



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN



LEONARDO HENRIQUE MENDES BESERRA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA UNIDADE SELETIVA DE LAVRA (SMU) E SEUS
IMPACTOS NOS INDICADORES DE PERDA E DILUIÇÃO EM UMA MINA DE
MINÉRIO DE FERRO**

**Ouro Preto – MG
2026**

LEONARDO HENRIQUE MENDES BESERRA

Leonardo.beserra@aluno.ufop.edu.br

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA UNIDADE SELETIVA DE LAVRA (SMU) E SEUS
IMPACTOS NOS INDICADORES DE PERDA E DILUIÇÃO EM UMA MINA DE
MINÉRIO DE FERRO**

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Ouro Preto – MG
2026



FOLHA DE APROVAÇÃO

Leonardo Henrique Mendes Beserra

Análise da variação da unidade seletiva de lavra (SMU) e seus Impactos nos Indicadores de Perda e Diluição em uma Mina de minério de Ferro

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

Aprovada em 03 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Adilson Curi - Universidade Federal de Ouro Preto
Eng. Brenda Campos - VALE

Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/03/2025



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/03/2026, às 17:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1070307** e o código CRC **11B8C741**.

Dedico este trabalho à memória de meu pai, que sempre foi minha inspiração
e me apoiou de forma incondicional

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meu caminho, proporcionar oportunidades e promover lições e reflexões.

À minha mãe, Maria Sirleide, e ao meu irmão, Paulo Henrique, pelo incentivo, pela educação e por não terem medido esforços em me apoiar.

Aos meus amigos da graduação, Pedro Soares e Rafael Palácio, pelos momentos de alegria.

Aos meus amigos Luiz Oliveira, Ramon Miranda, Thiago Santos e Brenda Campos, pelas valiosas ajudas e pelos ensinamentos diários.

Ao Professor Carlos Arroyo, pela orientação na elaboração deste trabalho.

À Vale S.A., pela disponibilização dos dados para este estudo.

À Deswik e seu programa Universidades, pelo suporte e recursos.

À UFOP, pelo ensino público de qualidade e pela oportunidade de aprender todos os dias.

*“Se enxerguei mais longe, foi porque me apoiei sobre os ombros de
gigantes.”*

Isaac Newton

RESUMO

A definição da Unidade Seletiva de Lavra (SMU) é um fator determinante no planejamento de mina, influenciando diretamente a aderência entre o planejado e o realizado ao conciliar a seletividade geológica com a exequibilidade da frota. Este trabalho avalia a variação da SMU e quantifica seus impactos nos indicadores de diluição planejada, perda de minério, teor médio e tonelagem, no contexto de um plano anual de lavra de uma mina de minério de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero. Utilizou-se um algoritmo de otimização fundamentado em uma matriz de penalidades, pré-definida para a mina estudada, para a tomada de decisão entre diluição e perda. A abordagem quantitativa consistiu na comparação de cenários com dimensões crescentes de SMU em relação ao modelo geológico de blocos original. Os resultados demonstram uma correlação direta entre o aumento da unidade seletiva e a degradação dos indicadores operacionais, com a diluição e a perda atingindo, respectivamente, os valores de 0,8% e 2,12% no cenário de menor seletividade. A análise litológica evidenciou que materiais de alto teor, como a hematita, são os mais sensíveis ao incremento da SMU devido às suas restrições espaciais, apresentando uma queda de recuperação para 90,9% na configuração de maior SMU. Concluiu-se que o cenário com SMU de dimensões de 15m x 15m x 10m representa o ótimo operacional para o depósito estudado, por equilibrar a preservação qualitativa da reserva mineral com a produtividade e a exequibilidade exigidas por uma frota de carga de grande porte.

Palavras-chave: Unidade Seletiva de Lavra (SMU). Diluição. Perda de minério. Planejamento de mina. Minério de ferro.

ABSTRACT

The definition of the Selective Mining Unit (SMU) is a determining factor in mine planning, directly influencing the reconciliation between planned and actual results by balancing geological selectivity with fleet operational operability. This study evaluates SMU variation and quantifies its impacts on planned dilution, ore loss, average grade, and tonnage indicators within the context of an annual mining plan for an iron ore mine located in the Iron Quadrangle (*Quadrilátero Ferrífero*). An optimization algorithm based on a penalty matrix, previously established for the studied mine, was employed for decision-making regarding the trade-off between dilution and loss. The quantitative approach involved comparing scenarios with increasing SMU dimensions against the original geological block model. The results demonstrate a direct correlation between the increase in the selective unit and the degradation of operational indicators, with dilution and loss reaching values of 0.8% and 2.12%, respectively, in the lowest selectivity scenario. Lithological analysis showed that high-grade materials, such as hematite, are the most sensitive to SMU increments due to their spatial constraints, exhibiting a recovery drop to 90.9% in the largest SMU configuration. It was concluded that the 15m x 15m x 10m SMU scenario represents the operational optimum for the deposit, as it balances the qualitative preservation of mineral reserves with the productivity and feasibility required by a large-scale loading fleet.

Keywords: Selective Mining Unit (SMU). Dilution. Ore loss. Mine planning. Iron Ore

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Lavra por bancadas.....	18
Figura 2 - Geometria das bancadas	20
Figura 3 - Tipos de diluição	25
Figura 4 - Diluição Interna e Diluição Externa	27
Figura 5 - Diluição externa lateral.....	28
Figura 6 - Influência do ângulo de talude na diluição	29
Figura 7 - Prismas de perda e diluição	29
Figura 8 - Sólidos de lavra contemplando perda e diluição planejada	32
Figura 9 - Representação do modelo de blocos.....	33
Figura 10 - Diluição e perda de minério por largura mínima de lavra	36
Figura 11 - Efeito do aumento da largura mínima de lavra	37
Figura 12 - Diagrama dos indicadores de reconciliação.....	40
Figura 13 - Fluxograma metodológico.....	42
Figura 14 - Modelo de blocos	43
Figura 15 - Sólidos do plano anual de lavra	44
Figura 16 - Matriz de Penalidades.....	50
Figura 17 - Esquema de incorporação na decisão por penalidade	51
Figura 18 - Resultados da otimização	52
Figura 19 - Diluição e perda planejadas.....	53
Figura 20 - Curvas de diluição e perda planejada por SMU	57
Figura 21 - Variação percentual de litologia por SMU	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de lavra a céu aberto	18
Tabela 2 - Comparativo entre tipos de planejamento	22
Tabela 3 - SMU mínimo para os equipamentos de carga	45
Tabela 4 - Cenários estudados	46
Tabela 5 – Resultados Diluição e Perda planejadas	55
Tabela 6 - Percentual de litologia relativa ao cenário base	58
Tabela 7 - Teor médio de Ferro por litologia e cenário.....	60
Tabela 8 - Análise Incremental entre cenários	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CG – Canga

EF – Estéril Franco

EFF – Estéril de Formação Ferrífera

HC – Hematita Compacta

HCT – Hematita Contaminada

HF – Hematita Friável

HM – Hematita

HMN – Hematita Manganesífera

IA – Índice de Aderência

IC – Índice de Comprimento

ICO – Itabirito Compacto

ICT – Itabirito Contaminado

IE – Índice de Efetividade de Lavra

IF – Itabirito Friável

IFR – Itabirito Friável Rico

IMN – Itabirito Manganesífero

ITA – Itabirito

ITAR – Itabirito Rico

KPI – *Key Performance Indicator*

LOM – *Life of Mine*

PNR – Planejado e não realizado

PR – Planejado e realizado

REM – Relação Estéril/Minério

RNP – Realizado e não planejado

RO – Rolado

ROM – *Run-of-mine*

SMU – *Selective Mining Unit*

VPL – Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Formulação do Problema	14
1.2	Justificativa.....	15
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Lavra a céu aberto	17
2.2	Planejamento de Mina.....	21
2.2.1	Horizontes de Planejamento	21
2.2.2	Planejamento de Longo Prazo.....	22
2.2.3	Planejamento de Médio Prazo	23
2.2.4	Planejamento de Curto Prazo	23
2.3	Diluição	24
2.3.1	Classificação da Diluição	25
2.3.2	Controle de diluição na SMU	31
2.4	Modelo de blocos	33
2.5	Unidade Seletiva de Lavra	35
2.5.1	Definição do tamanho mínimo	38
2.6	Reconciliação.....	39
2.6.1	Indicadores chave de desempenho	39
3	METODOLOGIA.....	42
3.1	Caracterização dos dados e ferramentas.....	42
3.2	Definição dos Cenários	44
3.3	Configuração e Parametrização do <i>Software</i>	46
3.3.1	Agrupamento litológico	47
3.3.2	Direção de Otimização.....	48
3.3.3	Dimensões da SMU	49
3.3.4	Matriz de Penalidades	49
3.4	Geração dos cenários	51
3.5	Cálculo de Diluição, Perda e Análise dos Dados	52
3.5.1	Equacionamento dos indicadores	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	Consolidação dos dados	55

4.2	Análise de Tonelagem de Minério.....	56
4.3	Análise de Perda e Diluição Planejadas.....	57
4.4	Análise dos Impactos por Litologia.....	58
4.4.1	Variação dos Teores de Ferro	59
4.5	Análise Incremental e Razão Perda/Diluição	60
4.6	Definição do Cenário Ótimo	61
5	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

O planejamento de mina compreende a quantificação de reservas e o sequenciamento de lavra, visando atingir os objetivos de produção, com eficiência econômica e operacional. Dessa forma, o processo busca maximizar o aproveitamento econômico dos recursos minerais naturais exauríveis e não naturais (Curi, 2014). Nesse contexto, a transformação do modelo geológico (construído para estimar recursos *in situ*) em um plano de lavra (que representa o material efetivamente recuperável) é uma das etapas mais críticas do processo mineiro. O parâmetro central que rege essa transformação é a Unidade Seletiva de Lavra ou *Selective Mining Unit* (SMU).

A SMU é definida como o menor volume de material que pode ser classificado individualmente como minério ou estéril (Sinclair e Blackwell, 2002). Para determinar o tamanho ótimo desta unidade, devem ser levados em consideração diversos fatores que, segundo Leuangthong et al. (2003) incluem o porte dos equipamentos de lavra, o método de lavra a ser utilizado, a direção de avanço da lavra e o ambiente deposicional do corpo mineralizado. Nessa perspectiva, a definição inadequada das dimensões da SMU pode implicar discrepâncias entre o planejado e o executado: tamanhos muito pequenos podem ser inexecutáveis operacionalmente, enquanto tamanhos muito grandes incorporam diluição excessiva e perda de minério.

O presente trabalho desenvolve um estudo de caso em uma mina de minério de ferro da companhia Vale S.A., situada no Quadrilátero Ferrífero, cujo contexto geológico é caracterizado por contatos entre itabiritos, cangas, hematitas e materiais estéreis. A análise concentra-se no Plano Anual de Lavra, etapa crucial responsável por traduzir as metas estratégicas em planos operacionais exequíveis. Nesse viés, a adequação de polígonos à realidade da frota minimiza desvios de recuperação mineral na ponta da cadeia, visto que é no curto prazo que a definição precisa da Unidade Seletiva de Lavra (SMU) se torna vital para assegurar a aderência entre o planejado e o executado, ao conciliar seletividade geológica e factibilidade operacional. Assim, a pesquisa propõe analisar cenários que evidenciem quantitativamente como a definição das dimensões da SMU impacta diretamente os indicadores de perda e diluição nos planos de lavra.

1.1 Formulação do Problema

A mina deste estudo situa-se na complexidade geológica do Quadrilátero Ferrífero, onde a variabilidade dos teores e os contatos entre diferentes tipos litológicos exigem uma certa seletividade de lavra. Rosière e Chemale Jr. (2000) descrevem que a gênese dessas formações ferríferas é produto de longos processos de metamorfismo e intemperismo. Essencialmente, em lavras de região de encosta, minérios intempéricos com particularidades também são aproveitados na mina analisada. No trabalho de Rosière e Chemale Jr. eles destacam a canga, o rolado e o itabirito chapinha, esses materiais de cobertura e intemperizados para serem seletivados, demandam um trabalho de planejamento de lavra mais restrito.

Do ponto de vista operacional, a mina atua com uma frota de grande porte, composta por pás carregadeiras Caterpillar 994K (largura da caçamba de 6,2m) e escavadeiras hidráulicas Komatsu PC2000 (largura da caçamba de 2,3m). O porte destes equipamentos cria uma restrição geométrica imediata, pois a largura de ataque da caçamba define a menor faixa selecionável de material. Tentar lavar seletivamente abaixo dessa largura resulta inevitavelmente em mistura de materiais.

A problemática consiste em definir a largura ótima da unidade seletiva de lavra. Para alcançar esse objetivo, segundo Rocca et al. (2007), torna-se necessária a elaboração de cenários de lavra operacionalmente exequíveis e que viabilizem a extração da reserva econômica. O equilíbrio consiste em maximizar as dimensões da SMU, visando a uma maior produtividade, com a minimização da diluição, preservando assim a qualidade do corpo mineralizado. Por conseguinte, é necessário analisar qual é o impacto da variação das dimensões da SMU na perda e diluição do Plano Anual de Lavra, em relação a um caso base de 5m x 5m x 10m (dimensões idênticas ao modelo geológico), quando aplicada a ferramenta *Dig Optimizer* do *software* Deswik, considerando as restrições da atual frota de carga.

1.2 Justificativa

Câmara (2013) defende que a diluição não deve ser tratada apenas como um "fator de ajuste" constante ou empírico, mas sim como uma variável quantificável que reflete a incapacidade técnica dos equipamentos de separarem perfeitamente o minério do estéril. Nesse sentido, ao dimensionar corretamente a unidade seletiva de lavra, perda e diluição tornam-se variáveis planejadas, conhecidas e minimizadas, já incorporadas no projeto de lavra, sobretudo em interfaces litológicas em que a unidade seletiva de lavra irá englobar mais de um bloco do modelo geológico.

Sob essa ótica, a definição de um tamanho de SMU otimizado atua preventivamente, protegendo o valor metálico do recurso mineral exaurível. Complementarmente, Leuangthong et al. (2003) demonstram que a determinação da dimensão ótima da SMU é fundamental para garantir que o modelo de blocos corresponda à produção real. Além disso, a simulação de cenários compatíveis com o porte dos equipamentos torna os planos mais operacionais e produtivos, fornecendo à operação de mina avanços exequíveis que mitigam misturas litológicas indesejadas na frente de lavra. Levar em consideração esses fatores é essencial para a economicidade da mina e no aproveitamento de reserva.

Ademais, o trabalho se justifica pela inovação metodológica, ao adotar a ferramenta do *software* de planejamento de mina Deswik, o *Dig Optimizer* (Deswik.DO), responsável por gerar polígonos de lavra otimizados, respeitando os contatos geológicos e a unidade mínima de lavra. Outrossim, possibilita configurar uma matriz de penalidades, que permite adotar pesos na decisão de "diluir ou perder" para determinados litotipos.

Diante disso, o foco deste trabalho consiste em analisar a variação de perda e diluição em função das alterações na geometria da unidade seletiva de lavra. A pesquisa investiga como diferentes dimensões de polígonos de lavra, quando confrontadas com a geologia local e os equipamentos de carga, afetam o resultado de um plano anual de lavra, buscando identificar a configuração que minimiza a contaminação e maximiza a recuperação do recurso mineral mantendo a produtividade ideal.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a variação da SMU e quantificar seus impactos nos indicadores de diluição, perda, teor médio e tonelagem de minério em um plano anual de lavra de uma mina de minério de ferro.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir a largura mínima de lavra para a frota da mina e estabelecer os cenários a serem avaliados.
- Configurar e parametrizar o otimizador Deswik *Dig Optimizer* para a mina em estudo.
- Aplicar uma Matriz de Penalidades (*Relative Loss Factor*) para ponderar economicamente a reclassificação de blocos nos contatos litológicos.
- Comparar três cenários de lavra com SMU de dimensões de 10m x 10m x 10m, 15m x 15m x 10m e 20m x 20m x 10m com um cenário base 5m x 5m x 10m.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lavra a céu aberto

A lavra compreende todo o conjunto de operações coordenadas voltadas ao aproveitamento industrial da jazida desde a extração de substâncias minerais economicamente úteis, até o seu beneficiamento (Código de Mineração, 1967). E também, corresponde à quarta fase da mineração, após prospecção, exploração e desenvolvimento. De acordo com Curi (2017), as operações mineiras convencionais são aquelas diretamente responsáveis pelo desmonte e movimentação de material, constituindo o ciclo básico de produção, sendo as principais:

- Perfuração: é a primeira etapa do ciclo em rochas não escaváveis. Consiste na abertura de furos na rocha com geometria e profundidade determinadas para alojar as cargas explosivas.
- Desmonte (com explosivos): é a deflagração que tem como objetivo desagregar a rocha *in situ*, a detonação fragmenta o material para ser carregado.
- Carregamento: é a operação de retirar o material da frente de lavra com o equipamento de carga e depositá-lo na unidade de transporte.
- Transporte: consiste no deslocamento do material carregado até seu destino final, seja o britador para minério ou as pilhas para o estéril.

Caracterizado por Curi (2017), define-se método de lavra a sistematização e a coordenação dessas operações unitárias com o objetivo de aproveitamento da jazida mineral. O método deve definir os ciclos de trabalho e a sequência espacial da lavra ao longo do tempo, viabilizando o melhor aproveitamento possível da reserva.

Conforme definido por Peroni (2007), a lavra a céu aberto engloba o conjunto de métodos de lavra onde as operações unitárias ocorrem em superfície, sem o confinamento característico do ambiente subterrâneo, ou seja, não são enclausuradas. Segundo Curi (2014), a aplicação da lavra a céu aberto é, em princípio, justificável sob os aspectos tecnológico e econômico quando o depósito se situa próximo à superfície ou a profundidades moderadas. Entretanto, o autor ressalta que, em razão dos significativos avanços na mecanização, minérios têm sido extraídos a profundidades cada vez maiores através dessa metodologia.

Observa-se pela Tabela 1 que esses métodos são classificados em duas grandes categorias, métodos de lavra a seco e lavra em presença de água, as quais se ramificam em técnicas específicas de acordo com a natureza do depósito e o mecanismo de desagregação do material (Curi, 2017).

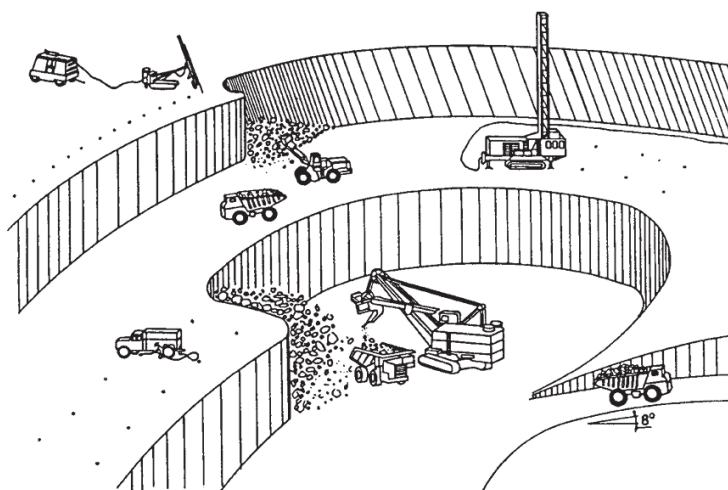
Tabela 1 - Métodos de lavra a céu aberto

Classe	Método
Lavra a seco	Lavra por bancadas
	Lavra em pedreiras
	Lavra por tiras
Lavra via úmida	Lavra hidráulica
	Dragagem
	Lavra química
	Extração por poço

Fonte: Autor

A metodologia operacional da lavra por bancadas, conforme Curi (2014), caracteriza-se pela extração descendente do corpo mineral (do topo para a base), segmentada em níveis (bancos). A Figura 1 mostra o desenvolvimento de uma cava com as operações unitárias na lavra por bancadas.

Figura 1 – Lavra por bancadas



Fonte: Hustrulid e Kuchta (2013).

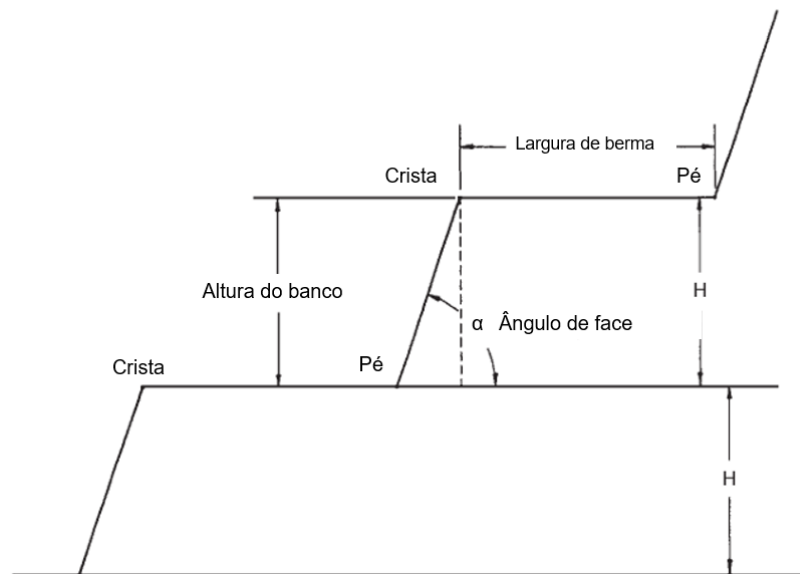
O desenvolvimento inicial exige a abertura de uma área ampla e da retirada da cobertura vegetal, o decapeamento, seguido da remoção do estéril de cobertura que garante o acesso ao minério. Segundo Curi (2017), a Relação estéril/minério (REM) expressa a quantidade de estéril que deve ser removida para se lavar uma unidade de minério. Este parâmetro é vital para o planejamento, pois define até que ponto a cava pode se aprofundar mantendo a lucratividade, a relação máxima admissível (REM Limite). No contexto operacional, a aderência à REM planejada depende diretamente da capacidade de separar minério e estéril na frente de lavra. Fatores como a geometria de corte e a dimensão da SMU influenciam essa seletividade: uma classificação incorreta dos blocos pode alterar os volumes de destino, impactando a relação estéril/minério efetiva realizada na mina.

A bancada constitui a unidade fundamental de exploração nas operações a céu aberto, é sobre ela que são executadas as operações unitárias cíclicas de perfuração, desmonte, carregamento e transporte. A definição da geometria dessas bancadas como altura, largura e ângulo de face é fundamental para a mina (Barros, 2021), e resulta da interação de fatores técnicos e econômicos. No livro de Curi (2014), ele destaca os principais fatores que influenciam a geometria das bancadas:

- características do depósito: volume, teor, distribuição etc.;
- seletividade na lavra e necessidade de blendagem;
- considerações sobre estabilidade dos taludes;
- custos operacionais em relação aos custos de investimento;
- escala de produção: toneladas de minério e estéril produzidas;
- relação estéril/minério;
- equipamentos utilizados nas operações de lavra: função básica da escala de produção.

A Figura 2 ilustra os principais parâmetros geométricos dos taludes das bancadas.

Figura 2 - Geometria das bancadas



Fonte: Adaptado de Hustrulid e Kuchta (2013).

É importante ressaltar que a geometria desses bancos tem relação direta com a unidade seletiva de lavra, cada pacote a ser lavrado deve ser compatível com a seleção de equipamentos. A altura de corte deve ser adequada ao alcance das escavadeiras para garantir exequibilidade e produtividade, visto que a operação de carregamento é momento que a seletividade planejada no escritório precisa ser executada pela máquina. Quando essa geometria não respeita as restrições da frota, o sistema torna-se suscetível a ineficiências operacionais que comprometem a aderência do plano, resultando em riscos à segurança e perda na seletividade da lavra.

Considerando que a lavra em bancadas é o método adotado na Mina deste estudo, a correta determinação dos parâmetros geométricos de escavação é vital para a viabilidade do projeto. Este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos nos indicadores de perda e diluição ao variar a largura da SMU e manter a altura de 10 metros dos bancos da mina, que corresponde também a altura dos blocos do modelo geológico e que corresponde às restrições de frota e premissas do plano.

2.2 Planejamento de Mina

Segundo Pinto e Dutra (2008), o planejamento de mina é o produto de uma série de estudos integrados, voltados a identificar a estratégia mais eficiente para o aproveitamento econômico de uma reserva mineral. O processo tem como objetivo central otimizar a recuperação do minério e maximizar o retorno financeiro do empreendimento. Para atingir tais metas, os planos de lavra definem o projeto e a geometria dos avanços, a qualidade do ROM a ser ofertado, o dimensionamento de frota, a movimentação de estéril e minério, e o sequenciamento da lavra.

Atualmente, a busca por essa otimização é sustentada pelo uso de modelos matemáticos e ferramentas computacionais avançadas. Esses *softwares* permitem a simulação de diversos cenários operacionais antes da tomada de decisão, considerando variáveis críticas como parâmetros operacionais, restrições geotécnicas, fatores econômicos e condições legais e ambientais.

Desse modo, é fundamental compreender o planejamento de lavra como um sistema dinâmico, sujeito a constantes revisões e adaptações (Amorim, 2016). Principalmente nos horizontes de curto prazo, à medida que as operações avançam e as condições reais da mina são reveladas, o modelo geológico é enriquecido com novas informações, a topografia real da mina é atualizada exigindo que os planos sejam reajustados continuamente para refletir a nova realidade.

2.2.1 Horizontes de Planejamento

A estrutura do planejamento é tradicionalmente dividida em níveis que correspondem a diferentes objetivos e horizontes temporais. Segundo Flores (2008), os três tipos de planejamento são: o planejamento estratégico, focado na visão de longo prazo e na viabilidade global do empreendimento; o planejamento tático, que traduz as metas estratégicas em planos de médio prazo; e o planejamento operacional, responsável pela execução e controle das atividades no curto prazo. A Tabela 2 resume as principais características e objetivos de cada um desses horizontes.

Tabela 2 - Comparativo entre tipos de planejamento

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

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

Corroborando essa classificação, Pinto e Dutra (2008) traduzem os três tipos de planejamento em fases dentro do planejamento de mina: o planejamento de longo prazo, o planejamento de médio prazo e o planejamento de curto prazo.

2.2.2 Planejamento de Longo Prazo

De acordo com Budke (2019), esta etapa se inicia pela conversão do depósito mineral em jazida, passando pela definição do modelo de blocos, estimativa de recursos e seleção do método de lavra. O processo envolve a elaboração de cenários baseados em premissas técnicas e econômicas, visando determinar a função benefício e o ritmo de produção anual que maximizem o retorno financeiro.

Segundo Campos (2017), a estrutura tradicional deste horizonte apoia-se em três etapas fundamentais: a determinação da cava ótima final, a definição dos avanços de lavra (*pushbacks*) e o sequenciamento de longo prazo. O produto final desta fase é o relatório de viabilidade, documento decisivo para a aprovação do desenvolvimento da mina, sua implementação e posterior operação até o fechamento.

O resultado desse processo é o plano de vida útil da mina, o *Life of Mine* (LOM), o que caracteriza este horizonte como o plano de exaustão da mina, sendo indispensável para calcular as reservas lavráveis e a relação estéril/minério global. Portanto, o plano de longo prazo constitui o alicerce sobre o qual os planos de médio

e curto prazo são elaborados, garantindo que as operações futuras mantenham a coerência com a estratégia econômica do negócio.

2.2.3 Planejamento de Médio Prazo

O planejamento de médio prazo atua como o elo para preencher a lacuna existente entre o planejamento de longo prazo e o de curto prazo. Budke (2019) ressalta que seu objetivo é assegurar a correta implementação dos projetos de cava, a disposição adequada das pilhas de estéril e o cumprimento do sequenciamento ótimo definido anteriormente.

O foco se volta para questões cruciais como a escala e a sequência de produção. De acordo com Amorim (2018), esse horizonte compreende geralmente o período entre 2 a 5 anos de produção, exigindo monitoramento do avanço da lavra para corrigir eventuais desvios. O médio prazo deve prever o sistema de produção e dimensionar os equipamentos necessários para atender às demandas do curto prazo. Sua finalidade última é manter a viabilidade operacional e garantir a exposição contínua de minério, assegurando a fluidez das operações futuras.

2.2.4 Planejamento de Curto Prazo

O planejamento de curto prazo corresponde à etapa de operacionalização da estratégia, compreendendo geralmente o programa anual de produção, que é subdividido em planos mensais, semanais e diários. Segundo Amorim (2018), este horizonte tem como objetivo disponibilizar minério na alimentação das plantas dentro das especificações e assegurar a remoção do volume de estéril programado, mantendo as restrições geométricas impostas. Budke (2019) afirma que o plano operacional não se limita apenas a marcar avanços iniciais e finais; ele desenha a sequência de lavra evento a evento e define “como fazer”, atendendo padrões de segurança e qualidade. Os novos acessos e rampas devem ser operacionalizados com a realidade da mina, cada poligonal de desmonte de um banco deve ser desenhada e programada, as paradas de preventiva e corretivas de um equipamento torna-se um ponto de detalhamento dos planos e as praças de lavra precisam seguir

parâmetros geométricos como área de manobra dos caminhões e a definição do *grade* para drenagem das frentes de lavra. Essas minúcias resultam em planos dinâmicos, que se reajustam a possíveis impactos na alimentação da usina ou permitir a realocação ágil de recursos para outras frentes a fim de corrigir a rota e aproveitar oportunidades operacionais.

Neste horizonte de maior detalhamento a definição da unidade seletiva de lavra se torna relevante. Como o curto prazo lida diretamente com a instrução de lavra para a operação, a aderência entre o modelo planejado e o executado depende de uma SMU compatível com o porte dos equipamentos de carga. Esta monografia utilizou como horizonte de estudo os sólidos anuais de lavra, para observar impactos de diluição planejada e da recuperação de minério ao variar as dimensões da SMU, buscando identificar o ponto de equilíbrio de produtividade e seletividade

2.3 Diluição

Crawford (2004) define que a diluição é habitualmente caracterizada como a incorporação de estéril durante a lavra de minério. Essa contaminação, na prática, surge por diversas incertezas que desafiam a precisão operacional, que conforme Câmara (2013), envolve fatores como:

- Natureza dos contatos e limites do minério;
- Zonas de limite de cava;
- Tamanho e posição de bloco;
- Densidade amostral;
- Complexidade geológica;
- Seletividade da lavra, tamanho de equipamento;
- Método de lavra e tipo de desmonte de rocha, etc.

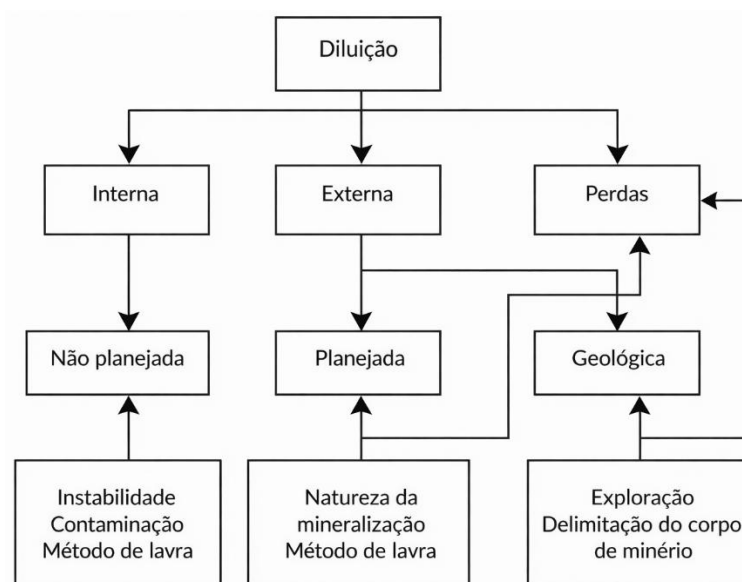
Villaescusa (1998) define que perda é todo material econômico que deixa de ser aproveitado devido a condições de lavra e operação. Como o material não recuperado deixado no interior das galerias, seja material desmontado ou mantido *in situ* como os pilares nas minas subterrâneas, ou não detonado adequadamente nos limites de lavra.

Diluições e perdas podem surgir durante todos os estágios da lavra, e a incorporação desse material indesejado implica consequências não só para mina como para o beneficiamento do minério. Conforme explica Ebrahimi (2013) *apud* Oliveira et al. (2022) a diluição provoca oscilações de teor e massa que aumentam os custos de tratamento e afetam diretamente o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto. Isso se justifica pelo fato de que um menor teor de alimentação compromete a recuperação mássica da planta, reduzindo sua capacidade efetiva e aumentando os custos de operação, consumo de reagentes e produção de rejeitos. Perdas e diluições excessivas maiores que as previstas, podem inviabilizar uma operação e negatar a tomada de decisão de um possível investimento na mineração.

2.3.1 Classificação da Diluição

De acordo com Rossi (2014), a diluição e a perda de minério são fenômenos intrinsecamente ligados, sendo que as referências à diluição na literatura frequentemente englobam ambos os casos. Segundo Villaescusa (1988), a diluição pode ser classificada em três categorias: diluição interna, diluição externa e perda de minério. A Figura 3 esquematiza essas classes.

Figura 3 - Tipos de diluição



Fonte: Adaptado de Câmara (2013).

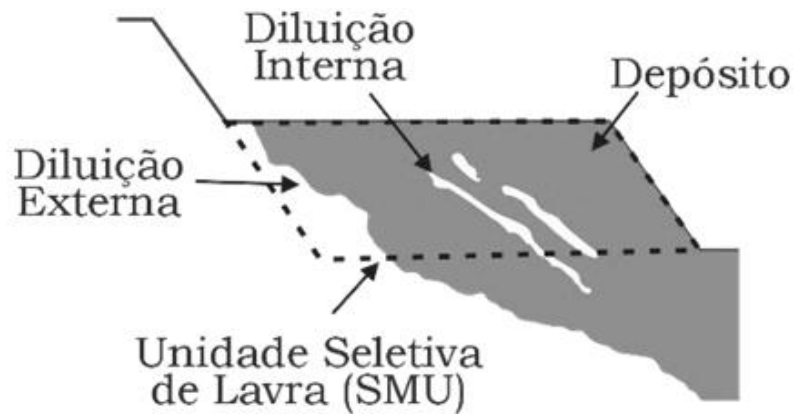
A diluição interna, segundo Câmara (2013), refere-se ao material de baixo teor ou estéril que se encontra contido dentro dos limites do bloco lavrado como minério. Esse fenômeno ocorre geralmente devido à dificuldade em delinear com precisão as fronteiras entre minério e estéril ou pela incapacidade técnica de separar esses materiais no momento da extração.

Sob uma ótica da geoestatística, apoiada em David e Toh (1989) *apud* Câmara (2013), a diluição interna é influenciada por fatores críticos como:

- O tamanho da *Selective Mining Unit* (SMU);
- A densidade amostral;
- Pequena escala de continuidade do minério.

Câmara (2013) ressalta que essa modalidade também é denominada "diluição *in situ*", pois representa a incapacidade intrínseca de seletividade do processo. Ela resulta da incorporação de uma massa de estéril não prevista no modelo original, na prática, isso resulta na mistura de litologias com alto e baixo teor dentro de um mesmo bloco, algo que se torna mais significativo em depósitos onde a mineralização é menos contínua. Além disso, Rossi (2014) ressalta que quanto maior o tamanho do bloco considerado, maior será a quantidade de mistura desses materiais, ou seja, maior a diluição interna. É uma consequência da estimativa de recursos em um volume diferente daquele dos dados originais de amostragem, o efeito suporte, forçado por restrições geométricas, e pelas limitações impostas pelo método e dos equipamentos de lavra. Assim, o estéril acaba sendo processado junto à massa de minério por não haver seletividade suficiente para sua segregação plena durante a operação. A Figura 4 demonstra a diluição interna dentro da unidade seletiva de lavra.

Figura 4 - Diluição Interna e Diluição Externa



Fonte: Oliveira et al. (2022)

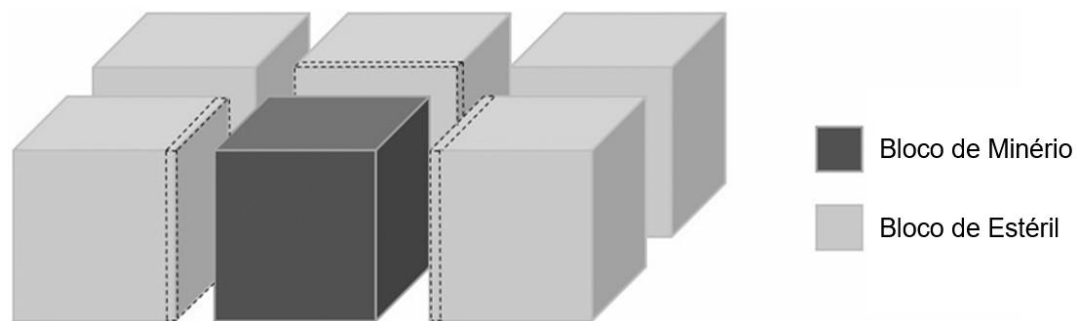
A diluição externa é descrita como uma função direta do método de lavra adotado e da regularidade do contato entre a rocha mineralizada e o estéril (Câmara, 2013). O grau de impacto dessa diluição depende substancialmente de quão abrupta é a transição de teores na zona de contato. Se essa transição for gradual, com a rocha da interface litológica minério-estéril apresentando teores semelhantes aos do minério, a incorporação de material durante a lavra terá um efeito menos nocivo do que em contatos abruptos, como no caso de estéreis francos.

Segundo Sinclair e Blackwell (2004), a diluição externa engloba fatores operacionais e geométricos cruciais, tais como a largura mínima de lavra, a diluição natural de contato e o *overbreak* (quebra excessiva) de material das rochas encaixantes nos limites da escavação.

Adicionalmente, Câmara (2013) destaca que a posição espacial e as dimensões do bloco de lavra são determinantes. A diluição pode ocorrer tanto lateralmente quanto verticalmente, influenciada pelos seis blocos contíguos ao alvo. Quando um bloco a ser minerado faz fronteira com blocos de estéril ou de baixo teor, a exploração limpa torna-se difícil, resultando na incorporação inevitável de parte do material vizinho, a diluição lateral é exemplificada pela Figura 5, em que um bloco de minério fica circundado horizontalmente por blocos de estéril na sua vizinhança. A diluição vertical se dá pelo contato dos blocos que estão acima e abaixo do bloco analisado, essa diluição muitas vezes pode ser minimizada quando a altura da bancada corresponde à altura do bloco do modelo geológico, mas ainda deve se

atentar a possíveis perdas de minério considerado que os planos de lavra são drenados e não mantêm uma cota fixa e constante ao longo das praças das frentes de lavra.

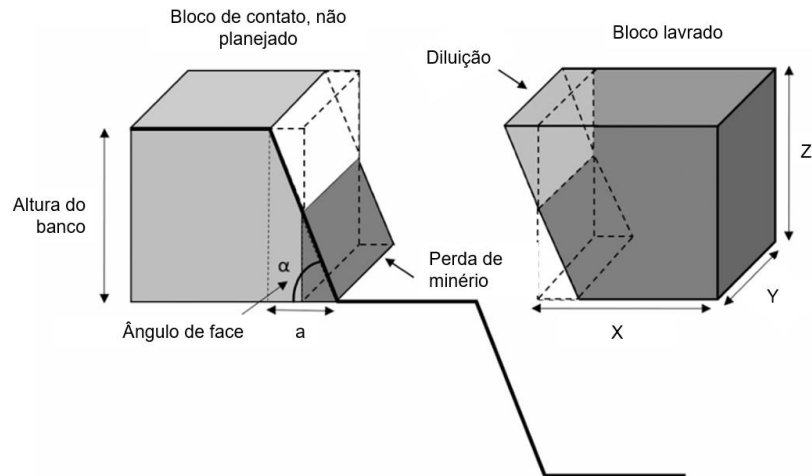
Figura 5 - Diluição externa lateral



Fonte: Adaptado de Câmara et al. (2018)

No desenho da cava e na geometria dos planos de lavra, restrições geométricas serão impostas, e diferente do modelo de blocos que entrega o depósito discretizado em blocos ortogonais e sem inclinação, parâmetros geotécnicos devem ser considerados, como por exemplo um determinado ângulo de talude da face dos bancos de lavra que confere a estabilidade dos taludes da mina. Neste caso, é possível quantificar essa diluição e perda de minério nos contatos laterais e calcular os teores diluídos, conforme demonstrado no trabalho de Câmara (2018) que calcula esses indicadores, a Figura 6 representa essa interação.

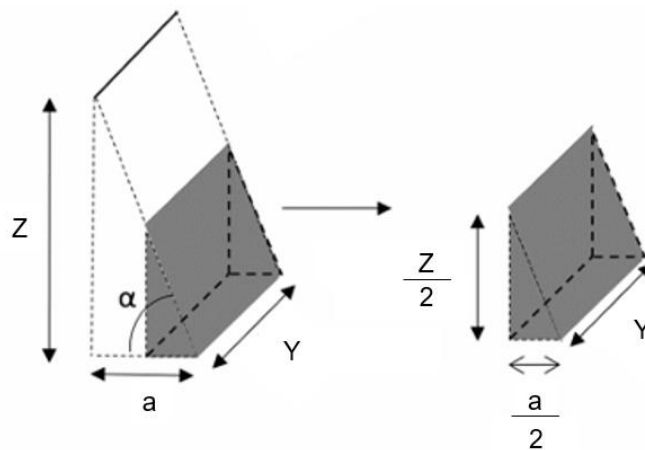
Figura 6 - Influência do ângulo de talude na diluição



Fonte: Adaptado de Câmara et al. (2018)

A Figura 7 esquematiza a trigonometria para o cálculo das dimensões desses prismas

Figura 7 - Prismas de perda e diluição



Fonte: Adaptado de Câmara et al. (2018)

O valor de a é dado pela equação 1:

$$a = \frac{Z}{\tan \alpha} \quad (1)$$

A equação 2, calcula a diluição (M_d), a massa do prisma triangular superior:

$$M_d = \frac{\frac{a}{2} \times \frac{Z}{2} \times Y \times \rho_e}{2} \quad (2)$$

A equação 3, calcula a perda (M_p), a massa do prisma triangular inferior:

$$M_p = \frac{\frac{a}{2} \times \frac{Z}{2} \times Y \times \rho_m}{2} \quad (3)$$

A massa do bloco de minério (M) será calculada pela equação 4:

$$M = X \times Y \times Z \times G1 \quad (4)$$

Então, é possível calcular a massa total e efetiva do material que será lavrado (M_t), conforme a equação 5:

$$M_t = M + M_d - M_p \quad (5)$$

E neste caso, o teor diluído (G_d) é dado pela equação 6

$$G_d = \frac{(M \times G1) + (M_d \times G2) - (M_p \times G1)}{M_t} \quad (6)$$

Para as equações 1,2,3,4,5 e 6, têm-se:

- X, Y, Z são as dimensões do bloco em seus respectivos eixos;
- α é o ângulo de talude;
- ρ_e é a densidade do estéril;
- ρ_m é a densidade do minério;
- $G1$ é o teor do bloco de minério;
- $G2$ é o teor do bloco estéril.

Ressalta-se que essa influência do ângulo de face da bancada ocorrerá apenas nos blocos localizados nas bordas dos planos de mina, que fazem contato com blocos não planejados, uma vez que os blocos inteiramente dentro do plano serão completamente extraídos.

A perda de minério é conceituada como a porção de material econômico que deixa de ser recuperada durante o processo da lavra devido a condicionantes de lavra

e limitações operacionais ou que foi lavrado e destinado como estéril, de forma equivocada. (Villaescusa, 1998). Por fim, a mitigação desses erros depende de fatores operacionais: é imprescindível que o equipamento selecionado esteja dimensionado adequadamente à geometria do depósito e que o operador mantenha controle total sobre o posicionamento da máquina durante a execução da lavra.

Villaescusa (1998) ainda destaca a importância de uma outra ocorrência chamada diluição geológica, que ocorre ainda nas fases de exploração e delineamento do corpo mineral. Esta modalidade refere-se à incorporação de estéril ou à perda de minério decorrentes das incertezas inerentes à modelagem geológica. Como o modelo geológico é construído a partir de informações limitadas (como os furos de sondagem), os limites estabelecidos do corpo de minério podem não coincidir com a realidade geológica exata do depósito, consequentemente, o modelo tende a excluir zonas de minério ou incluir zonas de estéril, certos fatores ainda podem agravar as estimativas, como a complexidade geológica do corpo a ser estudado e os *inputs* e configurações do algoritmo do *software* utilizado na modelagem geológica. No decorrer da lavra, com novos avanços, entende-se que essa diluição tende a reduzir, visto que o risco geológico cai à medida que novas informações são incorporadas no modelo de curto prazo (como o pó de perfuratriz dos furos de desmonte), consequentemente o modelo fica mais refinado e com melhor previsibilidade dos teores e dos contatos entre diferentes litologias.

2.3.2 Controle de diluição na SMU

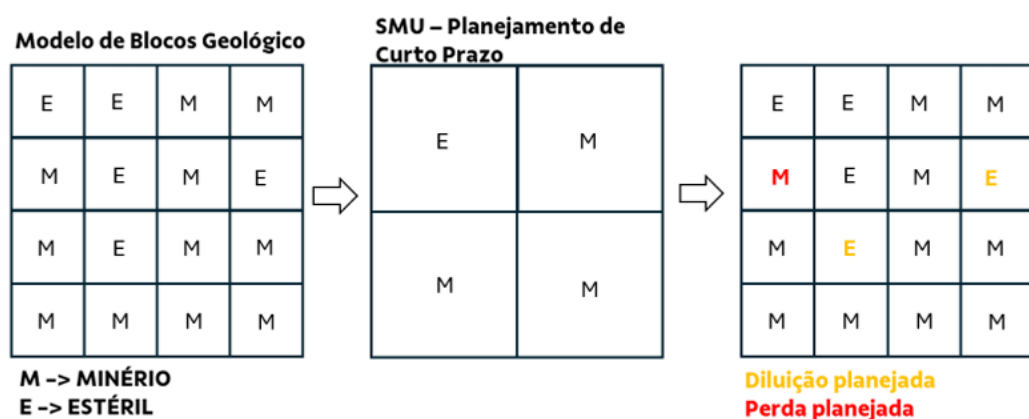
Campos et al. (2025) detalham o processo de incorporação da diluição dentro da unidade seletiva de lavra, durante o sequenciamento de curto prazo, a geometria dos avanços de lavra modela os sólidos que serão lavrados, gerados a partir da diferença entre a topografia planejada e a topografia atual. Esses sólidos são subdivididos nas Unidades Mínimas de Lavra (SMU) definida para a mina, respeitando as restrições do porte dos equipamentos da frota e a disposição espacial do corpo geológico.

O mecanismo de quantificação da diluição e da perda ocorre no cruzamento desses sólidos (SMU) com o modelo de blocos geológicos. De acordo com Campos

et al. (2025), a diluição planejada consiste na incorporação inevitável de blocos de estéril em sólidos de minério, penalizando o teor e aumentando contaminantes. Analogamente, a perda planejada se configura quando blocos de minério são incorporados em sólidos majoritariamente de estéril. Isso ocorre, porque em muitos casos as dimensões da SMU são maiores que as células do modelo geológico de blocos, portanto essa seletividade em discretizar cada bloco se torna inexecutável operacionalmente. É exatamente este tipo de diluição que será quantificada neste trabalho, quando a incorporação de blocos de estéril se torna inevitável no processo de otimização do tamanho mínimo de lavra.

Conforme demonstrado na Figura 8, os polígonos de lavra (SMU) englobam mais de um bloco do modelo geológico, recebendo uma classificação baseada na sua litologia majoritária, esse processo gera dois subprodutos inevitáveis: a perda e diluição planejadas.

Figura 8 - Sólidos de lavra contemplando perda e diluição planejada



Fonte: Campos et al. (2025)

Nesse viés, respeitando as premissas do plano de lavra, como massa total a ser movimentada, alimentação das usinas, qualidade do ROM ofertado, o sequenciador do Deswik destina cada sólido que será lavrado naquele período para composição do *blend* das usinas ou para pilha de estéril, levando em consideração os teores recalculados dos polígonos de lavra.

Por fim, Campos et al. (2025) destacam a importância do retorno dessa informação ao modelo geológico (processo conhecido como "carimbo"). Ao atribuir

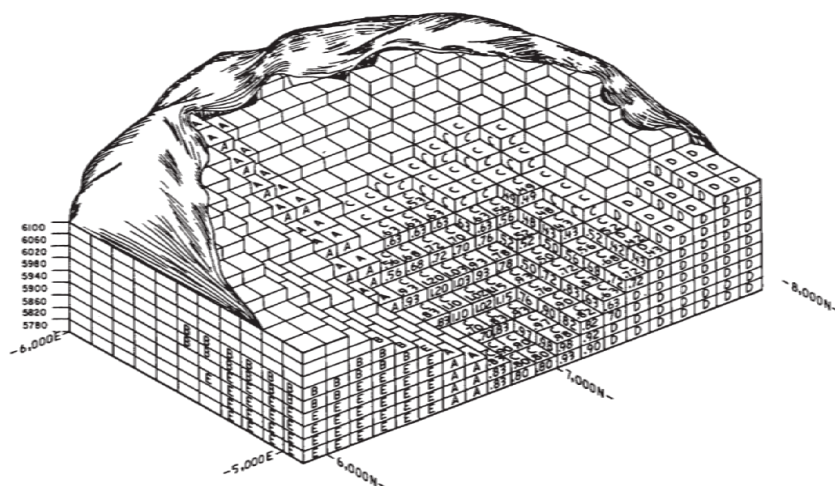
no modelo quais blocos foram planejados como minério ou estéril, independentemente de sua litologia original, a equipe de geologia consegue refinar a reconciliação e calibrar as curvas de teor-tonelagem para os próximos ciclos, transformando a diluição de uma variável desconhecida em um parâmetro de projeto controlado.

2.4 Modelo de blocos

Para que o planejamento de lavra possa ser processado computacionalmente, é necessário transformar a continuidade da natureza geológica em uma estrutura de dados discreta e regular, sob a ótica de Hustrulid e Kuchta (2013) para utilizar os métodos e algoritmos de estimativa de reservas, é essencial visualizar o depósito como um conjunto de blocos. Conceituado por Rossi (2014), o modelo de blocos descreve volumes tridimensionais com paralelepípedos de tamanho (relativamente) pequeno, sendo a base para a vasta maioria das avaliações de depósitos minerais.

O modelo de blocos é uma ferramenta fundamental para a geologia e o planejamento de mina, ele interpreta e quantifica o depósito mineral, sendo utilizado em etapas cruciais, como a otimização de cava e a definição do sequenciamento de lavra. A Figura 9 é uma representação clássica do modelo de blocos geológico.

Figura 9 - Representação do modelo de blocos



Fonte: Hustrulid e Kuchta (2013).

Cada bloco do modelo atua como um repositório de informações, que armazena atributos vitais para a avaliação econômica da jazida, criação dos planos de lavra e *blending* para alimentação das usinas, alguns desses atributos incluem:

- Teores médios, concentração das substâncias de interesse e de seus contaminantes;
- Litologia majoritária do bloco, definida por uma chave de classificação de cada mina, que leva em consideração teores químicos e granulometria,
- Densidade média, fundamental para a conversão de volume para tonelagem;
- Recuperação Metalúrgica e parâmetros geometalúrgicos para previsibilidade e simulação do ROM nas usinas;
- Coordenadas Espaciais, um sistema de localização (normalmente representado pelos índices cartesianos I, J e K) referenciado no centroide do bloco em relação aos eixos X, Y e Z.

As litologias variam de mina para mina, de acordo com sua formação e complexidade geológica, já a estimativa do teor, é um dos atributos mais críticos deste modelo, é realizada através de técnicas matemáticas de estimativas aplicadas aos dados de sondagem. Como apontam Pinto e Dutra (2008), os métodos mais utilizados pela indústria mineral são a Geoestatística usando a Krigagem, o Inverso da Potência da Distância e o Método dos Polígonos.

A determinação das dimensões das células do modelo (X, Y e Z) é uma decisão estratégica que deve ponderar tanto a densidade da informação geológica quanto as restrições de engenharia. Para a dimensão vertical (Z), Hustrulid e Kuchta (1995) afirmam que a altura do bloco deve coincidir com a altura da bancada projetada para a lavra ou corresponder a um sub-múltiplo desta, facilitando o planejamento operacional.

Já para as dimensões laterais (X e Y), a escolha é fortemente influenciada pelo espaçamento da malha de sondagem. Rossi (2014) sugere como guia prático que o tamanho do bloco esteja entre 1/3 e 1/2 da distância média entre os furos. O autor alerta para um *trade-off* importante: blocos muito pequenos em relação à malha de dados geram uma suavização artificial do modelo, enquanto blocos excessivamente

grandes perdem a resolução necessária para a otimização de cava e o planejamento de curto prazo.

É crucial destacar que o tamanho do bloco no modelo geológico nem sempre é igual à unidade seletiva de lavra. Essa diferença geométrica deve ser analisada, quando a SMU é maior que a célula do modelo de blocos, é realizado um agrupamento desses blocos, consoante a Campos et al. (2025) e descrito no tópico 2.3.2 Controle de diluição na SMU, a fim de atingir o tamanho mínimo definido para a seletividade da lavra. Neste caso, os teores podem ser reponderados, as litologias recarimbadas e perda e diluição quantificadas, podendo ser incorporadas no próprio modelo. Quando a SMU for menor que a célula do modelo de blocos, entende-se que o bloco do modelo pode ser lavrado de forma seletiva, em termos de otimização, os softwares de planejamento de mina convencionalmente discretizam o bloco do modelo em blocos menores no tamanho da SMU para serem sequenciados, destaca-se que nem sempre essa divisão representa a realidade geológica do depósito e pode trazer discrepâncias do planejado para o realizado, principalmente nos contatos litológicos. Sob esse enfoque, neste trabalho os cenários simulados seguem SMU com dimensões maiores e múltiplas que a do modelo de blocos de 5m x 5m x 10m.

Nessa linha de raciocínio, a SMU conecta a estatística do modelo à realidade física e geológica da mina, se seu tamanho for mal dimensionado, a aderência entre o planejado e o realizado será comprometida, tema que será aprofundado na seção a seguir.

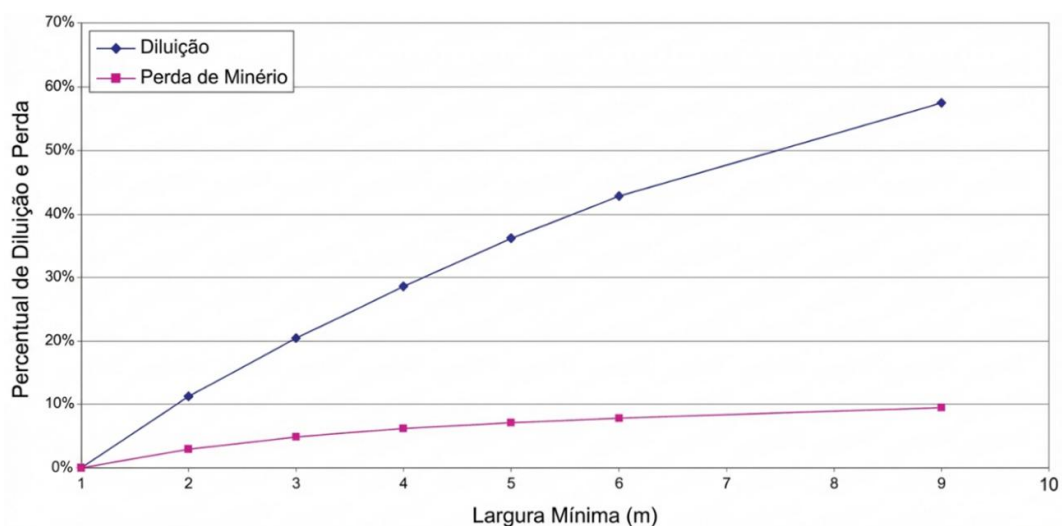
2.5 Unidade Seletiva de Lavra

A Unidade seletiva de lavra (também conhecida como unidade mínima de lavra) ou *Selective Mining Unit* (SMU) é tradicionalmente definida por Sinclair e Blackwell (2002) como o menor volume de material que pode ser classificado individualmente como minério ou estéril. Leuangthong et al. (2004) destacam que a realidade operacional é mais complexa, sendo impraticável selecionar e lavar uma unidade de minério em meio ao estéril, como também, discretizar e descartar uma unidade de estéril em meio ao minério. Em decorrência disso, Leuangthong et al. (2004) definem que a SMU é o tamanho da unidade de bloco que prevê corretamente

a tonelagem de minério, a tonelagem de estéril e o teor diluído que irá alimentar a planta. Rocca et al. (2007) reforçam que a definição incorreta da SMU é a principal causa de discrepâncias entre o modelo e a usina, especialmente em depósitos com zonas mineralizadas estreitas ou contatos irregulares, onde prevalece a diluição externa lateral. Os autores também destacam que esse tamanho depende de uma série de fatores diferentes que incluem o porte do equipamento de lavra, o método de lavra a ser utilizado, a direção de lavra e o ambiente deposicional do corpo de minério.

O trabalho de otimização do tamanho da SMU é fundamental, de acordo com Rocca et al. (2007), esse exercício se configura como um “*trade-off*”, entre a eficiência mecânica da frota e a recuperação efetiva de minério. A balança consiste em equilibrar a maximização das dimensões da SMU, visando uma maior produtividade dos equipamentos de carga e minimizar as diluições interna e externa, preservando assim a qualidade da reserva. A Figura 10 do trabalho de Rocca et al. (2007) mostra o aumento de perda e diluição com o aumento da largura mínima da SMU.

Figura 10 - Diluição e perda de minério por largura mínima de lavra



Fonte: Adaptado de Rocca et al. (2007)

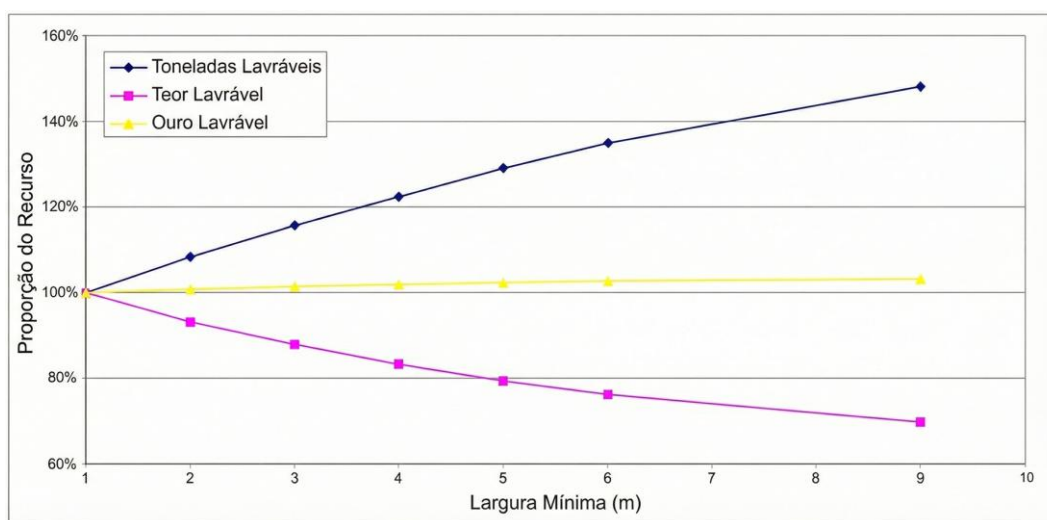
A seletividade da lavra através de uma SMU pequena, resulta em prós e contras. Unidades pequenas oferecem um maior inventário mineral, melhor qualidade do ROM e produto, e melhor utilização da usina; entretanto, acarreta em uma menor

produtividade dos equipamentos, aumento nos custos de perfuração e desmonte, e tornam operação de mina mais complexa e restrita.

Barros (2021) destaca que atingir as curvas ideais de teor e tonelagem recuperáveis de minério estimados é um desafio comum nos projetos mineiros. Dentre os fatores que governam o processo de estimativa dessas curvas, destaca-se o tamanho da SMU como um parâmetro fundamental (Reuwsaat et al., 2016).

Nesse viés, Jara et al. (2006), ao avaliarem um depósito de cobre, atribui o efeito suporte, ao aumentar o tamanho do suporte (de um bloco geológico pequeno para uma SMU grande), ocorre um decréscimo do teor médio global e um aumento da tonelagem de minério. Tal fenômeno é observado pelas curvas da Figura 11 do trabalho de Rocca et al. (2007) aumentar a largura mínima eleva a tonelagem de minério lavrável, mas reduz o teor médio (devido a diluição do estéril no minério), a quantidade de Ouro (metal contido) permanece relativamente constante (apenas espalhada em mais massa). Entretanto, é necessário destacar que este fenômeno ocorre para este estudo específico, e não é uma regra geral para todas as *commodities*, como a perda de minério do ouro era inviável economicamente, ao gerar os polígonos de lavra foi preferível diluir e absorver estéril nas usinas a perder minério.

Figura 11 - Efeito do aumento da largura mínima de lavra



Fonte: Adaptado de Rocca et al. (2007)

2.5.1 Definição do tamanho mínimo

As dimensões da unidade mínima de lavra variam conforme as especificidades de cada mina, sendo função direta da frota de equipamentos e da altura das bancadas. Na prática, a SMU representa a resolução efetiva da lavra, exigindo que os planos de produção sejam operacionalmente exequíveis, visto que qualquer heterogeneidade geológica inferior à SMU será ignorada pelo equipamento de carga, resultando inevitavelmente em mistura de materiais. Adicionalmente, a largura da caçamba dos equipamentos de carga impõe uma restrição geométrica instantânea às dimensões laterais da SMU. Nesse contexto, Jara et al. (2006) destacam outros fatores críticos, como a capacidade de manobra dos equipamentos, o ângulo de repouso do material e a disponibilidade de informações para suportar estimativas de teor em curto alcance. Portanto, a definição da SMU deve ser encarada como uma decisão estratégica de engenharia, essencial para garantir que o planejamento de curto prazo seja aderente à realidade operacional.

Segundo Barros (2021), em minas a céu aberto, a dimensão vertical da SMU corresponde, via de regra, à altura da bancada, admitindo-se variações operacionais como os casos de banco duplo ou meia bancada. Já as dimensões laterais são condicionadas pela largura mínima necessária para a atuação do equipamento de carga. Para parametrizar essa relação em cenários de lavra seletiva, Rocca et al. (2007) propõem critérios de compatibilização entre a unidade de lavra e caçamba do equipamento de carga:

- A largura da caçamba do (maior) equipamento de carregamento deve ser inferior a 75% da menor dimensão da SMU;
- O volume da SMU deve ser no mínimo equivalente à capacidade de dois caminhões.

Esse último critério equivale a, aproximadamente, dez caçambas de escavadeira por bloco SMU ou, para blocos que atendem aos critérios de largura mínima de lavra, dois blocos adjacentes ao longo da direção de cinco caçambas por SMU poderiam ser lavrados.

2.6 Reconciliação

No contexto da indústria mineral, a reconciliação é definida como o processo comparativo entre uma estimativa presente no modelo, e uma medição efetiva, proveniente de levantamentos topográficos ou, no caso de teores, da produção oficial reportada pela usina de beneficiamento (Morley, 2003). Essa prática é essencial para a governança dos dados geológicos e mineiros, de acordo com Morley (2003), os objetivos fundamentais da reconciliação consistem em:

- Medir o desempenho da operação em comparação aos planos;
- Providenciar suporte aos cálculos de ativos;
- Validar as estimativas de teor e tonelagem;
- Fornecer indicadores chave de desempenho ou *Key Performance Indicator* (KPI)

Segundo Parker (2012), a reconciliação não serve apenas para conferir os números, mas atua como uma ferramenta vital de validação do modelo geológico, da qualidade da amostragem e da adequação das premissas de planejamento, incluindo a definição da SMU. Outrossim, Morley e Thompson (2006, *apud* Câmara, 2013), afirma que a aplicação sistemática do monitoramento via reconciliação é capaz de evidenciar inconsistências nas estimativas de teor e massa, bem como falhas na amostragem, nos métodos de lavra e no beneficiamento. Uma vez diagnosticados, esses desvios técnicos podem ser analisados para a implementação de medidas corretivas e melhorias no processo.

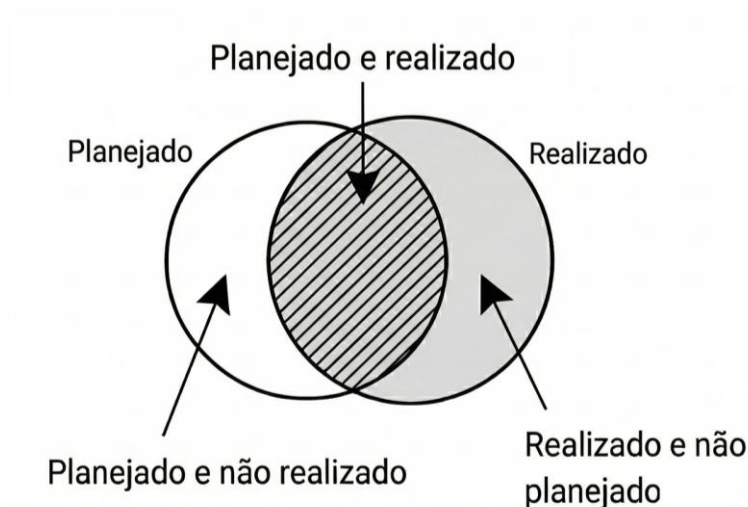
2.6.1 Indicadores chave de desempenho

Os indicadores chave de desempenho ou *Key Performance Indicators* (KPI) constituem métricas quantificáveis essenciais para o monitoramento de processos e o suporte à tomada de decisão estratégica. Nesse sentido, Câmara (2013) destaca que empresas de mineração comumente utilizam KPI para fornecer um exame de suas operações, aliado a isso suas variações com frequência revelam problemas na precisão de estimativas e na qualidade do projeto.

Os índices de controle da efetividade de lavra, são indicadores que possibilitam controlar a aderência e o cumprimento dos planos de lavra, dessa forma quantificar

os desvios do planejado para o realizado. A Figura 12 estrutura um perfil esquemático dos indicadores de desempenho.

Figura 12 - Diagrama dos indicadores de reconciliação



Fonte: Adaptado de Câmara (2013).

O Índice de Aderência (IA) mensura o percentual de material lavrado que estava dentro do plano e refere-se ao desvio da operação, ou seja, a disciplina da lavra em seguir as geometrias planejadas. O cálculo é obtido pela divisão entre a massa planejada e realizada (PR) pela massa total realizado no período, ou seja, o somatório da massa planejada e realizada (PR) com a massa realizada e não planejada (RNP), conforme demonstra a equação 7:

$$IA = \frac{PR}{(PR + RNP)} \times 100 \quad (7)$$

O Índice de Cumprimento (IC) mensura quanto do total planejado foi, de fato, executado, assim sendo avalia a operacionalidade e a capacidade física de execução do plano. Matematicamente, é a razão entre a massa planejada e realizada (PR) pela massa total planejada no período, ou seja, o somatório da massa planejada e realizada (PR) com a massa planejada não realizada (PNR), conforme a equação 8:

$$IC = \frac{PR}{(PR + PNR)} \times 100 \quad (8)$$

O Índice de Efetividade de Lavra (IE), demonstra a eficácia geral do processo de lavra, pode ser calculado pela média aritmética do índice de aderência e do índice de cumprimento, conforme apresentado na Equação 9:

$$IE = \frac{(IA + IC)}{2} \quad (9)$$

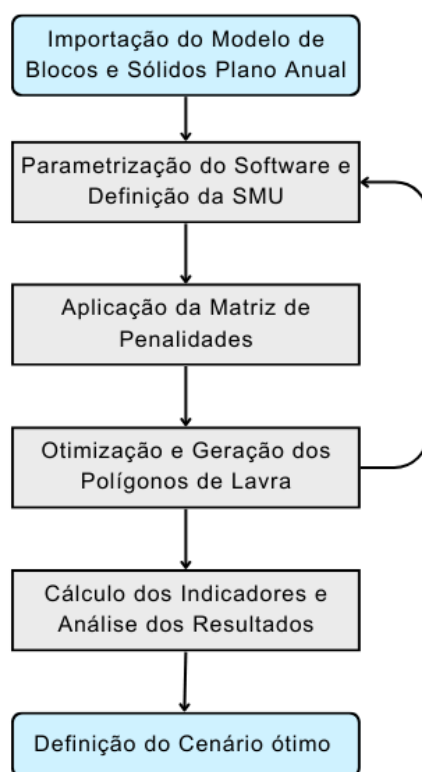
Para as equações 7, 8 e 9, temos:

- PR: Planejado e realizado;
- PNR: Planejado e não realizado.
- RNP: Realizado e não planejado;
- IA: Índice de Aderência;
- IC: Índice de Cumprimento;
- IE: Índice de Efetividade de Lavra.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se em uma abordagem experimental quantitativa, utilizando modelagem computacional para simular diferentes cenários de lavra. A metodologia foi estruturada para isolar a variável Unidade Seletiva de Lavra e quantificar seu impacto direto nos indicadores de diluição, recuperação de minério e teor de ferro. Para este estudo, seguiu-se o fluxo de trabalho diagramado na Figura 13, que sequencia as etapas da geração dos cenários e análise de dados.

Figura 13 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autor

3.1 Caracterização dos dados e ferramentas

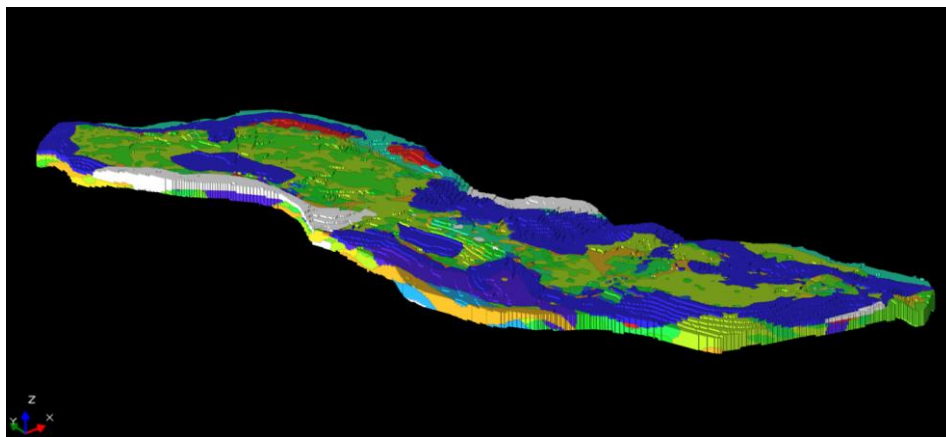
O estudo de caso utilizou dados reais de uma mina de minério de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Para o processamento dos

dados e geração dos cenários, optou-se pela utilização do *software* Deswik para a condução integral deste estudo, por ser uma ferramenta completa e com ampla consolidação na indústria mineral, especificamente os módulos:

- Deswik.CAD: para visualização gráfica e manipulação dos desenhos.
- Deswik *Dig Optimizer* (Deswik.DO): ferramenta algorítmica utilizada para a geração dos polígonos de lavra otimizados, com base nas dimensões da SMU e em uma matriz de decisão para perda e diluição.

A base de dados principal consistiu no modelo geológico de blocos, contendo as variáveis de teor, litologia, densidade e coordenadas dos blocos, com dimensões de células de 5m x 5m x 10m, visualizado na Figura 14, as cores dos blocos representam as litologias presentes no modelo.

Figura 14 - Modelo de blocos



Fonte: Autor

Além disso, importou-se os sólidos programados para o plano anual de lavra, representado pela Figura 15, horizonte chave responsável por traduzir as estratégias do médio prazo em geometrias operacionais do curto prazo por meio da SMU.

Figura 15 - Sólidos do plano anual de lavra



Fonte: Autor

3.2 Definição dos Cenários

Para definir os cenários a serem analisados, foi preciso estabelecer a SMU mínima para a mina, considerando as características operacionais de carga e transporte. Utilizou-se a metodologia proposta por Rocca et al. (2007), que propõe que o comprimento da caçamba do maior equipamento de carga deve ser menor que 75% da menor SMU. A frota da mina é composta por dois tipos de equipamentos de carga: a escavadeira hidráulica Komatsu PC2000 e a pá carregadeira Caterpillar 994k. A Equação 10 exprime o critério da largura da caçamba:

$$L_{\min} = \frac{L_{\text{caçamba}}}{0,75} \quad (10)$$

Onde:

- $L_{\min}$ = Largura mínima da SMU
- $L_{\text{caçamba}}$ = Largura da caçamba do equipamento de carga

A Tabela 3 foi montada utilizando equação 10 e a ficha técnica dos equipamentos.

Tabela 3 - SMU mínimo para os equipamentos de carga

Equipamento de Carga	Largura da Caçamba (m)	Volume da Caçamba (m³)	Menor aresta SMU (m)
Komatsu PC2000	2,3	12	3,01
CAT994K	6,24	19,1 a 24,5	8,32

Fonte: Autor

O cenário de referência (5m x 5m) não atende a este critério (5,0m < 8,32m), tornando a operação da CAT 994K inviável para essa seletividade. O primeiro cenário tecnicamente exequível para esta carregadeira é o de 10m x 10m.

Por conseguinte, Rocca et al. (2007) também definem que o volume da SMU deve ser o mínimo equivalente à capacidade de dois caminhões. Considerando que a frota de transporte da mina é composta pelo CAT789 com carga útil nominal de 193 toneladas e volume coroadado (SAE 2:1) estimado em 143m³, a equação 11 define:

$$V_{\min} = 2 \times V_{\text{caminhão}} \quad (11)$$

Onde:

- $V_{\min}$ = Volume mínimo da SMU
- $V_{\text{caminhão}}$ = Volume estimado da carga do caminhão (*Heaped Capacity*)

Neste raciocínio, o volume mínimo da SMU deve ser de 286 m³, mantendo a altura da SMU de 10m (altura da bancada), o cenário base 5m x 5m x 10m não atende este critério uma vez que a menor unidade teria um volume de 250 m³. O próximo cenário múltiplo é a SMU com dimensões de 10m x 10m x 10m, resultando em um volume de 1000 m³, que atende ao critério, comportando aproximadamente 7 cargas

de caminhão. A Tabela 4 organiza os cenários que foram otimizados e analisados neste trabalho.

Tabela 4 - Cenários estudados

Cenários	Largura (m)	Comprimento (m)	Altura (m)
	X	Y	Z
1	5	5	10
2	10	10	10
3	15	15	10
4	20	20	10

Fonte: Autor

O cenário 1 é o caso base de referência e foi adotado exclusivamente como um caso teórico de máxima seletividade, uma vez que suas dimensões coincidem com as células do modelo geológico. Esse cenário não incorpora diluição planejada e serve como base comparativa dos outros cenários, mas não atende às restrições operacionais impostas pela frota da mina. O cenário 2 representa a SMU mínima operacional, que seria possível fisicamente a lavra seletiva dos polígonos. Já os cenários 3 e 4 representam casos de ganho de produtividade e continuidade operacional, porém com progressiva perda de seletividade e aumento de diluição.

Para assegurar a comparabilidade entre os cenários analisados, mantiveram-se fixos ao longo do estudo o modelo geológico de blocos, os sólidos do plano anual de lavra, a frota de equipamentos de carga e transporte, a altura da bancada operacional (10m) e a matriz de penalidades adotada no processo de otimização. As únicas variáveis consideradas no estudo foram as dimensões laterais da SMU (largura e comprimento), permitindo isolar e quantificar os impactos da variação do tamanho sobre os indicadores de perda, diluição, teor médio e tonelagem de minério

3.3 Configuração e Parametrização do *Software*

Para a execução das simulações, utilizou-se o módulo do Deswik *Dig Optimizer*, responsável por gerar os polígonos de lavra, respeitando a SMU

estabelecida. A parametrização do algoritmo foi baseada em restrições operacionais da mina, de forma a garantir produtividade e aproveitamento da reserva, e também fatores geológicos econômicos.

3.3.1 Agrupamento litológico

Dada a diversidade litológica presente no modelo geológico original, foi necessário um agrupamento das litologias como etapa preliminar à otimização. Essa nova legenda simplifica a matriz de decisão do algoritmo e confere maior exequibilidade operacional aos planos e sequenciamento. O critério de agrupamento baseou-se na similaridade de parâmetros físico-químicos, tais como teores de ferro, distribuição granulométrica e materiais com comportamentos metalúrgicos e valor econômico similares, respeitando a prévia segregação estabelecida pela chave de classificação do modelo original. O quadro 1 apresenta a lógica de conversão das litologias originais para as litologias agrupadas, criando uma nova legenda chamada “Oretype”, utilizada na otimização.

Quadro 1- Agrupamento das litologias

Material DO Oretype	Fórmula	Litologia Modelo Geológico
CG	Igual à	CG
		RO
HM	Igual à	HC
		HCT
		HF
		HMN
IF	Igual à	IF
ITAR	Igual à e Teor de Fe $\geq$ 48%	ICO
		ICT
		IFR
		IMN
ITA	Igual à e Teor de Fe $<$ 48%	ICO
		ICT
		IFR
		IMN
EF	Igual à	EF
EFF	Igual à e Teor de Fe $<$ Cutoff	IF
		ICO
		ICT
		IMN

Fonte: Autor

As siglas das litologias agrupadas são:

- CG – Canga
- HM – Hematita
- IF – Itabirito Friável
- ITAR – Itabirito Rico
- ITA – Itabirito
- EF – Estéril Franco
- EFF – Estéril de Formação Ferrífera

Para as litologias originais do modelo geológico:

- CG – Canga
- RO – Rolado
- HC – Hematita Compacta
- HCT – Hematita Contaminada
- HF – Hematita Friável
- HMN – Hematita Manganesífera
- IF – Itabirito Friável
- ICO – Itabirito Compacto
- ICT – Itabirito Contaminado
- IFR – Itabirito Friável Rico
- IMN – Itabirito Manganesífero
- EF – Estéril Franco

3.3.2 Direção de Otimização

A direção de otimização é a orientação que o software considera para gerar os polígonos de lavra: o eixo perpendicular à direção definida representa a largura (X), e o eixo longitudinal representa o comprimento (Y). Essa configuração é útil para minas que possuam uma direção preferencial da mineralização, uma direção que a anisotropia se estenda de forma significativa. Para este estudo, adotou-se a direção coincidente com o *strike* do modelo de blocos (Azimute 337°). Como as dimensões das SMUs foram projetadas para serem múltiplos inteiros dos blocos originais, ao

seguirem a mesma orientação, o processo ocorre por meio de um agrupamento direto de acordo com a largura mínima, sem a necessidade de discretização complexa das células ou rotação da malha.

3.3.3 Dimensões da SMU

Os valores mínimos de largura e comprimento da SMU foram definidos para o *software* nos campos X (largura) e Y (comprimento) da *minimum mining width*. Estes são os parâmetros que foram variados conforme os quatro cenários estabelecidos na Tabela 4. Também é possível definir um valor para o campo “*discretization*” definindo em quantas parcelas o modelo de blocos pode ser dividido para gerar as SMUs. Como neste estudo as SMUs são maiores e suas dimensões são valores múltiplos da célula do modelo de blocos, esta opção não foi utilizada.

Para dimensão vertical (Z), fixou-se à altura de 10 metros, correspondente à altura da bancada operacional (coincide com altura da célula do modelo de blocos).

3.3.4 Matriz de Penalidades

A Matriz de Penalidades ou *Relative Loss Factor* é a lógica do software para a decisão de como gerar os polígonos de lavra nos contatos litológicos, ao agrupar diferente materiais dentro do mesmo polígono. A matriz (i,j) define a penalidade econômica de enviar um bloco geológico do tipo i para um destino (polígono) do tipo j. A diagonal da matriz é zero (sem perda quando o destino é correto). Os valores fora da diagonal representam a penalidade de diluição e perda de minério, de certo modo, as preferências em destinar blocos de uma litologia para uma SMU de outra litologia.

A matriz deste estudo está representada pela Figura 16. Vale ressaltar que a matriz adotada é a de uso atual do processo e foi estabelecida em estudos anteriores da mina. Ela foi configurada equilibrando a economicidade do projeto, de forma a penalizar a incorporação de blocos de estéril em polígonos de minério (diluição), o que, conforme discutido anteriormente, reduziria o teor e aumentaria a tonelagem de

minério, mas isso só é verdade se o teor do bloco diluído ainda pagar os custos (for maior que o *Cutoff*).

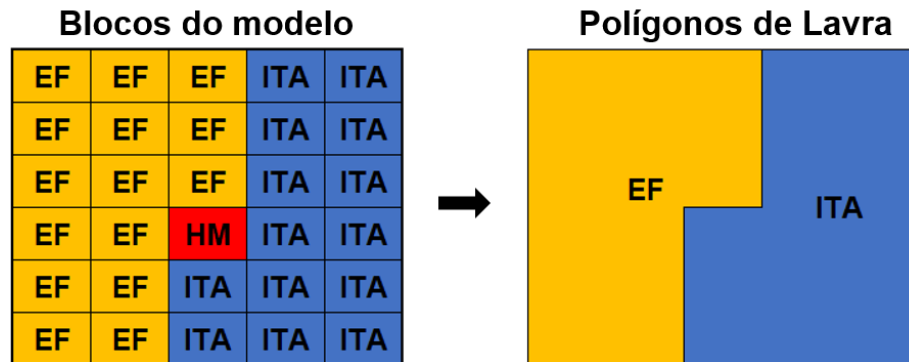
Figura 16 - Matriz de Penalidades

		Polígonos de Lavra						
Blocos do modelo		HM	CG	ITAR	ITA	IF	EFF	EF
	HM	0	1	1	1	4	5	5
	CG	1	0	2	2	2	3	2
	ITAR	2	2	0	3	4	4	4
	ITA	3	3	3	0	3	2	3
	IF	3	3	3	2	0	5	5
	EFF	4	4	4	4	4	0	1
	EF	6	6	6	3	6	1	0

Fonte: Autor

Com base na matriz apresentada, ao analisar a linha 1, a otimização sempre prefere incorporar um bloco de HM em um polígono de HM (Penalidade = 0). Mas caso este bloco esteja envolto de outras litologias, ele prefere incorporar em polígonos de CG, ITAR e ITA (Penalidade = 1), depois em um bloco de IF (Penalidade = 4), e por último, caso não tenha opção, em polígonos de estéril EFF e EF (Penalidade = 5). A Figura 17 exemplifica essa decisão, ao incorporar um bloco de HM que não poderia ser seletivado em um polígono de ITA e não no polígono de EF. Neste caso, ocorreu uma mistura de materiais, já que foi possível destinar a HM para um polígono de minério, então ela não foi perdida.

Figura 17 - Esquema de incorporação na decisão por penalidade



Fonte: Autor

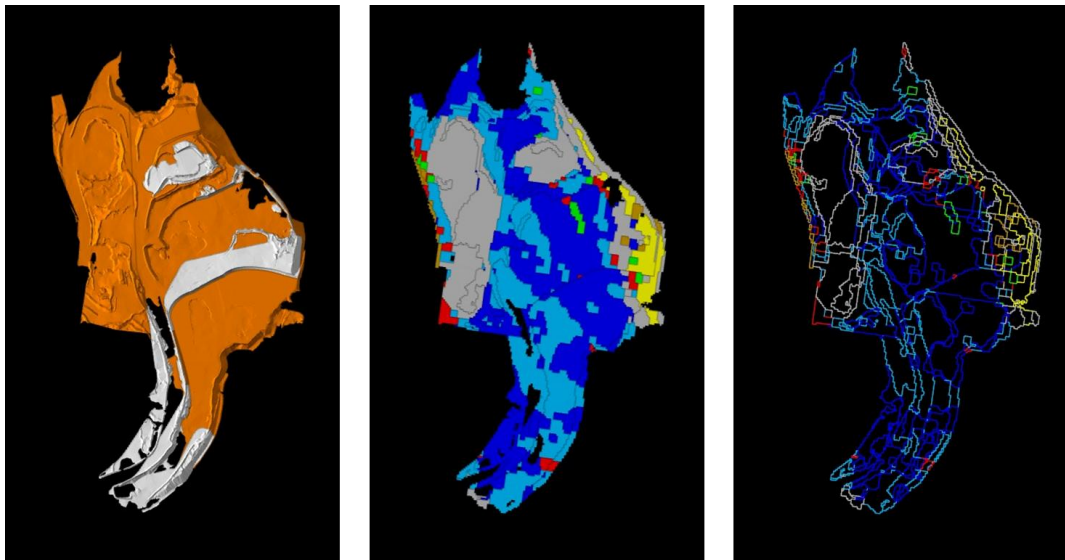
3.4 Geração dos cenários

A construção dos cenários seguiu um fluxo de processamento iterativo e estruturado dentro do *software* Deswik. Para cada uma das quatro configurações de SMU definidas, executou-se a seguinte rotina operacional:

- Importação dos sólidos programados para o Plano Anual de Lavra. Estas entidades foram o alvo da otimização, e serviram como “limite” de atuação do *software*, garantindo que a análise se restringisse às áreas efetivamente planejadas.
- Importação e manipulação do modelo de blocos de curto prazo de dimensões 5m x 5m x 10m, e com os atributos de teor e classificação litológica.
- Execução do Otimizador (*Dig Optimizer*): o algoritmo processou os sólidos bancada a bancada, agrupando os blocos do modelo e desenhando os polígonos ótimos que respeitavam simultaneamente a matriz de penalidades e a *minimum mining width* do respectivo cenário.
- Geração dos *Outputs*: o processamento gerou dois produtos a partir dos sólidos originais, as poligonais (linhas de contorno) e os sólidos tridimensionais resultantes da extrusão vertical. A Figura 18 compara os sólidos originais do plano anual e a geometria otimizada após a aplicação da SMU.

- Marcação do Modelo Geológico: o atributo *Oretype* é “carimbado” no modelo de blocos. Reclassificando a litologia indicando a qual polígono de SMU cada bloco pertence segundo aquele cenário específico.
- Validação Geométrica: realização de uma inspeção visual, para garantir que todos sólidos foram otimizados e verificar a existência de possíveis resíduos.

Figura 18 - Resultados da otimização



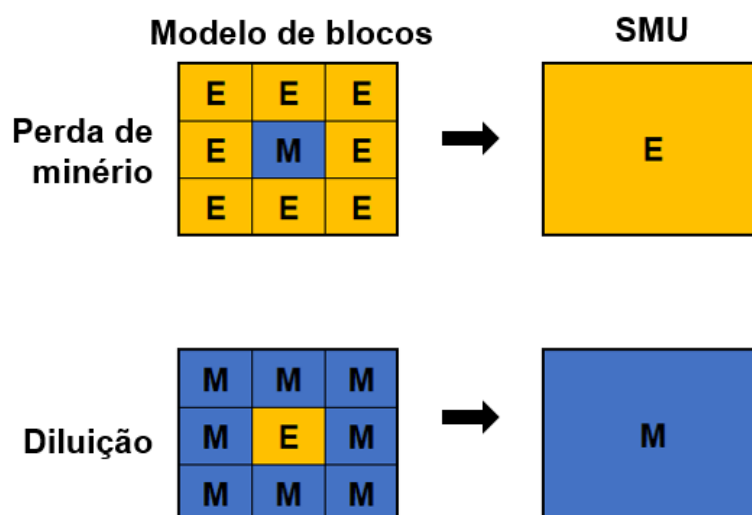
Fonte: Autor

3.5 Cálculo de Diluição, Perda e Análise dos Dados

A etapa final da metodologia consistiu na quantificação dos impactos através de uma “reconciliação planejada”. Adotando a abordagem proposta por Campos et al. (2025), o objetivo foi medir a diferença entre a “Geologia *in situ*” (representada pelo modelo de blocos) e a “Geometria Operacional” (definida pela SMU).

Dessa forma, qualquer bloco de estéril incorporado em uma poligonal de minério, foi calculado como diluição, enquanto qualquer bloco de minério incorporado em poligonais de estéril, foi calculado como perda de minério, esquematizado pela Figura 19.

Figura 19 - Diluição e perda planejadas



Fonte: Autor

Para quantificar os indicadores, realizou-se a cubagem dos sólidos originais do plano de lavra com a legenda de litologia agrupada do modelo de blocos original, contra a legenda das litologias atribuídas pelo otimizador.

Neste aspecto, vale mencionar que a diluição externa lateral foi incorporada na análise, uma vez que os sólidos do plano anual são desenhados já com um ângulo de talude nos limites, então as massas dos prismas calculadas conforme Equações 2 e 3 são computadas automaticamente na cubagem dos sólidos, e alguns casos, o sólido é a lavra de um banco completo. As diluições internas não planejadas e não previstas no modelo não foram quantificadas nas simulações, portanto não entraram no escopo deste trabalho.

3.5.1 Equacionamento dos indicadores

Para cada cenário, a Diluição Planejada foi calculada pela equação (12), que é a razão entre a massa total de estéril incluída dentro dos polígonos minério e a massa de minério aderente mais a massa de estéril diluindo ROM.

$$\text{Diluição}(\%) = \frac{Me_d}{Me_d + Mm_a} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

- Me_d : massa de estéril dentro de um polígono de minério
- Mm_a : massa de minério aderente

Por conseguinte, para cada cenário a perda de minério foi calculada pela equação (13), que é a razão entre a massa total de minério incluída dentro dos polígonos de estéril e a massa de minério aderente mais a massa de minério perdida.

$$\text{Perda}(\%) = \frac{Mm_p}{Mm_p + Mm_a} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

- Mm_p : massa de minério dentro de um polígono de estéril
- Mm_a : massa de minério aderente

Por fim, analisou-se o impacto no teor de ferro no minério e tonelagem de minério para cada cenário. As variações foram calculadas com base na diferença relativa entre os resultados de cada cenário e os valores de referência do cenário base.

Ressalta-se que os indicadores avaliados correspondem a valores planejados, resultantes da interação entre o modelo geológico de curto prazo e a resolução da SMU em cada cenário, refletindo, portanto, os efeitos geométricos da sua definição no planejamento de curto prazo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia de otimização da Unidade Seletiva de Lavra (SMU) nos quatro cenários propostos. A análise foca na quantificação dos impactos da perda de seletividade sobre a recuperação da jazida, o que evidencia a correlação direta entre o aumento das dimensões geométricas da SMU e a degradação dos indicadores operacionais e de seletividade relativa.

4.1 Consolidação dos dados

A Tabela 5 apresenta os principais indicadores calculados. O cenário base (5m x 5m x 10m) representa a máxima seletividade teórica, e serve como referência de recuperação de minério (100%) e diluição planejada nula (0%). A quantificação da perda de minério e da diluição planejada foi realizada por meio da aplicação das Equações 12 e 13 para todos os cenários analisados.

Tabela 5 – Resultados Diluição e Perda planejadas

Cenário	Diluição Planejada	Perda Planejada	Variação Tonelagem Minério	Variação Teor de Fe
5x5x10	0%	0%	-	-
10x10x10	0,34%	0,35%	-0,01%	-0,23%
15x15x10	0,63%	1,33%	-0,71%	-0,46%
20x20x10	0,76%	2,12%	-1,36%	-0,76%

Fonte: Autor

Vale ressaltar que este estudo foi realizado sobre um plano anual de lavra, que contemplava movimentação total na escala de dezenas de milhões de toneladas. Por

isso, pequenas variações percentuais do teor médio de ferro assumem relevância crítica em termos de metal contido. Ademais, a redução de 1,36% na massa de minério no cenário 20m x 20m, em valores absolutos, representa um volume significativo de recurso que deixa de gerar caixa e reduz a vida útil da mina.

Matematicamente, a elevada tonelagem de minério aderente tende a "amortecer" os indicadores de perda e diluição, resultando em percentuais aparentemente baixos. No entanto, essa aparente sutileza numérica também não deve ser subestimada, já que em valores absolutos, representam uma massa significativa de estéril alimentando na planta e uma quantidade expressiva de minério sendo descartado.

4.2 Análise de Tonelagem de Minério

Ao analisar a tonelagem de minério, existe uma redução progressiva em relação ao Cenário Base, um fenômeno inverso à diluição: a massa de minério diminuiu conforme as dimensões da SMU aumentaram.

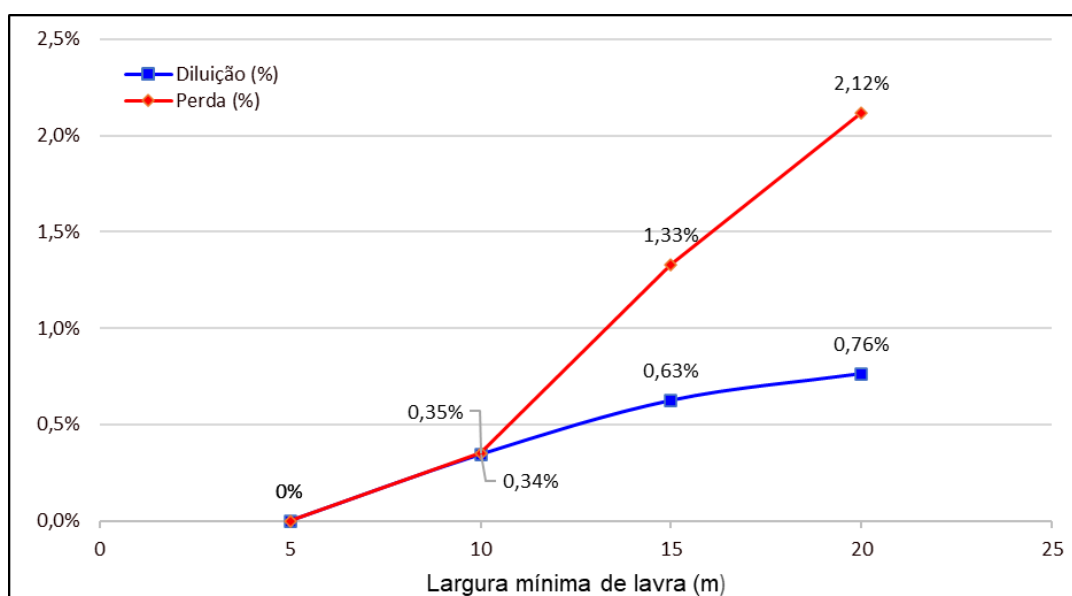
Este comportamento ocorre devido à configuração da Matriz de Penalidades utilizada no otimizador, que implica uma predominância da perda minério sobre a diluição. Como o custo atribuído à contaminação (envio de estéril para a planta) é alto, o algoritmo frente a grandes polígonos de lavra com minério e estéril, optou por classificar o bloco inteiro como estéril em vez de diluir o produto. O resultado é uma operação "mais limpa" (baixa diluição relativa), mas com maior descarte de minério (alta perda). Desse modo, ao aumentar a SMU, a contaminação do bloco inviabilizou seu processamento econômico, resultando no descarte de volumes significativos de minério para a pilha de estéril.

Simultaneamente, observou-se uma queda no teor médio de ferro. A parcela de massa que foi classificada como minério engloba dentro dos polígonos também uma parcela de estéril, diluição esta que impacta diretamente a qualidade média do produto.

4.3 Análise de Perda e Diluição Planejadas

A Figura 20 ilustra a sensibilidade dos indicadores de diluição e perda frente à variação da largura mínima de lavra, evidenciando como a seletividade operacional é afetada pela ampliação da SMU.

Figura 20 - Curvas de diluição e perda planejada por SMU



Fonte: Autor

Embora ambos os indicadores possuam correlação positiva com o aumento da unidade seletiva, eles possuem taxas de crescimento distintas. A perda de minério possui um comportamento de crescimento acelerado após o limiar de 10m, enquanto a diluição planejada apresenta um crescimento mais controlado e logarítmico, com uma tendência à estabilização. No cenário 20m x 20m essa assimetria fica clara, a perda atinge 2,12%, enquanto a diluição permanece abaixo de 0,8%. Essa divergência confirma a predominância da perda de minério sobre a diluição, devido às penalizações impostas ao algoritmo.

4.4 Análise dos Impactos por Litologia

A análise de recuperação por litologia, permitiu identificar como cada cenário de SMU impacta individualmente a reclassificação do otimizador. A Tabela 6 resume o percentual de cada litologia presente em cada cenário, relativos ao cenário base.

Tabela 6 - Percentual de litologia relativa ao cenário base

Cenário	HM	CG	ITAR	ITA	IF	EFF	EF
5x5	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10x10	100,5%	95,3%	98,4%	100,4%	99,0%	95,9%	99,4%
15x15	97,6%	85,0%	98,5%	99,4%	98,9%	94,4%	101,8%
20x20	90,9%	85,4%	92,6%	99,7%	98,8%	96,8%	103,6%

Fonte: Autor

Os dados revelam que o impacto da perda de seletividade é qualitativamente heterogêneo. Materiais massivos e contínuos, como os itabiritos (ITA e IF), apresentam uma estabilidade de recuperação superior a 98,8% mesmo em unidades de lavra de maiores dimensões. Esse comportamento é esperado devido à maior continuidade geológica e espacial desses litotipos nos depósitos de minério de ferro.

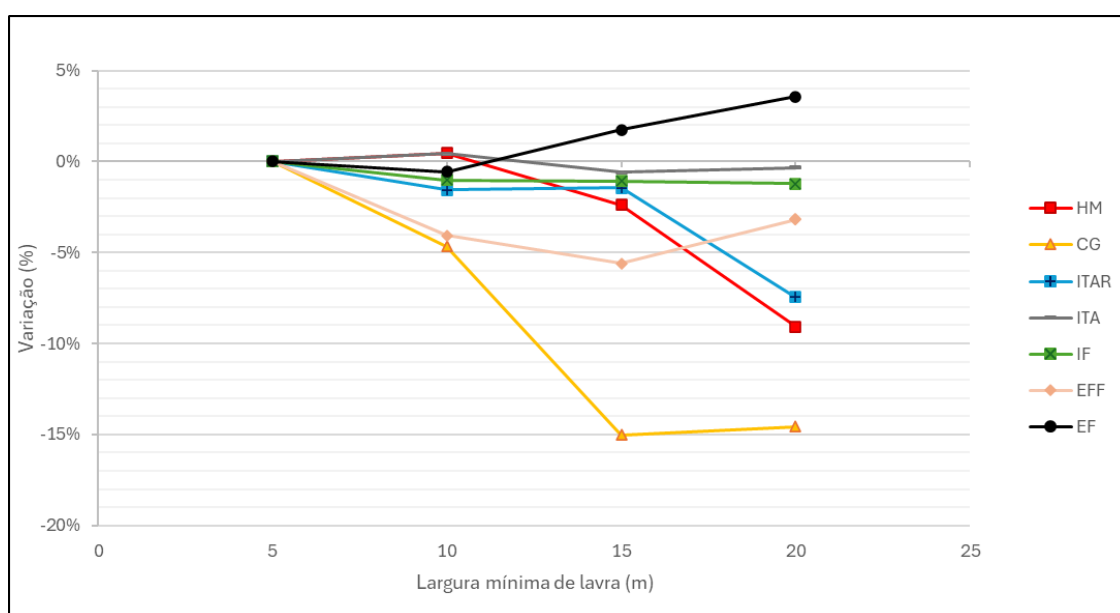
Em contrapartida, as Hematitas e Cangas, materiais de maior teor e valor agregado, demonstram uma maior sensibilidade ao aumento da SMU. No cenário de 20 metros, a recuperação de HM cai para 90,9% e a de CG cai para 85,4%. Como as passagens desses materiais possuem dimensões espaciais mais restritas, elas são "engolidas" por polígonos com outras litologias majoritárias, resultando em perda irreversível de minério nobre.

O cenário 10m x 10m apresenta valores ligeiramente superiores a 100% de recuperação de HM e ITA. Esse incremento indica a incorporação de diluição nos respectivos polígonos. Devido ao ajuste geométrico necessário para atingir a largura mínima de lavra, o otimizador capturou pequenas porções de materiais adjacentes

que o cenário base discretizava, resultando em sólidos com maior volume total, porém com teores reduzidos.

A Figura 21 corrobora com a Tabela 6, e representa a variação em percentual de cada litologia em relação ao cenário base. Nela fica evidente que as litologias mais sensíveis à variação da SMU são a HM, CG e ITAR que sofreram decréscimos com o aumento da largura mínima de lavra. E também fica claro a baixa variação de ITA e IF nos cenários analisados.

Figura 21 - Variação percentual de litologia por SMU



Fonte: Autor

4.4.1 Variação dos Teores de Ferro

Avaliou-se a variação dos teores médios de ferro nas litologias mais afetadas. Os dados apresentados na Tabela 7 revelam que a perda de seletividade não só reduz a recuperação de minério, mas compromete o metal contido das litologias recuperadas.

Tabela 7 - Teor médio de Ferro por litologia e cenário

Cenário	HM Fe (%)	ITA Fe (%)	EFF Fe (%)
10x10	59,58%	36,29%	34,57%
15x15	58,97%	36,26%	36,75%
20x20	58,94%	36,26%	37,33%

Fonte: Autor

Observou-se que o teor médio de ferro na HM sofre uma pequena redução no cenário de menor seletividade. Isso mostra que os polígonos de HM no cenário 20m x 20m incorporaram materiais de menor teor em sua periferia para satisfazer a restrição geométrica.

Simultaneamente, o teor de Ferro no EFF subiu de 34,57% para 37,33%. Este enriquecimento do estéril evidencia a perda operacional: blocos mineralizados de alta qualidade foram incorporados aos sólidos de descarte por incapacidade de isolamento geométrico da SMU de 20m.

Por fim, os teores de ITA variaram muito pouco, o que reforça a continuidade geológica e espacial desses corpos, poucos sensíveis à variação da SMU e com tendência de estabilidade.

4.5 Análise Incremental e Razão Perda/Diluição

A análise marginal compara o incremento de Perda e Diluição a cada aumento da SMU. A Tabela 8 demonstra a variação relativa dos indicadores entre os cenários adjacentes. É importante destacar que essa diferença entre os indicadores e a sensibilidade das curvas da figura 19, é um produto inerente à matriz de penalidades proposta.

Tabela 8 - Análise Incremental entre cenários

Transição Cenário	Δ Perda (%)	Δ Diluição (%)	Razão Perda/Diluição
5x5 → 10x10	+0,35%	+0,34%	1,0
10x10 → 15x15	+0,98%	+0,29%	3,4
15x15 → 20x20	+0,79%	+0,13%	6,1

Fonte: Autor

A análise da razão entre os incrementos revela a eficiência da seletividade em cada estágio. No intervalo inicial (5m para 10m), a relação de troca é equilibrada (1:1), para cada 1 tonelada de diluição que entrou, perdeu-se 1 tonelada de minério. O passo seguinte (10m para 15m) oferece ganho operacional, mas sem sacrificar o recurso de forma desproporcional, com uma razão de perda e diluição de 3,4.

No salto de 15m para 20m, observa-se que para cada 1 tonelada de diluição que entrou, perdeu-se quase 6 toneladas de minério. O agravante desta perda não é apenas quantitativo, mas qualitativo. Ao cruzar esses dados com a análise litológica anterior, observa-se que a perda se concentra nos materiais mais nobre da mina, como as Hematitas e Cargas.

4.6 Definição do Cenário Ótimo

A definição da SMU ideal exige a ponderação entre uma boa recuperação geológica e a eficiência produtiva da frota de carga de grande porte. Embora o cenário 10m x 10m x 10m apresente os melhores indicadores teóricos de recuperação, a análise de viabilidade para operações de minério de ferro em larga escala aponta o Cenário 15m x 15m x 10m como o ponto de equilíbrio operacional.

Esta escolha fundamenta-se nos seguintes pilares de *trade-off*:

- Aderência à Realidade Operacional: Em depósitos de ferro de alta escala, perdas planejadas na ordem de 1,33% (Cenário 15m x 15m) ainda são

aceitáveis, situando-se frequentemente dentro da margem de incerteza do próprio modelo geológico.

- Continuidade e Produtividade: A SMU de 15 metros favorece a execução operacional das frentes de lavra e a produtividade da frota (principalmente a CAT 994K). Unidades maiores reduzem o tempo de reposicionamento dos equipamentos e garantem continuidade operacional, resultando em um custo unitário de operação inferior ao de cenários com seletividade restrita.
- Preservação do Metal Contido: Diferente do cenário 20m x 20m, que apresenta uma razão perda/diluição alta de 6,1 e uma perda de quase 10% da hematita, o cenário 15m x 15m mantém a recuperação de HM em níveis satisfatórios (97,6%) e uma razão de troca de 3,4, considerada o limite suportável para garantir a eficiência da frota.

O cenário 20m x 20m x 10m foi descartado por configurar uma destruição de valor acentuada, mostrou um descarte massivo de HM e CG (redução, respectivamente, para 90,9% e 85,4% de recuperação) e o enriquecimento severo do estéril inviabilizam a sustentabilidade econômica do plano de lavra. A adoção da SMU de 10m x 10m x 10m é potencialmente utilizável e apresentou os maiores dados de recuperação de HM e ITA, com poucos percentuais de perda e diluição, entretanto ainda sacrifica produtividade e exige uma certa seletividade operacional.

Diante do exposto, define-se o Cenário 15m x 15m x 10m como o ótimo operacional para a mina estudada, conciliando a necessidade de alto desempenho da frota de carga com a manutenção da integridade qualitativa da reserva mineral. A adoção de SMU superiores a 15 metros pode ser adotada em zonas de itabirito massivas e homogêneas, onde a continuidade geológica permita o ganho de produtividade sem o descarte sistemático de lentes mineralizadas, o que não se verificou como regra geral para o depósito analisado.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo cumpriu seu objetivo geral ao quantificar os impactos da variação da Unidade Seletiva de Lavra (SMU) nos indicadores de diluição, perda, teor de ferro e tonelagem de minério em um plano anual de lavra. A aplicação da metodologia de otimização de polígonos de lavra permitiu concluir que o Cenário 15m x 15m x 10m consolida-se como o ótimo operacional para este depósito específico, por conciliar a preservação da qualidade do recurso mineral com a produtividade exigida.

A definição desta SMU valida tecnicamente a exequibilidade operacional da frota de carga e transporte, composta pelas pás carregadeiras CAT 994K, escavadeiras Komatsu PC2000, e os caminhões CAT789. Assegurou-se que as larguras das unidades de lavra respeitavam as restrições geométricas das caçambas dos equipamentos, permitindo seletividade e que minimizassem o reposicionamento das máquinas garantindo continuidade operacional.

Um fator a ser mencionado foi o impacto do efeito suporte. Como o modelo de blocos de curto prazo utilizado possui células de 5m x 5m x 10m, dimensões relativamente reduzidas para a escala operacional, a transição para unidades seletivas maiores gera uma suavização acentuada dos teores e o aumento dos indicadores de diluição e perda programadas. Esse fenômeno explica por que o salto para cenários de 20m x 20m x 10m tornou-se inviável, e apresentou valores dilatados em relação aos outros cenários. É importante ressaltar que as conclusões obtidas são válidas para o contexto geológico e operacional do depósito analisado e a metodologia demonstrou-se robusta para a gestão estratégica da seletividade da mina

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação de SMU retangulares para otimizar o avanço linear das frentes, sem sacrificar a seletividade lateral. Adicionalmente, recomenda-se aprimorar e reconfigurar a matriz de penalidades sob diferentes vieses, ao entender o custo entre perda, diluição e volume de produção. Por fim, propõe-se a aplicação desta metodologia em planos com horizontes de tempo menores, como mensais e semanais, para refinar a aderência entre o real e planejado no dia a dia da operação de mina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, Natália Barbosa de. **Análise da diluição planejada e operativa em uma mina de ouro a céu aberto**. 2016. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

BARROS, Daniela Souza. **Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no cálculo do fator de diluição operacional**. 2021. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

BRASIL. [Código de Mineração (1967)]. **Código de Mineração**: e legislação correlata. 2. ed. Brasília: Senado Federal, 2011. 112 p.

BUDKE, Régis. **Quantificação da diluição operacional na mina do salobo**. 2019. 74 f. Monografia (Especialização em Engenharia Mineral) – Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, 2019.

CÂMARA, T. R. **Sistematização do cálculo de diluição e perdas operacionais para reconciliação de teores e massas em lavra a céu aberto**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CÂMARA, T. R. *et al.* **Controlling operational dilution in open-pit mining**. Mining Technology, v. 128, n. 1, p. 1-8, 2018.

CAMPOS, Brenda M. M. et al. **Definição de minério e estéril de curto prazo para fins de reconciliação de mina**. in: Anais do 12^a Congresso Brasileiro de Mina a Céu aberto e Mina Subterrânea, 2025, Ouro Preto. Anais eletrônicos..., Galoá, 2025. Disponível em: <https://proceedings.science/cbmina-2025/trabalhos/definicao-de-minerio-e-esteril-de-curto-prazo-para-fins-de-reconciliacao-de-mina?lang=pt-br>. Acesso em: 28 dez. 2025.

CAMPOS, P. H. A. **Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra: sequenciamento direto de blocos vs. planejamento tradicional**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CRAWFORD, G. D. **Dilution and Ore Recovery**. Pincock Perspectives, n. 60, 2004. 4 p.

CURI, Adilson. **Lavra de Minas**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. v. 1, 774 p.

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

FLORES, B. A. **Planejamento de lavra estratégico e tático de morro da mina - Conselheiro Lafaiete/MG**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M. **Open pit mine planning & design fundamentals**. Colorado: Colorado School of Mines, 1995. v. 1.

HUSTRULID, William A.; KUCHTA, Mark; MARTIN, Randall K. **Open pit mine planning & design**: volume 1: fundamentals. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

JARA, R. *et al.* **Block size selection and its impact on open-pit design and mine planning**. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 106, p. 205-211, mar. 2006.

LEUANGTHONG, O.; NEUFELD, C.; DEUTSCH, C. V. **Optimal selection of selective mining unit (SMU) size**. In: International Conference on Mining Innovation (MININ), 2003, Santiago, Chile.

MORLEY, C. Beyond Reconciliation — **A Proactive Approach to Using Mining Data**. In: Fifth Large Open Pit Mining Conference, 2003, Austrália.

OLIVEIRA, M. P. R. de; SOUZA, F. R.; SILVA, J. M. da. **Otimização da Unidade mínima de lavra para o Planejamento de Curto Prazo**. Research, Society and Development, [S. l.], v. 11, n. 6, p. e56311629576, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/29576>. Acesso em: 27 dez. 2025.

PARKER, H. M. **Reconciliation principles for the mining industry**. Mining Technology, v. 121, n. 3, p. 160-176, 2012.

PERONI, R. L. **Notas de aula da disciplina de Introdução da lavra a céu aberto**. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

PINTO, C. L.; DUTRA, J. I. **Introdução ao planejamento e operação de lavra**. Belo Horizonte: Universidade Corporativa Chemtech, 2008.

REUWSAAT, J. D. *et al.* **Operational SMU Definition of a Brazilian Copper Operation**. In: GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. *et al.* (eds). *Geostatistics Valencia 2016*. Cham: Springer, 2017. (*Quantitative Geology and Geostatistics*, v. 19).

ROCCA, F.; SEBBAG, M.; TAIMRE, T. **Buzwagi open pit study**. In: *Proceedings Sixth Large Open Pit Mining Conference*, 2007, Perth.

ROSIÈRE, Carlos A.; CHEMALE JR., Farid. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero: uma visão geral e discussão**. *Geonomos*, Belo Horizonte, v. 8, n. 2, p. 27-43, 2000.

ROSSI, Mario E. **Mineral Resource Estimation**. 1. ed. Dordrecht: Springer, 2014. cap. 7, p. 117-132.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. **Applied Mineral Inventory Estimation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

VILLAESCUSA, E. **Geotechnical design for dilution control in underground mining**. In: *Proc. Seventh International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, 1998, Calgary. Rotterdam: Balkema, 1998, p. 141–149