

**Régis Budke**

**QUANTIFICAÇÃO DA DILUIÇÃO OPERACIONAL NA MINA DO SALOBO**

**Carajás, PA**

**2019**

Régis Budke

## **QUANTIFICAÇÃO DA DILUIÇÃO OPERACIONAL NA MINA DO SALOBO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em Lavra de Minas a Céu Aberto.

Orientadora: Taís Renata Câmara

Carajás, PA

2019

Título: QUANTIFICAÇÃO DA DILUIÇÃO OPERACIONAL NA MINA DO SALOBO

Classificação: ( ) Confidencial ( ) Restrita ( ) Uso Interno ( X ) Pública

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B927q

Budke, Régis  
Quantificação da diluição operacional na Mina do Salobo/ Régis  
Budke- Ouro Preto, 2019.

74 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico  
Vale, 2019.

Orientador: Taís Renata Câmara

1. Planos de lavras – diluição operacional. 2. Quantificação da  
diluição - Operações de lavra. 3. Operação de lavras. I. Título

CDD. 23. ed. 622.292

Especialização em Lavra de Minas a Céu Aberto

QUATIFICAÇÃO DA DILUIÇÃO OPERACIONAL NA MINA DO SALOBO

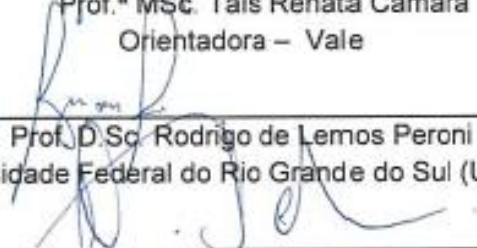
Autor: Régis Budke

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 03 de maio de 2019  
pela banca examinadora constituída pelos professores:



---


Prof.<sup>a</sup> MSc. Tais Renata Câmara  
Orientadora – Vale



---

Prof. D.Sc. Rodrigo de Lemos Peroni


Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)



---

Prof. D.Sc. Alizeibek Saleimen Nader

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)



---

Prof. D.Sc. Eunírio Zanetti Fernandes

Instituto Tecnológico Vale (ITV)

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Lair Budke e Gelsi Terezinha Budke, que sempre me apoiaram em tudo que faço e são os meus maiores exemplos de vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à DEUS pela dádiva de existir.

À minha mãe Gelsi Terezinha Budke e a meu pai Lair Budke, que sempre me apoiaram, incentivaram e estiveram presentes em todos os momentos difíceis da minha vida.

Ao Gerente de Planejamento, Processo e Qualidade da Mina do Salobo, Cleiber Rezende, que incentivou a abordagem sistemática da diluição na mina do Salobo e a execução deste trabalho.

Ao engenheiro de minas Hugo Nonato Campelo por todo ensinamento compartilhado na área de planejamento de lavra e pelo apoio na definição do tema.

Ao Engenheiro de Minas, Geoestatístico e amigo João Dirk Reuwsaat pelas diversas vezes que me ajudou com o esclarecimento, discussão e sugestões sobre os temas de reconciliação e diluição na Mina do Salobo.

À Geóloga Cleive Ribeiro que apoiou o trabalho de identificação dos contatos litológicos e mapeamento das qualidades do minério durante os trabalhos de campo.

Ao técnico Jhonnyce Silva pelo apoio prestado nas consultas e pesquisas dos dados dos polígonos na base de dados do despacho do Salobo.

E à minha orientadora Taís Renata Câmara pelo profissionalismo, respeito e total disposição para atender as dúvidas e paciência na resolução dos trabalhos.

*“Procure sempre fazer as coisas do modo mais simples que você puder”*

*(Albert Einstein).*

## RESUMO

A diluição operacional é um item de extrema importância no planejamento de curto prazo e o seu controle possibilita alcançar melhores índices no cumprimento do planejamento. Diversos estudos demonstram que não há uma definição clara e sistemática para quantificar as diferenças de teores planejados e executados, causando sempre uma discussão entre as áreas de planejamento e operação sobre a origem da divergência dos teores. É comum em diversas minas que essa problemática seja tratada com a adoção de fatores arbitrários de diluição nos planos de lavra. Entretanto, melhor que um fator fixo é a quantificação da diluição operacional. Desta forma, o objetivo principal deste trabalho foi a quantificação da diluição nas operações de lavra e planejamento da Mina do Salobo, propondo duas formas sistemáticas de quantificação. Para isso foram realizadas análises comparativas de polígonos planejados e executados a partir de levantamentos topográficos antes e após as detonações para investigação da diluição operacional de lavra e em um segundo momento, avaliação de planos de lavra mensais a partir de polígonos planejados para investigar o comportamento da diluição operacional planejada. Os resultados da diluição operacional de lavra alcançaram resultados de diluição média de -1,8%; a diluição operacional planejada resultou em média em -2,55%. Entretanto, houve grandes variações dos valores máximos e mínimos para os dois estudos, evidenciando que o uso de uma diluição média pode levar a uma má interpretação dos resultados, mascarando problemas específicos de cada mês. Observou-se que a interação entre operadores, técnicos e supervisores no dia-a-dia da mina é fator decisivo para evitar a ocorrência da diluição operacional de lavra enquanto que, na diluição operacional planejada, o desenho dos planos de lavra buscando a operacionalidade influenciam sobremaneira a ocorrência de diluição de acordo com a seletividade de lavra praticada.

**Palavras-chave:** Diluição. Operacional. Quantificação.



## ABSTRACT

Operational dilution is an extremely important factor in short-term mine planning and its quantification makes it possible to achieve better control in mine planning. Several studies demonstrated that there is no clear and systematic definition to quantify differences in planned and executed grades, which lead to divergences about the origin of that differences, if they are due to operational or planning problems. It is common to use an arbitrary dilution factor in several mines. However, rather than a fixed factor, better is the quantification of the operational dilution. Thus, the main objective of this study is the quantification of the planned and of the unplanned operational dilution of Salobo Mine, proposing two ways to quantify them. For this, comparative analyzes of planned and executed polygons were carried out from topographic surveys before and after blasting, to investigate the operational dilution. In a second moment, monthly mining plans were evaluated, in order to investigate the behavior of the planned operational dilution. The results of the unplanned operational dilution were in average -1.8%; the average planned operational dilution was -2.55%. However, there were large variations of the maximum and minimum values for the two studies, showing that the use of an average dilution can lead to misinterpretation of the results, masking specific problems of each month. It was observed that the interaction between operators, technicians and supervisors in the day-to-day of the mine is a decisive factor in avoiding the occurrence of the unplanned operational dilution, while in the planned operational dilution the design of the mining plans seeking the operability influence especially the occurrence of dilution according to the practiced mining selectivity.

**Keywords:** Dilution. Operational. Quantifying.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação hierárquica dos níveis de planejamento de lavra.....	21
Figura 2 - Fluxo de planos de lavra no horizonte do planejamento de curto prazo.....	26
Figura 3 - Fluxo de entradas e saídas do plano mensal de lavra .....	28
Figura 4 - Liberação de densidade e litologia de um polígono .....	30
Figura 5 – Organização da Estrutura do Line Up.....	32
Figura 6 - Processo de reconciliação na mina do Salobo .....	35
Figura 7 – Classificação da diluição.....	40
Figura 8 - Fluxo da metodologia de liberação de polígonos para lavra na Mina do Salobo ....	45
Figura 9 - Resultado do levantamento topográfico com <i>laser scan</i> da face livre do polígono.	46
Figura 10 - Contatos de qualidade (baixo, médio e alto teor) antes da detonação. ....	47
Figura 11 - Modelo de liberação (Ore Control Model) atualizado.....	47
Figura 12 - Isolinhas de temporização resultado da simulação do sequenciamento de iniciação do desmonte.....	48
Figura 13 - Levantamento topográfico com Laser Scan logo após a detonação do polígono..	49
Figura 14 - Levantamento topográfico com Laser Scan após finalização da lavra. ....	50
Figura 15 - Visualização da tela do operador da posição da escavadeira nos limites do polígono .....	56
Figura 16 - Sinalização em campo sobre a pilha desmontada das qualidades e regiões do polígono.....	57
Figura 17 - Resultado da lavra do polígono L3_277_045.....	59
Figura 18 - Porção realizada além do nível planejado (amarelo) e região não lavrada na crista (vermelho) .....	60
Figura 19 - Resultado dos avanços de lavra do plano mensal de setembro/17 .....	63
Figura 20 - Gráfico do resultado da diluição operacional planejada para os 18 meses.....	65
Figura 21 - Diluição operacional planejada e massa de ROM por polígono.....	66
Figura 22 - Gráficos de correlação entre massa de ROM e Diluição Operacional Planejada..	67
Figura 23 - Gráficos de correlação entre ROM por polígono e Diluição Operacional Planejada .....	68
Figura 24 – Mapa litológico do banco 277.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre tipos de planejamento .....	18
Tabela 2 - Resultados de diluição operacional de lavra .....	58
Tabela 3 - Resultado geral de diluição e reconciliação de massa.....	59
Tabela 4 - Resultados da cubagem plano mensal setembro/17 .....	63
Tabela 5 - Resultados da cubagem dos polígonos de avanços do plano mensal setembro/17 .	64
Tabela 6 - Resultados de estatística descritiva para Diluição Operacional Planejada.....	65
Tabela 7 - Teste de correlação entre Diluição Operacional Planejada e ROM/Polígono.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ag – Prata

ANN – *Artificial Neural Network* - Redes artificiais neurais

Au – Ouro

Backbreak – Sobre-quebra resultante da detonação de rocha.

Cu – Cobre

Line Up – Metodologia de programação diária de atividades de mina dentro da rotina do planejamento de Curto Prazo da Mina do Salobo.

LOM – Life of mine ou plano de lavra de longo prazo que descreve toda a sequência de lavra até o fechamento da mina.

Long Term Model (LTM) – Modelo de teores de longo prazo, atualizado anualmente

MTPA – Milhões de toneladas por ano

Open stope – Lavra com realce aberto. Método de lavra subterrânea, em que se deixam vazios os espaços originados pela remoção do minério.

Ore Boundary – Limite do corpo mineral.

Ore Control Model – Modelo de blocos de teores de curtíssimo prazo aplicados para informações de lavra

REDEL – Equipe que faz a montagem de linhas de energia na mina para atender os equipamentos elétricos, como escavadeiras e perfuratrizes.

ROM (Run of Mine): Minério que é lavrado da mina.

Short Term Model – Modelo de teores de curto prazo, atualizado mensalmente.

Skarns – Formas geológicas de corpos minerais verticalizados

SMU – *Selective Mining Unit* ou Tamanho mínimo de bloco

VPL - Valor Presente Líquido.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	14
2	OBJETIVO.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL .....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
3.1	PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO, TÁTICO E OPERACIONAL .....	17
3.2	PLANEJAMENTO LAVRA .....	18
3.2.1	PLANEJAMENTO DE LAVRA DE LONGO PRAZO.....	19
3.2.2	PLANEJAMENTO DE LAVRA DE MÉDIO PRAZO .....	20
3.2.3	PLANEJAMENTO DE LAVRA DE CURTO PRAZO .....	21
3.3	RECONCILIAÇÃO .....	33
3.4	DILUIÇÃO .....	36
3.4.1	CLASSIFICAÇÃO DA DILUIÇÃO .....	38
4	METODOLOGIA DA PESQUISA .....	42
4.1	ASPECTOS METODOLÓGICOS .....	42
4.2	ESTUDO DE CASO.....	43
4.2.1	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DA DILUIÇÃO OPERACIONAL DE LAVRA....	44
4.2.2	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DA DILUIÇÃO OPERACIONAL PLANEJADA.	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	56
5.1.1	RESULTADOS DE DILUIÇÃO OPERACIONAL DE LAVRA.....	56
5.1.2	RESULTADOS DE DILUIÇÃO OPERACIONAL PLANEJADA DE LAVRA.....	61
6	CONCLUSÕES .....	71
	REFERÊNCIAS .....	73

## **1 INTRODUÇÃO**

A mina do Salobo está situada no município de Marabá, na região sudeste do estado do Pará dentro do contexto da Província Mineral de Carajás – PA e constitui o maior jazimento de cobre e ouro associado em território brasileiro avaliado, até o presente. O depósito possui uma extensão na direção SE-NW de aproximadamente 4 km, com uma profundidade investigada de 750 metros a partir da topografia original, e uma largura que varia de 600 metros na porção central a 100 metros nas extremidades.

O processo de mineralização predominante é o hidrotermalismo, que resultou em um depósito que possui alta heterogeneidade de teores, imprimindo em toda sua extensão intercalações métricas a decamétricas de minério de alto, médio e baixo teor. Observa-se ainda a ocorrência de faixas de estéril com larguras métricas dentro dos corpos de minério, relacionados à intensidade de percolação do fluido mineralizante e o espaçamento dessas estruturas.

Sua operação iniciou em 2012 com o processamento nominal de 12 milhões de toneladas por ano (MTPA) e em 2014 dobrou sua capacidade para 24 MTPA, concluindo o comissionamento em 2015. Possui uma reserva da ordem de 1,17 bilhões de toneladas de minério com 0,67% de cobre e 0,32g/t de ouro e movimentação total anual da ordem de 130 MTPA. Está previsto para entrar em operação em 2022 mais uma usina de beneficiamento, aumentando a capacidade de processamento do minério para 36 MTPA. Desta forma, Salobo encontra-se no rol das minas com maiores movimentações por cava do Brasil. Essa característica traz implicações sérias quando se trata de diluição.

Algumas investigações vêm sendo realizadas na mina do Salobo a respeito dos diversos tipos de diluições. Nesta proposta de trabalho é abordado o comportamento da diluição em face ao porte dos equipamentos, dimensionamento dos planos, ritmo de produção, etc. Assim, procura-se desenvolver um método para investigação e quantificação da diluição operacional dentro da realidade da mina do Salobo, contribuindo para os processos de planejamento de lavra e resultados econômicos mais assertivos.

### **1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO**

A diluição é sempre tema capital quando se trata de reconciliação e avaliação da execução dos planos de lavra. Para encontrar um fator de diluição, é necessário realizar a

reconciliação de massas e teores entre o que é planejado e o realizado, para avaliar se há boa aderência entre estes dados e se a diluição atribuída está compatível com o planejamento.

De forma geral, no planejamento estratégico de qualquer empreendimento mineiro, é adotado um fator de diluição. É comum encontrar números arbitrários e adotados sem estudos aprofundados que podem ao longo do tempo inviabilizar a operação do empreendimento, como constatou o estudo de Pakalnis em minas subterrâneas de ouro no Canadá (Pakalnis, R. *et al*, 1995).

Ao se abordar a diluição no âmbito do planejamento de curto prazo e da operação do empreendimento mineiro, os desafios de cumprir as metas de produção podem se tornar mais difíceis. A razão para isto se deve a:

- Abordagem não sistemática da diluição;
- Não entendimento da causa e efeito da diluição;
- Adoção de fatores que não correspondem à realidade do depósito.

Este trabalho pretende calcular a diluição operacional da mina do Salobo a partir de uma abordagem sistemática desenvolvendo um método replicável para outras unidades, e assim fornecer um valor de diluição compatível com a operação, para utilização nos planos de lavra de curto e longo prazo.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Este trabalho de especialização tem por objetivo a abordagem da diluição operacional de forma técnica e sistematizada. Para isto, busca desenvolver o tema e contribuir para a comunidade com a quantificação sistemática da diluição operacional servindo de base para estudo da mina do Salobo.

Serão tratados dois aspectos principais: a influência das operações de mineração (desmonte e lavra) na diluição e a influência do planejamento de lavra, considerando o sequenciamento e operacionalização dos avanços. Para a quantificação da diluição serão aplicadas então, duas metodologias de medição: uma em relação à execução da lavra (Diluição Operacional de Lavra) e outra quanto à elaboração dos planos de lavra (Diluição Operacional Planejada).

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para investigar a diluição operacional de acordo com as abordagens propostas no objetivo principal deste trabalho, serão adotados os seguintes objetivos específicos:

- i. Quantificar a Diluição Operacional de Lavra por polígonos, identificando a influência de cada fator contribuinte;
- ii. Quantificar a Diluição Operacional Planejada, buscando avaliar a diluição como resultado da operacionalização e sequenciamento do plano de lavra.
- iii. Criar uma metodologia dinâmica de operacionalização de diluição nos planos de lavra e reconciliações.



### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO, TÁTICO E OPERACIONAL**

O conceito de planejamento pode ser definido como um processo desenvolvido para o alcance de uma situação futura desejada de um modo mais eficiente, eficaz e efetivo, com a melhor concentração dos esforços e recursos pela empresa. Pode-se dividir em três grandes níveis hierárquicos distintos: planejamento estratégico, planejamento tático e planejamento operacional (FLORES, 2008).

Surgiu na década de 60 uma metodologia do planejamento estratégico idealizada pelo professor Igor Ansoff, que afirma: “Não há nenhum problema em formular uma estratégia, o problema é fazê-la funcionar”. Dessa forma, o planejamento estratégico busca prever o futuro da empresa para direcionar os elementos de crescimento a uma evolução lucrativa para o negócio (ANSOFF, 1965).

O problema que se refere Ansoff está no distanciamento brutal entre os anseios da organização, definidos pelos mais altos cargos hierárquicos da organização, e os executantes das tarefas, costumeiramente chamado de “chão de fábrica”. Para a efetiva implementação desta estratégia os demais níveis da organização precisam estar integrados, para isso é que nascem os níveis de planejamento táticos e operacionais.

Oliveira (2007) reforça esta ideia afirmando que o planejamento estratégico, de forma isolada, é insuficiente, uma vez que o estabelecimento de objetivos a longo prazo, bem como seu alcance, resulta numa situação nebulosa, pois não existem ações mais imediatas que operacionalizam o planejamento estratégico. A falta destes aspectos é suprida através de desenvolvimento e implantação dos planejamentos táticos e operacionais de forma integrada.

O planejamento tático tem como objetivo otimizar áreas determinadas e não a empresa como um todo. Portanto, trabalha com decomposições de objetivos, estratégias e políticas estabelecidas no planejamento estratégico. A principal finalidade do planejamento tático é a utilização eficaz e eficiente dos recursos disponíveis para a consecução de objetivos previamente fixados segundo uma estratégia determinada, bem como as políticas orientativas para o processo decisório da empresa em horizonte de médio e curto prazo (FLORES, 2008).

O Planejamento Operacional está relacionado com o controle cotidiano de execução das operações a partir do planejamento tático. Os planejamentos operacionais correspondem a um conjunto de partes homogêneas do planejamento tático. No nível operacional são decididos os programas detalhados da produção dos itens finais e componentes (FLORES, 2008). A Tabela 1 apresenta o comparativo entre os tipos de planejamento.

Tabela 1 – Comparativo entre tipos de planejamento

<b>Discriminação</b>	<b>Planejamento Estratégico</b>	<b>Planejamento Tático</b>	<b>Planejamento Operacional</b>
<b>Prazo</b>	Mais longo	Médio	Mais curto
<b>Amplitude</b>	Mais ampla	Menos ampla	Mais restrita
<b>Riscos</b>	Maiores	Intermediários	Menores
<b>Atividades</b>	Fins e Meios <sup>1</sup>	Meios	Meios
<b>Flexibilidade</b>	Menor	Intermediária	Maior

Fonte: Adaptado de Oliveira (2007)

### 3.2 PLANEJAMENTO LAVRA

Kenneth Lane em uma conferência de planejamento estratégico de lavra na Austrália afirmou: “*O planejamento é uma atividade criativa, enquanto a otimização é um processo analítico. Não são muitas as otimizações a serem formuladas para uma estratégia; isto é refinar a estratégia escolhida. Planejamento é a atividade primária, a otimização é complementar*” (Lane, 2008).

Esta abordagem traduz muito do que os profissionais de planejamento de mina deparam-se no trabalho, uma mistura de arte (criatividade) e ciência (metodologias, otimizações, engenharia). Macêdo (2001) ao abordar os aspectos a serem considerados

<sup>1</sup> Os Fins são os estados futuros desejados, ou seja, a visão, a missão, os propósitos, os objetivos setoriais, os desafios e as metas. Os Meios são os caminhos para a empresa chegar ao estado futuro desejado.

na seleção de métodos de lavra, conclui que a decisão do método de lavra na fase de planejamento pode ser a tal ponto comparada como uma arte, tal como uma ciência devido tamanha complexidade.

O resultado do planejamento depende da experiência e competência da equipe que a executa. A criatividade é, todavia, o motor do qual depende o bom desenvolvimento dos negócios envolvendo o aproveitamento de bens minerais, buscando alcançar os objetivos de uma organização, além de atender a estratégia do negócio, alinhado à otimização de mina.

Desta forma, o principal objetivo é encontrar a melhor sequência entre os resultados de hoje e a sustentabilidade do ativo para o desenvolvimento futuro, a partir da melhor sequência de exploração de uma mina, atendendo a todos os critérios técnicos, econômicos do empreendimento mineiro com nível de risco gerenciável.

### 3.2.1 PLANEJAMENTO DE LAVRA DE LONGO PRAZO

De forma mais prática, a indústria mineral tem dividido o planejamento de mina em longo/estratégico e médio/curto prazo. Cada situação específica pode requerer ou dispensar uma subdivisão mais detalhada. O consenso, todavia, é a necessidade de haver um departamento que consiga antever o futuro, e preparar a empresa para os períodos de tempos mais longos.

Pois assim, definindo a estratégia que funcionará como um guia, partindo da posição atual e permitindo traçar a melhor trajetória para se chegar a uma outra determinada posição, este é o objetivo do planejamento de longo prazo. Por envolver toda a cadeia do bem mineral, ela torna-se mais genérica e preocupa-se com responder “o que fazer”, ou seja, qual a estratégia a ser utilizada.

O desafio do planejador é projetar a lavra e otimizar seu sequenciamento, de modo a assegurar a minimização da remoção do estéril, garantir a segurança necessária a equipamentos e operadores, além de maximizar o retorno econômico do minério lavrável (Silva, 2008).

Os estudos carregados pelo plano de lavra de longo prazo devem seguir um fluxo de trabalho. Seu início se dá pela classificação do depósito mineral em jazida, com a definição do modelo geológico e de blocos, estimativa dos recursos, seleção do método

de lavra, definição de cenários e premissas, definição da função benefício, otimização de cava, sequenciamento de lavra e avaliações técnicas, econômicas e de riscos e classificação das reservas.

Toda esta gama de trabalhos está presente nos estudos de viabilidade, de investimentos, ampliações e reduções de produção para a mineração. 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) afirma que a determinação de projetos de cavas otimizadas é uma das mais importantes tarefas dentro do processo do planejamento de lavra a céu aberto, a qual precisa ser resolvida bem no começo do planejamento estratégico da lavra. Estes projetos devem ser continuamente reajustados ao longo da vida da mina, devido às alterações e disponibilização de novas informações geológicas, dentre outras.

Desta forma, após a entrada em operação, anualmente é atualizado o ciclo orçamentário (geralmente de cinco anos), que preveem os investimentos em equipamentos, planos de supressão, avanços em depósitos de estéril e minério, rebaixamento de lençol freático, expansão da usina, mina, entre outros fatores. É bom salientar que o planejamento de longo prazo não é estático, mas sim dinâmico e acompanha as mudanças tanto operacionais da mina, como por exemplo a aderência de lavra, tanto como econômica na viabilidade de lavra, por exemplo com a definição econômica do minério (teor de corte).

### 3.2.2 PLANEJAMENTO DE LAVRA DE MÉDIO PRAZO

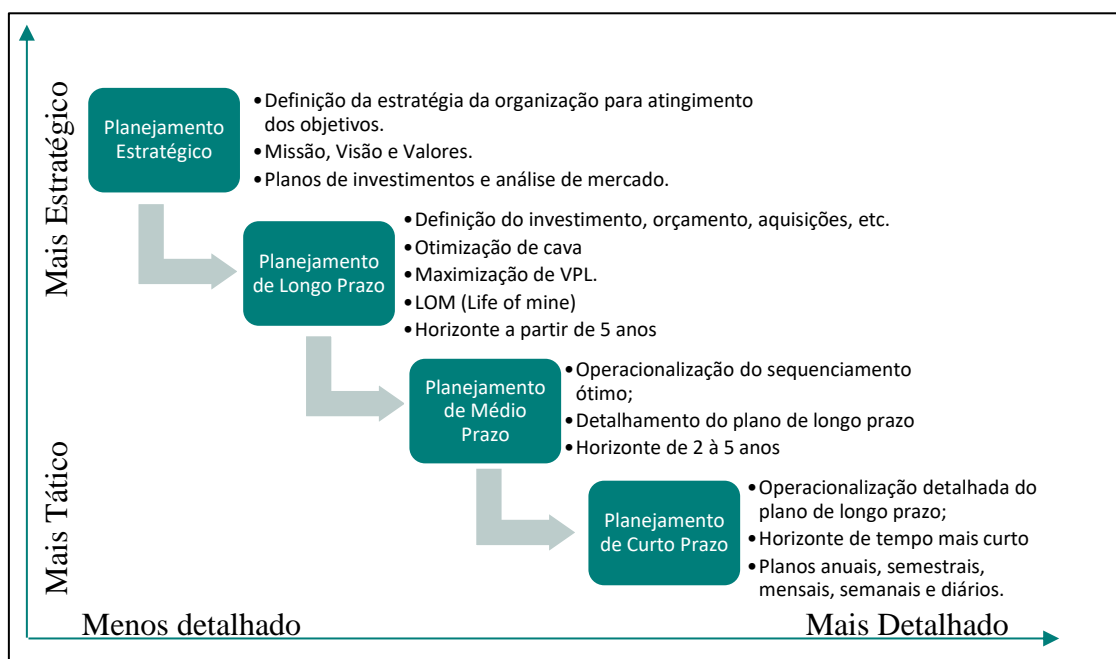
O desenvolvimento da área de planejamento com softwares mais sofisticados, maior capacidade de processamento e o investimento das organizações cada vez mais na otimização dos recursos e capital, faz surgir o planejamento de médio prazo, ocupando uma lacuna que trata da interface entre o plano estratégico e o operacional (curto prazo). A abrangência de cada área pode divergir entre cada operação, mas em geral compreende o sequenciamento de 2 a 5 anos do plano de lavra operacionalizado.

O planejamento de médio prazo tem como objetivo garantir a implementação da lavra da cava, disposição das pilhas de estéril e sequenciamentos ótimos definidos no

planejamento a longo prazo. Desenvolve os detalhamentos necessários para implementação na prática e ocupa-se da mitigação dos impactos por realocação de britagens, revisão de geometrias de taludes, acessos principais, poços de rebaixamento de lençol freático, construção de redes aéreas, entre outras atividades de grande impacto na mina (Mello, 2017).

O que o plano de longo prazo definiu e entregou dentro da ideia de “**o que fazer**” para se atingir o objetivo, assume então agora o plano de médio prazo pensando e solucionando questões que envolvem “**o como fazer**”, assim estratégia e tática interagem. A Figura 1 detalha o encadeamento dos diversos níveis hierárquicos do planejamento de lavra e ilustra como a estratégia do mais alto escalão da organização consegue chegar de forma sistemática até o nível operacional das atividades.

Figura 1 - Classificação hierárquica dos níveis de planejamento de lavra



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

### 3.2.3 PLANEJAMENTO DE LAVRA DE CURTO PRAZO

Responsável por garantir que as melhores sequências de lavra definidas nos planos de maior hierarquia sejam executadas, e então, conseqüentemente, os objetivos da organização alcançados. Debruça-se em resolver os problemas operacionais, garantindo

que padrões de segurança e qualidade sejam atendidos. Ele, portanto, contém os detalhes necessários para a boa execução operacional. Sua maior vantagem é poder implementar oportunidades de melhoria que nos outros planos nunca seria possível.

De acordo com Costa (2005) *apud* Mandarin (2018), o planejamento de curto prazo deve fornecer soluções que garantam que o minério será provido ao beneficiamento em quantidades e qualidades adequadas, utilizando-se da melhor forma possível os recursos disponíveis para atingir os objetivos da empresa.

Segundo Silva (2014), o planejamento de curto prazo tem dois grandes objetivos. O primeiro é garantir a exequibilidade do plano de longo prazo e o segundo é atender às demandas da usina. Esses dois objetivos ramificam outros que dão total sentido a importância do curto prazo. Desses outros objetivos, podemos citar:

- Distribuição correta dos equipamentos de escavação e carregamento nas frentes de lavra;
- Distribuição correta das perfuratrizes nos polígonos de perfuração;
- Distribuição otimizada dos recursos de infraestrutura na mina, nas pilhas e nos projetos;
- Garantir várias frentes de deposição de minério e estéril para proporcionar uma DMT (Distância média de transporte) cada vez melhor para o ciclo dos caminhões;
- Garantir a largura mínima das praças de escavação e carregamento para proporcionar aos equipamentos de carga alta produtividade, carregando dos dois lados sempre que puder;
- Garantir a execução do projeto de estradas e acessos (geométrico, estrutural e funcional) de transporte conforme plano de longo prazo;
- Definir corretamente o melhor local para passagem de rede de energia e o posicionamento correto das subestações que alimentam as máquinas;
- Definir as datas de desmonte buscando sempre diminuir a frequência das detonações que impactam nas utilizações dos equipamentos;
- Procurar manter frentes de minério liberadas na mina para evitar ao máximo as retomadas das pilhas;

Dentro do fluxo do processo da cadeia de mineração, o planejamento de curto prazo tem importância vital. É a área que faz interface direta com as áreas operacionais como perfuração e desmonte, infraestrutura, drenagem, meio ambiente, geotecnia, manutenção e usina. O planejamento de curto prazo é a ponte de ligação entre o planejamento de longo prazo e a operação. É responsável por diminuir, e até mesmo extinguir, o distanciamento existente entre planejamento e operação, ou também, entre o que se planeja e o que se executa. Dentre todas as áreas da mineração, é sem dúvida a que possui maior sinergia (Silva, 2014).

É detentor, portanto, do menor horizonte de tempo dentre todos os tipos de planejamento, estendendo-se do plano anual até o operacional (turnos de trabalho). A seguir os principais produtos do planejamento de curto prazo em atividade na Mina do Salobo serão detalhados.

### 3.2.3.1 PLANO DE LAVRA ANUAL

O plano de lavra anual avalia e detalha o Plano de Lavra de Longo Prazo e/ou Médio Prazo, em função do plano de produção do ano corrente. Compreende o sequenciamento mensal do período de um ano de lavra do Plano de Longo Prazo. Assim, este é o mais importante plano dentro do planejamento de curto prazo, por apresentar o plano de produção e garantir a viabilidade técnica-econômica da mina.

Como o horizonte projetado é pequeno, a ocorrência de problemas na execução do plano pode afetar diretamente as operações das plantas de beneficiamento e o cumprimento de prazos de entrega previstos em contratos. A atenção deste plano está voltada principalmente para Produção Orçada, Qualidade e Redução de custos de Operação (Mello, 2017).

As principais premissas necessárias para a confecção do plano anual são:

- Plano de Lavra de Médio Prazo/Longo Prazo: Cavas de Orçamento do Plano de Lavra de Médio Prazo (trimestrais ou mensais).
- Modelo de Blocos Atualizado
- Topografia Base: Cava Revisada do Início do período (Projetada)
- Restrições ambientais, licenças, limites de supressão e limite de concessão.

- Informações validadas dos índices operacionais de Disponibilidade Física (DF), Utilização Física (UF), Produtividade e plano de aquisições de equipamentos orçados para o período;
- Programa de produção da Usina, qualidade e quantidade de minério destinado à usina.

Segundo Mello, o desenvolvimento do plano anual deve antecipar movimentações e interferências para que se possa traçar a melhor alternativa e poder discutir entre as áreas envolvidas, podendo ser relativas à:

- Redes Elétricas – com o avanço de lavra ou estratégia de disposição de estéril é necessário mudar a posição de postes e cabos elétricos;
- Poços – com o aprofundamento da cava, necessita-se de poços para manter o nível de água do lençol freático controlado;
- Realocação de estruturas – áreas de lavra que possuem estruturas antigas, deverão ser realocadas para a execução do plano;
- Desvio de acessos – o desvio de acessos também é necessário dependendo da geometria planejada;
- Equipamentos e supressão vegetal – Áreas com equipamentos hibernados e regiões que necessitem supressão vegetal podem influenciar a execução de geometrias.

O plano anual deve prover de informações os demais planos de lavra: mensal, semanal e diário a respeito de:

- Capacidade e frotas dos equipamentos, considerando paradas por manutenção;
- Se os equipamentos disponíveis não são suficientes para a produção, considerar plano de locação;
- Tamanho e frota de equipamentos auxiliares;
- Plano de manutenção dos equipamentos e grandes paradas;
- Plano de manutenção das plantas de beneficiamento (Parada Geral da Usina - PGU)



- Determinação da lavra de Minério/Estéril com caracterização do local ou bancadas.
- Previsão da capacidade de disposição de resíduos (pilhas de estéril);
- Previsão das mudanças das rampas de acesso e transporte, elaborando os perfis das vias de transporte;
- Previsão das ações como drenagem e eletrificação da cava, entre outros.

### 3.2.3.2 PLANO DE LAVRA SEMESTRAL E TRIMESTRAL

Os planos de lavra semestral e trimestral estão intimamente ligados e são responsáveis pela atualização do plano de lavra anual sempre que necessário e com uma periodicidade mínima de 3 meses e máxima de 6 meses. Seu objetivo é realizar a inserção de novas informações dentro do plano anual e responder com simulações e cenários às diversas interferências ou mudanças incorridas na execução do plano, minimizando os riscos para a consecução do plano (Mello, 2017).

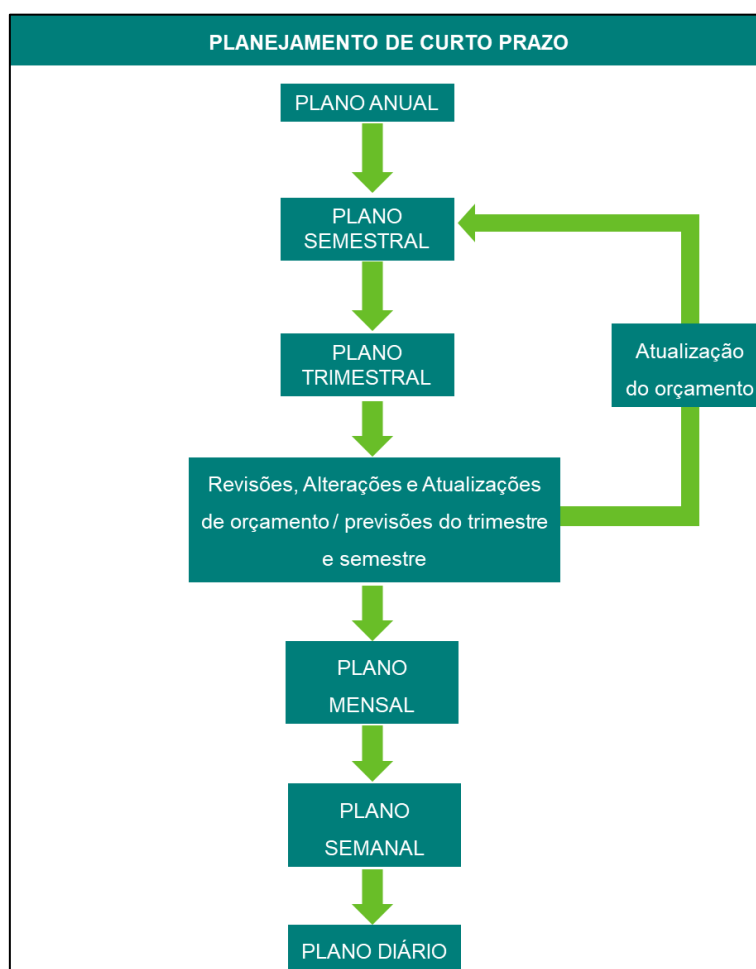
É muito comum na mineração haver desvios operacionais, antecipações ou postergações de marcos que anteriormente foram tratados como premissas. Por exemplo, considerando a manutenção de uma escavadeira de grande porte: o planejador ao confeccionar o plano anual obteve como premissa que a parada desta escavadeira seria no mês de fevereiro e permaneceria por dois meses em manutenção. Se esta premissa for alterada, mudando-se por exemplo a data de parada para maio, é necessário que isso seja novamente planejado, que se antecipe as atividades de lavra que não estavam previstas, e que todas as implicações futuras desta mudança sejam avaliadas e medidas para que não tenha prejuízo nos meses futuros, seja no sequenciamento de lavra ou alimentação do beneficiamento.

Outro cenário bastante comum são alterações dos valores de orçamento, podendo ser por conta de mercado (preço do minério, aumento do custo de insumos, entre outros), desempenho operacional muito baixo, novos contratos de vendas, etc., que levam a alterações de metas do orçamento vigente e à consequente atualização de todo o plano de produção. Assim, os planos trimestrais e semestrais conseguem responder a uma demanda de curto prazo com alternativas diferentes dos planos anteriormente definidos.

Entretanto, o objetivo que mais se recorre nos planos semestrais e trimestrais é a redução dos riscos operacionais, servindo de alerta para as equipes operacionais e de apoio nas definições de datas para conclusão de tarefas que interferem no plano, como por exemplo, conclusão de um furo de rebaixamento de lençol freático, realocação de redes aéreas de alimentação de energia e desvios de acessos. Esses serviços demandam muito recurso e tempo para a conclusão (Mello, 2017).

A Figura 2 representa o fluxo de informações dos planos de lavra dentro do horizonte de curto prazo.

Figura 2 - Fluxo de planos de lavra no horizonte do planejamento de curto prazo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

### 3.2.3.3 PLANO DE LAVRA MENSAL

Seguindo a cadeia hierárquica dos planos de lavra, chega-se agora ao plano mensal, com metas gerenciáveis de produção, tais como: movimentação total diária,

produção de concentrado (beneficiamento), relação estéril/minério, remanejos, datas de detonações de polígonos e todos os serviços e obras que precisam ser implementados com prazos e metas bem claros e objetivos.

O plano de lavra mensal deve ser bem detalhado, indicando todas as frentes de lavras do mês, quais os equipamentos que estarão nas frentes, qual a litologia de cada material, a data e o tempo que cada equipamento ficará nas frentes de lavra. O mesmo deve ser feito às perfuratrizes, indicando todos os polígonos que serão perfurados no mês, as datas de início e fim de cada polígono, a litologia, a massa, a densidade, número de furos e etc. (Silva, 2014).

Assim como todo plano, é necessário fornecer as entradas de informações como premissas, sendo as principais os dados de manutenção: disponibilidade física (DF) dos equipamentos de escavação, carregamento, perfuração, transporte e infraestrutura. Além dos índices por frotas, é necessário o detalhamento por equipamentos, e por datas previstas para execução da manutenção de cada equipamento, o que se traduz em um mapa mensal com todas informações de paradas preventivas dos equipamentos.

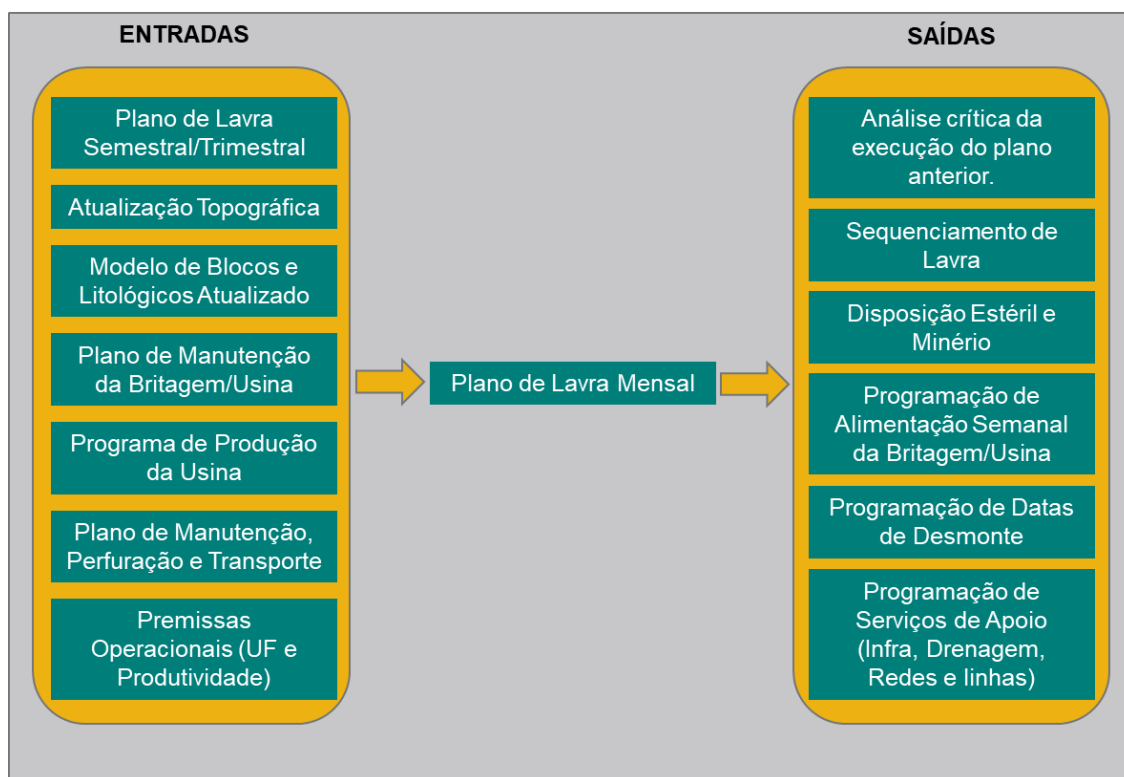
Assim também deve ser a interface com a equipe do beneficiamento, levando em conta a disponibilidade física e a utilização física (UF) da britagem e usina e os períodos em que ficarão em manutenção, para que no sequenciamento da lavra tudo seja levado em consideração. Quanto às utilizações físicas e produtividades dos equipamentos, são definidos no dimensionamento do plano com a participação das equipes operacionais que executarão o plano.

O sucesso de um bom plano de maneira geral é o comprometimento das partes que executam o plano. Por conta disso, as definições destas metas e objetivos devem contemplar a participação das equipes operacionais que receberão o plano para execução. As reuniões prévias surgem com esta missão de engajar e discutir as alternativas e soluções. Muitas dificuldades operacionais são sanadas e boas oportunidades aproveitadas a partir do compartilhamento e discussão de ideias.

A confecção do plano mensal se estrutura numa sequência de entradas e saídas de informações. A Figura 3 resume o fluxo de informações tratados e gerados pelo plano de lavra mensal na mina do Salobo. As entradas de informações são: o plano de lavra

semestral/trimestral, atualização topográfica da mina, o modelo de blocos e litológico atualizado, premissas operacionais usina/mina e de manutenção.

Figura 3 - Fluxo de entradas e saídas do plano mensal de lavra



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Quanto mais rico em detalhes for o plano mensal, maior será seu aproveitamento. A estrutura do plano de lavra mensal é baseada em eventos e marcos. O principal marco temporal do plano de lavra são as datas de detonação de polígonos, a partir da definição da programação de desmonte. O segundo marco mais importante é o plano de manutenção de escavação, pois cada escavadeira é sequenciada individualmente, logo é levada em consideração a sua parada preventiva prevista no mês.

O plano não se limita em avanço inicial e final, mas para cada evento uma sequência de lavra é desenhada. Assim, 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. Silva (2014) ressalta que só com um plano detalhado é possível identificar os pontos críticos, os riscos e as contingências e atuar antecipadamente.

Todavia, o plano mensal não pode ser implementado isoladamente, e sim, deve ser tratado como um manual para o andamento dos serviços no dia a dia da mina e é a base máxima de informações para o plano semanal manter atualizado e absorver as eventuais divergências na execução.

#### 3.2.3.4 PLANO DE LAVRA SEMANAL

O plano de lavra semanal segue basicamente o mesmo fluxo de informações utilizado pelo plano de lavra mensal, com a diferença de que as informações são atualizadas semanalmente, com isso é capaz de reorientar possíveis desvios na execução operacional do plano. Seu nível de detalhamento também é maior e absorve demandas das equipes operacionais para sequenciar os marcos e eventos previstos no plano mensal com maior precisão.

As saídas de informações entregues pelo plano mensal são agora mais detalhadas. As programações semanais de alimentação da usina/britagem são detalhadas por dia, as manutenções de equipamentos são confirmadas de acordo com o plano mensal ou em caso de mudança de data são levadas em conta e é considerado no sequenciamento.

Assim como o plano mensal é necessário haver sempre uma discussão entre as áreas de interface para garantir que os prazos e metas sejam claros e objetivos e que a informação seja devidamente aplicada às áreas operacionais. Os serviços de apoio se tornam peça fundamental do plano, pois ele prepara as condições ideais para a boa execução do plano. Todos os serviços de infraestrutura, redes e linhas e drenagem são discutidos e definidos prazos específicos para conclusão.

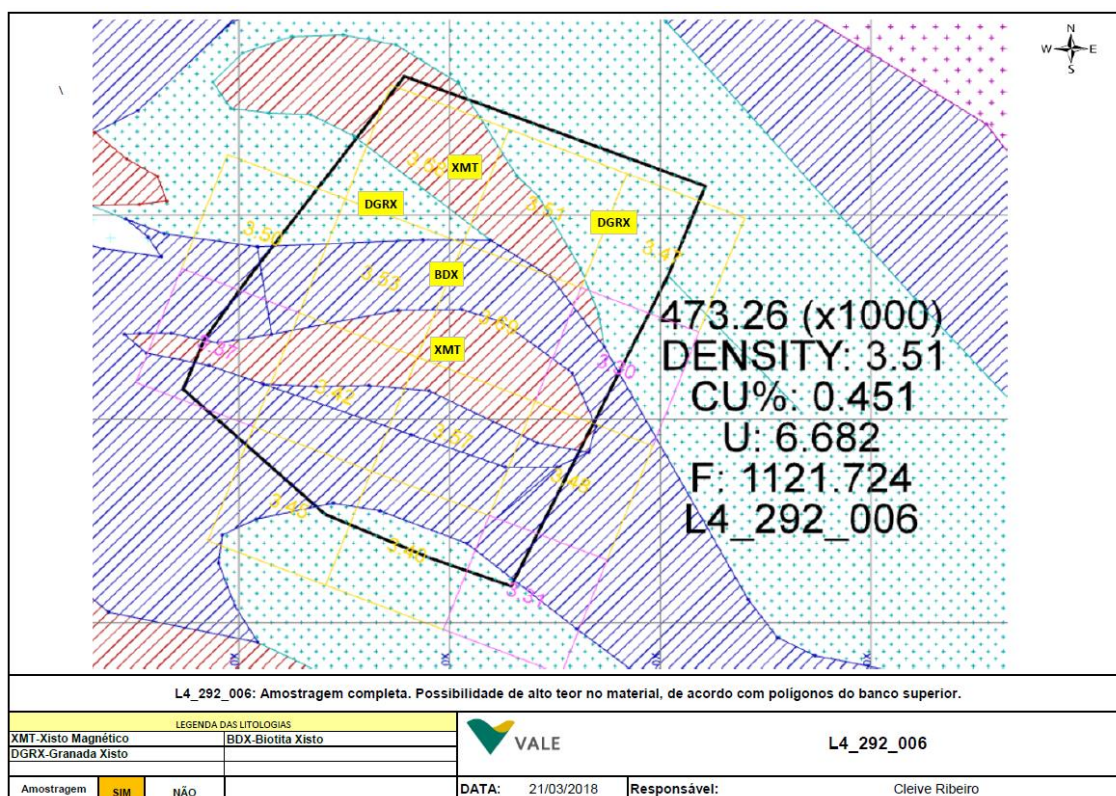
O ponto principal do plano semanal é revisar a programação de detonação dos polígonos previstos no plano mensal. Os polígonos são a menor unidade de lavra dentro de um plano. A definição dos limites e as dimensões de cada polígono leva em consideração vários fatores, os principais estão listados a seguir:

- Modelo de blocos de teores;
- Modelo litológico (geológico);
- Qualidade (Minério ou estéril);
- Seleção do equipamento de lavra;
- Considerações de perfuração e desmonte;

- Tamanho mínimo para lavra.

Todo polígono depois de desenhado recebe uma nomenclatura padrão que serve de base para as várias programações no plano diário (SILVA, 2014). A equipe de planejamento é responsável pela criação de todos os polígonos e a equipe de geologia recebe os polígonos e realizam a liberação das informações de densidade e litologias que servem de base para a criação do plano de perfuração e desmonte. A Figura 4 é um exemplo de polígono de minério.

Figura 4 - Liberação de densidade e litologia de um polígono



Fonte: E-mail Liberação de geologia, Cleive Ribeiro 2018.

A definição de polígonos é uma boa estratégia, pois centralizam e referenciam os marcos dos planos, além de localizar os serviços e locais na mina que servem de base para as programações diárias dos serviços para as equipes de operação e os supervisores e técnicos que estão no turno cumprindo o plano.

### 3.2.3.5 PLANO DE LAVRA DIÁRIO

O planejamento diário é a menor unidade do planejamento antes da execução operacional das atividades na mina. O plano diário é dividido na quantidade de turnos existentes na mina em questão. Assim, cada supervisor recebe as definições de serviços previstos para serem realizados naquele turno específico, chamado de programação diária.

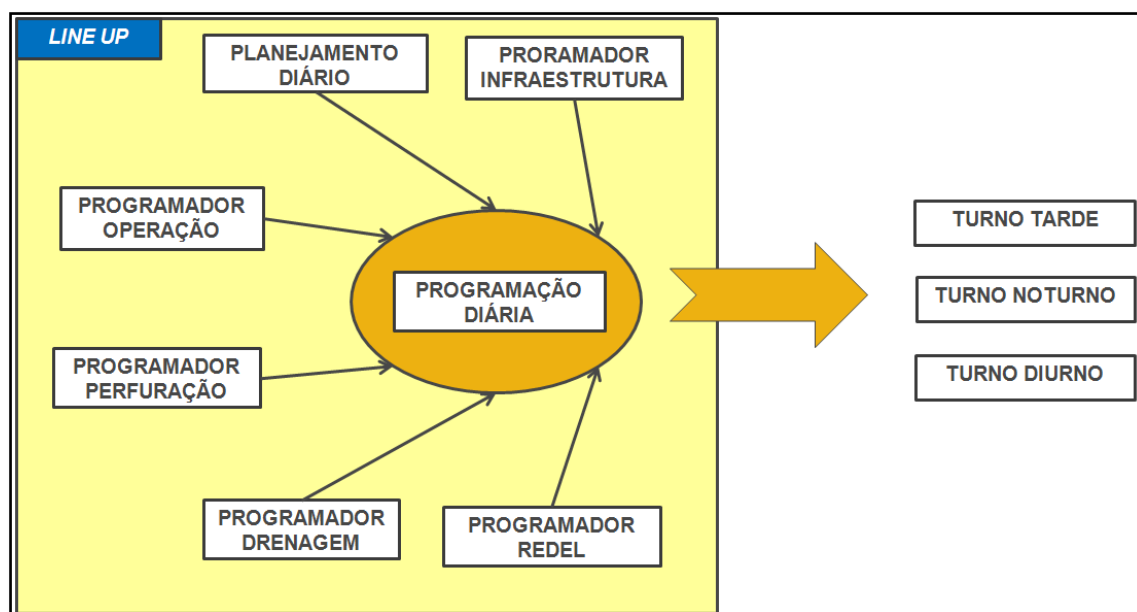
A programação diária segue (da mesma forma que os demais planos) a base de informações do plano de maior hierarquia imediatamente a cima, neste caso o plano semanal de lavra. Seu objetivo é alcançar a execução das atividades e marcos nas datas definidas no plano semanal, antecipar dificuldades operacionais e reavaliar a execução dia-a-dia das condições operacionais e traçar alternativas junto com as equipes operacionais para que o plano seja cumprido.

A maior proximidade com a operação é necessária para que o plano tenha sempre o atendimento das questões técnicas e principalmente de segurança para a programação de cada atividade.

Para que todos estes aspectos sejam cumpridos e mantida uma boa organização das atividades é utilizada uma metodologia pouco referenciada na bibliografia chamada de *Line Up*. Silva (2014) foi o precursor do desenvolvimento desta metodologia no Brasil e descreve que o *Line Up* é uma metodologia de trabalho que consiste da união de todas as áreas operacionais da mina, planejamento, operação, perfuração, infraestrutura, drenagem. A elaboração de uma programação diária de direcionamentos e atividades é a referência para as atividades dos três turnos correntes da mina.

É uma metodologia que insere as áreas num contexto sistemático em busca de um objetivo comum, a execução fiel ao que foi programado. O *Line Up* é formado pela pessoa do planejamento diário, pelo programador da operação, pelo programador da infraestrutura, pelo programador da perfuração, pelo programador da drenagem e pelo programador das redes e linhas (REDEL – Equipe que faz a montagem de linhas de energia na mina para atender os equipamentos elétricos, como escavadeiras e perfuratrizes). (SILVA, 2014). A Figura 5 mostra a organização da metodologia do *Line Up*.

Figura 5 – Organização da Estrutura do Line Up.



Fonte: Silva, (2014).

As principais vantagens decorrentes da implantação da metodologia do *Line Up* no planejamento diário de lavra são elencadas a seguir:

- Organização das atividades por área (supervisão);
- Priorização das atividades;
- Sequenciamento definido das atividades para cada supervisão;
- Integração das diversas áreas no planejamento das atividades;
- Sinergia das equipes do turno com o nivelamento de informações;
- Divulgação clara das informações desde o planejamento até a operação;
- Diminuição de retrabalho de serviços e aumento da segurança.

Mandarino (2018), realizando uma comparação entre a metodologia tradicional de planejamento diário de uma mina de ferro com a metodologia de *Line Up*, concluiu que a maior diferença é a organização e a valorização dos documentos criados e emitidos pelo planejamento, que são materializados pela programação diária. O mesmo autor ainda ressalta que na metodologia do *Line Up* as atividades são descritas de uma forma mais coerente, com uma distribuição exata para cada equipamento da operação da mina e que este método apresenta maior detalhamento de serviços, facilitando o entendimento dos operadores e mitigando os riscos de não seguimento do plano de lavra.



### 3.3 RECONCILIAÇÃO

Para um monitoramento sistemático da produção comparando os modelos preditivos e sua efetividade após a lavra é utilizado o método de reconciliação. Ele pode ser utilizado para otimizar os processos de modelagem e estimativa de recursos e auxiliar a execução do planejamento de lavra. Seu resultado compara valores previstos com os valores medidos.

Qualquer programa de reconciliação deve se basear em um conjunto claro de critérios e objetivos. Também deve ser executado por meio de uma abordagem lógica e gradual. Há uma série de suposições e requisitos-chave para que as reconciliações sejam efetivas, e elas não são isentas de armadilhas. Existem benefícios e custos associados à manutenção das informações e devem ser usadas salvaguardas para evitar a coleta e o uso de informações enganosas (ROSSI, 2002).

Para Rossi (2002), os procedimentos de reconciliação devem ser simples, robustos e especificamente adaptados à operação. Os dados de reconciliação devem ser confiáveis, e os procedimentos devem incluir, se possível, o fluxo de produção completo (modelo, mina, instalações de processamento e comparações do produto final); portanto, o processo pode envolver vários modelos preditivos (modelos de blocos de longo prazo e de curto prazo), diferentes minas a céu aberto e subterrâneas, estoque e múltiplos fluxos de processamento, caso o possuam.

Todas as grandes minas possuem um programa de reconciliação, ou ao menos um acompanhamento para as minas em operação dos valores de produção estimados *versus* realizado. O objetivo deste programa é contabilizar adequadamente todo o material extraído, tanto minério quanto estéril e atualizar os modelos de blocos de longo prazo de forma a obter uma medida de correção e validação dos modelos.

Como relatado anteriormente, a reconciliação pode ser uma ferramenta de otimização dos modelos de recursos e reservas, entretanto para isso é necessário que os dados coletados sejam precisos e acurados. Este requerimento pode aparentar ser simples e trivial, porém muitas minas não apresentam um controle mínimo de amostragem do material lavrado ou processado que permitam obter dados confiáveis.

O objetivo da reconciliação é aumentar a exatidão do planejamento, melhorar o conhecimento da mina, justificar as melhores práticas e analisar/corrigir desvios e

parâmetros de modelo. O esquema de cálculo consiste na comparação da massa, do teor e do metal planejados em uma etapa anterior com os executados em uma etapa posterior.

Na mina do Salobo são divididos em 3 grandes fatores de reconciliação, comparando o modelo de longo prazo com o de curto prazo (F1), os dados de produção com o modelo de curto prazo (F2) e a alimentação do processo com a produção reportada na britagem e usina (F3). Além disso, o fator F2 pode ser dividido em dois fatores, considerando o modelo liberado à lavra (*Ore Control Model*), sendo estes o F2-1, comparando o modelo de produção com o modelo de curto prazo (*Short Term Model*) e o F2-2, comparando os dados de produção com o modelo de produção. A seguir segue o detalhamento dos fatores, extraído do Relatório de Aderência e Reconciliação Salobo (REUSWAAT *et al*, 2017):

$F1^* = \text{Short Term Model (STM)} / \text{Long Term Model (LTM)} - \text{Ore Boundary}$  – Definido entre topografias, porém dentro da envoltória do corpo de minério definido pelo longo prazo, reconciliando na posição (massa) do corpo de minério planejado pelo longo prazo, previsto a partir dos dados de sondagem diamantada. Dessa forma, ele representa a acurácia geométrica das definições de teores por faixas no longo prazo.

$F1 = \text{Short Term Model (STM)} / \text{Long Term Model (LTM)}$  – Definido de forma semelhante ao  $F1^*$ , entretanto considera as estimativas de longo e de curto prazo não limitadas ao corpo de longo prazo. Dessa forma, o que é considerado é de fato se existem no curto prazo as massas e teores previstos no longo prazo. O modelo de curto prazo possui o mesmo suporte do modelo de longo prazo.

$F2 = \text{Production (PRD)} / \text{Short Term Model (STM)}$  – Compara as massas e teores obtidos na produção (teores liberados pela geologia de curto prazo e massas medidas pelas balanças dos caminhões) às estimadas pelo modelo de curto prazo.

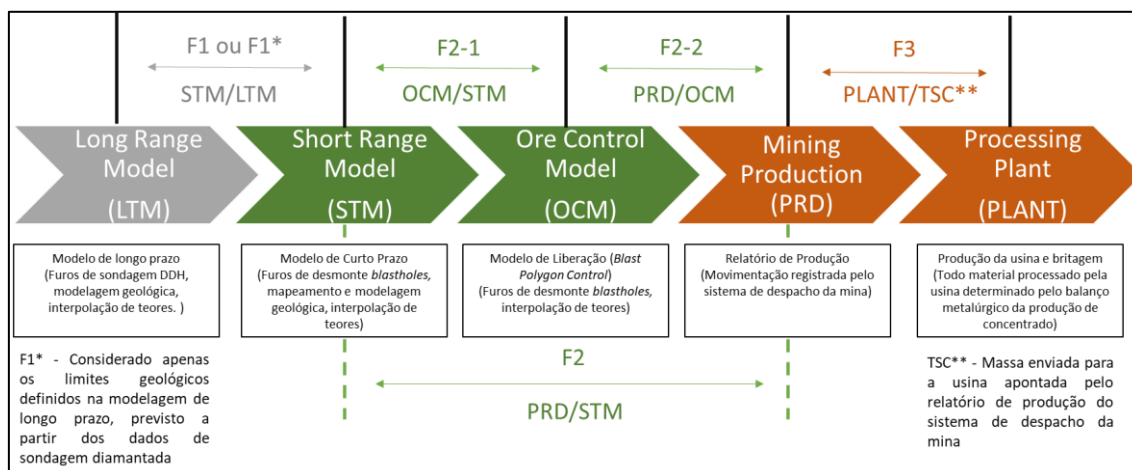
$F2-1 = \text{Ore Control Model (OCM)} / \text{Short Term Model (STM)}$  – Comparação entre modelos, avaliando as diferenças entre o modelo de curto prazo e o modelo entregue à lavra, cujo suporte corresponde aos polígonos liberados. Dessa forma se pode avaliar o efeito da seletividade de lavra comparada ao modelo estimado.

$F2-2 = \text{Production (PRD)} / \text{Ore Control Model (OCM)}$  – Fator que compara o material produzido pela mina em relação ao entregue pela geologia para a operação, o modelo estimado em última instância. É o fator que controla a lavra, podendo-se avaliar as perdas referentes à operação.

$F3 = \text{Process (PLANT)} / \text{Total Sent to Crusher (TSC)}$  – Fator que compara o material enviado ao britador da usina com o material processado na planta.

A Figura 6 mostra um resumo do processo de reconciliação com todos os fatores de reconciliação atualmente utilizados na mina do Salobo.

Figura 6 - Processo de reconciliação na mina do Salobo



Fonte: Modificado de Reuwsaat, 2017.

Desta forma, a proposição deste trabalho de criar uma metodologia para medição da diluição vem colaborar com o fator de reconciliação F2, que busca relacionar o modelo de controle de minério com o apontamento da produção, verificando as origens das perdas de minério e diluição. Embora o fator já aponte as diferenças e, portanto, o problema, é necessário correlacionar como o tamanho, forma e desenvolvimento dos avanços, porte dos equipamentos de lavra, influência do desmonte na lavra que contribuem para perdas e diluições operacionais.

A segunda vantagem do estudo metodológico da diluição é a atribuição de escala de tempo menores e tempo de respostas mais curtos para evitar perdas financeiras elevadas. Enquanto que a reconciliação por si só fornece o diagnóstico sobre onde estão as potenciais diferenças entre modelo e realidade, que é a base para um bom planejamento de lavra de longo prazo, o acompanhamento sistemático e constante da diluição na escala de produção propicia a atuação imediata no curto prazo para melhor aproveitamento dos recursos minerais.

### 3.4 DILUIÇÃO

O tema de diluição é conhecido e discutido entre os engenheiros de mina, planejadores, avaliadores de reservas, geoestatísticos e profissionais da área de mineração. Embora seja um tema relevante, ainda pouco se observa de recursos práticos e aplicáveis em forma de metodologias capazes de quantificar a diluição e perda de minério com base sistemática, especialmente para mineração a céu aberto. Para Rossi (2002) as fontes de diluição e perda de minério são bem conhecidas, porém não são fáceis de quantificar. Câmara (2013) tratou o tema de forma sistemática propondo uma metodologia para quantificar a diluição através da geometria e vizinhança de blocos aos polígonos lavrados, respeitando uma geometria planejada.

Quando se trata de diluição, não se pode deixar de abordar também a perda de minério, que é referente a porção que não é recuperada na lavra a partir de um avanço planejado ou que é lavrada e acaba sendo destinada como estéril, tanto por falta da capacidade de seletividade ou por irregularidades do avanço e até mesmo por erros na operação, como destinar minério lavrado para pilhas de estéril.

Na abordagem da diluição para mineração subterrânea, encontram-se mais referências na literatura. Pakalnis (1995) buscou quantificar os custos da diluição em minas subterrâneas no Canadá. Henning e Mitri (2007 e 2008), realizaram estudos de caso sobre diluição em minas subterrânea com método de lavra *Long Hole* e também sobre modelagem numérica da diluição com o efeito do *backbreak* do desmonte. Jang *et al.* (2015) buscaram através de rede artificial neural (ANN's) uma resposta para prever o efeito do *backbreak* do desmonte na decisão do tipo de sistema de suporte para minas subterrâneas de método de lavra *open stope*.

Embora relevante, não é difícil encontrar em diversos casos no planejamento de lavra, do estratégico ao curto prazo, a adoção de fatores de diluição de forma teórica e sem base de cálculo adequado. A importância do fator de diluição para minas a céu aberto foi investigada por Ebrahimi (2013). Segundo ele, devido à orçamento restrito, tempo insuficiente para investigações detalhadas, as empresas buscam fazer generalizações a respeito da diluição ao invés de realizar um estudo sistemático para quantificação da diluição de uma mina. Ao invés de desenvolver metodologias para quantificação da diluição, 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. (EBRAHIMI, 2013).

Zarshenas e Saeedi (2016) foram além em seu trabalho, concluindo que a diluição na mineração é um “vírus perigoso” que se não controlado, rapidamente se espalha em todos os níveis dos projetos de mineração e pode até paralisar a operação. No trabalho, os autores buscaram relacionar em uma matriz de riscos, não somente os aspectos técnicos e econômicos da diluição, mas também aspectos ambientais, sociais e de saúde e segurança. Pakalnis (1995) evidenciou que a tratativa da diluição de forma “irresponsável” levou muitas minas no Canadá a fecharem devido incorrerem em elevados custos de produção.

Crawford (2004) reforça a linha da definição de diluição como material estéril incorporado ao processo de extração de minério. Todavia, admite que o operador conhece com precisão o local, forma e teor do bloco de minério a ser lavrado e que o equipamento é adequado para minerar de forma ideal.

Sinclair (2002) *apud* Ebrahimi (2013) confirma que diluição é a incapacidade de separar durante a lavra o material estéril do minério e acaba sendo misturado e direcionado para a planta. Desta forma, o teor é diminuído e a massa é aumentada, podendo assim de forma teórica ser expresso pela equação 1:

Equação 1 - Forma teórica do cálculo de diluição

$$Diluição = \frac{Massa\ de\ Estéril}{Massa\ de\ Minério + Massa\ de\ Estéril} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Comumente, a diluição é expressada em percentagem. A diluição causa redução da qualidade final do material que estava previsto para ser lavrado. Esta consequência é diretamente percebida pela alteração do teor previsto com o executado. Porém, quando o ambiente de mineração está relacionado a um corpo mineral com alta variabilidade de teores e qualidades, a diluição tem origem no contato entre os próprios blocos de minério dentro da unidade geológica.

Para operações de mina em que minério e estéril estão dentro do corpo mineral, a separação precisa destes materiais durante a lavra se torna crítica. Em muitas operações, minério e estéril não podem ser identificados somente através do tipo de rocha, estrutura ou mesmo cor, devido as zonas de borda serem definidas por um critério econômico definido no teor de corte (TAYLOR; FIRTH, 2003).

Após toda esta generalização a respeito de diluição e perda de minério, é necessário que haja um detalhamento de acordo com as circunstâncias de cada etapa da diluição relacionando os fatores que levam a esse problema. É importante neste aspecto conhecer os diversos tipos de diluições e suas classificações.

### 3.4.1 CLASSIFICAÇÃO DA DILUIÇÃO

Segundo o aprofundamento do tema, verifica-se a necessidade de classificar os tipos de diluição, podendo ser de acordo com a origem, condições geométricas do corpo mineral, como também a partir de restrições no sequenciamento de minério e condições operacionais. Nesta ótica e com enfoque mais abrangente, partindo das etapas de exploração, avaliação de recursos e reservas, Rossi (2002) classifica a diluição em interna ou de mudança de suporte; geológica ou de contato e diluição operacional de mineração.

A diluição interna ou mudança de suporte para Rossi (2002) se define nas etapas de avaliação de projeto mineiro, onde são realizados estudos geoestatísticos para definir tamanho mínimo de bloco (SMU – *Selective Mining Unit*). Os métodos geoestatísticos são utilizados para seleção e correção do melhor suporte. Em suma, quanto maior o tamanho do suporte (bloco), maior a diluição interna.

A diluição de contato ou geológica está correlacionada com a estrutura do depósito e sua mineralização. A forma do corpo mineral e seu posicionamento na rocha encaixante vai impactar significativamente a diluição. Quanto maior for a área da superfície dos contatos litológicos em relação ao volume total escavado, maior será a diluição. Depósitos do tipo veios, *skarns* e delgados possuem maior impacto deste tipo de diluição que depósitos tabulares e massivos.

A definição de diluição operacional de mina para Rossi (2002) refere-se a mistura de material durante a lavra do minério. Se minério/estéril corresponderem aos contatos geológicos, então a diluição operacional e diluição geológica serão a mesma. Porém, é mais comum que os contatos da fronteira do minério/estéril sejam definidos em termos econômicos e não seguirem os limites geológicos. Neste caso, se trata da incapacidade em termos operacionais da seletividade de lavra com a combinação equipamento e habilidade do operador.

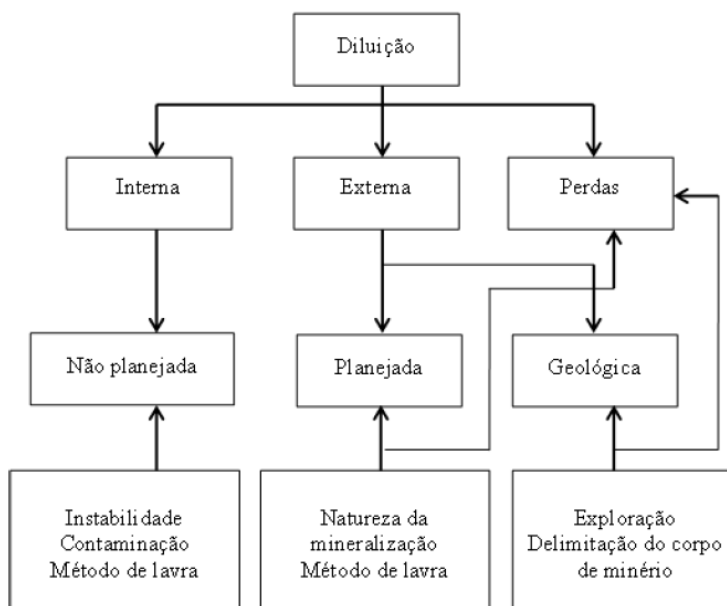
Ao contrário de bastante abrangente e pouco prática na indústria, a classificação de Rossi encontra seu antagônico na proposta de Villaescusa (1998). Sem deixar de carregar os significados em que se baseia Rossi, simplifica as definições tratando diluição apenas em: interna, externa e perdas de minério. Seu diferencial é propor um enfoque racional para identificação e tratativas que levem a redução da diluição. Salienta que as operações de definição de contatos litológicos, desenho e sequenciamento do plano de lavra, desenvolvimento de mina, perfuração e desmonte além de questões de produção e gestão podem ser os fatores contribuintes para diluição.

A diluição interna refere-se ao material de baixo teor ou estéril contidos dentro do avanço que contempla um tamanho mínimo de largura para lavra, desta forma a diferença resulta do ponto de vista operacional e não somente baseado no suporte do modelo. Referenciando-se com minerações a céu aberto, a diluição interna acaba sendo monitorada conforme o refinamento do modelo de blocos a partir de modelos de controle de teores, a partir de amostras de furos de perfuração onde o delineamento dos corpos de minério/estéril são então possíveis, porém ao se sequenciar o avanço encontram limitações geométricas para realizar a lavra seletiva, sendo, portanto, incorporado na lavra.

A diluição externa refere-se agora ao material incorporado pela lavra nas vizinhanças do limite original planejado, que pode estar em contato com blocos de estéril ou de baixo teor, independente se pertencer ao mesmo domínio geológico ou não. Aqui a diferença com a classificação de Rossi, é que a diluição é vista a partir da qualidade dos blocos e não do tipo litológico, visto que é mais comum a definição de minério-estéril a partir de um fator econômico (teor de corte).

Perda de minério refere-se ao limite planejado na lavra em que não são executados pela operação por diversos fatores tais como: irregularidades do piso e overbreak do talude. A Figura 7 resume as classificações:

Figura 7 – Classificação da diluição.



Fonte: Modificado de Villaescusa, (1998) *apud* Câmara, (2013).

Crawford (2004) de forma bastante clara dividiu diluição em 4 classes. Chamando de *Mine Call Factor* o fator aplicado as estimativas de teor da produção da mina para que se chegue nos valores do teor de alimentação reportado pela usina. Se tratando de um circuito fechado, esta seria de forma geral a diluição total da mina. A diluição externa, assim como Villaescusa, é o material de baixo valor (estéril) que é lavrado juntamente com o minério, não intencionalmente. Da mesma forma, a diluição interna refere-se ao estéril que está impregnado no minério e sua separação física é impraticável. A quarta classe de diluição o mesmo autor chama de Diluição de “Murphy” em referência ao dito popular inglês, em tradução livre “*Qualquer coisa que possa dar errado, vai dar errado*”, em referência aos erros operacionais na mineração. Esta se encaixa na definição de diluição operacional de lavra, compreendendo fatores tais como:

- Erro de apropriação do material que está sendo lavrado;
- Baixa precisão do GPS da escavadeira ou outro método de localização do minério na pilha desmontada;
- Diluição de contato por desmonte;
- Destinação errada das cargas de minério;
- Habilidade do operador e tamanho do equipamento.



Dentro de diversas conceituações, classificações e enfoques que cada autor utiliza dentro do seu campo de atuação, é importante delimitar para o fim a que se trata este estudo dos conceitos adotados e a utilização dentro da realidade do Salobo. Desta forma, temos como mais adequado adotar o conceito de classificação da diluição de Villaescusa (1998) e Crawford (2004) que dentro de alguma adaptação podemos sintetizar em Diluição Planejada e Diluição Não-Planejada.

Por Diluição Planejada será adotado o termo de Diluição Operacional Planejada, visto a delimitação do tema dentro do aspecto de planejamento de curto prazo, o qual possui uma abordagem tática e detalhista buscando atender os limites impostos pela capacidade dos equipamentos, condições geométricas locais, características do desmonte e etc. Desta forma, referindo-se em boa parte ao mesmo entendimento de diluição externa de Villaescusa (1998) e Crawford (2004).

A Diluição Não-Planejada será referida apenas como Diluição Operacional de Lavra para termos deste trabalho, sendo o resultado da diminuição do teor inicial previsto inicialmente dentro do plano de lavra. Seu resultado é em função da qualidade da execução da lavra, perícia do operador, diluição por desmonte, erros de apropriação do material lavrado entre outros. Neste caso, a referência pode ser adotada da diluição interna de Villaescusa (1998) e de diluição de “Murphy” ou operacional de Crawford (2004).

## 4 METODOLOGIA DA PESQUISA

### 4.1 ASPECTOS METODOLÓGICOS

O trabalho de desenvolver uma metodologia sistemática de medição da diluição operacional não é tarefa fácil. Por ser tema complexo e extenso, muitas vezes os debates envolvendo diluição carregam muito mais um tom de suposições, impressões e expectativas pessoais, denominada coloquialmente, por "achismo", que carece de rigor científico e investigativo. Logo, é de vital importância definir uma regra clara de medição para que a partir delas as discussões se norteiem primando sempre pela técnica.

Para melhor divisão deste trabalho, foram definidas duas formas de medição da diluição na Mina do Salobo. A primeira partindo do nível mais detalhado de informações, da menor unidade de lavra: os polígonos. Visando uma melhor precisão, serão utilizadas as tecnologias de levantamento topográfico a laser para identificar as frentes de lavra antes e depois da detonação e lavra.

Os valores planejados e executados serão reconciliados de forma a medir a diluição polígono a polígono, definindo assim de forma técnica a diluição operacional de lavra, ou habitualmente definida como diluição operacional. O objetivo principal desta parte é procurar esclarecer questões operacionais de lavra, desmonte com explosivos, forma do avanço, distribuição dos teores no polígono detonado, *overbreak* e *backbreak*, acompanhamento e controle de lavra, rigor na definição dos limites de qualidade, entre outros aspectos que podem interferir nos resultados planejados.

A segunda parte do trabalho, aumenta o escopo do estudo e alcança um horizonte maior, buscando sistematizar uma forma de calcular a diluição operacional planejada para um período definido. Neste trabalho, selecionou-se o plano de lavra mensal como o período a ser analisado. Os critérios para esta definição foram a capacidade de reproduzir as metas de orçamento definidas pela empresa e por representar a direção para os planos operacionais mais detalhados da mina, como o plano semanal e diário.

O plano mensal de lavra da Mina do Salobo possui um detalhamento muito grande, sendo o responsável pela definição das frentes de lavra, desenho dos polígonos e definição de metas operacionais como datas de desmonte, sequência de perfuração e lavra. Como visto no capítulo anterior, ele não se restringe a dois avanços: inicial e final do mês; e sim, detalha por polígono cada avanço dos equipamentos de lavra. Isso

possibilita uma maior precisão no sequenciamento e controle da diluição, pois cada polígono é avaliado antes pelo planejamento. Condições de qualidade (litologia e teores), parâmetros geométricos de desmonte e lavra que podem ser fontes de diluição são avaliados. A organização desta metodologia traz a resposta da diluição operacional planejada, visto que engloba no momento de se planejar todas as questões e limitações operacionais.

Para a realização das medições, serão utilizadas as tecnologias disponíveis na gerência de Planejamento, Processo e Qualidade da Mina do Salobo:

- Estações totais e GPS de alta precisão pela equipe da topografia;
- Laser Scan para levantamento topográfico das frentes de lavra;
- VANT (veículo aéreo não-tripulado) para levantamento topográfico da mina;
- Monitoramento por GPS dos equipamentos de lavra pelo Despacho;
- Base de dados registrada pelo Despacho.

Os dados serão tratados em softwares de planejamento em utilização no Salobo: GEMCOM GEMS® e Deswik.CAD® e em planilhas MS Office Excel®.

## **4.2 ESTUDO DE CASO**

O desenvolvimento do trabalho foi realizado em duas etapas. A primeira trata-se da medição da qualidade operacional da lavra em termos de seletividade de lavra, resultando na medição da diluição operacional por polígonos. A segunda etapa é em consideração a qualidade operacional do plano de lavra, refletindo-se no design dos avanços planejados, separação por contatos e qualidades dos polígonos, geometria dos polígonos e planejamento dos parâmetros de desmonte.

A segunda etapa do estudo busca compreender a influência do plano de lavra na diluição na mina do Salobo. Para isto foi definido o plano de lavra mensal como o período e unidade de tempo para medição dos resultados.

#### 4.2.1 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DA DILUIÇÃO OPERACIONAL DE LAVRA

O planejamento das operações inicia-se com o desenho dos avanços em periodicidade mensal em atendimento a alimentação da usina com massa e teor especificados pelo plano de produção vigente. O conceito de polígonos é adotado para selecionar os avanços de lavra tanto de estéril como no minério atendendo aos requisitos operacionais, tais como tamanho mínimo de frente de lavra de acordo com o equipamento, condição geométrica do corpo mineral e da face livre de desmonte, parâmetros geométricos da detonação, entre outros.

Com a definição dos polígonos tem-se a preparação dos planos de perfuração e de fogo, visando garantir qualidade de fragmentação para uma melhor produtividade da escavação e adequada granulometria do minério para a alimentação do britador. Durante a realização da perfuração dos polígonos, são realizadas amostragens do pó de perfuratriz para análise química e composição do modelo de liberação (*Ore Control Model – COM*) como abordado no item 3.3 deste trabalho. Este modelo é atualizado ao final da perfuração e análise de todos os furos amostrados.

As informações das análises químicas com posição do furo executado são importadas para o software de planejamento GEMCOM GEMS<sup>®</sup> e tratadas estatisticamente; logo após, é realizada uma estimativa por *krigagem* e gerado um modelo com suporte de 5x5x15 metros. Estas informações são plotadas em mapas e fornecidas para a equipe de desmonte para avaliação e simulação da melhor condição de sequenciamento do desmonte, de modo a evitar perdas e diluições por conta de contato e movimentação de material durante a detonação.

O modelo de Curto Prazo 30x30x15 metros é utilizado para o desenho inicial do plano de lavra (polígonos) e ao final da perfuração e com os resultados da *krigagem* com as novas informações de teores dos furos é atualizado o modelo de liberação (OCM) em suporte menor de 5x5x15 para facilitar a delimitação de contatos e acompanhamento de lavra. A Figura 8 resume o processo de liberação de polígonos na mina do Salobo atualmente.

Figura 8 - Fluxo da metodologia de liberação de polígonos para lavra na Mina do Salobo

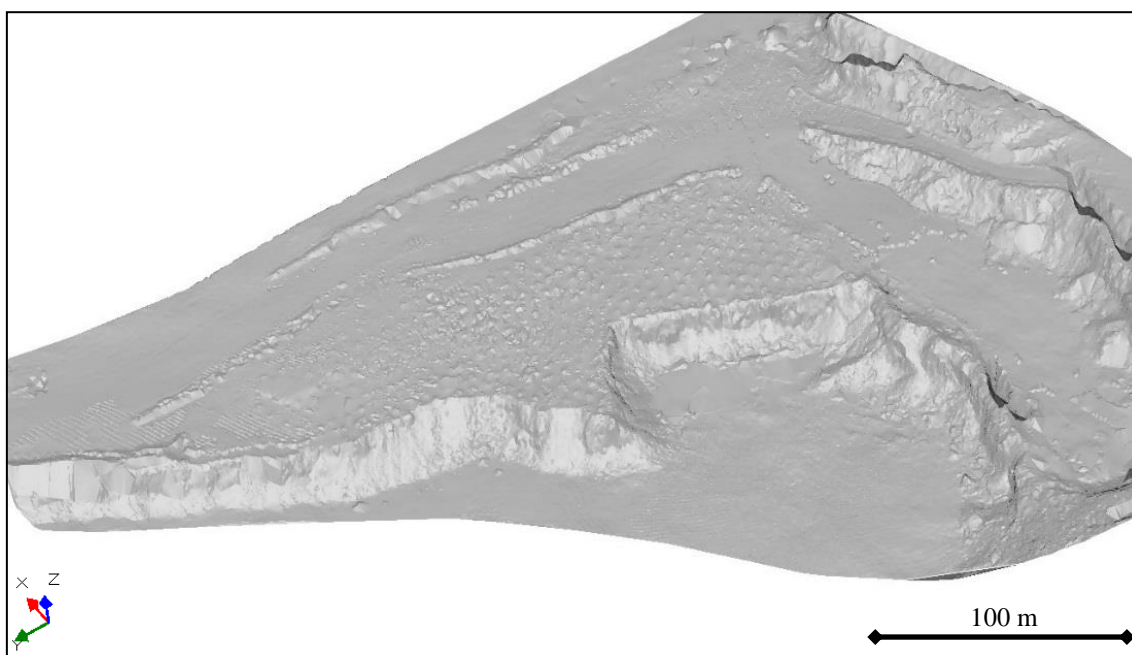


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Os levantamentos topográficos na mina do Salobo são realizados com Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) e *laser scan*, tecnologias que possibilitam grande precisão das informações topográficas em comparação com os levantamentos por GPS.

Assim que a lavra de uma frente de escavação é finalizada definindo-se a face livre de um polígono a equipe de topografia realiza a coleta das medições topográficas. Esta será a superfície de partida para análise da diluição operacional por polígono. A Figura 9 é o resultado do levantamento topográfico para se analisar com precisão as massas e teores a serem desmontados levando em consideração nível de praça, taludes, material remanescente no pé do banco, etc.

Figura 9 - Resultado do levantamento topográfico com *laser scan* da face livre do polígono.

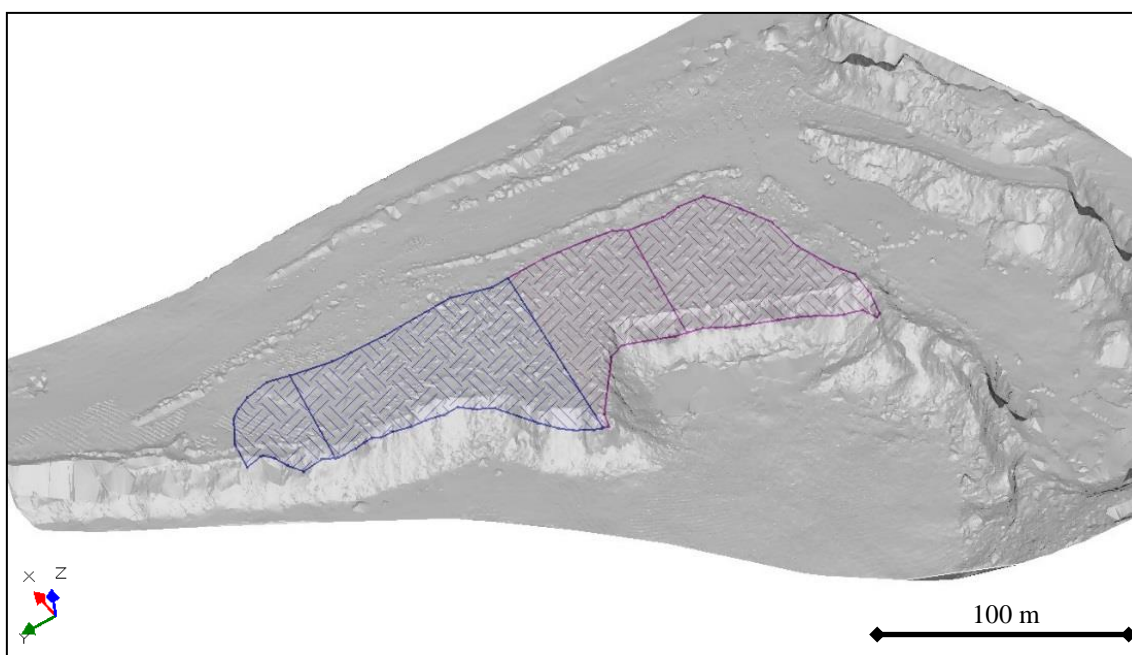


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Os resultados da *krigagem* e a atualização do modelo de liberação com as informações das análises químicas do pó de perfuração são base para a definição de divisões internas do polígono a ser detonado. Essas divisões são em termos dos teores de cobre e dos resultados das simulações do sequenciamento de iniciação do desmonte que indicam o sentido de movimentação da pilha detonada.

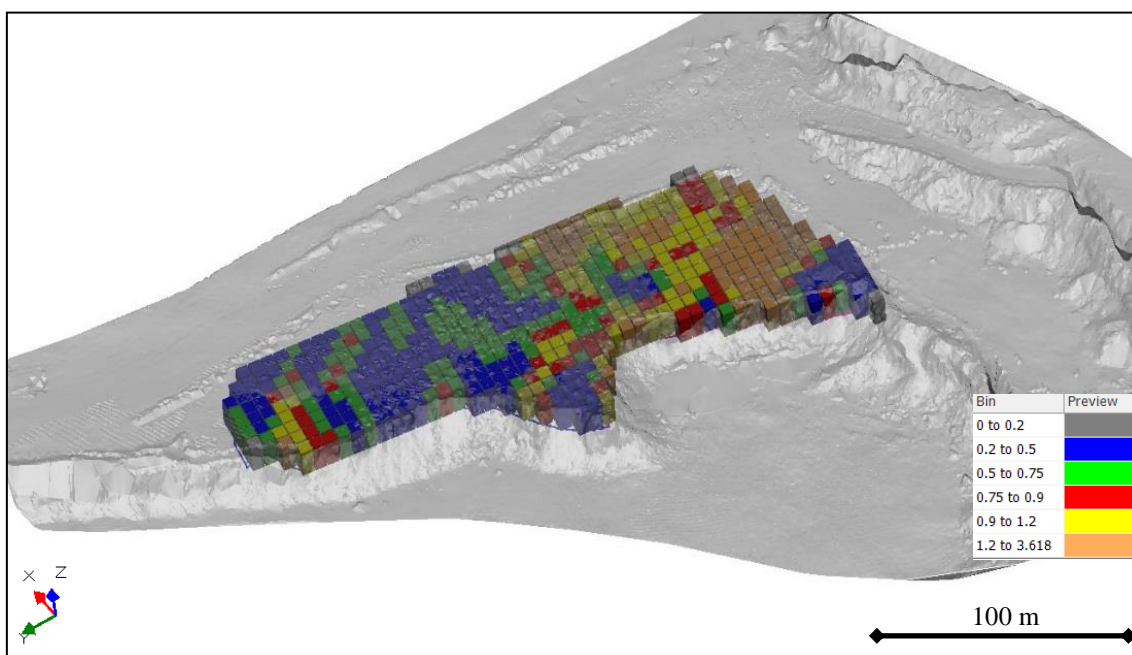
A Figura 10 mostra a divisão interna das qualidades de um polígono de alto teor e a Figura 11 o resultado da atualização do modelo de liberação (OCM) com as informações de análises químicas após a *krigagem*.

Figura 10 - Contatos de qualidade (baixo e alto teor) antes da detonação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 11 - Modelo de liberação (Ore Control Model) atualizado



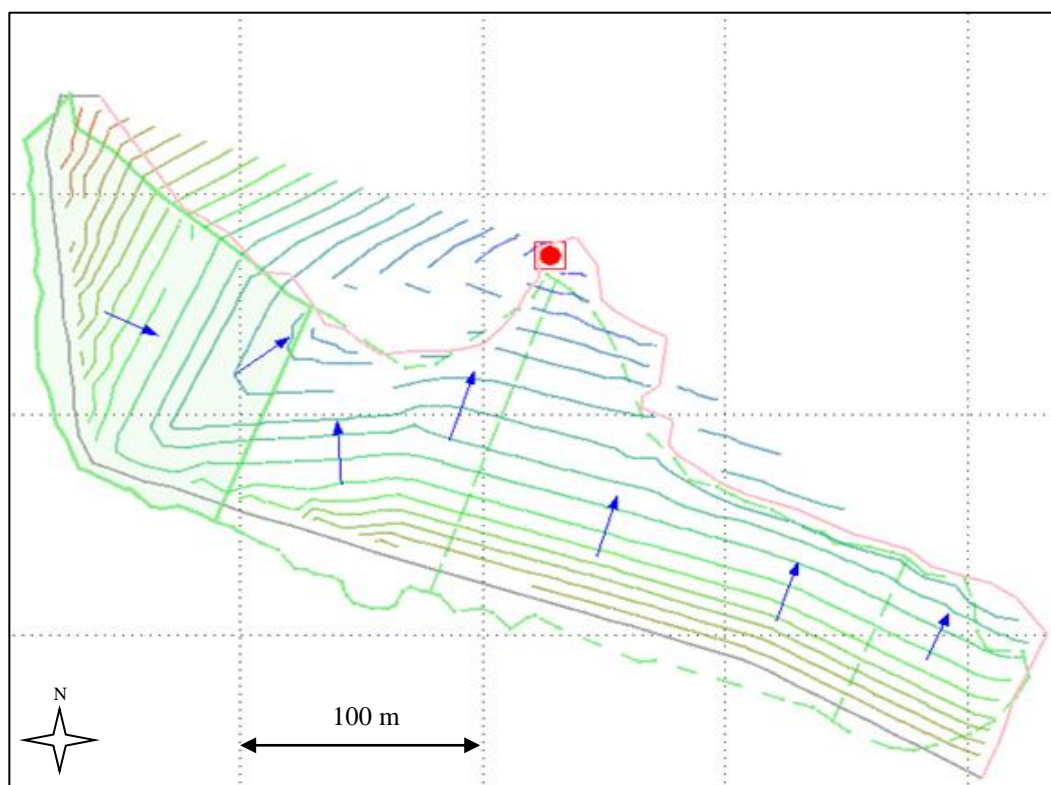
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

O sequenciamento de iniciação do desmonte é a definição pela equipe de engenharia de desmonte de como se procederá a detonação, com o sentido de

movimentação preferencial da pilha, temporização de cada furo, carga máxima por espera e outros fatores de modo a minimizar a movimentação de material entre as divisões internas do polígono inicial visto a possibilidade de mistura de materiais com teores diferentes e/ou mesmo perda de minério quando incorporado em uma região de estéril.

A Figura 12 mostra o resultado da simulação do polígono com as isolinhas de detonação.

Figura 12 - Isolinhas de temporização resultado da simulação do sequenciamento de iniciação do desmorte.



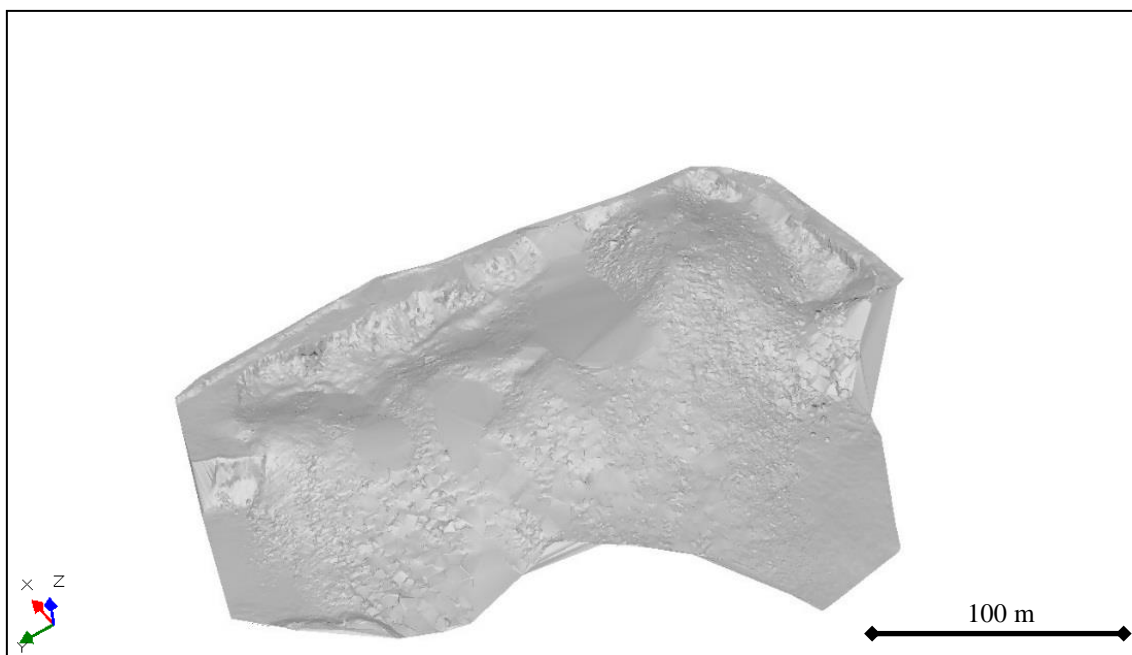
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Definida a melhor sequência de detonação e realizado o desmorte, outro levantamento topográfico com *laser scan* é coletado, para avaliação da movimentação da pilha e possíveis migrações de materiais entre as divisões internas do polígono, assim como para verificar se houve ocorrência de *backbreak* ou *overbreak* que possam alterar a qualidade de cada polígono e possíveis diluições e perdas.

A Figura 13 mostra o resultado da pilha desmontada deste polígono.



Figura 13 - Levantamento topográfico com Laser Scan logo após a detonação do polígono.



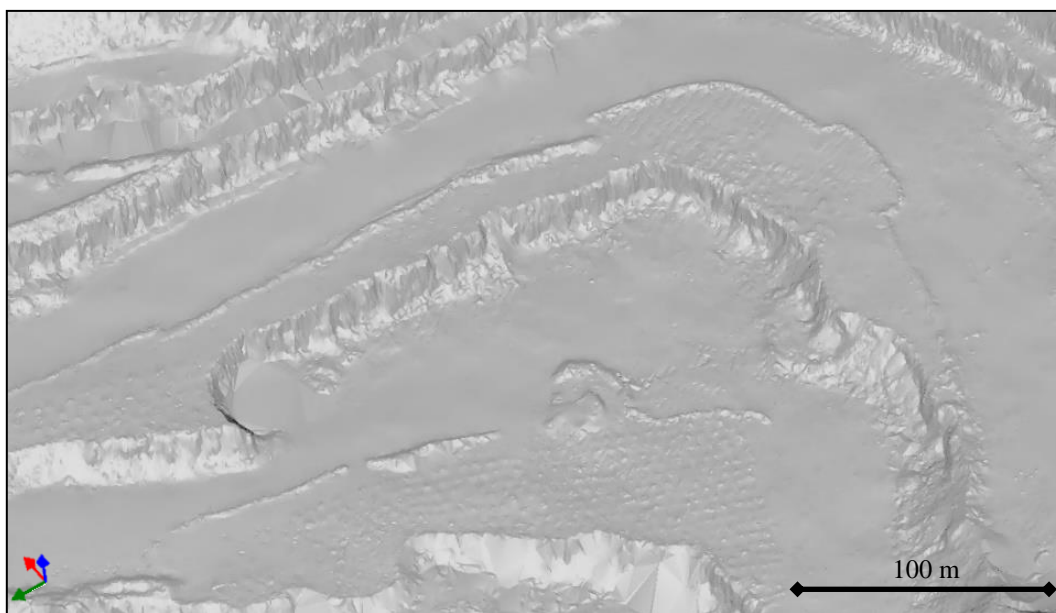
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A lavra é executada seguindo a orientação da equipe de controle de qualidade de mina, para que cada subdivisão do polígono seja corretamente apontada durante a lavra. Os limites são importados para o sistema do despacho e visualizados na tela do operador da escavadeira e disponível para acesso dos técnicos do turno através do computador.

Ao final da lavra de todo o polígono é realizado novo levantamento topográfico com *laser scan* para aferição da massa lavrada que foi apontada pelo despacho e comparada com a massa efetivamente lavrada extraída da cubagem entre o levantamento inicial antes do desmonte e este levantamento. A Figura 14 mostra o resultado da topografia após a lavra deste polígono.

Com estas informações foi possível estabelecer uma metodologia capaz de acompanhar e realizar a avaliação da diluição operacional de lavra com a introdução dos levantamentos topográficos dos polígonos, realizando a cubagem precisa da massa, conhecendo-se a configuração final da pilha desmontada e o resultado após a lavra. A reconciliação da massa efetivamente lavrada pode ser comparada com a massa real cubada pelas topografias antes e após a lavra.

Figura 14 - Levantamento topográfico com Laser Scan após finalização da lavra.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para o cálculo da diluição operacional de lavra é utilizada a Equação 2Equação 3 onde reflete a condição inicial e final de lavra por polígono analisado.

Equação 2 - Cálculo da diluição operacional de lavra

$$D_o(\%) = \frac{\text{Teor médio do polígono lavrado}}{\text{Teor médio do polígono planejado}} - 1 \quad (\text{Equação 2})$$

#### 4.2.2 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DA DILUIÇÃO OPERACIONAL PLANEJADA

A função do engenheiro de minas no planejamento de lavra de curto prazo é atender ao plano de lavra de longo prazo, alcançando boa aderência ao final de um período estabelecido. Este conceito de forma generalista traz uma percepção de que a atuação do planejamento de curto prazo pode pouco alterar o resultado de planos anteriores e de maiores hierarquias, mas como visto no Capítulo 3 deste trabalho e mais especificamente no tópico 3.2.3 a atuação do curto prazo pode ter influência significativa nos resultados previstos do plano de lavra.

A metodologia que aqui será abordada para a medição da diluição operacional planejada pode ser replicada em outras minas, observado o nível de detalhamento que existe nos planos de lavra de curto prazo. Neste caso, é necessário abordar a metodologia de desenvolvimento dos planos de lavra mensais que será objeto de comparação para medição dos resultados.

O conceito já foi abordado no item 3.2.3.3 PLANO DE LAVRA MENSAL e aqui serão abordados com maiores detalhes o fluxo das macros atividades para contextualização do trabalho de medição da diluição operacional planejada. O ponto de partida do plano mensal é o recebimento das informações de premissas das áreas de manutenção de equipamentos de mina e usina, operação de mina e programa de produção mensal oficial.

Estas informações são insumos para o correto dimensionamento de frotas e estabelecimento de metas. Juntamente com as áreas operacionais são discutidos e avaliados os valores dos índices de DF, UF e produtividade previstos no plano anual e semestral para o mês em questão a fim de ajustar os valores de acordo com a projeção aprovada pela gerência executiva.

Também como premissa, o planejamento recebe a atualização topográfica da mina e depósitos para projeção da cava de partida e conseqüente sequenciamento da lavra. A equipe de geologia realiza mensalmente a atualização do modelo de blocos de curto prazo e disponibiliza para a equipe de planejamento. Esta etapa é realizada na semana anterior ao início do mês. Com a cava de partida pronta, realiza-se o desenho do plano mensal com a definição de polígonos de lavra seguindo as condições operacionais de cada equipamento e sua capacidade.

Vale salientar neste ponto que o detalhamento do plano é feito de forma que cada avanço realizado seja cubado individualmente e por equipamento, tendo-se assim definida a sequência de lavra e o equipamento para qual cada polígono foi planejado. Isto contribui para a operação de mina em termos de produtividade e seletividade, também como previsibilidade do plano em relação a possíveis alterações de qualidade do minério e seus impactos na usina.

O fluxo de trabalho de confecção de um plano mensal de lavra deve durar de 3 a 5 dias e sua apresentação deve coincidir (de preferência) com o primeiro dia útil do mês. Esta disciplina é importante para que se tenha coerência com a cobrança dos resultados planejados. Logo, podemos resumidamente abordar 6 etapas da confecção do plano mensal:

1 – Recebimento das informações das áreas de manutenção de mina e usina, comumente chamadas de Premissas.

2 – Realiza-se as discussões com todas as áreas operacionais nas reuniões “prévias do plano” para definir as metas mensais e consolidar o dimensionamento de equipamentos.

3 – Na última semana do mês é disponibilizado o levantamento atualizado da mina e dos depósitos e realizado o ajuste com a projeção da Cava de Partida, que é a situação projetada da topografia para o primeiro dia do mês.

4 – A equipe de geologia de mina realiza a atualização do modelo de blocos de curto prazo por krigagem com a inserção das informações de análise química até a data disponível.

5 – Inicia-se o desenho do plano com a definição dos polígonos a serem lavrados no mês: minério e estéril.

6 – É realizada formalmente uma apresentação do plano no primeiro dia útil do mês a todos os técnicos, engenheiros e supervisores com o resultado do sequenciamento do plano de lavra do mês.

Este modo de sequenciamento mensal de lavra por polígonos tem o objetivo claro de aumentar a previsibilidade dos resultados do plano, mitigar riscos e aumentar a aderência ao realizado, dado que a metodologia anterior onde apenas dois avanços eram definidos (inicial e final), deixavam a cargo dos planos semanais e diários a decisão de

posicionamento de equipamentos, criação de polígonos e prioridades de lavra, o que levava muitas vezes à não exequibilidade dos avanços.

Frequentemente havia discussão a respeito do plano não atender em quantidade o minério para a alimentação da usina com a qualidade adequada, apesar da cubagem apresentar o contrário. O fator usado para diluição raramente era aplicado, por falta de informações e estudos sobre o caso. Estes fatores indicaram que havia descontrole sobre a lavra e definição do sequenciamento.

A diluição operacional planejada existe e não é trivial encontrá-la, assim como Ebrahimi (2013) identificou em seu estudo o pouco caso a respeito de definição de diluição para inclusão nos planos ser muitas vezes arbitrária e pouco científica. A sistematização do seu estudo, e proposições de metodologias científicas para cálculo e/ou medição tem sido nas últimas décadas esforço de muitos pesquisadores Câmara (2013), Pakalnis (1995), Villaescusa (1998) Henning e Mitri (2007 e 2008) entre outros.

Este trabalho busca contribuir para o cálculo da diluição operacional planejada com suas especificidades no ambiente da Mina do Salobo, localizada na Província Mineral de Carajás. Como base para o estudo foram utilizadas as informações de 18 planos mensais, no período de janeiro de 2017 a junho de 2018.

A etapa 1 deste trabalho irá compreender o estudo referente ao avanço total do mês com o estabelecimento do valor máximo do teor ponderado (Cu%) visando verificar qual seria o resultado do teor excetuando-se qualquer tipo de diluição operacional (caso fosse possível separar todos os blocos de minério dos blocos de estéril).

Nesta primeira etapa todos os planos mensais foram analisados da seguinte forma:

- 1- Definição de duas topografias como: o avanço inicial referente ao 1º dia do mês e o avanço final como o último dia do mês; serão as geometrias que limitarão o modelo de blocos.
- 2- A cubagem entre estas duas topografias planejadas é o total de massa prevista a ser lavrada no avanço mensal. É utilizado o mesmo modelo de blocos para todos os meses;
- 3- Os dados obtidos das cubagens são tratados em planilhas Excel® para classificação e quantificação dos materiais constantes em termos de minério (alto, médio e baixo teor) e estéril.

- 4- A partir da classificação do minério *Run of Mine* (ROM) das cubagens mede-se o teor final de cada mês como resultado da média ponderada pela massa.

O resultado deste teor é o teor máximo possível para o referido mês, visto que é excluída qualquer possibilidade de diluição operacional por conta de mistura de blocos de estéril e blocos de minério, excetuadas a diluição de suporte ou interna (Rossi, 2002). A diluição de suporte ou interna é resultado do tamanho mínimo de bloco (SMU – *Selective Mining Unit*) e está implícita no teor de cada bloco, porém não é objeto de estudo neste trabalho. Assim, este valor será o alvo de que o planejador busca atender, pois quanto menor a diferença, melhor a condição do plano para execução da operação.

A etapa 2 deste trabalho é resultado do detalhamento do plano mensal com as subdivisões dos avanços inicial e final em polígono por polígono. Para tanto, foram executados os seguintes passos:

- 1- Mantêm-se as duas topografias definidas como: o avanço inicial referente ao 1º dia do mês e o avanço final como o último dia do mês; entretanto, todos os polígonos são cubados individualmente, tendo-se, portanto, enumerado a massa e teor médio de cada polígono, seja ele de estéril ou minério, sem realizar agora nenhum filtro nos blocos, por qualquer que seja a razão: qualidade, litologia, material, etc.

É importante que aqui seja feita uma referência que a diluição operacional planejada em maior ou menor intensidade se origina na correta ou inadvertida proposição de lavra do planejador. Por exemplo, se um avanço possui uma porção de blocos com qualidade estéril no interior de um polígono de minério passível de ser separada, mas é definido pelo planejador realizar a lavra deste polígono de forma a não propiciar a separação no desmonte, é evidente que ocorrerá diluição, visto a incapacidade do equipamento de lavra para separar após a detonação o bloco de estéril daquele de minério. Logo, esta massa será incorporada à massa de minério diminuindo-se o seu teor médio final do polígono.

Em resumo, cada polígono é considerado uma unidade mínima de lavra (SMU) para qual o equipamento de lavra foi anteriormente definido, e a qualidade final do polígono (teor) é obtida pela média ponderada dos blocos constituintes.

Na sequência tem-se:

- 2- Todas as cubagens são realizadas até que se encontre o limite da cava final do mês. As informações são tratadas em planilhas Excel<sup>®</sup> e calcula-se o teor médio ponderado de Cu% de cada um dos polígonos. O modelo de blocos utilizado é o mesmo para Etapa 1 e Etapa 2.
- 3- Realiza-se a separação dos polígonos definidos como estéril e minério dentro do plano. Soma-se a massa dos polígonos de minério e calcula-se o teor médio final ponderado.
- 4- Tem-se agora um mesmo resultado de ROM e Teor de Cu% para o avanço inicial e final calculado pela metodologia da Etapa 1 e pelo avanço por polígonos na Etapa 2.

Após a realização das duas etapas anteriormente descritas, pode-se avançar para a comparação das duas situações onde claramente existirá a influência da operacionalidade proposta pelo planejador, resultado das análises do plano e geometrias e condição do corpo mineral (geologia, estrutura e litologia) dos períodos analisados.

Aplica-se então, a Equação 3 para cálculo da Diluição Operacional Planejada de cada mês.

Equação 3 - Cálculo de Diluição Operacional Planejada

$$D_p(\%) = \frac{\text{Teor do ROM por polígonos}}{\text{Teor do ROM por avanço}} - 1 \quad (\text{Equação 3})$$

Desta forma, a diluição operacional planejada baseia-se na comparação do teor do ROM ponderado por polígonos e o teor do ROM considerando um avanço mensal.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

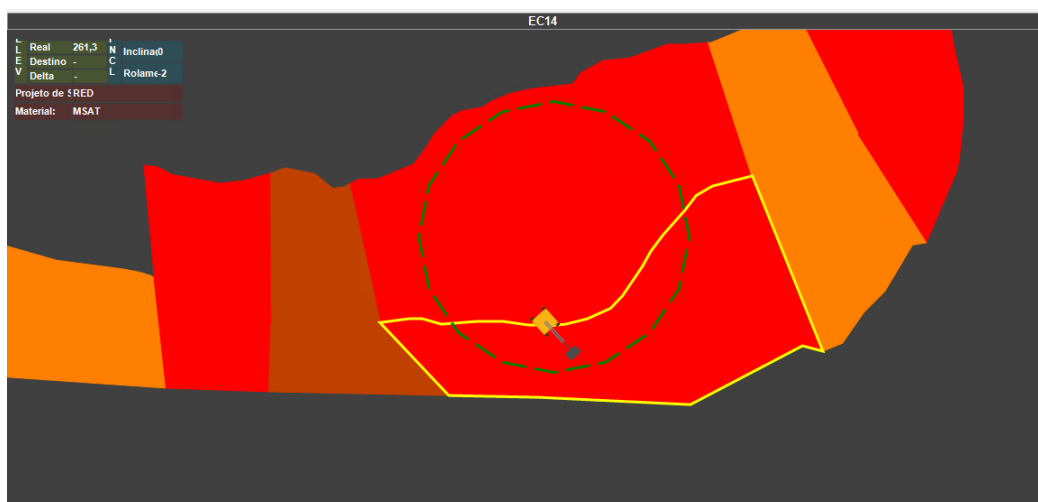
Neste capítulo serão apresentados os resultados em duas etapas: aplicação da metodologia de medição da diluição com a análise dos polígonos e na segunda etapa os resultados do estudo sobre a diluição operacional planejada resultante dos avanços mensais.

### 5.1.1 RESULTADOS DE DILUIÇÃO OPERACIONAL DE LAVRA

A operação de lavra é muito dinâmica e vários fatores contribuem para a ocorrência de diluição. Muitas tecnologias têm sido desenvolvidas para facilitar o controle e a execução por parte do operador da atividade de lavra propriamente dita. A implementação de limites virtuais de lavra acompanhados com GPS (Sistema de Posicionamento Global) com visualização a partir de uma tela instalada na cabine do equipamento com acesso em tempo real com o despacho se torna aliado fundamental na correta observação dos limites de lavra.

A Figura 15 mostra um exemplo da visualização do operador de seu equipamento em relação aos limites de contato entre os sub-polígonos como limites de lavra. Porém, ainda é comum que operador se localize apenas por marcações físicas realizadas sobre a pilha de material detonado através de estacas ou fitas como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Visualização da tela do operador da posição da escavadeira nos limites do polígono



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Este tipo de sinalização (Figura 16) e acompanhamento visual expõe a lavra a erros como rompimento da fita devido à ação da chuva e vento, ou mesmo perda da



referência verdadeira após a marcação inicial pelo operador por dificuldade de visualização. Ainda ocorre a exposição ao risco de acidente para a equipe que realiza a marcação e acompanhamento em campo destas sinalizações.

Figura 16 - Sinalização em campo sobre a pilha desmontada das qualidades e regiões do polígono



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Todos os polígonos analisados contaram com os dois tipos de acompanhamento disponível para os operadores de escavadeira, tal como é o procedimento padrão vigente na mina do Salobo. Esta abordagem buscou ter a quantificação das massas que são planejadas e compará-los com a execução. Ao total foram analisadas as informações de seis polígonos de avanços de minério do primeiro semestre de 2017.

O polígono planejado é atualizado com o modelo de liberação e então é calculado pela Equação 4 o teor ( $t_0$ ) planejado do polígono.

Equação 4 – Fórmula do teor médio planejado do polígono

$$t_0 = \frac{\sum_1^n (M_n * t_n)}{\sum_1^n M_n} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$n$  – Quantidade de sub-polígonos;

$M$  – é a massa do sub-polígono em toneladas

$t$  – é o teor de Cu em porcentagem

Após a lavra do polígono e ser realizado o escaneamento da face do talude remanescente, faz-se então a cubagem para saber a massa e teor efetivamente lavrados. Logo, calcula-se pela Equação 5 o teor médio do polígono lavado, também chamado de teor diluído ( $t_d$ ).

Equação 5 - Fórmula do teor médio do polígono lavado

$$t_d = \frac{\sum_1^n (M_{2n} * t_{2n})}{\sum_1^n M_{2n}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

$n$  – a quantidade de sub-polígonos;

$M_2$  – é a nova massa do sub-polígono lavado (real) em toneladas;

$t_2$  – é o novo teor de Cu em porcentagem após a lavra.

Uma vez que a lavra pode executar uma massa diferente do que anteriormente estava planejado, para avaliar a fonte de diluição e/ou perda é necessário calcular a reconciliação de massa para cada polígono.

Ao final foi calculada a diluição operacional de lavra pela fórmula da Equação 2 anteriormente descrita na metodologia deste trabalho. A Tabela 2 - Resultados de diluição operacional de lavra mostra os resultados de diluição operacional de lavra para todos os polígonos estudados. Os teores são oriundos do modelo de blocos a partir da atualização com amostras de pó de perfuratriz.

Tabela 2 - Resultados de diluição operacional de lavra

Polígono	Planejado		Realizado		Resultados	
	Massa (ton)	Teor (%)	Massa (ton)	Teor (%)	Reconciliação de massa	Diluição Operacional
L3_277_010	599,468	0.865	659,535	0.839	10.02%	-2.98%
L3_277_035	402,526	0.876	403,704	0.865	0.29%	-1.29%
L3_277_045	321,989	1.031	356,501	0.945	10.72%	-8.37%
L3_232_014	223,493	0.989	229,576	0.960	2.72%	-2.97%
L3_217_009	382,393	1.000	333,419	1.020	-12.81%	1.94%
L3_232_024	407,225	1.099	391,821	1.115	-3.78%	1.45%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Pelos resultados obtidos pode ser observado que houve diluições de até -8% e a ocorrência também de diluições positivas de aproximadamente 2%. Considerando a média de diluição entre todos os polígonos, a Tabela 3 sumariza os resultados.

Tabela 3 - Resultado geral de diluição e reconciliação de massa

Diluição Operacional de Lavra	-1.80%
Reconciliação de massa	1.60%

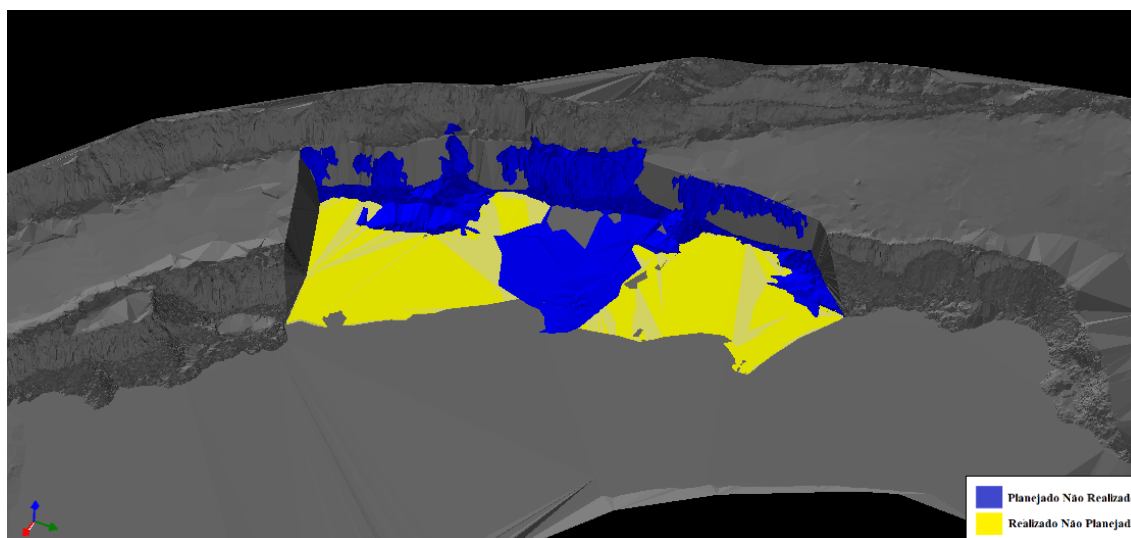
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Observando como exemplo as geometrias do polígono L3\_277\_045 planejada e executada, que obteve a maior diluição de um polígono individualmente, podem ser observados alguns fatores que indicam a origem da diluição:

- material no pé do banco que ficou sem realizar a lavra;
- presença de *overbreak* e *backbreak* no talude;
- realização da lavra abaixo do nível planejado (sub-furação).

Isto levou a um aumento de massa da lavra em relação ao planejado (+10%) e consequente variação do teor (-8%). A Figura 17 mostra os detalhes do avanço identificando onde houve lavra de regiões não planejadas e áreas em que não foram concluídos os avanços. As porções de coloração amarela são áreas lavradas abaixo do nível planejado referente a área de sub-furação do polígono, já em azul são materiais que não foram lavrados, como área de *overbreak* na face do talude e uma região de resistência no piso do polígono como resultado de um repê.

Figura 17 - Resultado da lavra do polígono L3\_277\_045

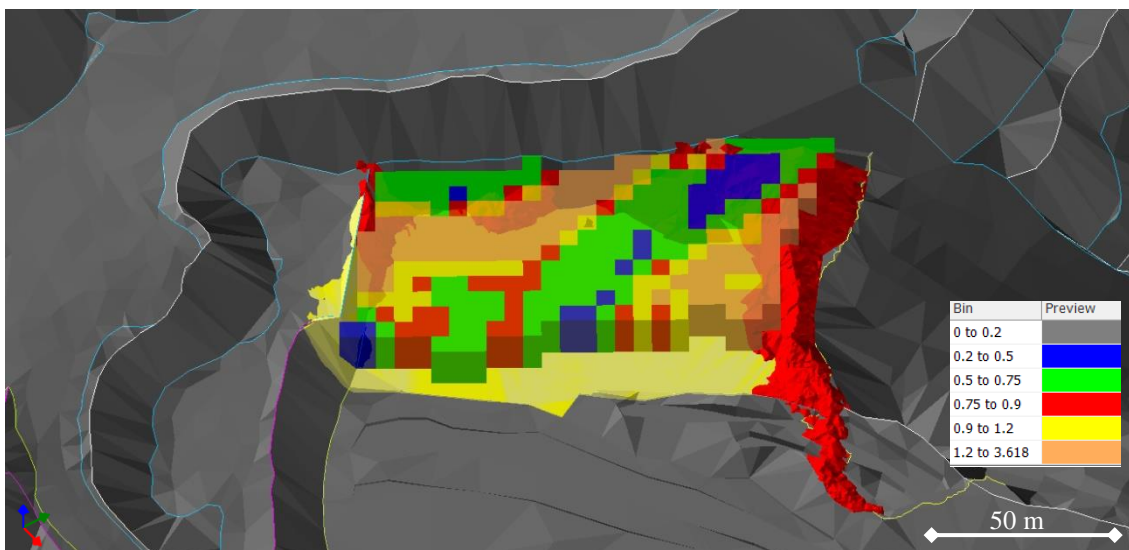


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Por outro lado, o polígono L3\_217\_009 apresentou resultado de diluição positiva. Também foi o polígono que apresentou menor aderência à massa lavrada/planejada, perdendo -12% da massa total planejada. A Figura 18 mostra a execução da lavra do L3\_217\_009 abaixo do nível de projeto (região amarela) e uma parte não realizada na crista e pé do banco (vermelha). Alguns fatores podem ser indicados para esta divergência:

- Deslocamento do material desmontado e geometria do polígono;
- Variabilidade interna de teores e presença de várias litologias no polígono desmontado.
- Perda de material desmontado por projeção para bancos inferiores, leiras, taludes, etc.

Figura 18 - Porção realizada além do nível planejado (amarelo) e região não lavrada na crista (vermelho)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Como resultado da baixa reconciliação de massa lavrada/planejada observou-se uma diluição positiva de 1,94%, ou seja, a partição de massa lavrada foi maior nas regiões mais ricas. A variação interna de teores neste polígono foi determinante para o resultado de diluição positiva. Em polígonos mais homogêneos a perda de massa tem menor influência nas diferenças de teores.

Estes exemplos, ilustram de maneira clara como as divergências entre o que é estabelecido como planejado e a execução pode variar sobremaneira, (positivamente ou negativamente), impactando os resultados entre teores informados e executados na usina.

De forma geral, a aderência de lavra é o fator chave para identificar a origem da divergência de teores, como principais fatores temos:

- Lavra de sub-furação;
- Ocorrência de *overbreak/backbreak* e repés;
- Perda de material do polígono em leiras, pé de banco, projeções para bancos inferiores, entre outros.

Ainda pode-se relacionar a interação entre o desmonte de rochas e a geologia do polígono dentro dos aspectos de:

- Deslocamento do material desmontado;
- Variabilidade interna de teores;
- Presença de diversas litologias no polígono desmontado.

Em resumo, no período de seis meses foram estudados e analisados seis polígonos que totalizaram uma massa de 2.337.093 toneladas planejadas contra 2.374.556 toneladas lavradas, variando da maior diluição medida de -8% até uma diluição positiva de 1,9% (média -1.8%), o que mostra que as condições locais de cada polígono foram determinantes para a ocorrência de maior ou menor variação dos teores. Esta variação de teores, sinaliza um ponto de atenção para a operação, visto que no período de lavra de alguns polígonos poderá ocorrer divergências significativas entre teores de mina e usina, enquanto que para períodos maiores a tendência é de equalização dos resultados entre executado e planejado. Por isto, esta métrica se torna importante uma vez que tem a capacidade de identificar possíveis situações geradoras de diluições e buscar tratativas de minimização da diluição.

### 5.1.2 RESULTADOS DE DILUIÇÃO OPERACIONAL PLANEJADA DE LAVRA

É inegável que a parte de controle e acompanhamento da lavra, aplicação de tecnologias modernas, investimento em treinamento dos operadores e rigidez do cumprimento do plano são ferramentas e meios de se buscar a redução da diluição. Não obstante este esforço (que deve ser contínuo), não se pode executar o plano sem que se tenha uma previsão de qual será o fator de diluição esperado para dado período.

A medição da diluição como demonstrada no item anterior, cumpre papel fundamental para elucidar possíveis discrepâncias entre reconciliação de produção entre mina e usina, ou seja, responde de forma reativa a um resultado passado. A seguinte metodologia visa, desta maneira, proporcionar um resultado capaz de suportar com informações o plano de produção da usina, calculando-se previamente a diluição a partir do resultado do sequenciamento de lavra.

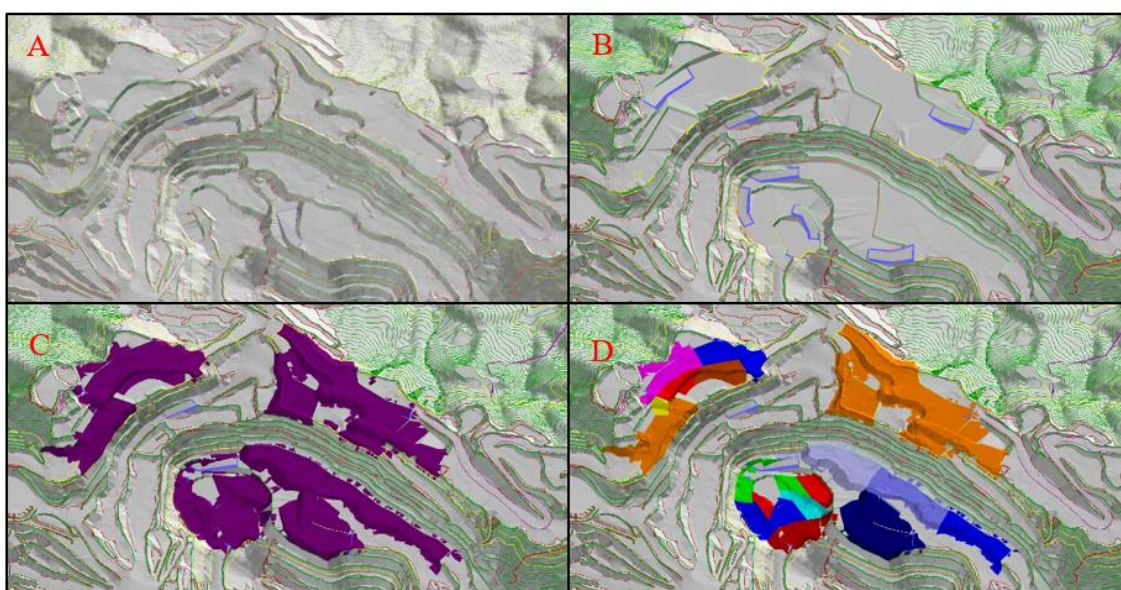
Foi realizado o acompanhamento durante o período entre janeiro de 2017 e junho de 2018 com a avaliação de todos os planos mensais apresentados e sistematizado o cálculo da diluição operacional planejada a partir do ROM e teor de cada mês na forma de um avanço único como sendo a situação ideal (sem diluição) e comparando-se com o resultado do ROM e teor calculado pelo sequenciamento por polígonos, considerado aqui como o valor diluído.

A Figura 19 apresenta as duas situações. A imagem A e B são topografias planejadas de início e fim de um plano de lavra (setembro/17), enquanto que a imagem C e D são os resultados dos desenhos pelos dois métodos. A imagem C é o avanço total sem subdivisão, objeto de cubagem onde o minério é classificado em litologia e qualidade (Baixo, Médio e Alto teor) levando-se em consideração apenas o modelo de blocos e o limite de lavra.

A imagem D é o resultado de como ficou o mesmo período sequenciado por polígonos, ou seja, adicionando a operacionalidade ao plano e cada sólido de avanço é nomeado, cubado e classificado como minério (baixo, médio e alto teor) e estéril. Assim, incorpora-se uma diluição operacional planejada que é resultado das condições técnicas da lavra.

A diferença está que após a cubagem no primeiro caso, ocorre uma classificação por teor e litologia onde todos os blocos são agrupados independente de sua localização, vizinhança e condições de lavra. Na segunda situação, estas condições são abordadas e, de acordo com a definição do engenheiro, são delimitados os avanços com base no modelo de blocos e pré-estabelecidos os blocos de lavra (polígonos). Todos os blocos nele inscritos serão “diluídos”, adotando-se um resultado médio de teor, mesmo que ocorra a presença de alguns blocos de estéril, que previamente sabe-se que não serão lavrados seletivamente.

Figura 19 - Resultado dos avanços de lavra do plano mensal de setembro/17



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A Tabela 4 mostra a cubagem entre o avanço final e inicial (Imagem A e B) para o mês de setembro/17 e a divisão referente à litologia e às qualidades de minério de baixo, médio e alto teor. As litologias principais de minério são:

- BDX – Biotita Xisto, representa minérios de baixo e médio teor.
- XMT – Xisto Magnético, representa minérios de médio e alto teor.
- Misto – Biotita Xisto, representa minérios de baixo e médio teor.
- DGRX – Granada-grunierita xisto, representa minério de baixo e médio teor.

Tabela 4 - Resultados da cubagem plano mensal setembro/17

Qualidade	Litologia	Massa (t)	Teor de Cu (%)
<b>Alto Teor</b> (%Cu > 0.85)	Outros Minérios	392,616	0.927%
	XMT	659,406	1.267%
	BDX	1,637,441	0.956%
	Misto	125,617	1.454%
<b>Médio Teor</b> (0.85 > %Cu > 0.50)	Outros Minérios	179,806	0.555%
	XMT	65,072	0.553%
	BDX	1,307,157	0.541%
	Misto	138,492	0.572%
<b>Baixo teor</b> (0.23 > %Cu > 0.50)	Outros Minérios	179,655	0.364%
	XMT	27,601	0.417%
	BDX	2,632,080	0.367%
	Misto	6,006	0.361%
<b>Total</b>		<b>7,350,950</b>	<b>0.668345%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Tabela 5 apresenta o resultado de todas as cubagens (Imagem D) feito por polígonos e a massa ponderada final com o teor diluído. Neste caso o sequenciamento planejou 20 polígonos para cumprir os avanços do mês.

Tabela 5 - Resultados da cubagem dos polígonos de avanços do plano mensal setembro/17

Polígonos	Massa (t)	Teor de Cu (%)
L4_352_013MT	207,620	0.589
L4_352_016AT	198,743	0.899
L4_352_016AT-2	138,451	0.800
L4_352_018AT	218,805	1.145
L3_202_006	195,418	0.677
L3_202_007AT	263,365	1.088
L3_247_045AT	299,207	1.317
L3_202_009MT	286,120	0.604
L3_202_008AT	364,142	1.197
L3_232_010AT	383,445	0.947
L3_202_005AT	143,513	1.517
L3_247_047	813,415	0.307
L4_352_013BT	492,247	0.507
L4_352_016BT	307,858	0.538
L4_352_018BT	163,610	0.680
L4_352_019BT	336,584	0.591
L3_217_020BD	483,110	0.455
L3_232_025	1,100,709	0.501
L3_202_022	144,754	0.413
L3_247_044	809,834	0.353
<b>TOTAL</b>	<b>7,350,950</b>	<b>0.647005</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Desta forma, aplicando-se a Equação 3 - Cálculo de Diluição Operacional Planejada, a diluição operacional planejada pode ser calculada:

$$D_p(\%) = \frac{\text{Teor do ROM por polígonos}}{\text{Teor do ROM por avanço}} - 1$$

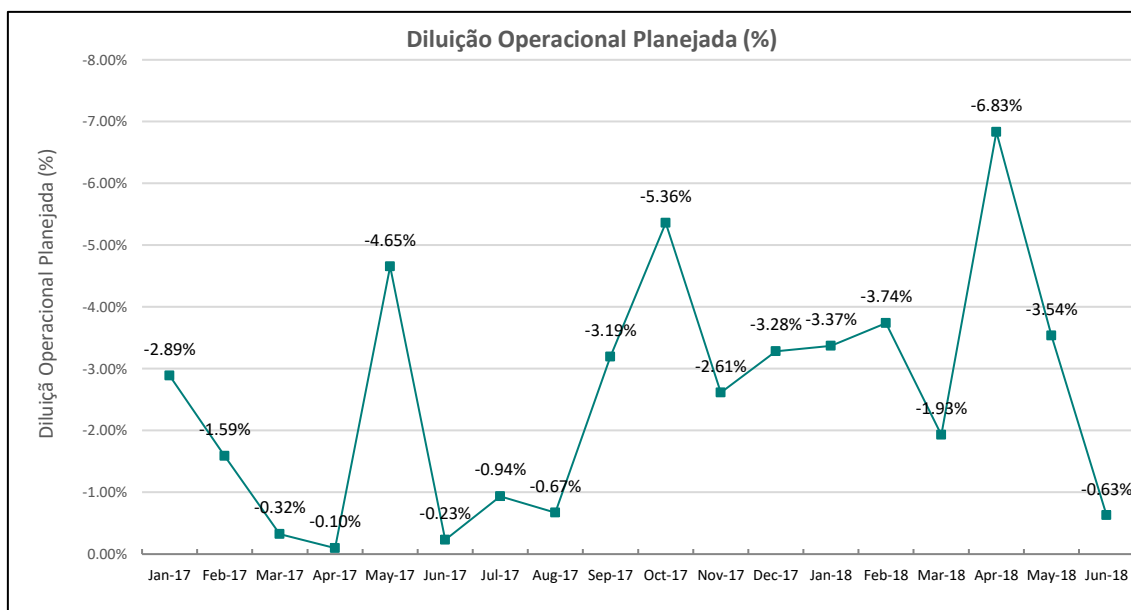
$$D_p(\%) = \frac{0,647005}{0,668345} - 1$$

$$D_p(\%) = -0,0319 \rightarrow -3,19\%$$

A Figura 20 mostra os resultados para o período analisado de diluição operacional planejada.



Figura 20 - Gráfico do resultado da diluição operacional planejada para os 18 meses



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A Tabela 6 mostra a estatística descritiva dos dados de diluição. O estudo resultou em diluição média de -2,55%, alcançando picos de diluição no mês de até -6,83% para ABR/18. Notam-se alguns picos de diluição que ocorrem em intervalos de 3 a 5 meses, como por exemplo entre FEV-ABR/17, JUN-AGO/17 e NOV/17-MAR/18.

Para buscar entender estes resultados mais discrepantes, relacionou-se a quantidade de polígonos e a massa de ROM, criando-se uma razão massa por polígono.

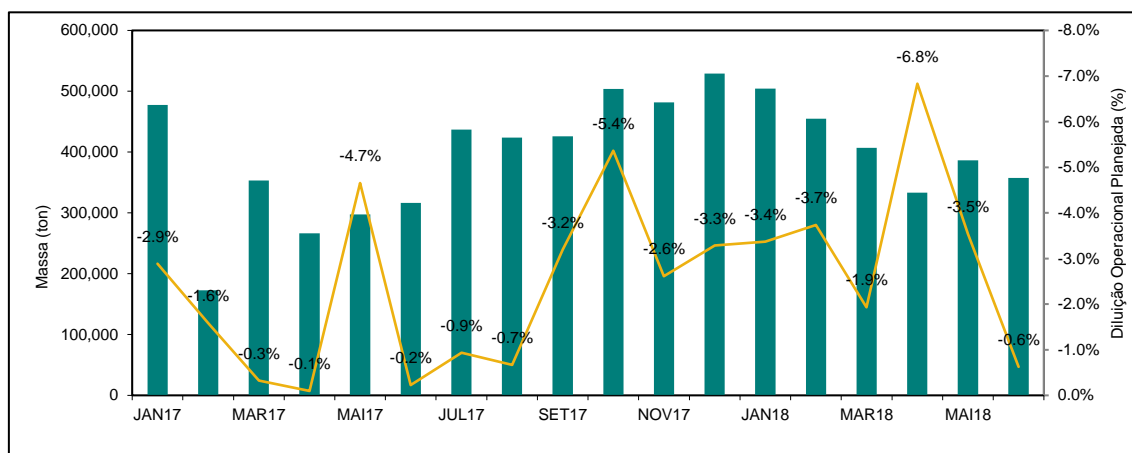
Tabela 6 - Resultados de estatística descritiva para Diluição Operacional Planejada

Indicador	Diluição Operacional Planejada (%)
Média	-2.55%
Erro padrão	0.45%
Mediana	-2.75%
Desvio padrão	1.91%
Variância da amostra	0.04%
Intervalo	6.74%
Mínimo	-6.83%
Máximo	-0.10%
Contagem	18

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

O gráfico da Figura 21 mostra estes resultados, todavia não houve confirmação da hipótese de uma correlação forte entre ROM/Polígono e Diluição Operacional Planejada.

Figura 21 - Diluição operacional planejada e massa de ROM por polígono.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A Tabela 7 mostrou também uma correlação fraca entre estes resultados, não sendo evidente que a relação direta entre polígonos maiores possa causar maiores diluições. Todavia, encontrou-se um comportamento diferente quando o tamanho dos polígonos por qualidades é analisado.

A maior correlação ocorre na qualidade de médio teor, com correlação negativa de 50%. Isso significa que o plano que possuir maior quantidade de avanços de médio teor será mais suscetível à diluição.

Tabela 7 - Teste de correlação entre Diluição Operacional Planejada e ROM/Polígono

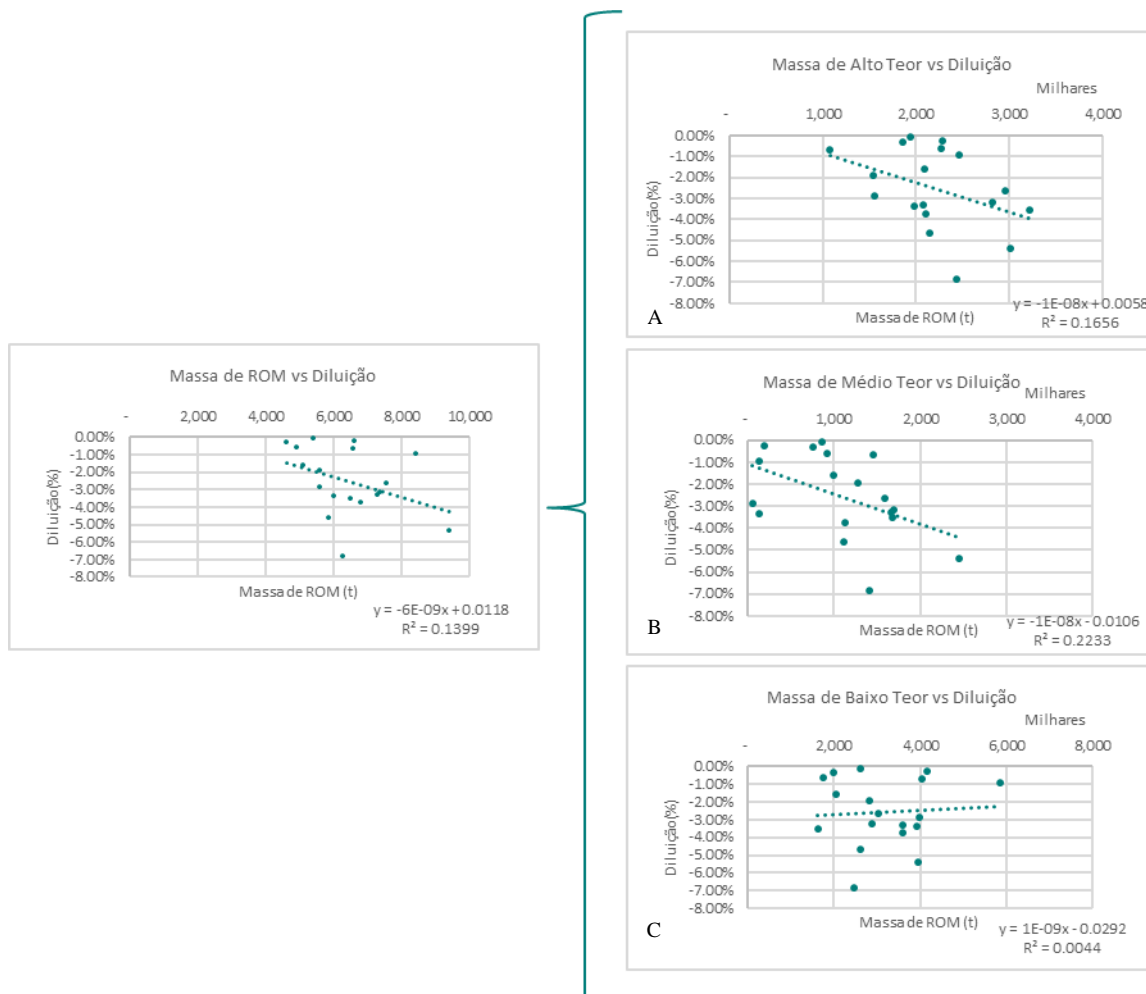
	<i>Diluição Operacional Planejada (%)</i>	<i>ROM/ Polígono</i>	<i>ROM/ Polígono Alto Teor</i>	<i>ROM/ Polígono Médio Teor</i>	<i>ROM/ Polígono Baixo Teor</i>
Diluição Operacional Planejada (%)	100%				
ROM/Polígono	-30%	100%			
ROM/AT	-10%	26%	100%		
ROM_MT	-50%	36%	10%	100%	
ROM/BT	2%	73%	-8%	-23%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Foram traçados gráficos de dispersão para todas qualidades. O gráfico C da Figura 22 e Figura 23 mostraram que o baixo teor tem fraca correlação com a diluição tanto em relação à massa de ROM quanto ao tamanho de polígono. Isto pode ser explicado pela homogeneidade dos teores de cobre quando se disseminam na borda do corpo mineral. Já os gráficos A e B da Figura 22 e Figura 23 referente ao alto e médio teor, respectivamente,

apresentaram correlação mais forte, indicando que as fontes de diluição estão ligadas provavelmente à brusca mudança de teores dentro do corpo mineral.

Figura 22 - Gráficos de correlação entre massa de ROM e Diluição Operacional Planejada

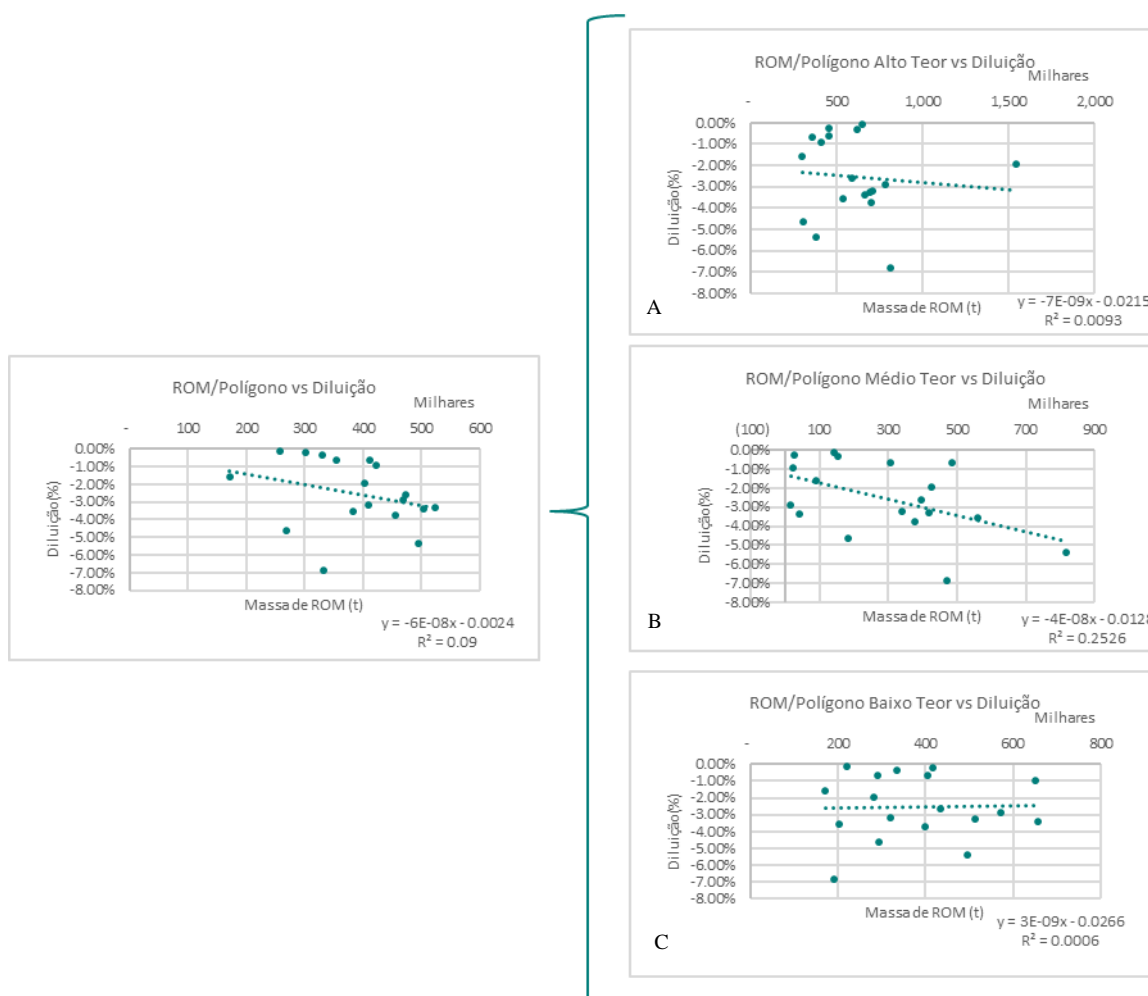


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Há que se destacar que a maior quantidade de ROM de alto teor (Figura 22 A) está ligada a um aumento da diluição (segunda maior correlação), porém em relação ao tamanho dos polígonos (Figura 23 A) não há um maior incremento na diluição. Isto pode ser resultado do fato que os polígonos de alto teor estão obedecendo aos limites do corpo mineral e do modelo de blocos no momento do planejamento dos avanços. É, portanto, interessante observar que a decisão do desenho de lavra é fundamental para garantir a seletividade desde o planejamento e não responsabilidade única da parte executante da tarefa (operação).

Analisando os resultados do médio teor percebe-se uma maior correlação. Há uma tendência de aumento da diluição quando há maior presença de massa do ROM nos avanços (Figura 22 B) e quando os polígonos são de maiores tamanhos (Figura 23 B). O fato dos avanços de médio teor estarem na região de transição entre veios muito ricos e teores mais disseminados, colabora com este resultado. Os baixos teores da vizinhança e dos blocos presentes entre os delgados veios de alto teor, são incorporados nos polígonos aumentando a diluição.

Figura 23 - Gráficos de correlação entre ROM por polígono e Diluição Operacional Planejada



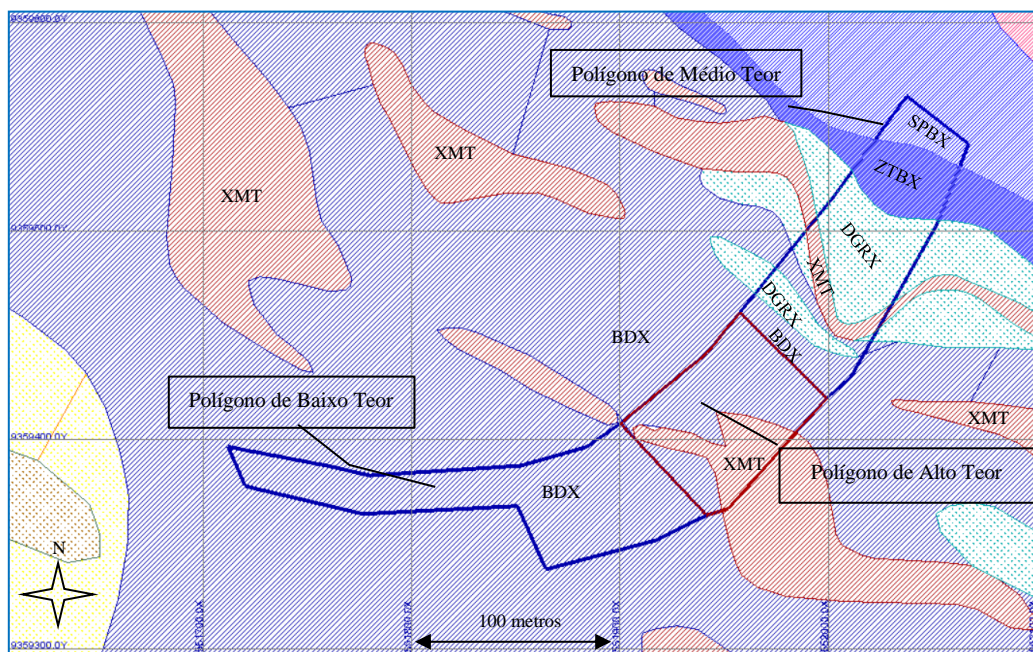
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para exemplificar esta situação é apresentado um mapa litológico do banco 277 na região de lavra da Fase 3 da mina do Salobo. Percebe-se na Figura 24 como o formato dos avanços de lavra podem minimizar ou intensificar a diluição devido a configuração do contato de corpos minerais dentro de polígonos de lavra.

As principais litologias de minério são xistos que são classificados pela presença de magnetita, biotita e granadas. E nas regiões de transição onde apresentam-se alterados encontram-se na forma de saprólitos e rochas alteradas por condições de intemperismo. São dadas as seguintes nomenclaturas para os principais tipos litológicos:

- BDX – Biotita Xisto, representa minérios de baixo e médio teor.
- XMT – Xisto Magnético, representa minérios de médio e alto teor.
- DGRX – Granada-grunierita xisto, representa minério de baixo e médio teor.
- ZTBX – Zona de transição de biotita xisto, zonas intemperizadas e semi-intemperizadas de rochas biotita xisto.
- SPBX – Saprólito de biotita xisto, estéril oxidado de rochas biotita xisto.

Figura 24 – Mapa litológico do banco 277.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Verifica-se que o polígono de baixo teor é bastante homogêneo litologicamente com presença de apenas um domínio litológico (BDX), enquanto que o polígono de alto teor já possui a presença de uma porção da litologia de xisto magnético (XMT). O destaque é particularmente para o polígono de médio teor, situado na extremidade leste do avanço que possui a maior variabilidade de litologias, bastante delgadas e dobradas, gradando da área alterada SPBX, para intemperizada (ZTBX), rocha sã (DGRX) minério de alto teor (XMT) e novamente baixo e médio teor nas litologias DGRX e BDX.

Os resultados da diluição operacional planejada corroboraram com os valores dos resultados medidos para as diluições operacionais de lavra calculadas no item 5.1.1 deste trabalho. Foram estudados ao total 400 polígonos (minério e estéril) em 18 avanços de lavra mensais para se determinar a diluição operacional planejada. Os resultados obtidos apresentaram variações pontuais assim como foi verificada nas análises dos polígonos que os valores máximo e mínimo ficaram entre -0,1% à -6,8%, enquanto a média do período em -2,5%. Tal resultado demonstra que a diligência do planejamento de lavra em atender a condição de seletividade nos avanços é de fundamental importância para se garantir a redução da diluição. Valores médios de diluição são importantes para se basear períodos maiores de lavra, porém quando se trata de curto prazo, podem ocorrer discrepâncias significativas nos teores, em decorrência de diluição operacional ou mesmo planejada.

A diluição média nos dois estudos mostra-se ineficiente, distorcendo resultados de grande variabilidade, que são originados por conta da falta de aderência à lavra planejada ou à condição implícita de seletividade do período analisado. Portanto, não é um bom indicador para curto-prazo. Os valores discrepantes no estudo de diluição operacional planejada apresentaram uma tendência temporal, sendo visualizado que a origem é relativa aos próprios avanços em presença de maior ou menor litologia de médio teor e zonas de transição. Assim, também para polígonos que não seguiram de forma aceitável os limites planejados de lavra.

Os dois estudos demonstraram que é coerente aplicar tal metodologia para quantificação da diluição operacional e planejada. A atribuição deste resultado obtido como fator de diluição para todos os planos de lavra futuros entretanto não é recomendável, visto que os fatores geradores da diluição são mutáveis e tornar fixo um valor de diluição para planos de lavra futuros, seja de longo ou curto prazo, não faz sentido posto que, as condições de lavra se alteram rapidamente, experiência e integração de operadores e supervisores mudam com o tempo, implementação de novas tecnologias podem facilitar o rastreamento do minério, o corpo mineral pode apresentar maior ou menor complexidade em determinado período de tempo ou avanço, entre outras questões que podem ser levantadas.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho tratou de forma técnica e sistematizada a diluição operacional, que tem afetado muitas minas no mundo, embora ainda seja tratado de forma empírica e até com pouco crédito dentro das empresas. Buscou-se colaborar com a discussão do tema ao desenvolver técnicas que sejam replicáveis e sistematizadas para medição da diluição operacional.

A grande contribuição foi o desenvolvimento e aplicação de uma rotina técnica de quantificação da diluição nas operações de lavra e planejamento. Duas situações foram enfocadas: a execução da lavra (diluição operacional de lavra) e a elaboração do planejamento de lavra (diluição operacional planejada). Estes dois conceitos adotados e desenvolvidos ao longo do trabalho permitem um entendimento da diluição quanto resultado da ação humana durante a lavra e a busca da melhor forma de minimização da diluição, enquanto planejamento.

A medição da diluição operacional de lavra totalizou 6 polígonos com levantamentos topográficos realizados por *laser scan* antes e após a lavra, resultaram em uma diluição operacional de lavra variando de +1,9% até -8%. A variação dos valores máximos e mínimos deve ser observada como ponto de risco para a operação, sinalizando que no período de lavra de alguns polígonos poderá ocorrer divergências significativas entre teores de mina e a alimentação da usina. Embora a diluição média tenha resultado em -1,8%, não é adequado atribuir tal índice genericamente aos planos de lavra, devido aos fatores intrínsecos que cada situação proporciona para atenuar ou intensificar a diluição. Entre estes fatores destacam-se: condições de lavra, aderência ao planejado, projeções de desmonte, litologia entre outros.

Para a diluição operacional planejada foram estudados 18 planos mensais de lavra, totalizando 400 polígonos entre minério e estéril, apresentando uma variação de diluição por período de -0,10% até -6,8%. Da mesma maneira que o caso anterior, o impacto da diluição foi percebido proeminentemente em alguns períodos específicos e também um resultado de diluição média de -2,55%. Apesar dos resultados serem próximos nos dois estudos, isto só é alcançado tomando-se a média de um maior período de tempo, portanto no curto prazo também poderá ocorrer divergências de teores. Todavia, estas variações de teores dos planos são decorrentes de fatores diversos daqueles observados na diluição operacional de lavra, posto que a maior implicação está na operacionalidade planejada,

nas condições geométricas e litológicas dos planos. Além disso, as regiões de lavra em que ocorrem litologias de transição e médios teores são mais propícias à ocorrência de diluição.

A partir dos estudos de todos os fatores abordados pelos autores na revisão bibliográfica e diante do exposto e identificado neste trabalho pode-se afirmar que a diluição operacional de lavra representa a qualidade da execução do desmonte e da eficiência da operação de lavra, como consequência da experiência, interação e colaboração entre operadores, técnicos e supervisores no dia-a-dia da mina. Da mesma forma, pode-se constatar que a diluição operacional planejada é a função que melhor representa o resultado da qualidade da operacionalidade e viabilidade dos planos de lavra do ponto de vista de seletividade, sendo objetivo do planejamento de lavra buscar o desenho dos avanços de forma a minimizar a diluição ao máximo.

Como propostas de trabalhos futuros que aqui não puderam ser tratados estão a utilização de sensores ativos dentro dos polígonos para rastreamento da movimentação do material após desmonte e melhor informação dos contatos de polígonos deslocados. A influência de treinamento contínuo dos operadores nas tecnologias embarcadas, tal como GPS, monitoramento de lavra e precisão da perfuração. Aplicação de novos tipos de explosivos e tecnologias de simulações para evitar lançamentos demasiados de material e redução da diluição.



## REFERÊNCIAS

ANSOFF, H. I. **Corporate Strategy: An Analytic Approach to Business Policy for Growth and Expansion**. Harmondsworth: Penguin Books, 1965.

Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672001000300010&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672001000300010&lng=en&nrm=iso)

COSTA, F. P. **Aplicações de Técnicas de Otimização a Problemas de Planejamento Operacional de Lavra Em Minas A Céu Aberto**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral Ouro Preto 2005.

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.

CRAWFORD, G. D., **Dilution and ore recovery**, Pincock Allen and Holt, Pincock Perspectives (Article), Issue NO 60 – November, 2004

EBRAHIMI, A. **The importance of dilution factor for open pit mining projects**.

Acessado em Fevereiro de 2019 em:

[http://www.srk.com.au/files/File/papers/dilution\\_factor\\_openpit\\_a\\_ebrahimi.pdf](http://www.srk.com.au/files/File/papers/dilution_factor_openpit_a_ebrahimi.pdf)

FLORES, B. A. **Planejamento de lavra estratégico e tático de morro da mina - Conselheiro Lafaiete/MG**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2008

HENNING, J. G, MITRI, H. S., **Numerical modelling of ore dilution in blasthole stoping**, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 44, 692–703 January, 2007.

HENNING, J. G, MITRI, H. S., **Assessment and Control of Ore Dilution in Long Hole Mining: Case Studies**, Geotech Geol Eng, 26, 349–366, January, 2008.

RIBEIRO, C., **Relatório interno de liberação de polígono**, Mina do Salobo, 2018.

JANG, H., TOPAL, E., KAWAMURA, Y. **Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations using a neuro-fuzzy system**. In: Applied Soft Computing 32 1–12, ELSEVIER, 2015.

LANE, K.F., **The Economic Definition of Ore, Cutoff Grade in Theory and Practice**, Mining Journal Books, London, 2008

MACEDO, A. J. B de; BAZANTE, A. J.; BONATES, E. J. L. **Seleção do método de lavra: arte e ciência**. Rem, Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 54, n. 3, p. 221-225, Julho 2001.

MANDARINO, M. F.; **Análise de métodos para planejamento de curto prazo: uma abordagem para o Line Up**, Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, 2018.

MELLO, P., **Notas de aula da disciplina Planejamento Operacional de Lavra**, Curso de Especialização Lato Sensu em lavra de minas a céu aberto, Parauapebas, 2017.

MTAITA, C. M. **Ore Dilution Estimation Model in Tanzania Southern Highland Zone: A Case of New Luika Gold Mine**, *International Journal of Science and Qualitative Analysis*. Vol. 4, No. 1, pp. 7-12. doi: 10.11648/j.ijjsqa.20180401.12, 2018

OLIVEIRA, D. P. R., **Planejamento Estratégico: Conceitos, Metodologia e Práticas**. Edição 23, São Paulo, Atlas, 2007.

PAKALNIS R., POULIN R., VONGPAISAL S., **Quantifying dilution for underground mine operations**, 1995 Annual meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Halifax, May 14–18, 1995

PAKALNIS R.C., POULIN R, HADJIGEORGIOU J **Quantifying the cost of dilution in underground mines**. SME Annual Metalurgy And Exploration, Denver, 1995

PARKER, H. M. **Reconciliation principles for the mining industry**, Published by Maney on behalf of the Institute of Materials, Minerals and Metallurgy and the AusIMM, maneypublishing.com, 2012

REUWSAAT, J. D. V.; COSTA, J. P. M.; CAIXETA, A. P. C.; **Relatório de aderência e reconciliação Salobo – 2016**, 2017.

ROSSI, M. E. DEUTSCH, C. V. **Mineral Resource Estimation**, DOI 10.1007/978-1-4020-5717-5\_11, © Springer Science+Business Media Dordrecht, 2014

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

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.

SILVA, N.C.S. **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, 124 p., São Paulo, 2008.

SINCLAIR, A. BLACKWELL. G. **Applied Mineral Inventory Estimation**, Cambridge University Press, 2002.

TAYLOR, D. L.; FIRTH, I. R. **Utilization of blast movement measurements in grade control.**, Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries, South African Institute of Mining and Metallurgy, p. 243–248., 2003

ZARSHENAS, Y., SAEEDI, G. **Risk assessment of dilution in open pit mines**, Arab J Geosci 9: 209DOI 10.1007/s12517-015-2214-8, 2016