura 23 apresenta como é desenhado o contorno (em azul) a partir do modelo de blocos (em verde), representativo do corpo de minério.

**Figura 23** - Desenho do contorno do corpo de minério.

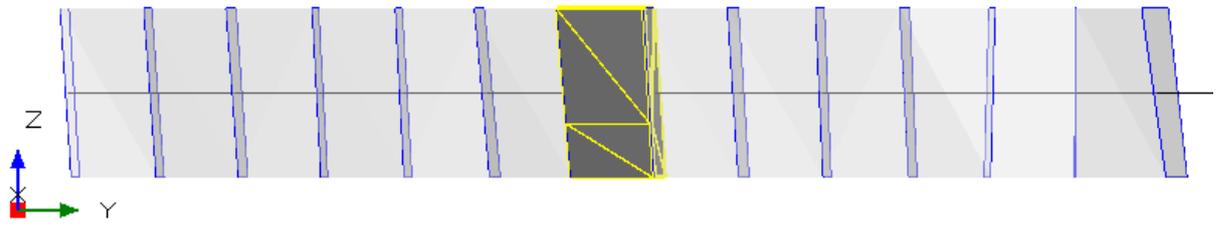


Fonte: autoria própria.

Finalmente, após o desenho dos contornos, para gerar os sólidos representativos dos realces, criaram-se sólidos unindo-os dois a dois, dessa forma obtiveram-se realces de 20 metros de comprimento e 10 m de largura.

A Figura 24 apresenta em destaque o sólido representativo de um realce e os contornos após o processo finalizado.

**Figura 24** - Sólidos representativos gerados.



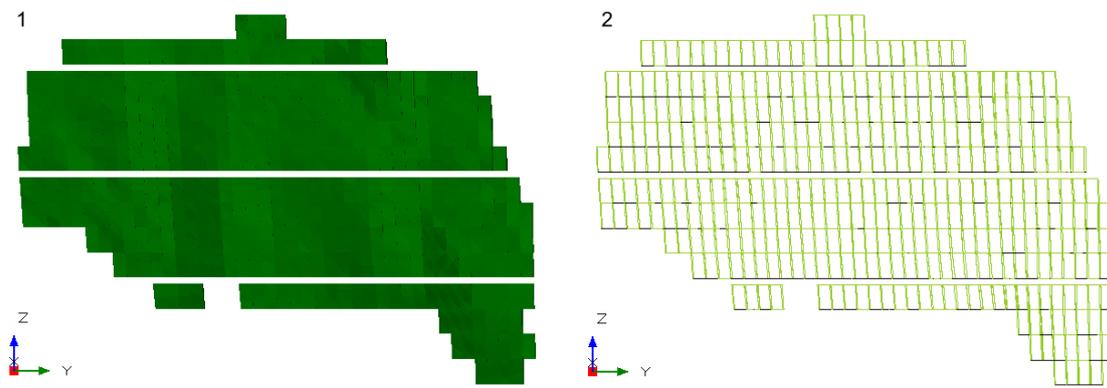
**Fonte:** Autoria Própria.

## 7. Resultados

### 7.1 Cenário 1

Para o cenário 1, otimizado pelo Deswik.SO, utilizou-se todos os parâmetros acima citados e para a metodologia da avaliação do teor de corte, usou-se a *Cell centerline*, como resultados obteve-se os seguintes outputs demonstrados na Figura 25:

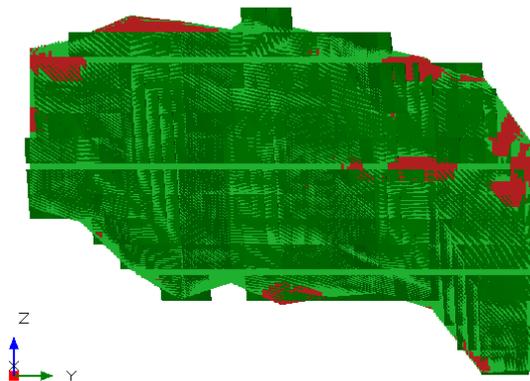
**Figura 2** - Realces gerados cenário 1.



Fonte: Autoria Própria.

Em 1 tem-se a wireframe dos realces, sólidos representativos dos mesmos, e em 2 têm-se as linhas geradas e utilizadas no método das seções para a geração final dos stopes. Em relação ao modelo de blocos, representativo do depósito estudado, observou-se que os realces gerados ficaram bastantes aderentes, conforme a Figura 26.

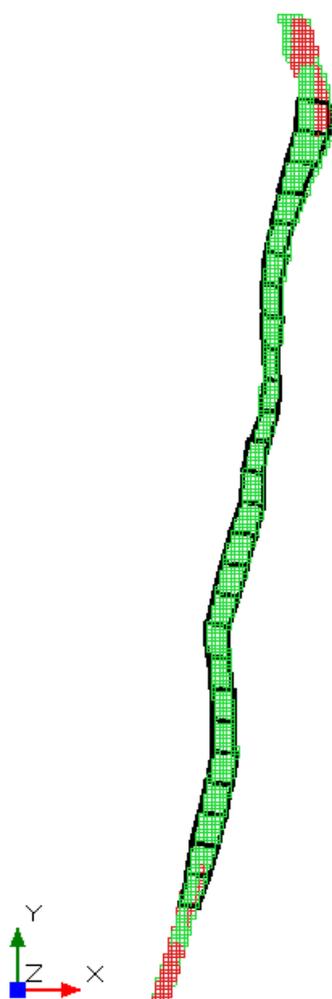
**Figura 26** - Vista dos realces gerados no cenário 1 e modelo de blocos.



Fonte: Autoria Própria.

Pode-se observar em verde mais claro todo o minério do depósito e em vermelho, o estéril. Dessa maneira, o software não gerou realces em grande parte destas regiões, uma vez que, se gerados, não seriam economicamente viáveis (teor de corte maior que 3,0 g/t), como mostra a Figura 27, que apresenta a vista em corte do modelo de blocos e dos realces gerados.

**Figura 27** - Vista em corte do modelo de blocos e realces gerados no cenário 1.



Fonte: Autoria Própria.

Foram gerados 376 realces e, após realizada a cubagem, processo para saber informações do tipo: massa, teor e volume, em relação ao modelo de blocos, chegou-se nos seguintes dados da tabela 7.

**Tabela 7** - Cubagem realizada nos realces do cenário 1.

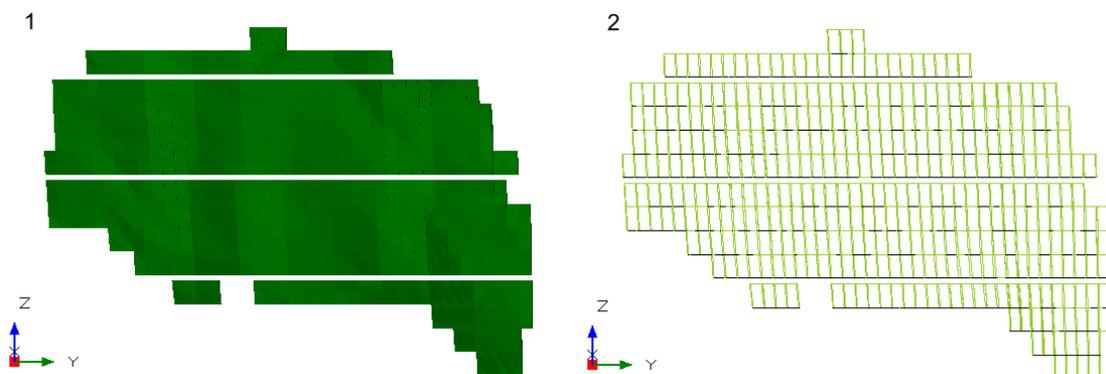
	<b>Massa (t)</b>	<b>Diluição (%)</b>	<b>Teor Médio (g/t)</b>	<b>Ouro Contido (Oz*10<sup>10</sup>)</b>
Minério	1.324.867,48			
Estéril	277.914,18	17,3	8,32	4,7
Total	1.602.781,66			

Fonte: Autoria Própria.

## 7.2 Cenário 2

Desenvolveu-se o cenário 2 a partir da metodologia *Exact Geometric* para avaliação do teor de corte e dos parâmetros já discutidos. Como resultado também se obtiveram os sólidos representativos dos realces (1), bem como as linhas utilizadas no método das seções (2), conforme a Figura 28.

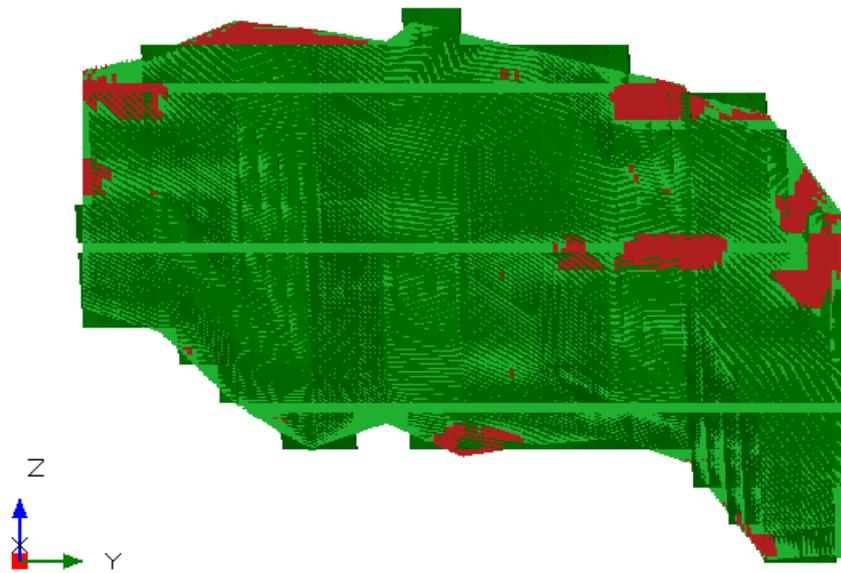
**Figura 28** – Realces gerados cenário 2.



Fonte: Autoria Própria.

Comparando a área superficial ocupada pelos realces e a área ocupada pelo modelo de blocos pela Figura 29, nota-se que este cenário teve boa aderência ao depósito de ouro.

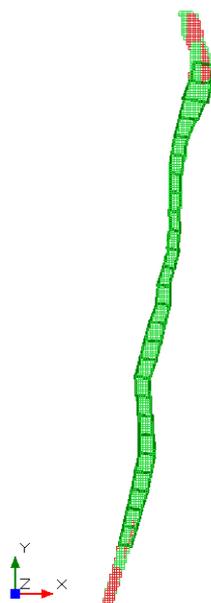
**Figura 29** - Vista dos realces gerados no cenário 2 e modelo de blocos.



Fonte: Autoria Própria.

Já a Figura 30 apresenta o modelo de blocos e os realces em uma seção, demonstrando que o software não gerou realces em regiões com alta concentração de estéril.

**Figura 30** - Vista em corte do modelo de blocos e realces gerados no cenário 2.



Fonte: autoria própria.

Foram gerados 376 realces e, após realizada cubagem, chegou-se nos seguintes resultados da tabela 8.

**Tabela 8** - Cubagem realizada nos realces do cenário 2.

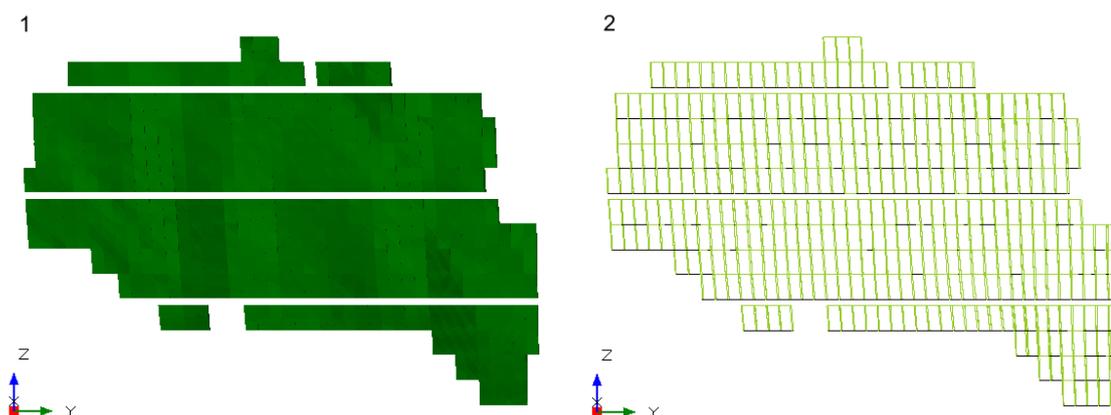
	<b>Massa (t)</b>	<b>Diluição (%)</b>	<b>Teor Médio (g/t)</b>	<b>Ouro contido (Oz Oz*10<sup>10</sup>)</b>
Minério	1.359.091,35			
Estéril	286.629,64	17,4	8,33	4,8
Total	1.645.720,99			

Fonte: Autoria Própria.

### 7.3 Cenário 3

O cenário 3, desenvolvido utilizando a metodologia *Combination* para a avaliação do teor de corte, assim como os outros cenários apresentados, gerou também os sólidos representativos dos realces (1), e as linhas utilizadas no método das seções (2), conforme Figura 31.

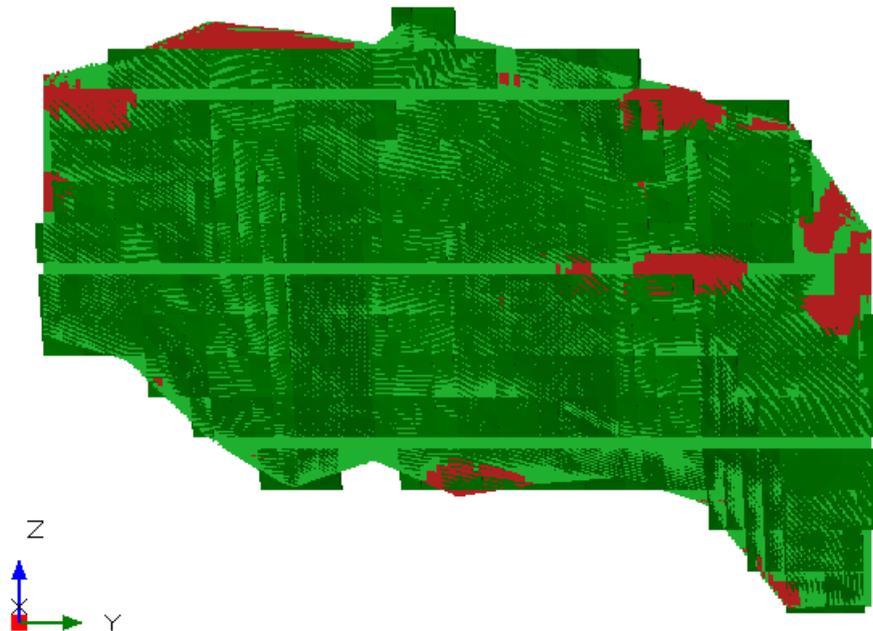
**Figura 31** - Realces gerados cenário 3.



Fonte: autoria própria.

Em relação à aderência do cenário gerado ao modelo de blocos, observou-se também boa aderência, uma vez que os realces gerados não sobrepõem totalmente o modelo, conforme vê-se na Figura 32.

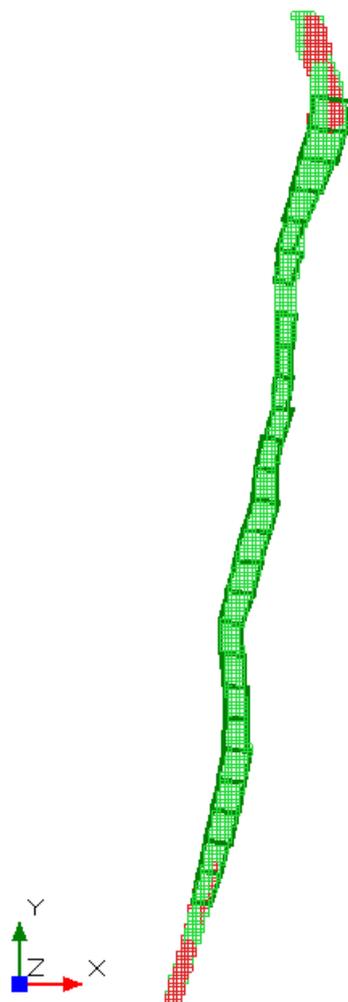
**Figura 32** - Vista dos realces gerados no cenário 3 e modelo de blocos.



Fonte: autoria própria.

Pela Figura 33, pode-se ver que o software também não gerou realces em determinadas regiões onde a concentração de estéril é maior, nota-se também que em algumas regiões onde em outros cenários foram gerados, neste o algoritmo não gerou, que será discutido as possíveis razões no capítulo Discussões de Resultados.

**Figura 33** - Vista em corte do modelo de blocos e realces gerados no cenário 3.



Fonte: autoria própria.

Foram gerados 371 realces e após cubagem deste cenário, chegou-se nos seguintes resultados, conforme Tabela 9.

**Tabela 9** - Cubagem realizada nos realces do cenário 3.

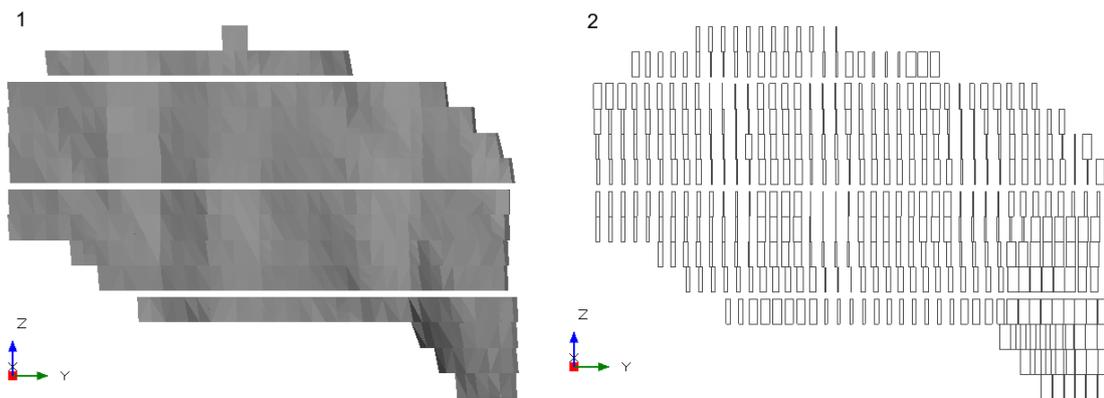
	<b>Massa (t)</b>	<b>Diluição (%)</b>	<b>Teor Médio (g/t)</b>	<b>Ouro Contido (Oz*10<sup>10</sup>)</b>
Minério	1.311.869,64			
Estéril	267.394,16	16,9	8,37	4,6
Total	1.579.263,80			

Fonte: Autoria Própria.

## 7.4 Cenário 4

Desenvolveu-se o Cenário 4 de maneira manual, utilizando a metodologia das seções segundo os parâmetros previamente definidos para os cenários. Conforme esta metodologia, como resultado também se obteve os sólidos representativos (1) e as linhas utilizadas para a geração dos mesmos nas seções (2), como o observado na Figura 34.

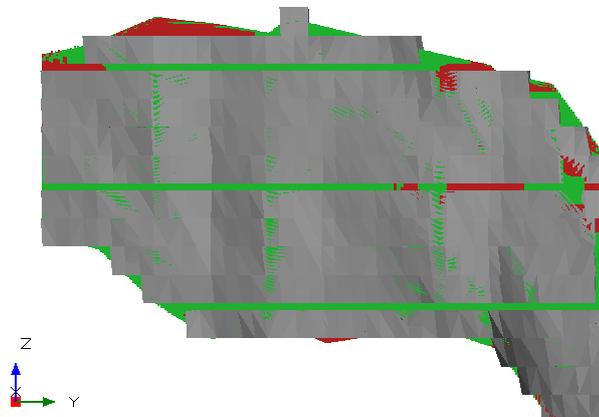
**Figura 34** - Realces gerados, cenário 4.



Fonte: Autoria Própria.

Outro aspecto a se considerar é a aderência ao modelo de blocos. Os realces projetados no cenário 4 não tiveram uma aderência muito boa, pode-se observar pela Figura 35, que eles sobressaem em relação ao modelo.

**Figura 35** - Vista dos realces gerados no cenário 4 e modelo de blocos.



Fonte: Autoria Própria.

Ao desenhar as seções para este cenário, optou-se também somente por áreas mais mineralizadas, conforme pode-se observar pela vista em seção dos realces e modelo de blocos na Figura 36.

**Figura 36** - Vista em corte do modelo de blocos e realces do cenário 4.



Fonte: Autoria Própria.

Foram gerados 379 realces e ao cubar o volume produzindo neste cenário, obteve-se os seguintes resultados:

**Tabela 10** - Cubagem realizada nos realces do cenário 4.

	<b>Massa (t)</b>	<b>Diluição (%)</b>	<b>Teor Médio (g/t)</b>	<b>Ouro Contido (Oz*10<sup>10</sup>)</b>
Minério	1.383.428,51			
Estéril	627.125,73	31,1	8,23	4,9
Total	2.010.554,24			

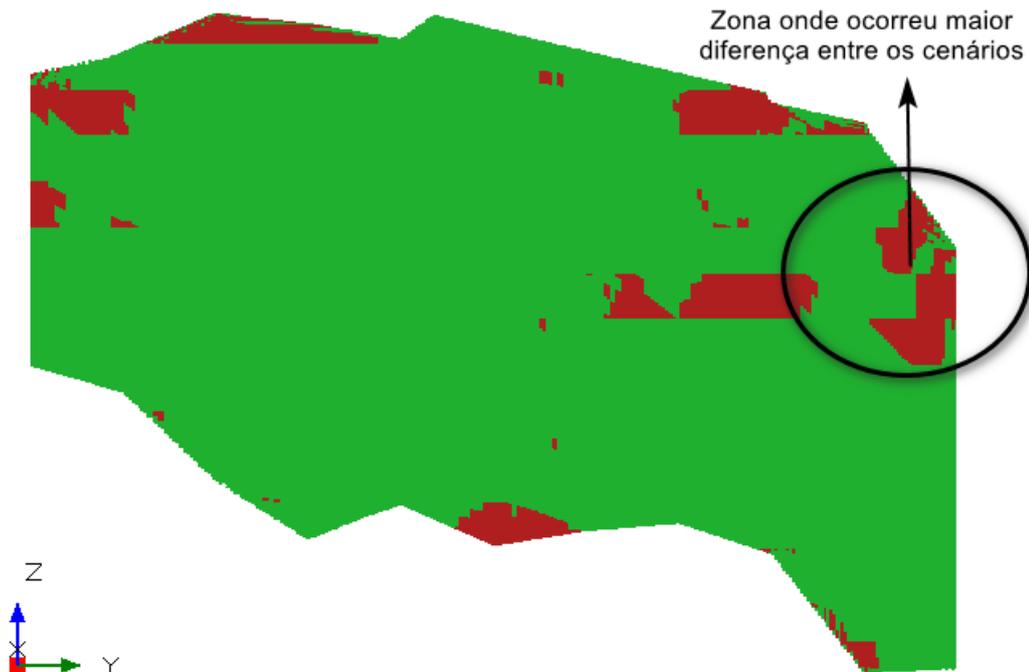
Fonte: Aatoria Própria.

## 8. Discussão de resultados

A partir dos resultados obtidos nos cenários otimizados, podem-se observar algumas diferenças no design dos realces em determinadas zonas do modelo de blocos, que apresentam alta ocorrência de material estéril. Esta diferença ocorre pelo uso dos diferentes métodos de avaliação do *cuttoff* dos realces, influenciando na geometria final dos mesmos, conforme Figura 14 e consequentemente na massa final, tanto de minério quanto de estéril.

A Figura 37 exemplifica uma destas zonas.

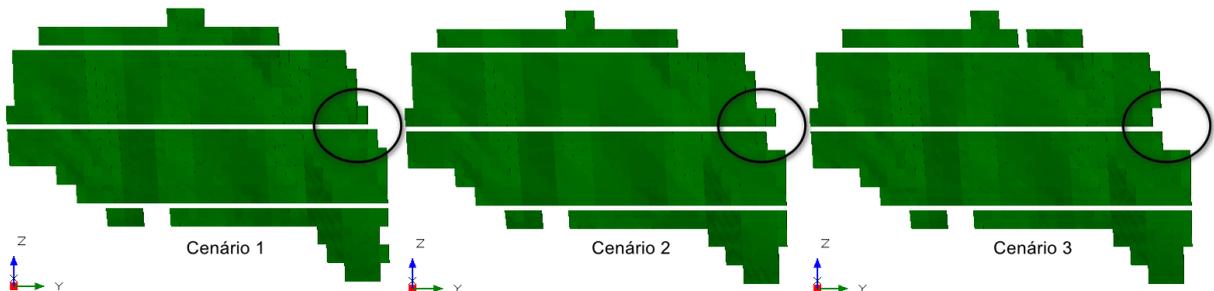
**Figura 37** - Zona do modelo de blocos onde houve maior diferença de realces gerados entre os cenários.



Fonte: autoria própria.

A Figura 38 faz a comparação entre os cenários na região destacada pela Figura 37.

**Figura 38** - Comparação de geração de realces entre os cenários.



Fonte: Autoria Própria.

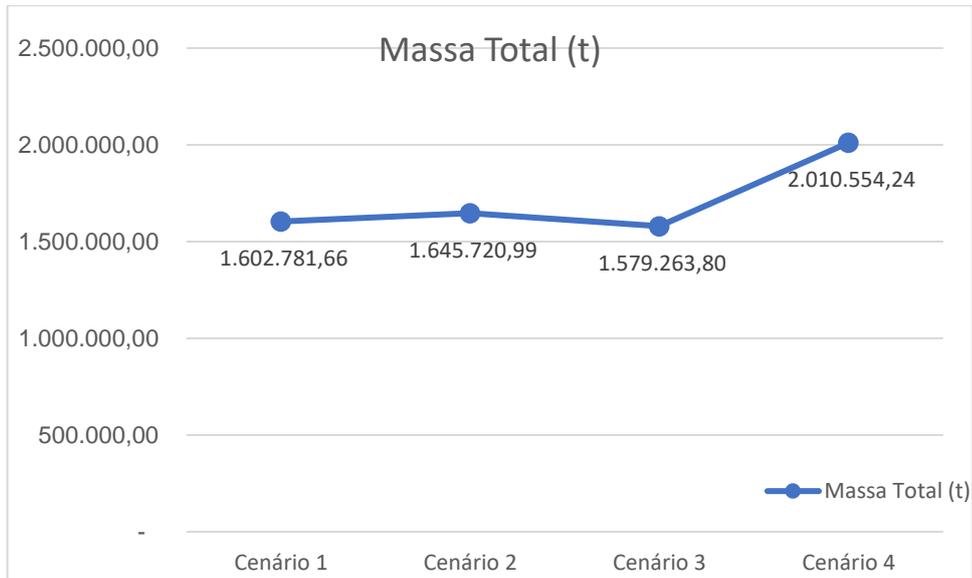
Os cenários 1 e 2 apresentaram o mesmo número de realces, 376, já o cenário 3 foi o que apresentou o menor número, 371. E de acordo com a Figura 38, pode-se observar que é o que menos gerou realces na região destacada. Isto deve-se ao fato de que o método *Combination*, apesar de gerar realces com a mesma geometria que o método *Cellcenterline*, apresenta menor massa de minério, uma vez que não considera a massa total da célula do modelo de blocos que por ele é interceptada.

Dessa forma, o método *Combination*, em regiões nas quais tem-se maior ocorrência de material estéril, pode não gerar realces, uma vez que estes terão um menor teor, podendo ser abaixo do *cutoff*.

O cenário 4 foi o que apresentou o maior número de realces, 379. Por ser manual e seu projeto depender da habilidade e experiência de quem o executa, muitas das vezes não é possível fazer inúmeras análises, como é o caso dos algoritmos próprios para este fim.

Ao fazer uma comparação entre as massas dos cenários, nota-se que o Cenário 4 é o que possui maior massa, seguido do Cenário 2, conforme pode-se notar na Figura 39.

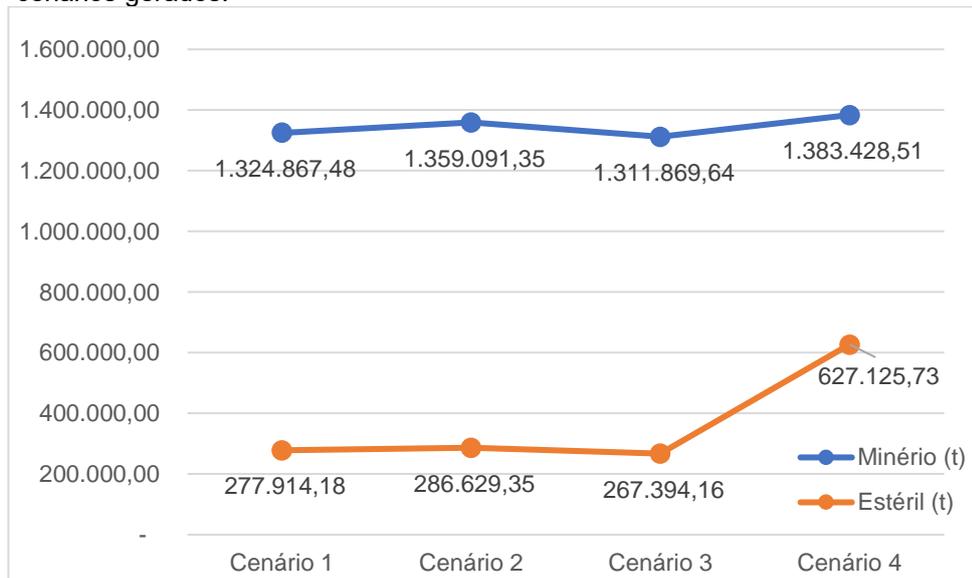
**Figura 39** - Gráfico de comparação de massa total entre os cenários.



Fonte: Autoria Própria.

Em consequência de possuir massa muito superior aos demais cenários, 364.833 toneladas a mais que o 2, o cenário 4 torna-se também menos aderente ao modelo de blocos. Apesar de apresentar, dentre os cenários, maior massa de minério, uma diferença de 24.337 toneladas para o segundo com maior massa, cenário 2, apresenta também maior quantidade de estéril incorporado a ele, apresentando uma diferença de 340.496 toneladas a mais em relação ao cenário 2, conforme apresenta a Figura 40.

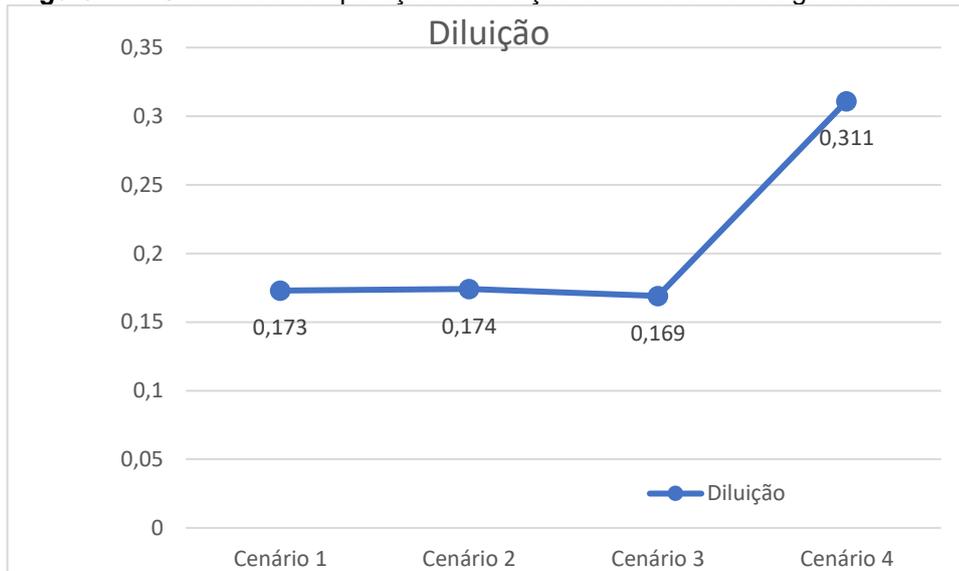
**Figura 40** - Gráfico de comparação de massa de minério e estéril entre os cenários gerados.



Fonte: Autoria Própria.

Nota-se ao comparar o cenário 4 com os demais, que o mesmo teve um pequeno aumento de massa em relação ao minério, por outro lado, ao analisar o aumento de estéril, percebe-se um aumento bastante considerável. Isto faz com que o cenário 4 apresente também um valor bem mais alto para diluição em comparação com os demais cenários, conforme a Figura 41.

**Figura 41** - Gráfico de comparação da diluição entre os cenários gerados.



Fonte: Autoria Própria

Dentre os cenários otimizados, tem-se que o 1 e o 2 apresentaram valores semelhantes de diluição, porém sabe-se que o 2 possui maior massa incorporada, já o cenário 3 é o que possui melhor valor para diluição, porém é o que possui também menor massa, tanto para minério quanto para estéril.

## 9. Conclusão

O uso de aplicativos (softwares) de planejamento de mina, que visualizam o corpo em três dimensões, no desenvolvimento de novos dispositivos, contribui para análise dos realces reais lavrados de forma mais eficaz, auxiliam na comparação com os realces de projeto e permitem melhor controle de índices de eficiência na lavra subterrânea como a diluição...

O aprimoramento dos softwares de planejamento de mina tem ajudado no desenvolvimento dos procedimentos operacionais.

Após analisar os cenários desenvolvidos a partir de um depósito de ouro, bem como os resultados obtidos, pode-se afirmar que os projetos gerados por meio do módulo Deswik.SO, pertencente ao software Deswik, são mais favoráveis para se adotar um empreendimento mineiro. Isto se deve ao fato de que ao configurar o software para a otimização, foram inseridos diversos parâmetros de controle de geometria e econômicos dos realces. Já no projeto manual tais parâmetros são mais complexos de serem controlados, como por exemplo não é possível pré-determinar um valor para o *cutoff* e apenas projetar realces acima deste valor estipulado.

Justamente por não ter este controle, os realces gerados manualmente não são tão aderentes ao modelo de blocos, apesar de conter mais minério, contém também, expressiva massa de estéril em relação aos otimizados, e conseqüentemente muito maior diluição.

Como sugestão de aprimoramento para o projeto de realces manual, para diminuir a quantidade de estéril, seria renunciar também a uma parte do minério, e substituir os contornos desenhados (4 pontos) por geometrias com mais pontos, para abranger de forma mais aderente o corpo de minério, levando em consideração também a operacionalidade desses realces.

Dentre os cenários otimizados, o cenário 3 apesar de conter menor diluição, contém também menos massa, deixando assim de abranger importante quantidade de minério. Já o cenário 2 apresentou, dentre os gerados pelo Deswik.SO, a maior massa, e o valor de diluição 0,001 maior em relação ao cenário 1, sendo dessa forma o cenário mais favorável dentre os estudados, levando em consideração os parâmetros aqui estudados, uma vez que movimenta mais massa de minério, com uma diluição relativamente equivalente ao cenário 1.

O módulo Deswik.SO se mostrou uma ferramenta bastante eficiente na otimização de cenários de lavra para corpos subterrâneos, gerou cenários economicamente viáveis e bastante aderentes ao depósito mesmo em regiões que apresentavam diferentes mergulhos e direções ao longo da extensão do corpo. Porém para conseguir um fator de diluição menor, a ferramenta não abrange o material minério em sua totalidade. Dessa forma, como sugestão para trabalhos futuros, para conseguir um cenário economicamente melhor do que os gerados, deve-se variar e explorar as diferentes geometrias com as quais o software é capaz de trabalhar.

## REFERÊNCIAS

ASSIS, Alexandre Henrique de. *Teores de corte: uma análise da influência no resultado econômico de um empreendimento mineiro*. 2016.

BARBOSA, Gustavo Rodrigues; CORRÊA, Wanderson Dantas. *Avaliação a resistência de pilares em mineração subterrânea*. 2020. 50 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário de Anápolis, Anápolis.

BOTELHO, Annelise; GRIEBELER, Eder Eidolon; NEVES, Eslyn; WARNERY, Eric. Projeto de pré-viabilidade de um depósito subterrâneo de ouro. 2011. 224 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BOWATER, Mark. *Crimes Against Mine Planning: Solving The Top 10 Pitfalls*. 2022. 250 p.

BRASIL. *Resolução nº 94, de 7 de fevereiro de 2022*. Normatiza a classificação das reservas minerais, com base em padrões internacionalmente aceitos de declaração de resultados e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2022.

CÂMARA, Taís Renata. *Diluição operacional em lavra a céu aberto: quantificação, controle e minimização utilizando ferramentas computacionais e incertezas geológicas*. 2020.

CARLI, Carla de. *Análise de projetos limite: Lavra a céu aberto vs Lavra Subterrânea*. 2013. 123 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CURI, Adilson. *Lavra de minas*. São Paulo: Oficina de Textos., 2017. 774 p

CURI, Adilson. *Minas a céu aberto: planejamento de lavra*. São Paulo: Oficina de Texto, 2014. 376 p

DESWIK. *Deswik.SO. c2023*. Disponível em: <<https://help.deswik.com/HelpContent/Deswik.Suite2022.2/content/so/introductiontotheswikso.htm>>. Acesso em 09 de fev. de 2023.

DESWIK. *Sobre a Deswik. c2021*. Disponível em: <<https://www.deswik.com/ptbr/about/>>. Acesso em 07 de fev. de 2023.

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.

EBRAHIMI, A. *The importance of dilution factor for open pit mining projects*. In: 23rd WORLD MINING CONGRESS - WMC, 2013, Montreal, Canadá. Proceedings 2013. p. 1–12.

HARTMAN, H. L.; Mutmansky, J. M. *Introductory Mining Engineering*. John Wiley and Sons, New York, p. 323. 2002.

HARTMAN, H.L.; MUTMANSKY, J.M. 2002. *Introductory mining engineering*, John Wiley & Sons, Londres, pag-570

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M. *Open pit mine planning & design*, Irradiação Sul Ltda, Porto Alegre, Vol. 1: Fundamentals, 2013.

KRZANOVIC, B. D. *Maximizing the net present value by applying an optimal cut-off grade for long-term planning of the copper open pits*. Acta Montanistica Slovaca. 2015.

MACÊDO, A. J. B.; Bazante, A. J.; Bonates, E. J. L. Seleção do método de lavra: arte e ciência. REM - *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 54, n. 3, p. 221-225, jul./set. 2001.

MELO, Marcela Resende Barreto e. *ESTUDO DA VIABILIDADE DO MÉTODO SHRINK STOPE NA MINA DO MAMÃO, MUNICÍPIO DE FLORESTA DO ARAGUAIA-PA*. 2014. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2014.

Mining Data Solutions, Agnew Complex, Disponível em: <<https://miningdataonline.com/property/263/Agnew-Complex.aspx>>. Acesso em 01 de fev. de 2023.

Mining Data Solutions, Bateman -F2 Project, Disponível em: <<https://miningdataonline.com/property/456/Bateman---F2-Project.aspx>>. Acesso em 01 de fev. de 2023.

Mining Data Solutions, Palmarejo Mine, Disponível em: <<https://miningdataonline.com/property/123/Palmarejo-Mine.aspx>>. Acesso em 01 de fev. de 2023.

Mining Data Solutions, Pinos Project, Disponível em: <<https://miningdataonline.com/property/3392/Pinos-Project.aspx>>. Acesso em 01 de fev. de 2023.

Mining Data Solutions, Premier-Red Mountain Project, Disponível em: <<https://miningdataonline.com/property/3050/Premier-Red-Mountain-Project.aspx>>. Acesso em 01 de fev. de 2023.

NEME, M. B., CURI, A. & SILVA, J. M. (2011). Realização de projeto de lavra de mina subterrânea com utilização de aplicativos específicos. *Revista Escola de Minas*, 64(4), 519-524.

OLIVEIRA, Michel Melo. *Dimensionamento empírico de realce em sublevel stoping*. 2012. 162 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Pakalnis R.T. *Empirical stope design at the Rutan Mine*. Sherritt Gordon Mines LTD. Doctor thesis Mining And Mineral Process Engineering. Mining And Mineral Process Engineering. University British Columbia. Vancouver. 1986. 290p.

Pakalnis, R., Poulin, R. and Hadjieorgiou, J. *Quantifying the Cost of Dilution in Underground Mines*. SME Annual Metallurgy and Exploration. Denver. 1995

QUEIROZ, Rafael Costa. *Análise da influência da largura mínima de lavra na diluição em uma lavra a céu aberto de ouro*. 2014. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

RENDU, J. M. *An introduction to cut-off grade estimation*. Littleton, Colorado, USA. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2008.

ROSADO, Rafael Campos. *Avaliação do impacto da incerteza de teores no planejamento de mina subterrânea*. **Dissertação? Universidade? 2019.**

SALDANHA JÚNIOR, Artur Almgren. *Definição de estratégia de sondagem para aumento na conversão de recursos e reservas*. 2020. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SALES, João Vítor Araújo. *Determinação da profundidade de transição entre lavra a céu aberto e lavra subterrânea para uma mina de ouro*. 2019.

SCOBLE, M. J., MOSS, A. 1994. *A dilution in underground bulk mining: implications for production management, mineral resource evaluation II: methods and case histories*. Geological Society Special. Publication no. 79, 1994, p.95-108

SILVA J.M. 2021. *Lavra Subterrânea*. DEMIN-EM-UFOP.

SILVA JM. 2021b. MIN745- *Lavra Subterrânea*. DEMIN-EM-UFOP.

SMITH, Martin L.; WICKS, Stewart J. *Medium-term production scheduling of the Lumwana mining complex*. Interfaces, v. 44, n. 2, p. 176-194, 2014.

SOUZA, Days Juliana. *Otimização de realces operacionais para um depósito de ouro por câmaras e pilares*. 2021.

SYSTEMS, A. M. *Stope Shape Optimiser*, Version 4.1.0, 2020, 209 p

VERHOEFF, R.L.A. *Using genetic algorithms for underground stope design optimization in mining: a stochastic analysis*. 2017. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Delft University of Technology, Delft, 2017.

VILLAESCUSA, E. *Geotechnical design for dilution control in underground mining*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENTS SELECTION, 7., 1998, Balkema, Rotterdam. 1998. p. 141–149.

VILLAESCUSA, E. *Geotechnical design for sublevel open stoping*. New York: CRC Press, 2014. 526 p.

WRIGHT, E A. *Dilution and mining recovery: Review of the fundamentals*, Erzmetall, 1983.