



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



DANIELA SOUZA BARROS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO
DO FATOR DE DILUIÇÃO OPERACIONAL

OURO PRETO
2021

DANIELA SOUZA BARROS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO
DO FATOR DE DILUIÇÃO OPERACIONAL

Trabalho de Encerramento de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Minas.

Orientador: Prof. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

OURO PRETO

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B277a Barros, Daniela Souza.

Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no cálculo do fator de diluição operacional. [manuscrito] / Daniela Souza Barros. - 2021. 53 f.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

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

1. Minas e recursos minerais. 2. Planejamento - Minas e mineração. Processo produtivo. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.013:658.5



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e cinco dias do mês de outubro de 2021, às 17h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Daniela Souza Barros**, matrícula 16.2.1532, intitulado: **ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DO FATOR DE DILUIÇÃO OPERACIONAL**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Carlos Enrique Arroio Ortiz, Prof. Dr. Adilson Curi e Eng.º de Minas Karl Santorio Torres. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu à discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro Prof. Dr. Adilson Curi, segundo o Eng.º de Minas Karl Santorio Torres, e em último, o Prof. Dr. Carlos Enrique Arroio Ortiz. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou à discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão da discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que a discente foi **APROVADA** por unanimidade, com a nota **09 (NOVE PONTOS)**, sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. A discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 25 de outubro de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroio Ortiz

Membro: Prof. Dr. Adilson Curi

Membro: Eng.º de Minas Karl Santorio Torres

Discente: Daniela Souza Barros

Prof. Dr. Carlos Enrique Arroio Ortiz

Aos meus pais, Elziene e Adonil Barros, que sempre apostaram em mim e são os meus maiores exemplos de vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à DEUS pela dádiva de existir, bênçãos e proteção.

À minha mãe, Elziene Barros, e a meu pai, Adonil Barros, que sempre me apoiaram, incentivaram e acreditaram em mim.

Ao meu irmão Daniel e à minha prima Gal pelo carinho, apoio, confiança e amizade. E à toda minha família que sempre torceram por mim.

À república Maktub por ter me acolhido e se tornado a minha segunda família em Ouro Preto, em especial às meninas que estiveram comigo durante esses anos de graduação, que dividiram comigo momentos de dificuldade e também de muita alegria.

Aos meus amigos e amigas pela parceria, apoio, conforto e amor, em especial aqueles que a UFOP me proporcionou e o meu grupo do relatório de química, Higor, Antônio, Maria e Lucas, ter conhecido vocês foi um presente que levarei para a vida.

Ao meu orientador Carlos Arroyo pela confiança, disposição, incentivo e apoio.

À GE21 Consultoria Mineral e à CSN Mineração pela oportunidade de estagiar com profissionais tão incríveis e por todo aprendizado. À Deswik e seu programa Deswik Universidades pelos treinamentos, suporte e recursos, em especial ao Marcel pela dedicação, disposição e ensinamentos.

Aos meus colegas de trabalho e amigos dos estágios por todo aprendizado, suporte e amizade. À lêssa, João e Carol pela parceria, ajuda e boas risadas.

A todos os professores da UFOP pelo ensino de excelência.

E por último, à gloriosa Escola de Minas e à UFOP pelo ensino público de qualidade e pela oportunidade de expandir os horizontes do meu conhecimento.

RESUMO

A mineração pode ser descrita como um negócio de alto risco, desse modo, é imprescindível que o desempenho operacional nas etapas do processo produtivo seja medido e avaliado. A diluição faz parte dos índices operacionais que precisam ser analisados e controlados, já que não pode ser evitada e, por exemplo, pode impactar diretamente no fluxo de caixa e no lucro do empreendimento causando um aumento nos custos das operações de lavra e beneficiamento do minério. O presente trabalho realiza uma análise de sensibilidade de parâmetros fundamentais relacionados ao cálculo do fator de diluição operacional aplicado ao planejamento de mina à céu aberto. Utilizando ferramentas comuns em *softwares* de planejamento, o cálculo da diluição operacional é incorporado ao modelo de blocos, afim de automatizar a quantização do mesmo. Assim, a análise é feita a partir dos resultados de diferentes cenários operacionais. Desse modo, concluiu-se que para o tipo de depósito analisado, o fator de diluição apresenta maior sensibilidade para a variação do ângulo de talude do que para a altura da bancada, porém o tamanho dos blocos do modelo é a variável de maior impacto.

Palavras-chave: Diluição operacional. Planejamento. Parâmetros operacionais.

ABSTRACT

Mining can be described as a high-risk business; therefore, it is essential that the operational performance in the stages of the production process is measured and evaluated. Dilution is part of the operating ratios that need to be analysed and controlled, as it cannot be avoided and, for example, it can directly impact the cash flow and profit of the project, causing an increase in the costs of mining operations and ore processing. The present work performs a sensitivity analysis of fundamental parameters related to the calculation of the operational dilution factor applied to open pit mine planning. Using tools common to planning software, the calculation of operational dilution is incorporated into the block model, in order to automate its quantization. Thus, the analysis is based on the results of different operational scenarios. Thus, it was concluded that for the type of deposit analysed, the dilution factor is more sensitive to the variation of the slope angle than for the height of the bench, but the variation in the size of the model blocks is the largest variable impact.

Keywords: Operational dilution. Planning. Operating parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um modelo de blocos.....	19
Figura 2 - Esquema mostrando relações de volume e variância.....	22
Figura 3 - Perfil esquemático dos indicadores de desempenho.....	24
Figura 4 - Amostra de uma mineralização de cobre em veio	27
Figura 5 - Distribuição de pontos da amostra em pequena escala.....	28
Figura 6 - Distribuição de pontos da amostra após aumento do tamanho dos blocos	28
Figura 7 - Modelo de blocos sub-blocado nos contatos	30
Figura 8 - Esquema de diluição operacional de lavra e perda de minério	32
Figura 9 - Fluxograma resumo da metodologia desenvolvida	35
Figura 10 - Vista de seção da superfície que envolve os blocos de minério	38
Figura 11 - Blocos do contato do corpo de minério	39
Figura 12 - Diluição de blocos no contato de materiais diferentes	40
Figura 13 - Diluição nos blocos da borda do plano de lavra.....	41
Figura 14 - Cava matemática gerada no Deswik (RF=0.98)	43
Figura 15 - Regiões de lavra definidas pelo sequenciamento anual	44
Figura 16 – Avanço operacional cenário 2	47
Figura 17 - Avanço operacional cenário 3.....	47
Figura 18 - Gráfico do Fator de diluição por período.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de lavra a céu aberto	15
Tabela 2 - Comparativo entre tipos de planejamento	17
Tabela 3 - Modelos de blocos utilizados	36
Tabela 4 - Parâmetros econômicos considerados	36
Tabela 5 - Parâmetros operacionais considerados	37
Tabela 6 - Descrição das cavas operacionais do ano 1	44
Tabela 7 - Report dos modelos considerando apenas material acima do teor de corte	45
Tabela 8 - Resultado das cubagens da cava matemática	45
Tabela 9 - Resultados do cenário 1	48
Tabela 10 - Resultados do cenário 2	48
Tabela 11 - Resultados do cenário 3	49
Tabela 12 - Resultados do cenário 4	50
Tabela 13 - Estatística descritiva dos resultados	51
Tabela 14 - Variação do fator de diluição entre cenários com os mesmos parâmetros	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO GERAL.....	14
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 LAVRA A CÉU ABERTO.....	15
3.2 PLANEJAMENTO DE LAVRA.....	16
3.3 MODELO DE BLOCOS.....	18
3.3.1 Unidade Seletiva de Mineração (SMU).....	19
3.3.2 Reblocagem.....	21
3.4 RECONCILIAÇÃO.....	22
3.4.1 KPI – Indicadores Chave de Desempenho.....	24
3.5 FATOR DE DILUIÇÃO	26
3.5.1 Classificação da Diluição.....	26
3.5.1.1 Diluição Interna ou Efeito Suporte.....	27
3.5.1.2 Diluição de Contato Geológico	29
3.5.1.3 Diluição Operacional	31
3.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	33
4. METODOLOGIA	35
4.1 DADOS E PARÂMETROS UTILIZADOS.....	35
4.2 MANIPULAÇÃO DO MODELO DE BLOCOS	37
4.3 CÁLCULO DO FATOR DE DILUIÇÃO	39
4.4 PLANEJAMENTO DE LAVRA.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 DILUIÇÃO INTERNA OU EFEITO SUPORTE	45
5.2 DILUIÇÃO OPERACIONAL PLANEJADA.....	46
5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA DILUIÇÃO OPERACIONAL	50

6. CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

A diluição é uma questão crítica que afeta muitos aspectos da mineração. Acontece, geralmente, devido às características geométricas do corpo de minério, às operações de lavra, às características geológicas de contatos, e as limitações do equipamento de mineração para recuperar o material desejado nesses contatos geológicos (CÂMARA, 2020).

Segundo Budke (2019) a diluição ocorre quando o minério não consegue ser totalmente separado da rocha encaixante durante a operação, ou seja, a parte do estéril é misturado com o minério e é enviado para a usina, reduzindo o teor e aumentando a tonelagem, gerando um maior custo de produção.

Existem três tipos de diluição que precisam ser consideradas: a diluição devido à mistura de tipos de materiais dentro de um bloco, a diluição devido aos contatos geológicos e a diluição operacional. Esta última é geralmente planejada pelo engenheiro de minas no momento de desenvolver um plano de mina, mas também ocorre de forma inesperada, e é chamada de diluição não planejada (ROSSI, 2014).

Em muitos casos, as mineradoras optam por desconsiderar esse fator ou usar um valor fixo para toda mina, pois quantificar essa diluição antes da lavra não é uma tarefa simples. Porém, ao assumir um valor fixo de diluição o planejador deixa de considerar aspectos particulares de cada avanço de lavra ou região da mina, o que acaba impactando na aderência e reconciliação do plano.

O objetivo deste estudo é mostrar a influência dos principais parâmetros operacionais no cálculo da diluição operacional planejada, pois conhecer o comportamento dessa variável diante de alguns contextos pode oferecer ao engenheiro de planejamento informações necessárias para elaboração de planos mais aderentes e assertivos.

2. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é realizar a análise de sensibilidade de parâmetros fundamentais relacionados ao cálculo do fator de diluição operacional aplicado ao planejamento de mina à céu aberto.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma metodologia para quantificar a diluição operacional planejada dentro do modelo de blocos na fase de planejamento;
- Analisar a influência do tamanho dos blocos e do ângulo de face no cálculo da diluição operacional planejada;
- Quantificar a diluição operacional planejada por avanços de lavra, identificando a influência de cada uma dessas variáveis.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico foram referenciados conteúdos e alguns conceitos que satisfazem o desenvolvimento do tema em estudo. A fundamentação teórica deste trabalho é feita através da revisão bibliográfica dos tópicos que abordam o método de lavra, planejamento de mina, modelo de blocos, reconciliação, diluição e análise de sensibilidade.

3.1 LAVRA A CÉU ABERTO

Desde a pré-história a mineração tem estado presente e tem sido essencial para a existência do homem. A evolução dos métodos de mineração tem feito com que cada vez mais a extração mineral se torne mais eficiente e teores cada vez mais baixos tornem-se aproveitáveis do ponto de vista econômico (PERONI, 2007).

A escolha do método de lavra é um dos itens-chave em todo o processo, podendo determinar o sucesso ou o fracasso de um empreendimento mineral, e esta, de acordo com Curi (2017), deve ser realizada considerando a conformação do depósito e a economicidade do empreendimento.

Segundo Peroni (2007), os métodos de lavra a céu aberto são aqueles onde as operações de mina não são enclausuradas e os operadores não trabalham em ambiente subterrâneo, e podem ser divididos em duas classes, e subdivididas em métodos específicos, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Métodos de lavra a céu aberto

Classe	Método
Mecânica	Lavra em cava
	Lavra por lançamento
	Lavra de rocha ornamental
	Lavra de encosta
Em presença de água	Desmonte hidráulico
	Dragagem
	Lixiviação
	Dissolução

Fonte: PERONI, 2007

O foco de estudo deste trabalho é analisar o comportamento da diluição

operacional no método de lavra em cava, considerando uma base de dados de um depósito de ouro (Au), por isso é de suma importância a abordagem do método no presente trabalho.

A lavra em cava ou também chamada de lavra em bancadas é comumente utilizada para depósitos minerais metálicos e carvão, é aplicada a áreas com extenso capeamento que deve ser removido afim de expor o minério e depositado em camadas horizontais formando pilhas de estéril (CURI, 2017).

Ainda de acordo com Curi (2017), as bancadas podem ser consideradas como as unidades fundamentais da exploração nas operações de lavra a céu aberto, diversos fatores influem na determinação da geometria e dimensões das bancadas, os principais estão listados a seguir:

- Características do depósito: volume, teor e distribuição, etc.
- Escala de produção: Toneladas de minério e estéril produzidas.
- Seletividade na lavra e necessidade de blendagem.
- Equipamentos utilizados nas operações de lavra: Função básica da escala de produção.
- Considerações sobre estabilidade dos taludes.
- Relação estéril/minério (REM).
- Custos operacionais em relação aos custos de investimento.

A correta determinação dos parâmetros geométricos da cava como ângulo de face, largura e altura da bancada é fundamental. Neste trabalho, analisa-se a influência destes parâmetros no fator de diluição a ser considerado no planejamento de lavra, afim de se obter uma boa reconciliação e aderência na produção.

3.2 PLANEJAMENTO DE LAVRA

Sabe-se que o planejamento de lavra corresponde ao processo para se determinar o projeto e sequenciamento de lavra que trará o melhor retorno econômico, segundo uma estratégia estabelecida anteriormente. É considerado um elemento chave para o sucesso de um empreendimento de mineração, uma vez que subsidia o processo decisório sobre a sua condução e desenvolvimento (SILVA, 2008). E pode ser dividido em três grandes níveis: planejamento estratégico, tático e operacional, como está descrito na tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Comparativo entre tipos de planejamento

Discriminação	Planejamento Estratégico	Planejamento Tático	Planejamento Operacional
Prazo	Mais longo	Médio	Mais curto
Amplitude	Mais ampla	Menos ampla	Mais restrita
Riscos	Maiores	Intermediários	Menores
Atividades	Fins e meios	Meios	Meios
Flexibilidade	Menor	Intermediária	Maior

Fonte: Oliveira (2007) *apud* Budke (2019)

De maneira mais efetiva, o mercado mineral tem dividido o planejamento de mina em longo/estratégico e médio/curto prazo, segundo Budke (2019). Cada situação específica pode requerer ou dispensar uma subdivisão mais detalhada. De forma geral, a necessidade é que haja um departamento que consiga antever o futuro, e preparar a empresa, possibilitando que a mesma programe os recursos necessários para a lavra e beneficiamento do bem mineral.

De acordo com Budke (2019), o plano de lavra de longo prazo se inicia pela classificação do depósito mineral em jazida, com a definição do modelo de blocos, estimativa dos recursos, seleção do método de lavra, seguido pela definição de cenários e premissas, definição da função benefício, otimização de cava, sequenciamento de lavra e avaliações técnicas, econômicas e de riscos das reservas.

Determina-se nesta etapa o ritmo de produção anual e a cava ótima para a mina objetivando-se o maior retorno econômico. Define-se quantidades e capacidades dos equipamentos por exemplo e a sequência de aquisições. O resultado é o plano de lavra da vida da mina (LOM – Life of mine) até o fechamento, com a vida útil total prevista (SILVA, 2008).

O planejamento de médio prazo surge para preencher a lacuna que trata da interface entre o plano estratégico e o operacional (curto prazo). Segundo Budke (2019), o planejamento de médio prazo tem como objetivo garantir a implementação dos projetos da lavra da cava, disposição das pilhas de estéril e sequenciamentos ótimos definidos no planejamento a longo prazo.

Enquanto isso, o planejamento de curto prazo é responsável por garantir que a melhor sequência de lavra definida no plano de nível superior seja executada para atingir os objetivos da organização. Além de resolver os problemas operacionais, buscando atender os padrões de segurança e qualidade exigidos. Ou seja, no planejamento operacional é possível implementar melhorias, desde que garanta a exequibilidade do plano de longo prazo e atenda as demandas da usina (SILVA, 2014).

Budke (2019) afirma que o plano operacional não se limita em avanço inicial e final, mas para cada evento uma sequência de lavra é desenhada. Desse modo, cada desmonte ou parada de escavadeira em preventiva se torna um ponto de detalhamento do sequenciamento de lavra, isto resulta em um plano capaz de aproveitar as oportunidades e antecipar impactos, sejam de alimentação do minério ou alocação de recursos para outras áreas.

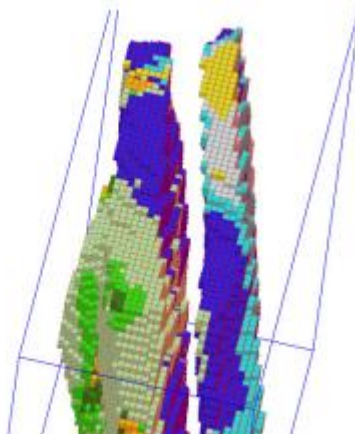
O presente trabalho utilizou como horizonte de estudo avanços mensais de lavra, dentro do planejamento operacional de doze meses de lavra observou-se o comportamento do fator de diluição para diferentes parâmetros geotécnicos.

3.3 MODELO DE BLOCOS

Os modelos de blocos são, geralmente, conjuntos de volumes tridimensionais em formato de paralelepípedos que descrevem os depósitos minerais modelados, armazenando informações e características geológicas medidas e estimadas em cada bloco. Modelos de blocos são ferramentas convenientes para avaliação da mina, estimativa de recursos e planejamento de lavra, incluindo otimização de cava ou *stope* e sequenciamento de mina (SINCLAIR e BLACKWELL, 2002 *apud* ROSSI, 2014).

Na figura 1 a seguir, tem-se uma ilustração de como um corpo de minério é representado através de um modelo de blocos. Segundo Rossi (2014), a geometria do modelo de bloco depende das características do depósito, das características geológicas que estão sendo modeladas e dos requisitos de planejamento da mina, como tamanho e tipo de equipamento a ser usado pela operação. Sendo assim, o tamanho e a geometria do bloco são decisões importantes para modelagem de recursos.

Figura 1 - Representação de um modelo de blocos



Fonte: INSTITUTO MINERE (2018)

Existem ainda, os modelos bidimensionais que podem ser apropriados para depósitos sedimentares ou evaporíticos estratigráficos controlados, incluindo carvão, depósitos de areias pesadas, areias betuminosas, alguns depósitos de urânio e alguns minerais industriais, como nitratos, iodo e depósitos minerais de boro. De acordo com Stone e Dunn (1996), as aplicações típicas de modelos bidimensionais estão relacionadas à modelagem de superfícies, como topografia e superfícies que definem diferentes características geológicas. Às vezes, os modelos de bloco são definidos como um conjunto empilhado de modelos bidimensionais na presença de sequências de estratos mineralizados.

Enquanto modelos tridimensionais são usados, geralmente, para modelar depósitos massivos, como depósitos de cobre pórfiro, depósitos maciços de sulfeto, skarn, tipos de veios e outros tipos de depósitos tabulares e sedimentares ou pseudo-sedimentares com significativo desenvolvimento na terceira dimensão (STONE e DUNN, 1996).

3.3.1 Unidade Seletiva de Mineração (SMU)

A unidade seletiva de mineração, SMU, é definida como o menor volume que a operação pode recuperar, e na prática, depende do método de lavra, do tamanho equipamento, dos dados disponíveis no momento da seleção e das características de seletividade da operação. Por conveniência, geralmente é representado como um

bloco retangular, embora as minas nunca extraiam o minério e o estéril como paralelepípedos perfeitos (ROSSI, 2014).

Atingir as curvas de teor e tonelagem recuperáveis de minério estimados é um desafio comum nas operações de mineração. Um dos parâmetros mais impactantes no processo de estimativa dessas curvas é o tamanho da unidade seletiva de mineração (REUWSAAT et al, 2016).

Segundo Reuwsaat et al (2016), um parâmetro tão importante como o SMU é frequentemente definido por regras gerais práticas e teóricas com base na malha de amostragem, e muitas vezes sem levar em conta aspectos como geologia local, configuração da mina e taxas de produção.

No entanto, as informações disponíveis sobre os furos de sondagem têm volume e escala muito menores do que os volumes de planejamento de mina e seleção de minério ou estéril. Os furos têm alguns centímetros de diâmetro e cada amostra representa normalmente entre 10 e 50 quilogramas de material, de acordo Rossi (2013).

Em contraste, uma mina a céu aberto muito seletiva consideraria unidades de mineração de $5 \times 5 \times 5$ metros (aproximadamente 325 toneladas métricas assumindo uma densidade de $2,65 \text{ t/m}^3$), enquanto os depósitos maiores e maciços planejam unidades que são tão grandes quanto $25 \times 25 \times 15$ metros (aproximadamente 25.000 toneladas métricas). Algumas minas subterrâneas podem ser mais seletivas, mas o volume da unidade de planejamento ainda é muito maior do que o furo perfurado (ROSSI, 2013).

Para minas a céu aberto, a dimensão vertical da SMU é a altura da bancada, embora ocasionalmente algumas minas operem em altura dupla ou meia de bancada. As dimensões laterais representam a largura mínima do equipamento de extração, levando em consideração a profundidade de escavação, o ângulo de repouso do material, a capacidade de manobra do equipamento e as informações disponíveis para apoiar as estimativas do teor em distâncias curtas (JARA et al, 2006).

De acordo com Jara et al (2006), o tamanho da SMU pode ser maior quando se tem depósitos difíceis e amostragem de controle baixo. Se o minério e o estéril puderem ser definidos por um contato visual agudo, nesse caso, o equipamento pode ser capaz de lavar nos contatos com apenas 2 ou 3 metros de diluição ou perda de minério.

3.3.2 Reblocagem

A reblocagem acontece quando se altera um modelo com dimensões de blocos menores para um com dimensões maiores. Segundo Dowd (1994) *apud* Campos (2017), o uso de blocos com dimensões maiores apresenta uma grande vantagem em relação ao tempo computacional requerido para o desenho da cava. Entretanto, a desvantagem é a perda da definição geológica e teor do corpo mineral.

Em seu estudo Jara et al (2006) mostram os impactos da escolha das dimensões dos blocos nos resultados econômicos finais de um projeto, relacionado aos custos, fluxo de caixa, etc. E para eles, os fatores de maior influência na seletividade da operação são: efeito suporte, efeito informação, restrições geométricas e a diluição.

Dentre os fatores destacados por Jara et al (2006), o efeito suporte e a diluição são os que mais interessam este estudo. Sabe-se que ao se reblocar um modelo aumentando as dimensões dos blocos, perde-se seletividade, comprovado ao se comparar curvas de tonelagem x teor. Além disso, a tonelagem de minério aumenta, mas o teor médio do elemento de interesse diminui. Portanto, o valor presente líquido também decresce (CAMPOS, 2017).

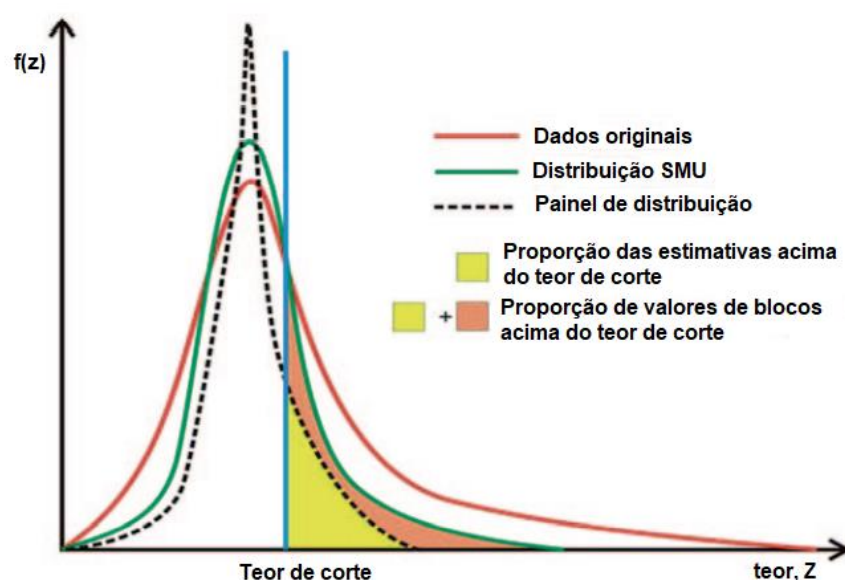
Quanto a diluição interna causada pela reblocagem, esta pode ser modelada usando ferramentas geoestatísticas para correção de variação de volume. De acordo com Rossi (2014), os métodos de mudança de forma de distribuição mais comuns para correção de variação de volume são os métodos Affine Correction, Indirect Lognormal e Discrete Gaussian.

Esses métodos corrigem uma distribuição de um atributo de teor amostrado em um suporte inicial (geralmente chamado de distribuição de escala de ponto) em uma distribuição de bloco SMU. Esses métodos analíticos são rápidos e geralmente aplicáveis a mudanças em pequena escala (ROSSI, 2014).

A relação entre o volume e a variância é mostrada na figura 2. Percebe-se que a variância diminui à medida que o volume aumenta devido à média dos valores altos e baixos. Rossi (2014) afirma que a média é afetada pelo tamanho e forma do volume, a continuidade da variável e o processo de média. Para a maioria das variáveis na mineração, uma vez que fazem a média aritmeticamente, a média não muda à medida

que o volume aumenta e a variância da distribuição diminui. Existem exceções, no entanto, principalmente quando se considera algumas variáveis de desempenho geotécnico e metalúrgico.

Figura 2 - Esquema mostrando relações de volume e variância



Fonte: Adaptado de ROSSI (2014)

Jara et al (2006) diz que a distribuição de pontos de um atributo sempre terá uma variação maior do que a distribuição de blocos do mesmo atributo. Assim, as correções mencionadas anteriormente se aplicam à distribuição de amostras dentro de um domínio de estimativa específico. Dessa forma, o objetivo é obter a distribuição representativa dos dados da escala de pontos e inferir um bloco global ou distribuição SMU que seja mais adequada.

3.4 RECONCILIAÇÃO

A reconciliação, essencialmente, é um processo de identificar, analisar e gerenciar as variações existentes entre dados planejados e resultados obtidos a partir de um processo real. A partir da obtenção desses resultados é possível destacar oportunidades para que sejam implementadas metodologias para gerar melhores estimativas, melhorar o *design*, melhorar as técnicas para que a diluição e perdas

sejam minimizadas, além de identificar maneiras para que a recuperação de minério durante a exploração seja maximizada (RISKE et al, 2010, *apud* CÂMARA, 2013).

De acordo com Morley (2003), a reconciliação pode ser alcançada a partir da comparação das estimativas de massa e teor adquiridos a partir de um modelo de blocos com as estimativas de massa e teor obtidas a partir da lavra efetuada, ou seja, compara valores previstos com valores medidos (*apud* CÂMARA, 2013). E a partir dela é possível avaliar o desempenho e a aderência da operação, além de validar as estimativas de recursos e reservas minerais e fornecer indicadores de desempenho para que o planejamento de curto e de longo prazo seja controlado.

Segundo Rossi (2002) *apud* Budke (2019) os procedimentos efetuados para que a reconciliação seja obtida precisam ser simples, robustos e adaptados à operação existente. Ademais, os dados utilizados devem ser precisos e devem ser incluídos no procedimento, caso seja possível, o fluxo de produção completo (modelo, mina, instalações de beneficiamento e comparações do produto final). Desse modo, o processo pode envolver tanto modelos de blocos de longo prazo, quanto modelos de blocos de curto prazo, minas a céu aberto e subterrâneas, estoque e múltiplos fluxos de processamento.

De acordo com Câmara (2013), a reconciliação deve ser realizada a partir de uma comparação feita de maneira correta para que os erros sejam minimizados e as estimativas e os resultados obtidos precisam ser relativos a um mesmo material. Ademais, ela pode ser efetuada entre distintas áreas, por exemplo, modelo de estimativas x produção obtida pela lavra, planejamento de curto prazo x planejamento de longo prazo e produção obtida pela lavra x produção obtida pela usina.

A reconciliação é realizada para que o planejamento seja feito com maior exatidão, para que o conhecimento sobre o empreendimento mineiro aumente, para que melhores práticas sejam justificadas e para que os desvios e parâmetros do modelo sejam analisados e corrigidos (BUDKE, 2019).

Segundo Gilfilan & Levy (2011) *apud* Câmara (2013), a partir da reconciliação podem ser comparadas as massas e os teores de qualquer um dos seguintes itens:

- Estimativa de recursos.
- Estimativa de reservas.
- Estimativas do controle de teores a médio prazo, tanto para recursos *in situ* ou reservas lavráveis.

- Produção lavrada depositada em pilhas de minério e/ ou levada para a próxima etapa de produção.

- Produção depois de lavrada e circuito do minério.

É importante ressaltar que cada empreendimento possui o seu programa de reconciliação, ou ao menos o seu acompanhamento. Sendo que um dos objetivos desse programa é contabilizar todo o material, tanto o minério quanto o estéril explotado, de forma correta para que os modelos de blocos de longo prazo sejam atualizados e validados (BUDKE, 2019).

O fator de diluição, segundo Budke (2019), pode ser encontrado a partir da reconciliação de massas e teores de minério estimados pelos modelos da jazida e as massas e teores de minério de fato executados, lavrados e beneficiados na usina.

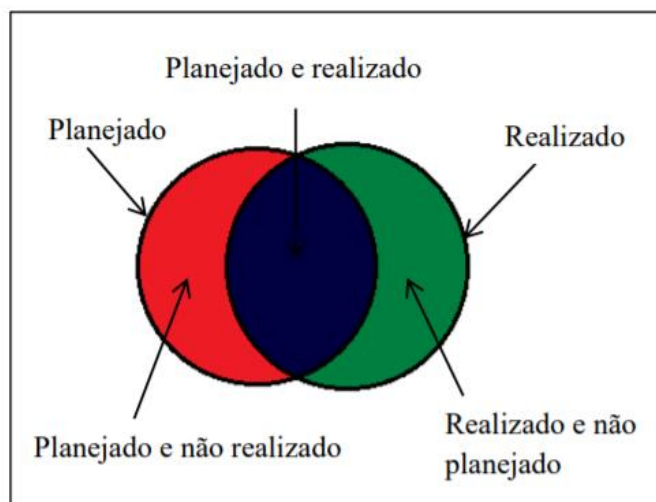
Desse modo, é possível analisar a aderência entre os dados obtidos por meio dos indicadores chave de desempenho e se a diluição encontrada é adequada ao planejamento feito, ou se estratégias que minimizem esse problema precisam ser realizadas. Dessa forma, nota-se a importância de utilizar um fator de diluição que seja adequado as condições de operações e considere todas as particularidades da lavra, ao invés de um fator fixo, para assim obter-se uma boa reconciliação e aderência do plano.

3.4.1 KPI – Indicadores Chave de Desempenho

Indicadores de desempenho são utilizados para que informações a respeito do desempenho de processos e produtos sejam fornecidas e auxiliem nas tomadas de decisões (LIMA, 2005 *apud* COSTA, 2015). Sendo que a escolha desses indicadores é realizada de acordo com o objetivo a ser alcançado.

Índices de controle da efetividade de lavra são utilizados para que a aderência e cumprimento do planejamento possam ser avaliados conforme Figura 3.

Figura 3 - Perfil esquemático dos indicadores de desempenho



Fonte: Câmara, 2013

A partir da equação 1 é possível observar como o índice de aderência é alcançado, ou seja, esse índice é obtido através da divisão da quantidade de massa total planejada e realizada (PR) pelo somatório da massa total planejada e realizada (PR) e da massa total realizada e não planejada (RNP) (CÂMARA, 2013).

$$IA = \frac{PR}{(PR+RNP)} \times 100 \quad (1)$$

Já a partir da equação 2 é possível obter o índice de cumprimento que se refere à operacionalidade do plano. Esse índice é obtido através da divisão da quantidade de massa total planejada e realizada (PR) pelo somatório da massa total planejada e realizada (PR) com a massa total planejada e não realizada (PNR), ou seja, é capaz de medir quanto do total planejado foi efetivamente executado (CÂMARA, 2013).

$$IC = \frac{PR}{(PR+PNR)} \times 100 \quad (2)$$

O índice de efetividade de lavra pode ser atingido a partir da média aritmética do índice de aderência com o índice de cumprimento conforme mostra a equação 3.

$$IE = \frac{(IA+IC)}{2} \times 100 \quad (3)$$

Nas equações apresentadas acima, o PR, RNP e PNR, IA, IC e IE são,

respectivamente, o planejado e realizado, o realizado e não planejado, o planejado e não realizado, o índice de aderência, o índice de cumprimento e o índice de efetividade de lavra.

É notório que os KPI's são uma ferramenta de medição de desempenho e que seus resultados podem auxiliar empresas em suas tomadas de decisões, no entanto, podem possuir alguns erros associados. Erros, por exemplo, nos dados obtidos em campo, portanto, para que os resultados obtidos sejam confiáveis os dados recebidos devem ser validados constantemente.

3.5 FATOR DE DILUIÇÃO

Entre os desafios mais antigos e frequentes que os profissionais da mineração se deparam estão a diluição e a perda de minério. A diluição é responsável por agregar massa de estéril a massa de minério lavrada, reduzindo assim os teores de minério previamente estimados (ROSSI, 2014).

Já a perda de minério, de acordo com Villaescusa (1998) *apud* Câmara (2020), é definida como o material econômico que deixa de ser lavrado ou mesmo que é misturado ao material estéril e conseqüentemente descartado devido as condições de operação e execução de lavra.

O fator de diluição é um dos fatores de correção aplicados ao plano de lavra para atingir reconciliações mais aderentes, e para que este fator seja estimado de maneira sistemática, é necessário conhecer a maior quantidade de características possível do depósito e da operação (CÂMARA, 2020).

3.5.1 Classificação da Diluição

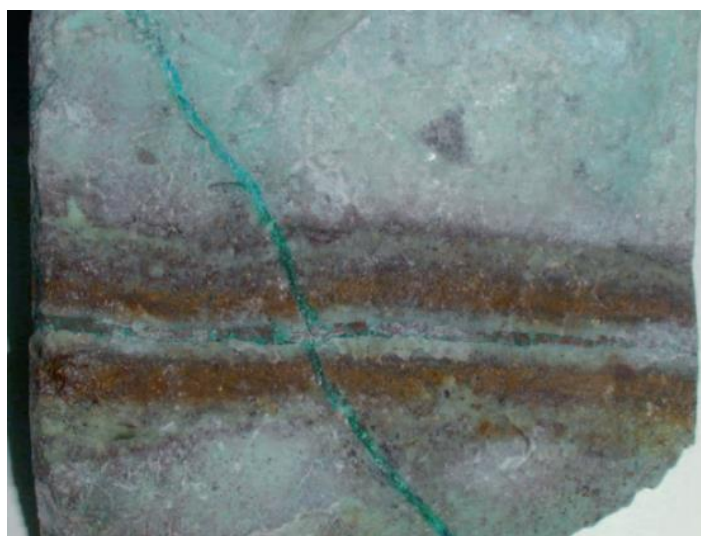
Segundo Rossi (2014), existem várias fontes de diluição e perda de minério. Sendo que a diluição e a perda de minério estão sempre intimamente ligadas, e as referências à diluição incluem ambos os casos. As principais fontes de diluição podem ser classificadas em três categorias diferentes (Rossi 2002): Diluição interna ou efeito suporte, diluição de contato geológico e a diluição operacional.

3.5.1.1 Diluição Interna ou Efeito Suporte

A diluição interna é uma consequência da previsão de recursos em um volume diferente dos dados originais (Parke, 1980 *apud* Rossi, 2014). A estimativa de recursos requer um teor médio dentro dos blocos e geralmente é modelado usando a variação de volume ou correção de suporte.

Esta mistura de material que existe dentro do bloco inclui geralmente mineralização de alto e baixo teor, tendo uma variação mais significativa se a mineralização for menos contínua. Além disso, quanto maior for o tamanho do bloco considerado, maior será essa mistura de mineralização ou diluição interna (ROSSI, 2014). A figura 4 exibe uma amostra de 3 polegadas de uma mineralização típica de Porfírio de Cu, onde, dentro da massa de rocha sólida, veios de alto teor de Crisocola (mineralização de Cu) pode ser observada.

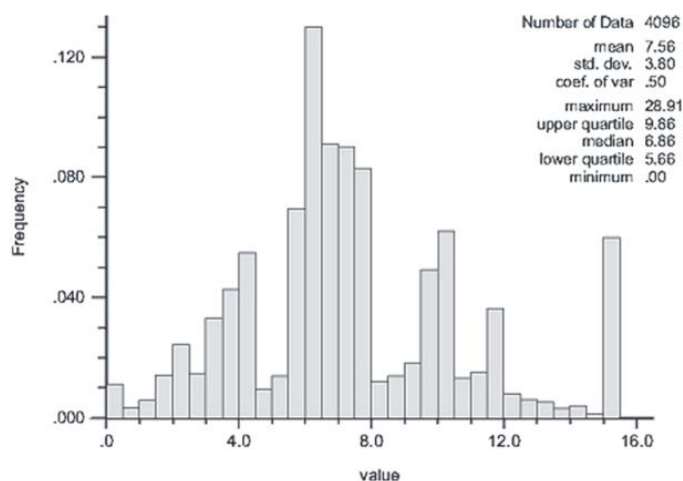
Figura 4 - Amostra de uma mineralização de cobre em veio



Fonte: Rossi (2014)

De acordo com o autor, se essa mineralização fosse amostrada em uma escala muito pequena, a dispersão dos teores de Cu resultantes dos ensaios de laboratório poderia ser representada por uma distribuição como a mostrada na Figura 5. No entanto, se o volume da amostra coletado fosse maior, então haveria mais mistura de material em qualquer amostra, portanto, os veios de alto teor seriam misturados com o material de baixo teor ao seu redor (ROSSI, 2014).

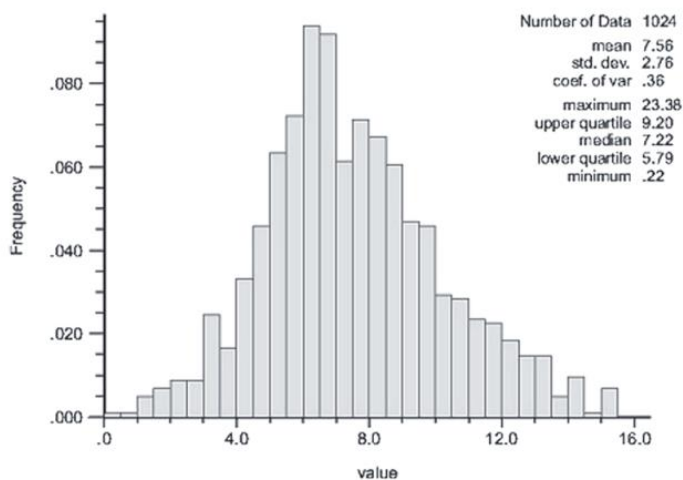
Figura 5 - Distribuição de pontos da amostra em pequena escala



Fonte: Rossi (2014)

Dessa forma, aumentando o volume da amostra uma distribuição como a que é mostrada na Figura 6 poderia ser obtida, para este caso. Observa-se que as médias das distribuições são as mesmas, como os teores são frações de massa e aumentam linearmente, a média geral é mantida, porém o desvio padrão e o coeficiente de variação são menores para a distribuição de volume maior. Além disso, o mínimo e o máximo da distribuição passam a ficar mais próximos da média geral.

Figura 6 - Distribuição de pontos da amostra após aumento do tamanho dos blocos



Fonte: Rossi (2014)

Segundo Isaaks e Srivastava (1989), existe uma tendência geral para a distribuição de grandes volumes ser mais simétrica do que a distribuição original. Como a mineralização não é homogênea, sempre ocorre a mistura de materiais de diferentes teores. Isso é verdade para todos os tipos de mineralização e depende da natureza dos eventos geológicos que produziram a mineralização. A presença de veios mineralizados, zonas ou unidades altamente fraturadas e litologias mais ou menos permeáveis podem afetar a quantidade de diluição interna esperada.

3.5.1.2 Diluição de Contato Geológico

A diluição de Contato Geológico é definida como a diluição e perda de minério resultante da extração de material de diferentes características geológicas. De acordo com Rossi (2014), este tipo de diluição pode muitas vezes ser contabilizado ao usar sub-células ou blocos parciais na definição do modelo de bloco de recursos. De modo que os teores e outras características de cada unidade geológica que entra em contato dentro de cada bloco podem ser calculados em média de acordo com as proporções de cada um dentro dos blocos do modelo.

O impacto e a importância relativa deste tipo de diluição dependem da geometria dos limites entre as unidades geológicas e das diferenças de teor entre as unidades. Em depósitos maciços de alta tonelagem de metais básicos, o impacto da diluição do contato geológico será pequeno se comparado aos depósitos com geometrias complicadas, como tipo de veio ou depósitos skarn, ou um depósito estratigraficamente controlado com dobras e falhas significativas (ROSSI, 2014).

Segundo Guardiano et al. (1995) *apud* Rossi (2014), para um tamanho de bloco fixo, digamos uma SMU (Unidade de Mineração Seletiva), a diluição de contato pode ser caracterizada para zonas geológicas individuais ou domínios de estimativa pela razão do volume de contato de superfície (SCV) para o volume de extração total (V), ou seja, SCV / V . Este fator sem unidade fornece uma indicação de quão importante pode ser a diluição de contato. Uma proporção de 0,05 ou superior geralmente indica alta diluição de contato e é característico do depósito em veio, skarns ou depósitos tabulares delgados, enquanto valores menores que 0,01 correspondem à tonelagem a granel, depósitos massivos ou do tipo pórfiro.

Dessa maneira, para depósitos massivos, a diluição de contato é geralmente um

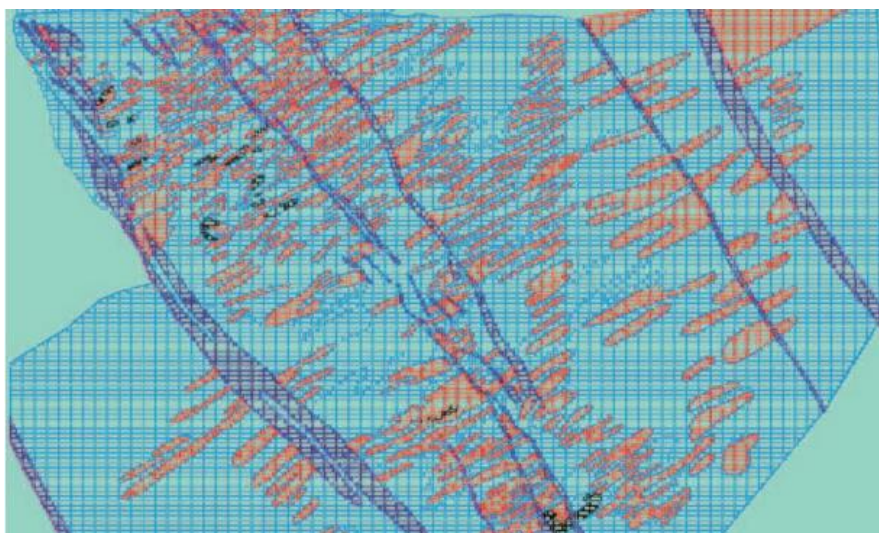
problema local, uma vez que a maior parte da massa será extraída até os contatos e, portanto, sua importância de um modelo de recurso global pode ser limitada. Ainda assim, pode impactar o posicionamento do talude final de cava ou stope, bem como a REM (relação estéril/minério). É muito diferente de depósitos do tipo skarn ou em veios, onde a diluição por contato pode ser o tipo de diluição mais importante.

De acordo com Rossi (2002), a diluição de contato pode ser incorporada ao modelo de bloco usando duas técnicas alternativas, mas conceitualmente semelhantes:

1. O método de sub-célula, conforme mostrado na Figura 7, fornece uma melhor definição dos contatos geológicos. Conforme abordado por Rossi (2002), essas sub-células são então reblocadas novamente para o tamanho do bloco padrão do modelo para fornecer os teores de diluição e manter as proporções de cada unidade geológica dentro de cada bloco;

2. Um cálculo direto da proporção (porcentagem) de cada unidade dentro de cada bloco, armazenando essa porcentagem em relação a massa de cada unidade geológica existente dentro do bloco. Nesse caso, o teor médio do bloco é expresso como a média ponderada da proporção dos teores de cada unidade geológica individual do bloco.

Figura 7 - Modelo de blocos sub-blocado nos contatos



Fonte: Rossi (2014)

Outra opção, menos desejável, seria introduzir empiricamente no modelo de

blocos fatores que penalizem os teores dos blocos nos contatos ou próximos, de acordo com critérios pré-especificados. Neste método, se um contato entre uma zona geológica de alto teor e de estéril passa por qualquer bloco, o teor desse bloco é rebaixado arbitrariamente (EBRAHIMI, 2013).

Segundo Ebrahimi (2013), as empresas buscam fazer essas generalizações devido à orçamento restrito e tempo insuficiente para investigações detalhadas. No entanto, segundo ele, as limitações desse procedimento são significativas, uma vez que os fatores aplicados são empíricos e globais, ao invés de diluir de acordo com os teores estimados localmente, é prática comum a aplicação de fatores de diluição da ordem de 3%, 5% e até 10% arbitrariamente, apenas para ajuste dos planos de produção.

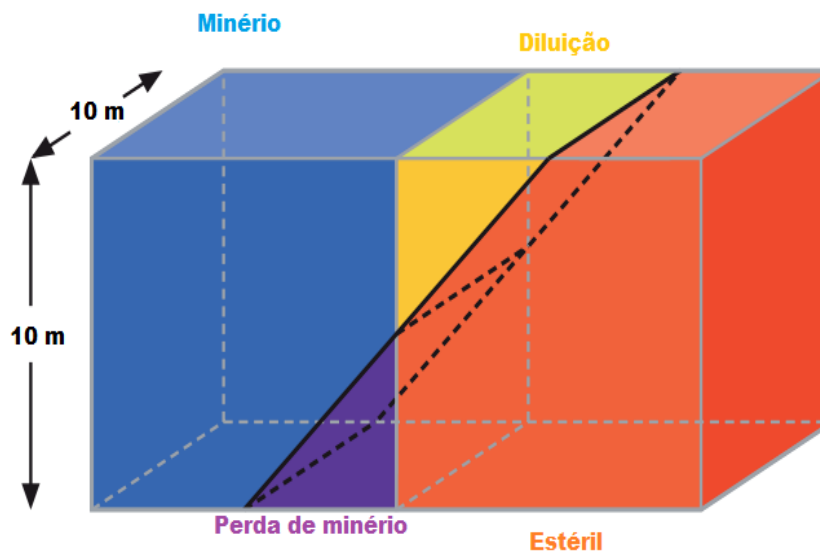
3.5.1.3 Diluição Operacional

A Diluição Operacional inclui diluição e perda de minério que ocorre no momento da lavra. Os equipamentos de mineração, inevitavelmente, misturam material, assim como afirma Rossi (2014), pois a precisão com que o equipamento pode seguir uma linha de escavação é limitada, mesmo com Sistemas de Posicionamento Global (GPS).

Se os contatos minério e estéril correspondem aos contatos geológicos, a diluição operacional e de contato é a mesma. Mais comumente, no entanto, os contatos de minério e estéril que ocorrem no momento da lavra são definidos em termos econômicos e não seguem necessariamente zonas de contato geológicas (EBRAHIMI, 2013).

Uma estimativa possível desse tipo de diluição pode ser obtida por cálculos geométricos simples. A Figura 8 ilustra o caso de uma mina a céu aberto, onde a diluição e perda de minério são incorporadas aos recursos considerando uma altura de bancada específica e assumindo um ângulo de repouso para o material. A perda total de metal depende das características do contato, incluindo o teor do minério perdido e o teor do material diluente (ROSSI, 2014).

Figura 8 - Esquema de diluição operacional de lavra e perda de minério



Fonte: Adaptado de Rossi (2014)

Outra fonte de diluição e perda de minério é a movimentação e elevação do material depois do desmonte por explosivos que muda a posição do material a ser lavrado e complica as linhas de escavação modeladas. Rossi (2014) cita algumas pesquisas significativas que foram feitas nesta área (Yang e Kavetsky 1990; Harris 1997; e Zhang 1994), mas até o momento existem poucas operações que tentam quantificar e contabilizar com precisão o movimento causado pela explosão.

A perda e diluição do minério também ocorre quando o material extraído é transportado para a destinação errada, ou seja, estéril é enviado para a usina ou minério para as pilhas. Equipamentos de controle, como GPS e sistemas de despacho de caminhão, reduziram a frequência desse erro, mas o problema de controle de destino persiste e pode ser significativo (BUDKE, 2019).

Às vezes, é importante distinguir entre diluição planejada e não planejada; pode haver algumas práticas operacionais inesperadas na mina que estão aumentando a diluição. Para Budke (2013), a diluição operacional planejada é aquela considerada no planejamento de curto prazo, o qual possui uma abordagem tática e detalhista buscando atender os limites impostos pela capacidade dos equipamentos, condições geométricas locais e etc. Enquanto que a diluição operacional não planejada é resultado da má execução da lavra, falta de perícia do operador, diluição por desmonte, erros de apropriação do material lavrado, entre outros.

Para este estudo, considerou-se a diluição operacional planejada, onde o seu cálculo foi estabelecido através dos parâmetros geométricos do plano de lavra, como altura de bancada e o ângulo de face.

3.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade (SA) é um método que permite definir os fatores mais influentes em um sistema. Quando uma pequena variação em um parâmetro altera drasticamente a variável de saída do modelo matemático, diz-se que o modelo (para aquela variável) é muito sensível a este parâmetro (SONG et al, 2015).

A análise de sensibilidade pode ter vários objetivos, tais como:

- Identificar quais fatores de entrada têm uma influência pequena ou grande na saída;
- Identificar quais fatores de entrada precisam ser estimados ou medidos com maior precisão;
- Determinar a possível simplificação do modelo;

De acordo com Song et al (2015) podemos dividir a análise de sensibilidade em dois grupos, sendo de Sensibilidade Local (LSA) e Análise de Sensibilidade Global (GSA). E a escolha do método irá depender do objetivo da análise.

O autor aborda que a análise de sensibilidade local é baseada nas derivadas locais de saída do modelo em respeito a variação de um único parâmetro (X), que indica a rapidez com que a saída aumenta ou diminui localmente em torno do valor do parâmetro de referência (base). Enquanto na análise de sensibilidade global, a variância da saída do modelo é avaliada em relação ao quanto os parâmetros variam em todos os seus domínios de incerteza ($X_{\min} < X < X_{\max}$). Isso fornece uma visão mais realista do comportamento do modelo quando usado na prática.

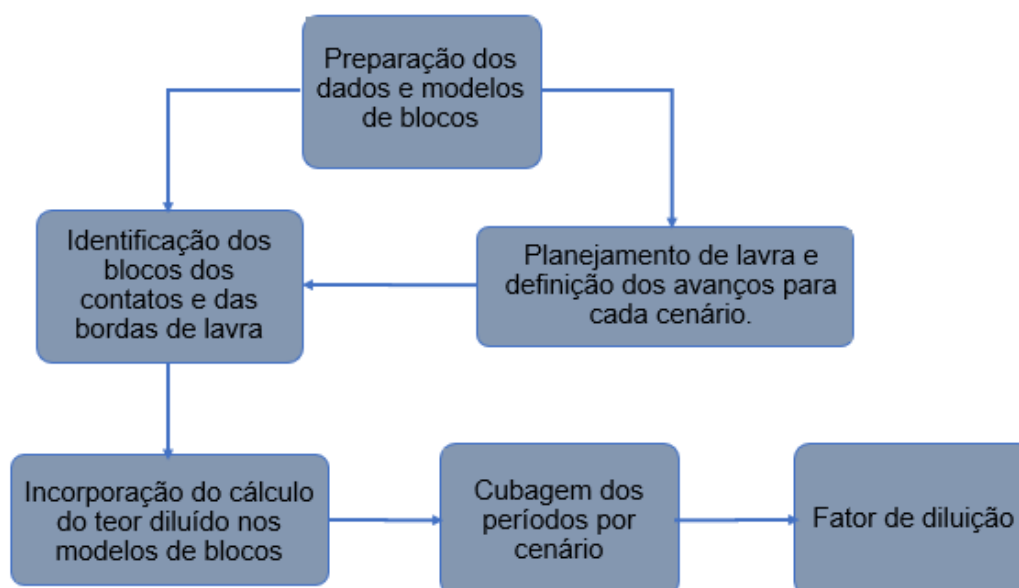
Para este trabalho, foi considerado a análise de sensibilidade local, pois é o método mais prático, com menor consumo computacional, mais fácil de ser aplicado e que demanda poucas simulações em relação a análise sensibilidade global. Embora tenha algumas desvantagens por ser um método que não explora a incerteza, pois a variação do parâmetro é um valor relativo e não abrange o intervalo de incerteza vista em um campo. Além disso, esse método não considera a interação entre os

parâmetros, ou seja, é difícil ordenar a importância deles em relação a variável de saída do modelo (SONG, 2015). Ainda sim, para o estudo proposto a LSA atende os objetivos deste trabalho.

4. METODOLOGIA

Este tópico apresenta a metodologia desenvolvida neste trabalho que consiste em, através do modelo de blocos, aplicar parâmetros diferentes para o cálculo do fator de diluição e observar os impactos dessas variáveis na quantização do mesmo, dentro do plano de lavra de curto prazo. O fluxograma a seguir resume as etapas executadas (Figura 9).

Figura 9 - Fluxograma resumo da metodologia desenvolvida



Fonte: Autor

Para tanto, por ser um *software* completo e muito conhecido na indústria, o Deswik foi escolhido para ser utilizado em todas as etapas deste estudo, desde a manipulação do modelo de blocos, otimização, operacionalização, sequenciamento, até a quantificação do fator de diluição.

É importante mencionar que este trabalho foi desenvolvido, mesmo que por vezes remotamente, no Laboratório de Planejamento de Lavra do DEMIN – UFOP e o mesmo possui licenças oficiais do *software* Deswik disponibilizadas aos alunos do departamento.

4.1 DADOS E PARÂMETROS UTILIZADOS

O modelo de blocos utilizado representa um depósito de ouro real no Brasil, nele

há características das dimensões dos blocos, localização, tonelagem e teores de ouro (Au).

A fim de se avaliar o impacto do tamanho dos blocos para o fator de diluição operacional, o modelo original denominado A, foi reblocado dando origem ao modelo B, assim como esta disposto na tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Modelos de blocos utilizados

Modelo	Dimensão	Número de blocos
A	2 x 10 x 5	10,312,500
B	4 x 10 x 10	2,582,250

Fonte: Autor

Para a otimização da cava, os parâmetros econômicos utilizados encontra-se na tabela 4 a seguir, todos os dados e custos consideram o método de lavra a céu aberto.

Tabela 4 - Parâmetros econômicos considerados

Descrição	Unidade	Valores
Preço do ouro	USD\$/oz	1,725.00
Custo de lavra (ROM)	USD\$/t	2.17
Custo de lavra (Estéril)	USD\$/t	1.55
Custo de beneficiamento	USD\$/t	11.95
Teor de corte	Au g/t	0.30
G&A	USD\$/t	2.15
Recuperação metalúrgica	%	97.50
Ângulo Global	°	55.00

Fonte: Autor

Em relação aos parâmetros operacionais, foram considerados quatro cenários diferentes variando entre dois valores o ângulo de face para cada um dos modelos de blocos, onde a dimensão em z do bloco é equivalente a altura da bancada. Mantendo os outros parâmetros constantes, ao variar ângulo de face e altura do talude o ângulo geral também é alterado, como mostra a tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros operacionais considerados

Parâmetros	Modelo A		Modelo B	
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Ângulo Geral (°)	40	43	55	60
Ângulo de Face (°)	78	85	78	85
Altura de Banco (m)	5	5	10	10
Largura de Berma (m)	5	5	5	5
Largura de Rampa (m)	12	12	12	12
Inclinação de Rampa (%)	10	10	10	10
Raio de Curvatura (m)	22	22	22	22

Fonte: Autor

4.2 MANIPULAÇÃO DO MODELO DE BLOCOS

Antes de ir para a otimização e demais etapas de planejamento, ambos os modelos de blocos foram tratados, e tiveram alguns atributos criados e acrescentados neles.

Com o *software* Deswik, a primeira modificação realizada foi a criação do atributo de volume e exclusão dos blocos de ar (todos os blocos acima da topografia foram removidos), para reduzir o modelo e otimizar as demais operações a serem executadas com o mesmo.

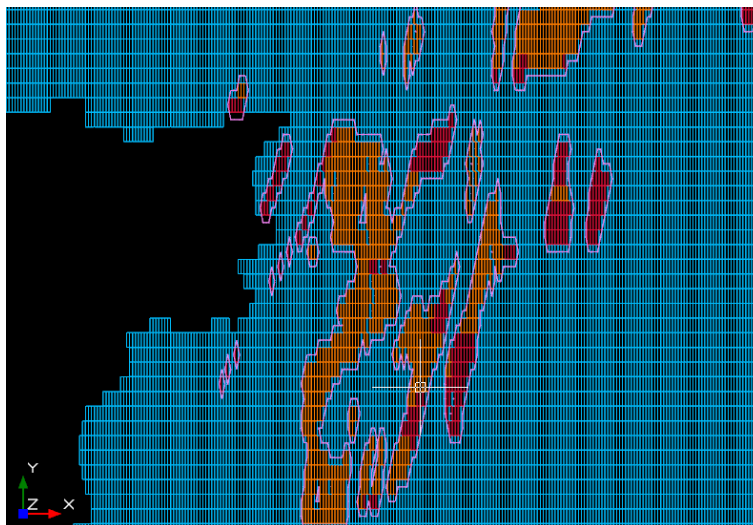
Outro atributo criado foi o de classificação, através do teor de corte definido pelos parâmetros econômicos, todo bloco com teor maior ou igual a 0.3 g/t foi classificado como ORE e os blocos com teores menores que 0.3 g/t foram carimbados como WASTE. Facilitando assim a aplicação das fórmulas para os cálculos que necessitam diferenciar o tipo de material, como por exemplo a função benefício e o cálculo do fator de diluição, além de servir também como referência para as cubagens e análise dos resultados.

Pensando no cálculo do fator de diluição, mais um atributo precisou ser criado, pois além de saber se o bloco é minério ou estéril, é fundamental saber a classificação dos seus vizinhos, já que, como foi mencionado, a diluição ocorre quando há mistura de estéril com o material de interesse, causando a redução do teor e aumento de massa.

Para identificação desses blocos do contato entre o corpo de minério e sua encaixante foi necessário adaptar alguns comandos existentes no Deswik.

Primeiramente criou-se um filtro de minério, e com esse filtro gerou-se uma superfície (wireframe) fechada suavizada em volta dos blocos de minério. Essa superfície que contorna o corpo mineralizado intercepta os blocos que estão no contato, observe a Figura 10 a seguir, em seção, onde a linha rosa corresponde a superfície criada, que separa o minério, blocos vermelhos e laranjas, do estéril, blocos azuis.

Figura 10 - Vista de seção da superfície que envolve os blocos de minério

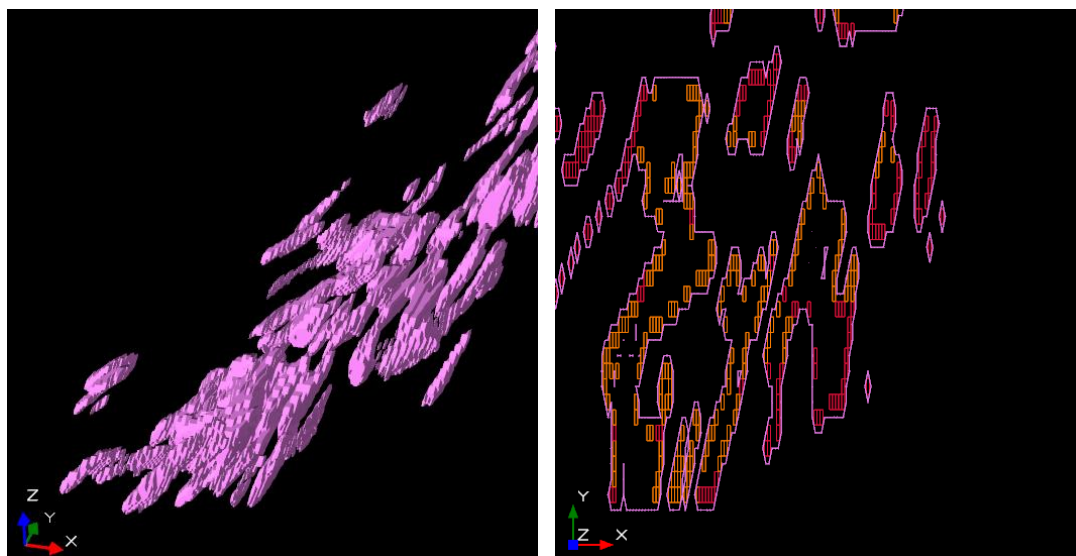


Fonte: Autor

Sabendo disso, executou-se um comando que carimba um volume percente (volper) nos blocos a partir de uma superfície de referência, desse modo, os blocos que se encontram 100% dentro da wireframe recebeu o valor 1, os blocos que estão 100% fora da superfície recebeu o valor 0, enquanto os blocos que se encontram na borda recebeu um valor fracionado que representa o quanto do bloco está dentro da envoltória.

Dessa forma, foi possível criar o atributo que identifica os blocos do contato entre materiais diferentes, fazendo volper diferente de 0 e 1, tudo que resta são blocos da borda. A Figura 11 mostra o modelo filtrado exibindo apenas os blocos carimbados com o atributo de contato, na imagem da esquerda em 3D e na direita em seção. O mesmo método foi realizado para carimbar os blocos na borda do plano de lavra, utilizando a superfície da cava de cada período.

Figura 11 - Blocos do contato do corpo de minério



Fonte: Autor

4.3 CÁLCULO DO FATOR DE DILUIÇÃO

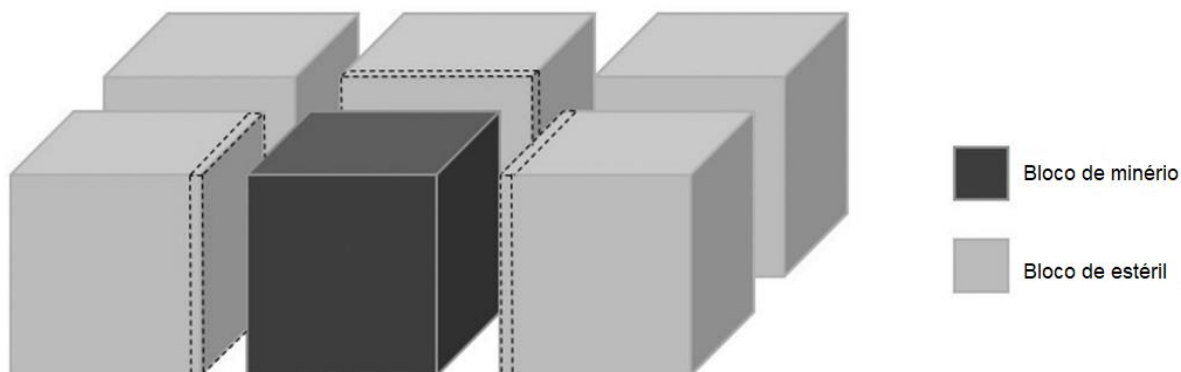
O cálculo do fator de diluição considerado neste trabalho toma como base o método desenvolvido por Câmara (2018), em seu artigo “Controlling operational dilution in open-pit mining” publicado no periódico Mining Technology (TIMM A).

Para os blocos localizados no contato entre minério e estéril, mas que estão dentro do polígono do plano de lavra, a diluição é calculada com base na premissa de que a imprecisão do equipamento evitará que os blocos sejam extraídos perfeitamente.

Ou seja, se o contato entre os blocos for estéril, uma pequena fração dos blocos de estéril em contato com o bloco de minério será incorporado a ele, como é ilustrado na Figura 12.

Como resultado, para o teor diluído considera-se a nova massa incorporada no bloco de minério. A perda de minério não é considerada nesta fase porque a metodologia pressupõe que é melhor recuperar mais tonelagem de minério, mesmo com a consequência de gerar maior diluição, do que ter perdas de minério (CÂMARA, 2018). De acordo com a bibliografia, é comum considerar que cerca de 5% do volume do bloco de estéril em contato será misturado com o estéril.

Figura 12 - Diluição de blocos no contato de materiais diferentes



Fonte: Câmara (2018)

Neste caso, o teor diluído é dado pela equação 4 a seguir:

$$\text{Teor diluído} = \frac{(B_m \times t_m) + (B_e \times t_e)}{B_m + B_e} \quad (4)$$

Onde:

B_m = massa do bloco de minério

B_e = massa da porção (5% do volume) do bloco de estéril

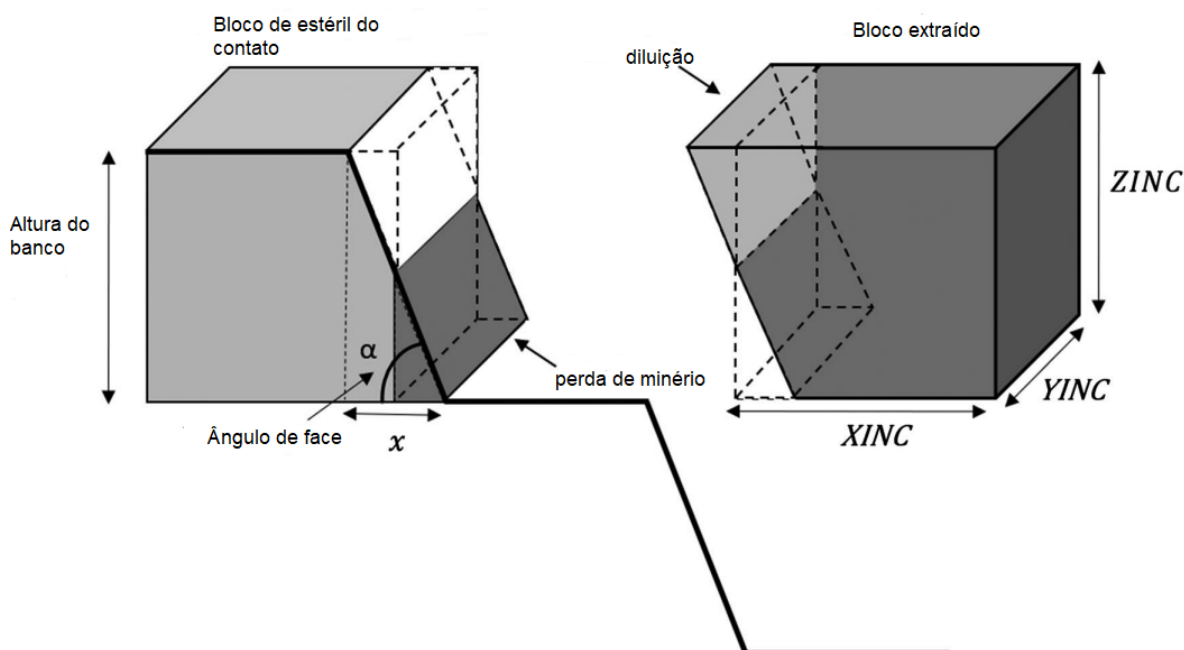
t_m = teor do bloco de minério

t_e = teor do bloco de estéril

Tal equação só é aplicada aos blocos que respeitam a condição estar no contato, mas não estar na borda da cava.

Para blocos localizados nas bordas dos planos de mina, a influência do ângulo da face da bancada deve ser considerada. Ao extrair um bloco, as condições operacionais e a estabilidade da rocha devem ser respeitadas usando um ângulo de face de bancada estável. A Figura 13 mostra como o ângulo da face da bancada pode influenciar na massa planejada e o seu teor.

Figura 13 - Diluição nos blocos da borda do plano de lavra



Fonte: Câmara (2018)

Para calcular o teor diluído devido à influência do ângulo de face da bancada, equação 7, a massa do prisma triangular designado como perda de minério na Figura 10, equação 6.1, é subtraída da massa total do bloco e a massa do prisma triangular designado como diluição, equação 6.2, é somada a ele. Encontra-se o valor de x , que é a base do prisma, pela equação 5, para cada ângulo de face tem-se um valor de x diferente. Sabendo que $YINC$ e $ZINC$ são as dimensões do bloco em Y e Z . Temos:

$$x = \frac{ZINC}{\tan \alpha} \quad (5)$$

$$\text{Perda de minério} = \left(\frac{\left(\frac{x}{2} \times \frac{ZINC}{2}\right) \times YINC \times dm}{2} \right) \times tm \quad (6.1)$$

$$\text{Diluição} = \frac{\left(\frac{x}{2} \times \frac{ZINC}{2}\right) \times YINC \times de}{2} \times te \quad (6.2)$$

$$\text{Teor diluído} = \frac{(Bm \times tm) + \text{diluição} - \text{perda de minério}}{\text{Massa total do bloco}} \quad (7)$$

Onde:

dm = densidade do minério

de = densidade do estéril

Assim foi criado o atributo de teor diluído no modelo, para os blocos de minério que estão no contato, mas estão fora da borda do avanço, aplica-se a Equação 4, se o bloco está no contato e na borda, aplica-se a Equação 7, se o bloco não tiver no contato e nem na borda, o atributo “teor diluído” recebe o mesmo valor do teor original do bloco.

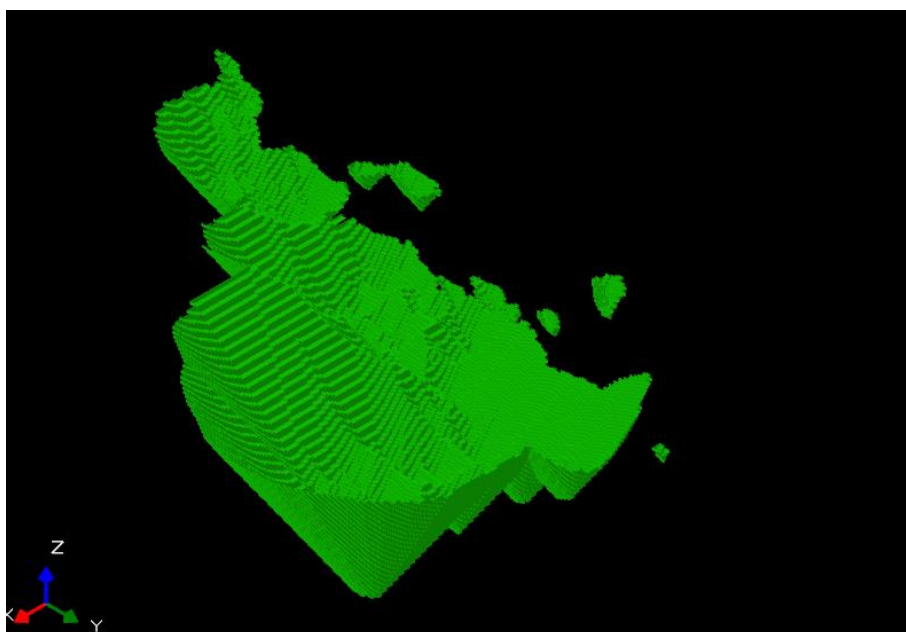
Vale ressaltar que todas as modificações e atributos criados aplica-se aos modelos A e B, de acordo com os parâmetros dispostos na tabela 5 para cada cenário. Dessa forma, para cada cenário o atributo do fator de diluição considera valores diferentes de ângulos e altura de bancada na fórmula, o que gera valores diferentes para o mesmo atributo, de forma que cada cenário precisou ser carimbado e salvo separadamente, gerando assim quatro versões do modelo de blocos, um para cada cenário. Assim, ao realizar a cubagem de cada avanço de lavra tem-se o fator de diluição operacional daquele período, para aquele cenário.

Além disso, é importante mencionar que para o desenvolvimento deste estudo, algumas premissas foram adotadas, assim como Câmara (2018), como por exemplo a consideração de que os blocos são homogêneos, ou seja, assume-se que o teor do bloco é igual em toda sua extensão. Por isso foi possível quantificar a diluição causada pelo ângulo de bancada e a diluição interna, uma vez que ao adicionar e subtrair massa, o teor correspondente às porções era a mesma que do bloco inteiro.

4.4 PLANEJAMENTO DE LAVRA

Com todas as informações necessárias nos modelos de blocos, utilizando o programa Deswik, a função benefício foi configurada de acordo com os parâmetros exibidos na tabela 4. E para a definição da cava ótima, aplicou-se um fator de receita sobre o preço do ouro (Au) com um intervalo de valores entre 0.8 a 1.0, com incrementos de 0.01. Desse modo, foram geradas 22 cavas aninhadas para cada modelo, sendo a cava escolhida como a cava de reserva a de fator de receita (Revenue Factor) igual a 0.98 (Figura 14), gerada com o modelo A.

Figura 14 - Cava matemática gerada no Deswik (RF=0.98)

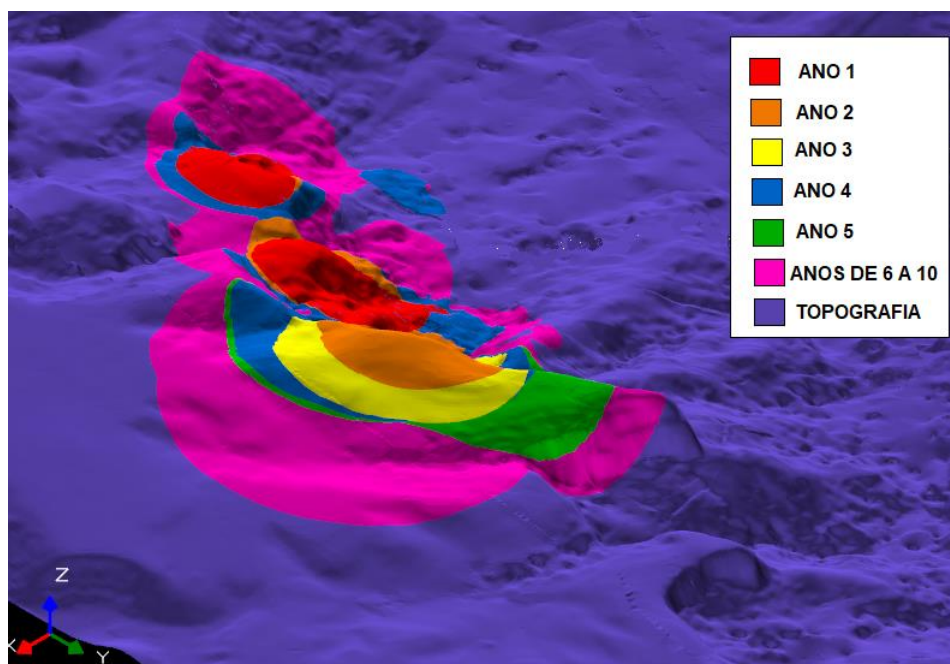


Fonte: Autor

Em seguida, procedeu-se com o sequenciamento matemático. O mais adequado seria operacionalizar a cava final e a partir dela gerar o sequenciamento, porém, como este estudo tem como foco a análise dos 12 primeiros meses de lavra, buscando otimizar tempo, realizou-se um primeiro sequenciamento anual com a cava matemática definida na otimização.

O sequenciamento foi realizado através dos módulos IS e SCHED do Deswik. O Deswik.*IS* é a ferramenta responsável por conectar, inserir e modificar dados que sejam necessários no CAD e no SCHED, ou seja, prepara os dados para o sequenciamento, criando sólidos, atividades de lavra, dependências, etc. O sequenciamento foi realizado por meio da ferramenta *Resource Leveling*. A Figura 15 exhibe as regiões e a sequência a serem lavradas conforme o sequenciamento anual.

Figura 15 - Regiões de lavra definidas pelo sequenciamento anual



Fonte: Autor

A partir desse sequenciamento, operacionalizou-se o primeiro ano de acordo com os parâmetros operacionais para os quatro cenários definidos anteriormente na tabela 5. E com estas quatro cavas, uma para cada cenário, descritas na tabela 6, foi realizado um novo sequenciamento para enfim chegar aos avanços mensais.

Tabela 6 - Descrição das cavas operacionais do ano 1

Cenário	Minério (kt)	Estéril (kt)	REM (t/t)
Cenário 1	1,298	10,686	8.23
Cenário 2	1,298	10,528	8.11
Cenário 3	1,388	9,627	6.94
Cenário 4	1,389	9,466	6.81

Fonte: Autor

O fator de diluição é obtido a partir cubagem de cada avanço mensal de lavra. Para se chegar ao fator de diluição, basta fazer a relação entre a média ponderada do atributo de teor diluído e do teor original do bloco, equação 8. Dessa forma, para cada avanço teremos um fator de diluição operacional.

$$\text{Fator de diluição operacional} = \frac{\text{Teor diluído}}{\text{Teor}} - 1 \quad (8)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da metodologia exposta anteriormente.

5.1 DILUIÇÃO INTERNA OU EFEITO SUPORTE

Após a reblockagem do modelo A para o modelo B, com blocos quatro vezes maiores, notou-se uma significativa redução nos teores e um aumento na massa classificada como minério pelo teor de corte.

A tabela 7 mostra o resultado das cubagens de ambos os modelos considerando apenas blocos com teores maiores ou iguais a 0.3 g/t de Au.

Tabela 7 - Report dos modelos considerando apenas material acima do teor de corte

Modelo	Au médio (g/t)	Massa (kt)
Modelo A	8.38	26,522
Modelo B	5.72	30,078

Fonte: Autor

Observa-se que o teor médio dos blocos (após aplicação do teor de corte) sofreu uma redução de 32%, enquanto que a massa de material acima do teor de corte aumentou cerca de 13%. Essa variação no teor corresponde a diluição interna.

A tabela 8 exhibe os resultados das cubagens da cava matemática para os dois modelos.

Tabela 8 - Resultado das cubagens da cava matemática

Modelo	Minério (kt)	Estéril (kt)	Au (g/t)	REM (t/t)
Modelo A	18,226	182,985	1.96	10.04
Modelo B	23,786	177,425	1.52	7.46

Fonte: Autor

Como a cava matemática considera apenas os blocos economicamente viáveis pelo método de lavra a céu aberto, blocos muito profundos com altíssimo teor não entram na conta, e a diluição fica menor, cerca de 23%. Nota-se que a diluição interna é mais significativa quando envolve teores mais altos.

Além disso, a massa de minério sofre um aumento de 31%. Esse aumento na

tonelagem que seria enviada para a planta de beneficiamento, pode significar um grande impacto no fluxo de caixa da mina e até inviabilizar a lavra de todo o material, uma vez que essa cava matemática foi gerada a partir do modelo de blocos com o tamanho original das células (modelo A).

Entende-se que os blocos menores que antes estavam a baixo do teor de corte e eram classificados como estéril, ao se agrupar com outros blocos de alto teor no processo de reblockagem, passa a ser classificado como minério por sua média ficar a cima do teor de corte, no entanto o teor médio geral cai, pois passa a considerar uma massa maior para uma mesma quantidade de metal de interesse.

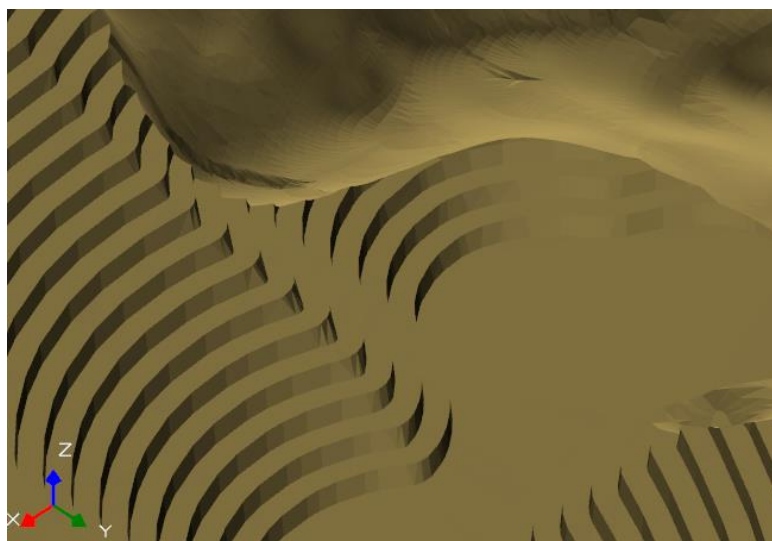
Esses dados confirmam que quanto maior o tamanho dos blocos maior será a diluição interna e menos seletiva será a lavra. Embora seja comum na indústria fazer a reblockagem do modelo, buscando ganho no tempo computacional requerido para o desenho das cavas com blocos de dimensões maiores, tais desvantagens precisam ser analisadas.

5.2 DILUIÇÃO OPERACIONAL PLANEJADA

Para avaliar a diluição operacional planejada, o estudo em questão utilizou avanços de lavra mensais e calculou o fator de diluição a partir dos teores diluídos reportados pelas cubagens de cada avanço. As informações foram tratadas em planilhas Excel®.

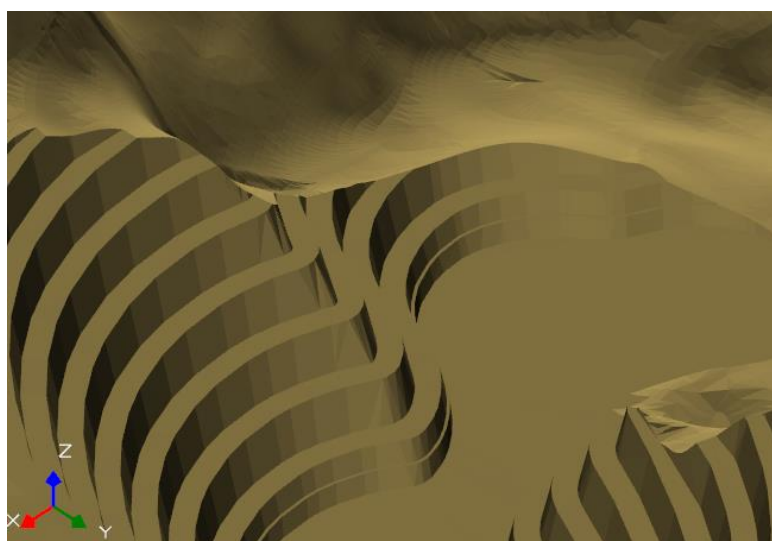
Como mencionado, os avanços operacionais foram desenhados para quatro cenários diferentes, onde os principais parâmetros que os diferem são o ângulo de face e a altura do banco. Para os cenários com bancos de 5 metros, em algumas regiões houve um aumento expressivo do estéril, devido a topografia ser muito acidentada. As Figuras 16 e 17 ilustram um desses casos, onde a Figura 16 mostra o cenário 2, que considera ângulo de face de 85 graus e bancos de 5 metros de altura, e a Figura 17 mostra o cenário 3, cujo ângulo é igual a 78 graus e possui 10 metros de altura de bancada, ambas imagens correspondem a mesma região de avanço.

Figura 16 – Avanço operacional cenário 2



Fonte: Autor

Figura 17 - Avanço operacional cenário 3



Fonte: Autor

As tabelas 9, 10, 11 e 12 a seguir apresentam os resultados obtidos considerando os parâmetros operacionais definidos para os cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Tabela 9 - Resultados do cenário 1

Período	ROM (kt)	Estéril (kt)	Au (g/t)	Au diluído (g/t)	Fator de diluição (%)
1	103	896	1.99	1.91	-3.88%
2	108	899	2.03	1.95	-3.79%
3	108	862	2.01	1.93	-4.00%
4	106	875	2.11	2.02	-4.03%
5	105	876	2.08	1.96	-4.50%
6	109	907	2.11	1.99	-5.30%
7	107	901	2.12	2.03	-4.20%
8	109	898	2.1	2.01	-3.17%
9	111	891	2.12	2.02	-4.30%
10	113	892	2.09	1.96	-5.77%
11	110	878	2.13	2.05	-3.87%
12	108	909	2.09	2.03	-2.88%
Total	1,298	10,686	2.08	1.99	-4.14%

Fonte: Autor

Observa-se que o fator de diluição médio para o ano fica em torno de -4.14% neste cenário, no entanto, o valor máximo é de -5.77% no período 10 e o mínimo é de -2.88% no Período 12, sendo essa uma variação significativa, que pode estar atrelada a geometria ou região dos avanços mensais.

Tabela 10 - Resultados do cenário 2

Período	ROM (kt)	Estéril (kt)	Au (g/t)	Au diluído (g/t)	Fator de diluição (%)
1	101	885	1.99	1.92	-3.46%
2	106	887	2.02	1.97	-2.57%
3	112	877	2.03	1.96	-3.68%
4	110	878	2.1	2.02	-3.60%
5	108	880	2.09	2.03	-3.10%
6	111	875	2.12	2.02	-4.73%
7	108	876	2.13	2.06	-3.46%
8	107	872	2.09	2.03	-2.77%
9	110	876	2.14	2.07	-3.15%
10	109	878	2.11	2.02	-4.35%
11	110	876	2.14	2.06	-3.65%
12	106	864	2.07	2.02	-2.57%
Total	1,298	10,528	2.09	2.02	-3.43%

Fonte: Autor

Com base nos resultados apresentados na Tabela 10, percebe-se que o fator de diluição médio teve uma redução em relação ao primeiro cenário, caindo para -3.43%. Os parâmetros que variam entre os dois cenários é o ângulo de face e conseqüentemente o ângulo geral, visto que a altura de bancada é a mesma para ambos. Isso indica que quanto mais suave o ângulo de face, maior será a diluição e a perda de minério, o que faz sentido pois ao reduzir o ângulo aumenta-se a base do prisma (Figura 10) e maior será o volume diluído.

Tabela 11 - Resultados do cenário 3

Período	ROM (kt)	Estéril (kt)	Au (g/t)	Au diluído (g/t)	Fator de diluição (%)
1	112	802	1.49	1.43	-4.17%
2	115	811	1.52	1.46	-4.03%
3	116	779	1.5	1.44	-4.17%
4	115	799	1.57	1.50	-4.33%
5	117	779	1.55	1.46	-5.72%
6	118	814	1.57	1.48	-5.70%
7	115	812	1.58	1.51	-4.17%
8	116	811	1.57	1.51	-4.10%
9	117	799	1.58	1.50	-4.90%
10	116	806	1.56	1.46	-6.10%
11	117	795	1.59	1.53	-3.95%
12	114	820	1.56	1.51	-3.09%
Total	1,388	9,627	1.55	1.48	-4.54%

Fonte: Autor

Para o cenário 3 o ângulo de face é o mesmo que o ângulo utilizado no cenário 1, o que muda agora é a altura da bancada e o ângulo geral. Sabe-se que quanto maior a bancada, menos seletiva é a lavra. Neste cenário, a média do fator de diluição vai para -4.54%. No entanto, se for considerar os teores e não o fator de diluição operacional aplicada, percebe-se que a variação é significativa, uma redução em torno de 23% nos teores, isso acontece devido a diluição interna dos blocos causada pela reblockagem e alteração das dimensões dos blocos.

Tabela 12 - Resultados do cenário 4

Período	ROM (kt)	Estéril (kt)	Au (g/t)	Au diluído (g/t)	Fator de diluição (%)
1	112	795	1.49	1.44	-3.64%
2	115	788	1.51	1.45	-3.70%
3	116	781	1.52	1.46	-3.88%
4	115	789	1.57	1.51	-3.79%
5	117	793	1.56	1.51	-3.45%
6	118	789	1.58	1.50	-4.98%
7	115	787	1.57	1.51	-3.64%
8	116	776	1.56	1.51	-2.98%
9	117	797	1.60	1.54	-3.90%
10	116	775	1.55	1.48	-4.50%
11	117	785	1.60	1.54	-3.84%
12	114	811	1.55	1.51	-2.70%
Total	1,388	9,466	1.55	1.50	-3.75%

Fonte: Autor

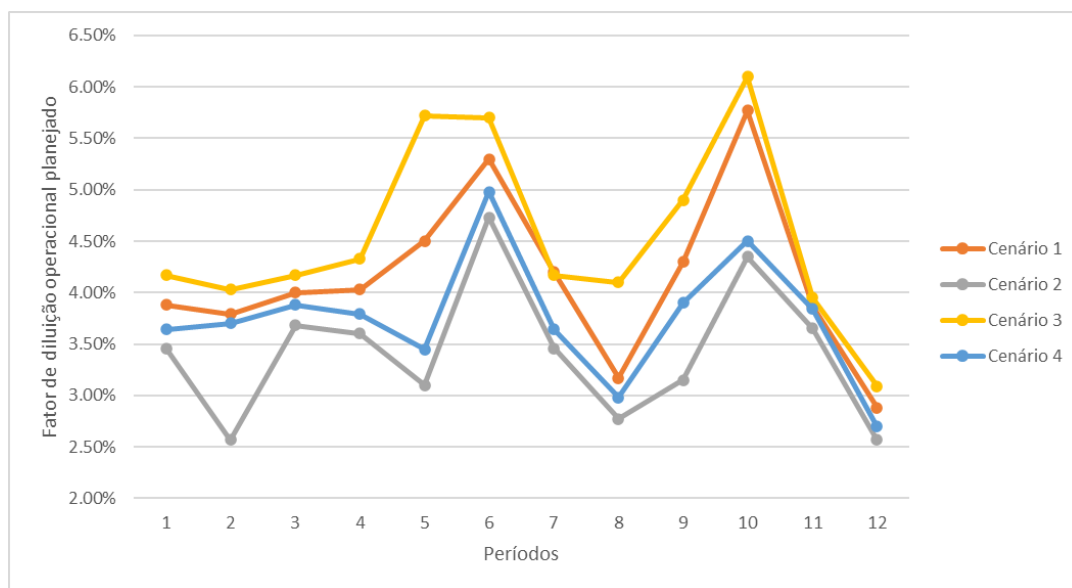
Por último, o cenário 4 traz uma média anual de aproximadamente -3.75% para o fator de diluição. Confirmando que quanto maior o ângulo de face, menor será a diluição operacional planejada. Além disso, é possível notar que a altura da bancada tem certa influência para o cálculo do fator de diluição operacional, além de impactar diretamente na REM, nesse caso.

Observa-se que o cenário que obteve maior fator de diluição foi o cenário 3, com a maior altura de banco e menor ângulo de face.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA DILUIÇÃO OPERACIONAL

A Figura 18 mostra o fator de diluição operacional planejado calculado para cada período por cenários. Nota-se um intervalo de variação de 3.53 e a ocorrência de picos de diluição nos períodos 6 e 10. Esses resultados mais discrepantes provavelmente estão associados a geometria e litologia do avanço, uma vez que o comportamento se repete para os 4 cenários.

Figura 18 - Gráfico do Fator de diluição por período



Fonte: Autor

A estatística descritiva dos dados de diluição operacional planejada consta na tabela 13, a seguir. O estudo teve como resultado uma diluição média de -3.96 para o depósito analisado, considerando todos os períodos e todos os cenários.

Tabela 13 - Estatística descritiva dos resultados

Indicador	Diluição Operacional Planejada (%)				Geral
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	
Média	-4.14	-3.43	-4.54	-3.75	-3.96
Erro padrão	0.19	0.19	0.2	0.16	0.21
Mediana	-4.01	-3.46	-4.17	-3.74	-3.88
Desvio padrão	0.8	0.66	0.89	0.6	0.83
Variância da amostra	0.64	0.44	0.79	0.36	0.7
Intervalo	2.9	2.17	3.01	2.28	3.53
Mínimo	-5.77	-4.73	-6.1	-4.98	-6.1
Máximo	-2.88	-2.57	-3.09	-2.7	-2.57
Contagem	12	12	12	12	48

Fonte: Autor

Para uma melhor compreensão do impacto de cada parâmetro no cálculo da

diluição operacional, a tabela 14 mostra a taxa de variação do fator de diluição encontrado para cada período comparando os cenários com os mesmos parâmetros.

Tabela 14 - Variação do fator de diluição entre cenários com os mesmos parâmetros

Período	Altura dos Bancos		Ângulo de face	
	5 m	10 m	78°	85°
	Cenários 1 e 2	Cenários 3 e 4	Cenários 1 e 3	Cenários 2 e 4
1	11%	13%	7%	5%
2	32%	8%	6%	44%
3	8%	7%	4%	5%
4	11%	12%	7%	5%
5	31%	40%	27%	11%
6	11%	13%	8%	5%
7	18%	13%	-1%	5%
8	13%	27%	29%	8%
9	27%	20%	14%	24%
10	25%	26%	6%	3%
11	6%	3%	2%	5%
12	11%	13%	7%	5%
Média	17%	16%	10%	11%

Fonte: Autor

As primeiras duas colunas comparam cenários que possuem a mesma altura de bancada, 5 ou 10 metros. A variação média da diluição fica entre 16 e 17%, sendo o parâmetro de influência dessa análise o ângulo de face, nota-se que para uma pequena variação no ângulo o impacto na diluição é considerável.

Nas duas últimas colunas, tem-se a variação do fator de diluição para cenários de ângulos iguais, 78 e 85 graus, respectivamente. Nesse caso, o parâmetro analisado é a altura do banco, que gera uma variação média entre 10 e 11%. É uma variação baixa, considerando que a altura do banco dobrou. Conclui-se que o fator de diluição é mais sensível para o ângulo de talude, do que para a altura da bancada.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar e compreender a influência de parâmetros operacionais para o fator de diluição. Controlar a diluição de forma sistemática permite um melhor entendimento dos problemas durante os processos de reconciliação de massa e teor e onde eles ocorrem no dia a dia da mina.

Com base na metodologia proposta é possível afirmar que a diluição apresenta maior sensibilidade para o tamanho dos blocos do que para o ângulo de face e altura do banco.

Para a diluição operacional planejada foram estudados 12 planos mensais de lavra, para quatro cenários diferentes, totalizando 48 avanços, apresentando um intervalo de variação do fator de diluição de -2.57% até -6.1%.

Ainda assim, o fator de diluição apresentou picos em alguns períodos específicos e também um resultado de diluição média de -3.96 %. Apesar dos resultados serem relativamente próximos entre os períodos do mesmo cenário, os valores que se destacam dos demais podem ser justificados por fatores diversos e principalmente pelas condições geométricas e litológicas dos planos.

Além disso, pode-se afirmar que quanto maior o ângulo de face e menor a altura da bancada, menor será a diluição e perda de minério associada a geometria da lavra, dessa forma, para minas que são divididas por setores geotécnicos e possuem parâmetros diferentes, não faz sentido aplicar o mesmo fator de diluição para todas as áreas de lavra. A diluição é um dos fatores que mais afetam a reconciliação e aderência do plano, conseguir prevê-la é de grande importância para a assertividade do plano de lavra.

Dessa forma, tendo as devidas informações sobre o comportamento do fator de diluição em relação aos parâmetros de cada região de lavra, um bom método de controle da diluição pode ser desenvolvido e assim, buscar maneiras de minimizá-la.

REFERÊNCIAS

- BUDKE, Régis. **Quantificação da diluição operacional na mina do salobo**. 2019. 74 f. Monografia (Especialização *latu sensu*) - Instituto tecnológico vale, Ouro Preto, 2019.
- CÂMARA, T. R. **Sistematização do cálculo de diluição e perdas operacionais para reconciliação de teores e massas em lavra a céu aberto**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2013.
- CÂMARA, T. R. LEAL, R. S., PERONI, R. L. e CAPPONI, L. N. **Controlling operational dilution in open-pit mining**. *Mining Technology*, V. 128, Issue 1, p. 1-8, 2018 (TIMM A), 2018. <http://doi.org/10.1080/25726668.2018.1470275>
- CÂMARA, T. R. **Diluição operacional em lavra a céu aberto: quantificação, controle e minimização utilizando ferramentas computacionais e incertezas geológicas**, Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2020.
- CAMPOS, Pedro Henrique Alves. **Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra: Sequenciamento direto de blocos vs. planejamento tradicional**. Orientador: Prof. Dr. IVO EYER CABRAL. 2017. 93 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- COSTA, Flávio Vieira. **Análise dos principais indicadores de desempenho usados no planejamento de lavra**. 2015. 98 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2015.
- CURI, Adilson. **Lavra de Minas**. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, v.1, 2017. 774 p.
- EBRAHIMI. A. **The importance of dilution factor for open pit mining projects**. Acesso em setembro de 2021 em: http://www.srk.com.au/files/File/papers/dilution_factor_openpit_a_ebrahimi.pdf
- INSTITUTO MINERE. **Modelagem Geológica e a sua relação com o Planejamento de Lavra**. *In: . Website. Amanda Corrêa*, 4 out. 2018. Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/modelagem-geologica-e-a-sua-relaao-com-o-planejamento-de-lavra>. Acesso em: 20 set. 2021.
- ISAAKS E. H., SRIVASTAVA R. M. (1989) **An introduction to applied geostatistics**. Oxford University Press, New York, p 561. ISBN0-19-505012-6, ISBN0-19-505013-4.
- JARA, R.; COUBLE, A.; EMERY, X.; MAGRI, E.; ORTIZ, J. **Block size selection and its impact on open-pit design and mine planning**. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 106, p. 205-211, Março, 2006.

PERONI, R. L. **Notas de aula da disciplina de Introdução da lavra à céu aberto**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programas de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2007

REUWSAAT J.D., DIEDRICH C., MENIN R., DE PAULA W.F. (2017) **Operational SMU Definition of a Brazilian Copper Operation**. In: Gómez-Hernández J., Rodrigo-Ilarri J., Rodrigo-Clavero M., Cassiraga E., Vargas-Guzmán J. (eds) Geostatistics Valencia 2016. Quantitative Geology and Geostatistics, vol 19. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46819-8_21

ROSSI, M.E. **Recursos Geológicos o Reservas Mineras?** In: Proceedings from the Sextas Jornadas Argentinas de Ingeniería de Minas, San Juan, Argentina, Mayo 30–Junio 1, 2002.

ROSSI, Mario E. **Mineral Resource Estimation**. 1. ed. Springer, 2014. v. 1, cap. 7, p. 117-132. ISBN 978-1-4020-5716-8. Springer Dordrecht Heidelberg New York London.

SILVA, N C. S. **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais**. Orientador: Giorgio de Tomi. 2008. 128 f. Dissertação de Doutorado (Engenharia mineral) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São paulo, 2008.

SILVA, N. H. C. **Uma abordagem sobre o planejamento de lavra de curto prazo com ênfase na metodologia da programação diária (Line Up) da mina de Salobo**, Trabalho de Conclusão de Curso do Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) em Sistemas Mínero-Metalúrgicos, Parauapebas, 2014.

STONE J.G., DUNN P.G. **Ore reserve estimates in the real world**. Soc Econ Geol Special Publication (3), p 150. 1996. Acesso em agosto de 2021 em: https://www.segweb.org/store_info/SP/SP-03-Additional-Product-Info.pdf

SONG, X.; ZHANG, J.; ZHAN, C.; XUAN, Y.; YE, M.; XU, C. **Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications**. Journal of Hydrology, Volume 523, 2015, p 739-757, ISSN 0022-1694. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>. Acesso em: 20 set. 2021.