



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIDADE ARAXÁ

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO DIMENSIONAMENTO DE PILARES
NA RECUPERAÇÃO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA DE OURO**

MATHEUS TEIXEIRA OLIVEIRA

ARAXÁ

2025

MATHEUS TEIXEIRA OLIVEIRA

**AValiação DO IMPACTO DO DIMENSIONAMENTO DE
PILARES NA RECUPERAÇÃO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA
DE OURO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Data de Defesa: Araxá, 17 de julho de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **GUILHERME ALZAMORA MENDONÇA**
Data: 24/07/2025 21:37:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Presidente e Orientador: Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Campus
Araxá

Documento assinado digitalmente
 **SILVANIA ALVES BRAGA DE CASTRO**
Data: 24/07/2025 20:30:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Titular: Prof. Dra. Sylvania Alves Braga de Castro
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Campus
Araxá

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO BRANDAO RODRIGUES DA SILVA**
Data: 24/07/2025 20:14:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Titular: Prof. Dr. Fernando Brandão Rodrigues da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Campus
Araxá

AGRADECIMENTOS

À minha família, pilar fundamental em cada etapa desta jornada acadêmica, agradeço por todo apoio, dedicação e sacrifício que tornaram possível a conclusão desta graduação. Em especial, aos meus pais, Kathia e Dione, ao meu irmão Lucas, e à minha companheira, Lara.

Aos meus amigos, cuja amizade e lealdade foram essenciais, oferecendo suporte e motivação nos momentos de desafios e incertezas.

À equipe Datamine Softwares Brasil, pelo suporte técnico e vasto conhecimento compartilhado através do Programa Datamine Universidades.

Ao professor Guilherme pelo tempo investido na busca de materiais relevantes, pelas valiosas sugestões que enriqueceram este estudo, e por todo apoio e orientação ao longo do processo.

À professora Silvânia por não medir esforços para possibilitar a apresentação deste trabalho.

À empresa detentora da reserva mineral, pela confiança em disponibilizar os dados necessários, os quais foram fundamentais para a execução e o êxito deste trabalho.

RESUMO

O planejamento de lavra a longo prazo é essencial em todas as fases de um empreendimento mineiro. Ele garante o máximo aproveitamento do minério durante a vida útil da mina, considerando aspectos geológicos, financeiros, ambientais e de segurança. Em uma mina subterrânea que opera através do método Câmaras e Pilares é fundamental um bom aproveitamento da reserva, uma vez que a quantidade de pilares contendo minério abandonados é significativa, reduzindo a recuperação. O Studio UG é um software da empresa Datamine capaz de otimizar os realces e gerar diversos cenários para avaliar o impacto de cada parâmetro nos resultados, realizando assim uma análise de sensibilidade. O presente trabalho tem como objetivo dimensionar os pilares de uma reserva de ouro em fase de estudo que utilizará do método Câmaras e Pilares, através do software Datamine Studio UG. Foram fornecidos pela empresa os arquivos contendo os painéis de lavra, topografia e rampa de acesso principal. O estudo se inicia a partir da criação do modelo de blocos da reserva que se encontra em fase de estudo de viabilidade, com base nos arquivos fornecidos pela empresa. Este modelo será tratado para sua otimização e operacionalização, levando em consideração a recuperação de lavra, requisitos geológicos e de segurança, sem esquecer do aspecto socioambiental. As aberturas foram definidas com base nos maiores equipamentos utilizados pela empresa e a espessura do depósito, sendo dimensionadas com 8x8 metros e 4 metros altura. As dimensões dos pilares foram determinadas por meio de 4 cenários: 75, 100, 125 e 150% do tamanho da abertura. Através da análise destes cenários é possível analisar o impacto do dimensionamento dos pilares e o aproveitamento da reserva, permitindo analisar o impacto deste exercício na recuperação. Os resultados foram condizentes, sendo o cenário de maior recuperação e melhor aproveitamento da reserva o pilar com 75% do tamanho da abertura, retornando uma recuperação de lavra de 54%, porém representando o cenário com a menor nível de segurança, devido ao pilar de 6x6 metros, sendo menor do que a abertura, necessitando de um maior controle e investimento em suportes e monitoramento. O contrário se observou no cenário de pilares com 150% do tamanho da abertura, o qual retornou a menor recuperação de lavra, 40%, possuindo pilares 12x12 metros, retornando uma segurança maior para a operação. A diluição foi desprezível, uma vez que foi possível dimensionar as aberturas com a mesma altura da espessura do depósito, 4 metros.

Palavras-chave: Planejamento de lavra; Studio UG; Câmaras e Pilares; Dimensionamento de Pilar; Lavra subterrânea.

ABSTRACT

Long-term mine planning is a step present in all phases of a mining project. It is an essential activity for the success of a mining enterprise, ensuring that the use of the ore is maximized throughout the mine's useful life, taking into account geological, financial, environmental and safety aspects during the activity. In an underground mine that operates using the Room and Pillars method, it is fundamental to make good use of the reserve, since the number of abandoned pillars containing ore is significant, reducing recovery. Studio UG is a Datamine software capable of optimizing highlights and generating different scenarios to evaluate the influence of each parameter on the results, performing a sensitivity analysis. The present study aims to dimension the pillars of an underground gold mine that uses the Room and Pillars method, using the Datamine Studio UG software. The company provided the files containing the mining panels, topography and main access ramp. The study begins by creating a block model of a reserve, which is at the feasibility study phase, based on the files provided by the company. This model will be optimized and operationalized, taking into account mining recovery, geological and safety requirements, without forgetting the socio-environmental aspect. The rooms were defined based on the largest vehicles used by the company and the thickness of the deposit, being dimensioned with 8x8 meter and 4 meters height. The assessment of the pillar size was determined through 4 scenarios: 75, 100, 125 and 150% of the room size. Through the analysis of these scenarios, it is possible to establish a direct relationship between the pillar size and the use of the reserve, allowing the analysis of the influence of the pillars on recovery. The results were consistent, with the scenario of greatest recovery and best use of the reserve being the pillar with 75% of the room size, returning a mining recovery of 54%, but represents the scenario with the least safety, requiring greater control and investment in supports. The opposite was observed in the scenario of pillars with 150% of the opening size, which returned a mining recovery of 40%, but with 12x12 meter pillars, returning greater safety to the operation. Dilution was negligible, since it was possible to size the rooms at the same height as the thickness of the deposit, 4 meters.

Keywords: Mine Planning; Studio UG; Room and Pillars; Dimensioning of Pillar; Underground Mine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Porte e modalidades de lavra das minas 2009.	12
Figura 2 - Porte e modalidades de lavra das minas 2021.	13
Figura 3 - Sistema classificatório das explorações subterrâneas e respectivos métodos de lavra, com indicação aproximada de certos aspectos geomecânicos.	14
Figura 4 - Método Câmaras e Pilares.....	15
Figura 5 - Método Câmaras e Pilares vista em planta.....	16
Figura 6 - Método Câmaras e Pilares.....	17
Figura 7 - Estimativa de reservas a partir de um modelo de recursos.....	18
Figura 8 - Diagrama do processo de fornecimento mineral.....	20
Figura 9 - Fases da mineração.....	21
Figura 10 - Influência de cada fase nos custos.	22
Figura 11 - Representação de um modelo de blocos.	24
Figura 12 - Coordenadas no modelo de blocos.....	24
Figura 13 - Interface software Studio UG.	26
Figura 14 - Realces gerados pelo MSO com modelo de blocos ao fundo.	26
Figura 15 - Estruturas geradas pelo Studio UG.....	27
Figura 16 – Parte do painel de lavra.	28
Figura 17 - Topografia.	28
Figura 18 - Rampa de acesso principal.	29
Figura 19 - Projeto contendo os painéis de lavra, rampa e topografia.	29
Figura 20 - Modelo de Blocos obtido.	32
Figura 21 - Corpo de minério.	33
Figura 22 - Estéril e topografia.	33
Figura 23 - Resultado câmaras e pilares pelo MSO, vista superior.	34
Figura 24 – Cenário 1, pilar com 75% da abertura.	35
Figura 25 – Cenário 2, pilar com 100% da abertura.	35
Figura 26 – Cenário 3, pilar com 125% da abertura.	36
Figura 27 – Cenário 4, pilar com 150% da abertura.	36
Figura 28 – Projeto cenário 1.	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Massa total movimentada em cada cenário.	39
Gráfico 2 - Comportamento do dimensionamento do pilar e da massa total movimentada.	40
Gráfico 3 - Massa de minério total movimentada de cada cenário.	41
Gráfico 4 – Comportamento do dimensionamento do pilar e da massa de minério total movimentada.	42
Gráfico 5 - Volume de rocha por pilar em cada cenário.	43
Gráfico 6 - Ouro total extraído em cada cenário.	44
Gráfico 7 - Ouro total extraído em onças troy e receitas brutas entre cenários.	45
Gráfico 8 – Comportamento da quantidade de ouro extraída e do dimensionamento dos pilares de cada cenário.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Cubagem do modelo de blocos.....	34
Tabela 2 – Massa e volume movimentados em cada cenário.....	37
Tabela 3 – Massa e volume de minério e estéril lavrados.....	38
Tabela 4 - Quantidade de ouro extraído e metragem escavada de cada cenário.	38
Tabela 5 - Recuperações de lavra de cada cenário.....	43
Tabela 6 - Metragem escavada de cada cenário.	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Justificativa.....	10
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1 Objetivo geral.....	11
1.2.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Organização do trabalho.....	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1 Lavra Subterrânea.....	12
2.1.1 Métodos com realces autosuportantes.....	14
2.1.2 Métodos artificialmente suportados.....	14
2.1.3 Métodos por abatimento.....	14
2.2 Método Câmaras e Pilares.....	15
2.2.1 Recuperação e Segurança.....	17
2.3 Recursos e Reservas Minerais.....	18
2.4 Planejamento de Lavra.....	19
2.4.1 Planejamento de Lavra Subterrânea.....	23
2.5 Modelo de Blocos.....	23
2.6 Sequenciamento.....	25
2.7 Software Studio UG.....	25
3. METODOLOGIA.....	28
3.1 Base de dados.....	28
3.2 Preparação dos arquivos.....	29
3.3 Dimensionamento.....	30
3.4 Cubagem.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Modelo de Blocos.....	32
4.2 Câmaras e Pilares.....	34
4.3 Cubagem.....	37
4.4 Análise dos resultados.....	39
5. CONCLUSÃO.....	49
6. REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

A redução de grandes corpos mineralizados mais próximos à superfície reflete o aprofundamento das minas a céu aberto atuais, que em conjunto com a tendência crescente das restrições ambientais, estão gerando uma tendência global no aumento da produção mineral em minas subterrâneas (NEME *et al.*, 2011).

Em uma sociedade que necessita cada vez mais de recursos minerais e ao mesmo tempo, requer a preservação do meio ambiente, impondo restrições à lavra a céu aberto, se faz necessário o aumento da escala de produção através da lavra subterrânea, a fim de cumprir com as restrições ambientais (SILVA, 2009).

Com a crescente dificuldade de conseguir minérios economicamente lavráveis, aliado à variação dos preços das *commodities*, houve um grande avanço no campo do planejamento de lavra e no desenvolvimento de tecnologias. Através dos estudos de planejamento com o auxílio de softwares disponíveis, é possível se desenvolver uma mina economicamente viável com teores cada vez mais baixos.

Planejar é prever e organizar ações e processos que impactam no futuro. Para Neme *et al.* (2011), no caso específico do planejamento de lavra, trata-se de elaborar, com base em estudos econômicos seguros, planos de extração de recursos minerais de maneira eficiente e sustentável, atendendo a demanda existente. Segundo Hustrulid, Kuchta e Martin (2013), os preços das *commodities* estão cada vez mais definidos pela oferta e procura mundial, assim se faz necessário o planejamento de lavra para estimar esses valores com exatidão durante toda a operação, buscando uma redução de custos através de uma mineração eficiente, segura, rentável e ambientalmente responsável a longo prazo.

Atualmente, o uso de *software* está presente em quase todas as áreas da vida humana, desde atividades simples até operações empresariais mais complexas. No campo da mineração houve um grande aumento na utilização de softwares na última década, muito devido a diminuição nos custos de aquisição, mas também em razão da evolução de desempenho e aumento de profissionais qualificados disponíveis no mercado. Os *softwares* atuais processam milhares de dados em um curto espaço de tempo, fornecendo uma gama de resultados bastante precisos para que seja feita uma análise minuciosa e assertiva, aumentando o rendimento em qualquer que seja a área em questão.

Diante de todos esses desafios, torna-se imprescindível o emprego de softwares para o sucesso empresarial. Não sendo diferente na mineração, para se obter um preço competitivo no mercado e assim viabilizar o projeto mineiro, deve-se utilizar destas ferramentas para potencializar os produtos e processos, como aumento da produção e otimização de frotas.

O software Studio UG, desenvolvido pela empresa Datamine, fornece um conjunto completo de ferramentas para mineração subterrânea, com soluções para o design e sequenciamento da mina. Através dele é possível realizar todo o planejamento de uma mina subterrânea, permitindo que seja inserido diversas variáveis econômicas, geotécnicas, legais e ambientais, retornando todos os cenários possíveis de serem realizados, contendo informações como o valor presente líquido (VPL), volume e massa total de minério, tempo necessário para cada atividade, entre outras informações para a tomada de decisão.

O presente trabalho surge a partir de um modelo disponibilizado por uma empresa detentora de uma reserva de ouro situada em Minas Gerais, a qual se encontra na fase de estudo de viabilidade, contendo parte dos painéis de lavra, rampa de acesso principal, topografia, especificações dos maquinários utilizados e faixa de teor encontrado no corpo de minério.

Com base nos maiores equipamentos, foram dimensionadas as aberturas. Posteriormente foram criados 4 cenários variando a dimensão dos pilares. Através do software Studio UG e todos os outros materiais, criou-se o modelo de blocos, aberturas e pilares para cada cenário.

Por fim, calculou-se a massa e volume movimentados, metal extraído e receita bruta em cada cenário com o intuito de avaliar o impacto do dimensionamento dos pilares na recuperação do minério, levando em conta a segurança.

1.1 Justificativa

Será estudado o planejamento de lavra subterrânea em uma reserva de ouro através do método câmaras e pilares. A reserva se encontra em fase de estudos e avaliações para posteriormente iniciar suas operações. Desta forma, a presente pesquisa visa avaliar os diferentes cenários do ponto de vista econômico e o impacto do dimensionamento de pilares na recuperação para o método

proposto.

Como trata-se de um projeto ainda não operacional, estudos e pesquisas são de suma importância, pois refletirá por toda a vida útil do empreendimento mineiro, impactando diretamente e positivamente a economia local, como empregos diretos e indiretos, impostos, serviços, infraestruturas públicas, entre outros.

1.2 Objetivos

Os objetivos gerais e específicos deste trabalho estão descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto do dimensionamento dos pilares na recuperação de uma mina subterrânea de ouro que se encontra em fase de estudos, através do método de Câmaras e Pilares, utilizando o software Studio UG.

1.2.2 Objetivos específicos

- Calcular as recuperações de lavra para cada cenário;
- Analisar o impacto do dimensionamento de pilares na recuperação, levando em conta aspectos econômicos quantitativos e de segurança qualitativos.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em capítulos, incluindo o presente. No Capítulo 2 será apresentado o referencial teórico, contendo os principais conceitos necessários que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho. No Capítulo 3 serão descritos os procedimentos, estratégias e os dados utilizados para a realização do estudo. Posteriormente no Capítulo 4 serão apresentados e discutidos os dados obtidos durante a pesquisa, através de tabelas, gráficos e figuras. Por fim, no Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões, bem como as perspectivas de trabalhos futuros. A revisão bibliográfica deste trabalho apresenta uma revisão dos principais estudos relacionados ao tema, descrevendo seus resultados e suas contribuições.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão bibliográfica sobre os principais assuntos que serão abordados no decorrer deste estudo é apresentada abaixo.

2.1 Lavra Subterrânea

Atualmente está ocorrendo um aprofundamento das minas a céu aberto, reflexo da redução de depósitos mais próximos à superfície. Este maior aprofundamento aliado ao aumento das restrições ambientais, está promovendo uma tendência global de intensificação da produção mineral em minas subterrâneas. (NEME *et al.*, 2011)

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro, de 2009 a 2021 houve um aumento de cerca de 40% no número de minas subterrâneas ou mistas (subterrânea e céu aberto) em atividade no Brasil. Na Figura 1 é possível observar que em 2009 existiam 21 minas subterrâneas ou mistas em atividade, e verifica-se pela Figura 2 que em 2021 existiam 30 minas subterrâneas ou mistas em atividades, sendo este o último levantamento disponibilizado pela Agência Nacional de Mineração (ANM).

Figura 1 - Porte e modalidades de lavra das minas 2009.

CLASSE / SUBSTÂNCIA	GRANDES			MÉDIAS			PEQUENAS			Subtotal			Total
	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	
BRASIL	152	4	4	809	2	23	2.365	-	11	3.326	6	38	3.370
Metálicos	53	3	2	46	1	10	61	-	5	160	4	17	181
Alumínio (Bauxita)	4	-	-	6	-	-	15	-	-	25	-	-	25
Cobre	2	1	-	-	-	-	-	-	-	2	1	-	3
Cromo	-	-	-	1	-	1	2	-	-	3	-	1	4
Estanho	4	-	-	9	-	-	-	-	-	13	-	-	13
Ferro	31	-	-	14	-	-	11	-	-	56	-	-	56
Lítio	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1
Manganês	1	-	-	4	-	1	6	-	-	11	-	1	12
Nióbio	1	-	-	1	-	-	2	-	-	4	-	-	4
Níquel	1	-	-	3	1	1	1	-	-	5	1	1	7
Ouro	8	1	2	6	-	6	19	-	2	33	1	10	44
Titânio	1	-	-	1	-	-	4	-	-	6	-	-	6
Tungstênio	-	-	-	-	-	-	1	-	2	1	-	2	3
Zinco	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	2
Zircônio	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	1

Fonte: Anual Mineral Brasileiro, DNPM, 2009.

Figura 2 - Porte e modalidades de lavra das minas 2021.

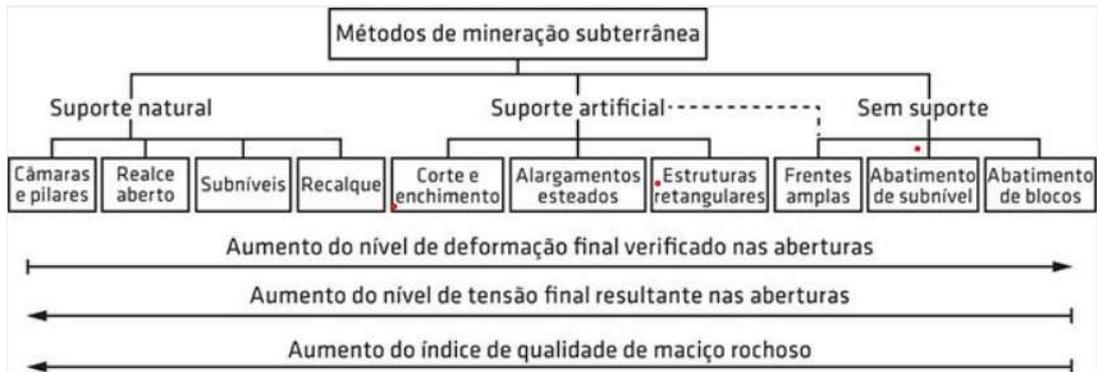
Substância	Grandes			Médias			Pequenas			Subtotal			Total
	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	
Brasil	68		8	66		16	61	1	5	195	1	29	227
Alumínio (Bauxita)	4			8			19			31			31
Cobre	4		1	2		2	1			7		3	10
Cromo			1	1			1			2		1	3
Estanho	5			8			4			17			17
Ferro	46			26			10			82			82
Manganês				4		1	12			16		1	17
Nióbio	3									3			3
Níquel	3						1			4			4
Ouro*	4		4	16		13	13	1	5	33	1	22	56
Vanádio	1									1			1
Zinco			2	1						1		2	3

Fonte: Anual Mineral Brasileiro, ANM, 2022.

Em uma sociedade que necessita cada vez mais recursos minerais e ao mesmo tempo, requer a preservação do meio ambiente, impondo restrições à lavra a céu aberto, se faz necessário o aumento da escala de produção através da lavra subterrânea. (Silva, 2009).

Existem diversas formas de se realizar a lavra subterrânea, sendo sua escolha muito importante, afetando diretamente a viabilidade de todo o projeto. Sendo assim, após estudos suficientes sobre o corpo de minério, a seleção do método de lavra pode começar. (Hustrulid; Bullock, 2001). Os métodos de lavra se dividem em três principais grupos de acordo com suas aberturas e estão representados na Figura 3:

Figura 3 - Sistema classificatório das explorações subterrâneas e respectivos métodos de lavra, com indicação aproximada de certos aspectos geomecânicos.



Fonte: Lavra de Minas, Adilson Curi, 2017.

2.1.1 Métodos com realces autosuportantes

Métodos onde a própria rocha encaixante sustenta as aberturas e poços, através do abandono de pilares (*Room and Pillar Mining*) ou realces livres (*Sublevel Open Stopping*). São métodos que possuem alta produtividade, porém com uma recuperação baixa devido ao abandono de estruturas contendo minério. Além disso, necessitam de uma certa qualidade e homogeneidade do minério (CURI, A., 2017).

2.1.2 Métodos artificialmente suportados

Métodos em que o suporte é dado por um material externo como rejeito, que pode ser levado aos realces (*Cut and Fill Stopping*). Trata-se de métodos de alto custo relacionado as técnicas de suportes, representando grande parcela dos gastos. Sendo assim, limitando a depósitos com teores mais elevados ou minérios de alto valor agregado, podendo alcançar valores moderados de produtividade (CURI, A., 2017).

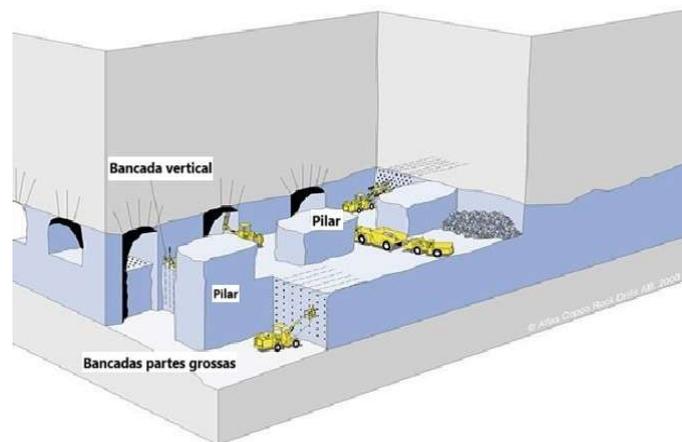
2.1.3 Métodos por abatimento

Métodos em que à medida que a lavra avança, o abatimento das rochas é provocado de maneira controlada, afim de se garantir condições adequadas de segurança e produtividade em corpos de baixa resistência. São métodos de alta produtividade pela facilidade de suas operações, mas com alta diluição em razão da dificuldade de realizar um abatimento controlado (CURI, A., 2017).

2.2 Método Câmaras e Pilares

Segundo Hartman e Mutmansky (1987), a lavra subterrânea pelo método de câmaras e pilares aplica-se geralmente a corpos tabulares sub-horizontais de espessura limitada, como xisto de cobre, carvão, sal e potássio. As operações de produção são conduzidas em aberturas denominadas câmaras, as quais se prestam a múltiplos propósitos: fonte de minério, acesso de pessoal, vias de transporte, circulação de ar, etc. Entre tais aberturas são abandonados os chamados pilares, com a finalidade de servir de suporte para a coluna de rochas sobrejacentes. Estas estruturas estão representadas Figura 4.

Figura 4 - Método Câmaras e Pilares.



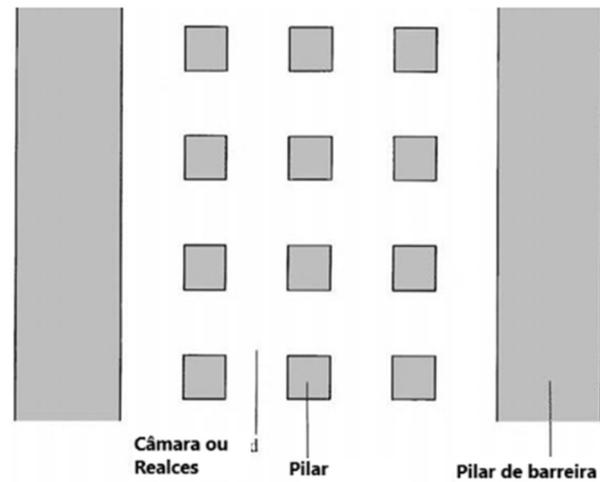
Fonte: (Hustrulid; Bullock, 2001).

Trata-se de um método no qual as equipes de produção estão continuamente expostas sob os vãos das câmaras, requerendo alto grau de segurança para garantir que o teto permaneça intacto, sendo frequentemente instalados parafusos de ancoragem para reforçar essas estruturas. Além disto, se faz necessário um efetivo planejamento das dimensões seguras tanto de pilares quanto de vão dos tetos. (Hartman; Mutmansky, 1987).

As câmaras e os pilares são normalmente organizados em padrões regulares conforme mostra a Figura 5. Os pilares podem ser projetados de forma circulares ou quadradas. Os minerais presentes nos pilares não são recuperados, não fazendo parte da reserva lavrável do depósito. O trabalho de desenvolvimento é mínimo, uma vez que os acessos para transporte do minério são estabelecidos através das câmaras de produção. As escavações das galerias

podem ser realizadas de forma combinada com a produção de minério, assim as porções extraídas servirão como rotas de transporte. (Hartman; Mutmansky, 1987).

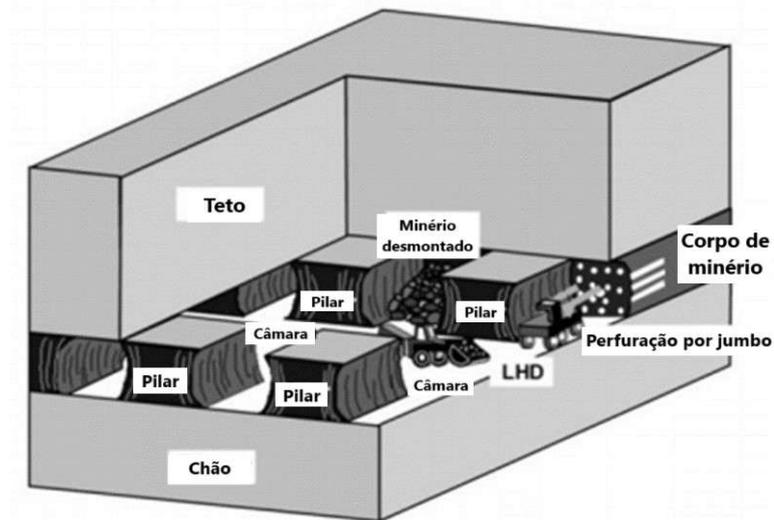
Figura 5 - Método Câmaras e Pilares vista em planta.



Fonte: (Hartman; Mutmansky, 1987).

Para a produção de minério neste método, a dimensão de perfuração e desmonte são iguais à largura e altura do realce, como mostra a Figura 6. Portanto, se as condições geológicas forem favoráveis, os realces podem ser maiores, e grandes jumbos podem ser usados para a perfuração mecânica. Em depósitos com grandes alturas são minerados em fatias, iniciando do topo, onde após a lavra, são instalados parafusos para o controle do teto, as seções abaixo são recuperadas em bancadas.

Figura 6 - Método Câmaras e Pilares.



Fonte: PROSSER, L. J. 2011.

O minério desmontado é carregado na pilha por carregadeiras. De acordo com Hartman e Mutmansky (1987), diferentes sistemas de transporte podem ser utilizados dependendo da altura do realce e da distância de transporte. Se a abertura for alta o suficiente, o caminhão comum proporciona um transporte econômico desde os realces até os pontos de coleta. Para corpos finos de minério, fabricantes possuem caminhões especialmente construídos para este fim. Câmaras muito pequenas podem ser acessadas para o carregamento do material desmontado por *load-haul-dump* (LDH), e o material pode ser transferido para caminhões estacionados em pontos estratégicos para o transporte em distâncias maiores.

2.2.1 Recuperação e Segurança

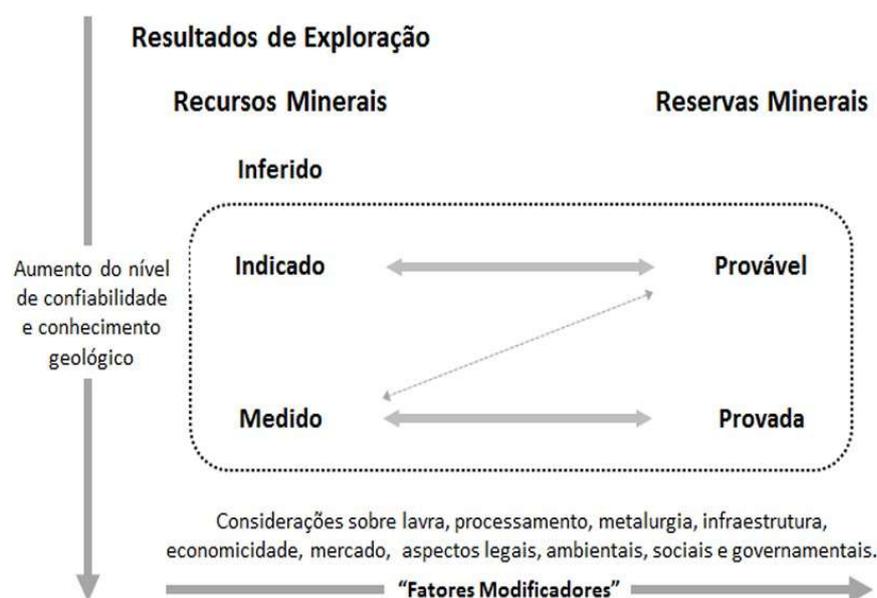
Uma vez que os pilares são abandonados e não considerados como reserva lavrável, os mesmos devem ser dimensionados de modo que contenham o menor volume de material possível. Assim, deve-se considerar restrições à máxima recuperação possível do jazimento, a qual oscila, na maioria dos casos, entre 40 e 60 % sem recuperação posterior dos pilares, podendo chegar até 80 % (Hartman; Mutmansky, 1987) quando os mesmos são recuperados. Entretanto, operações de recuperação posterior vêm sendo cada vez mais restringidas em todo o mundo por questões legais de segurança e ambientais, uma vez que a

subsistência dos terrenos sobrejacentes é uma consequência comum nesses casos, com danos a edificações na superfície e alterações no ciclo hidrológico local. Portanto, é essencial para este método um bom aproveitamento das reservas, uma vez que o abandono dos pilares causa uma diminuição na recuperação.

2.3 Recursos e Reservas Minerais

Um recurso mineral é uma ocorrência mineral com potencial econômico em seus minerais, porém que ainda não teve a sua viabilidade econômica avaliada. Reservas minerais são porções dos recursos que passaram pela avaliação econômica, provando ser viável de se explorar, tanto em vista econômica quanto técnica (Figura 7). Devido as variações nos preços das *commodities* minerais, avanço tecnológico, demanda de mercado e outros fatores, frequentemente materiais que antes eram recurso viram reserva minera, com o inverso também podendo acontecer. (Curi, 2014).

Figura 7 - Estimativa de reservas a partir de um modelo de recursos.



Fonte: (Snowden, 1996).

A seguir as definições para cada tipo de classificação de depósito de acordo com a *Society of Mining Metallurgy and Exploration* (SME):

Recurso: Concentração de material sólido, líquido ou gasoso que ocorre naturalmente na crosta terrestre, em tal forma e quantidade que a sua extração econômica seja atual ou potencialmente viável. Localização, teor, qualidade e quantidade são conhecidos ou estimados a partir de evidências geológicas específicas. Para os vários graus de certeza geológica, os recursos podem ser subdivididos em medidos, indicados e inferidos.

- **Medido:** A quantidade é calculada a partir das dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras ou furos de sondagem: os teores e a qualidade são calculados a partir do resultado de uma amostragem detalhada. O caráter geológico é tão bem definido que o tamanho, a forma, a profundidade e o conteúdo mineral do recurso estão bem estabelecidos.
- **Indicado:** A quantidade e teores são calculados a partir de informações semelhantes às usadas para recursos medidos, mas os locais para inspeção, amostragem e medições estão mais distantes uns dos outros. O grau de segurança, embora inferior ao dos recursos medidos, é suficientemente elevado para assumir a continuidade geológica entre os pontos de observação.
- **Inferido:** As estimativas são baseadas em evidências geológicas e na continuidade assumida em que há menos confiança do que para recursos medidos ou indicados. Os recursos inferidos podem ou não ser apoiados por amostras ou medições, mas a inferência deve ser apoiada por dados geocientíficos razoáveis.

Reserva: Uma reserva é a parte do recurso que é viável de ser extraída considerando os fatores modificadores, como fatores de lavra, processamento, metalurgia, infraestrutura, economicidade, mercado, aspectos legais, ambientais, sociais e governamentais. A viabilidade das práticas de mineração e produção especificadas deve ter sido demonstrada ou pode ser razoavelmente assumida com base em testes e medições. O termo reservas não significa necessariamente que as instalações de extração estejam instaladas e operacionais.

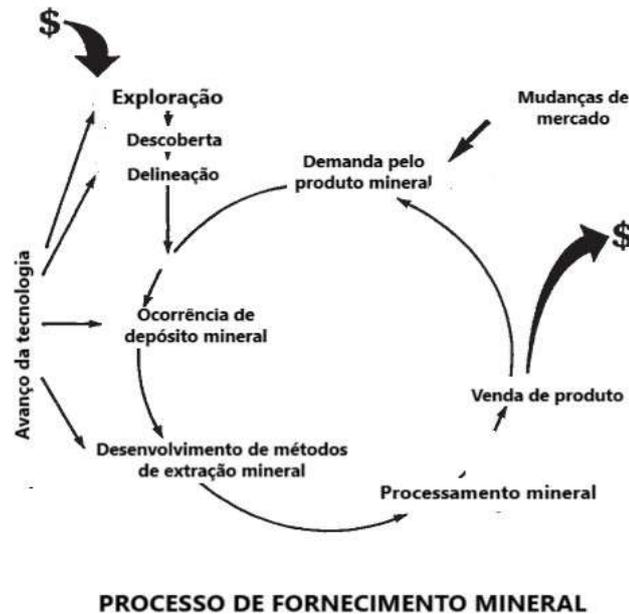
- **Reserva provada:** Parte de um recurso medido que satisfaz as condições para ser classificada como reserva.
- **Reserva provável:** Parte de um recurso indicado que satisfaz as condições para ser classificada como reserva.

2.4 Planejamento de Lavra

A indústria extrativa mineral atual tem como objetivo econômico principal maximizar os seus lucros, porém, diferente das demais indústrias, a mineração

realiza o aproveitamento de recursos não renováveis (Figura 8). Portanto, essa maximização dos lucros ocorre em um período definido, neste caso durante a vida útil da mina. (Curi, 2014)

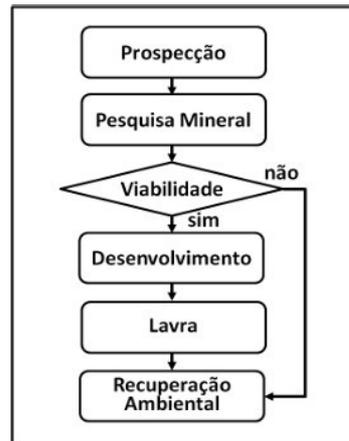
Figura 8 - Diagrama do processo de fornecimento mineral.



Fonte: (Mackenzie, 1981).

Levando em conta todos esses aspectos, é imprescindível um bom planejamento de lavra (Figura 9), composto por estudos detalhados referentes à implantação de uma mina através de um amplo conhecimento em diversas áreas da engenharia. Não se pode realizar o planejamento de lavra sem o suporte da engenharia de minas e das geociências, como geologia e geotecnia. Além disso, são necessários conhecimentos em matemática financeira, estatística, ciências ambientais, computação e informática.

Figura 9 - Fases da mineração.



Fonte: DNPM.

O planejamento de lavra está presente em todas as fases de um empreendimento mineiro, desde a prospecção até o fechamento da mina. Basicamente todo projeto moderno de mina tem como desejo otimizar o valor presente líquido (VPL) ou de operar a propriedade de tal forma que a taxa interna máxima de retorno seja gerada a partir dos fluxos de caixa descontados. Os profissionais por trás de um planejamento de mina devem estar totalmente familiarizados com estes conceitos. Juntamente a isso, qualquer empresário que esteja a planejar uma mina com base apenas nos aspectos econômicos, sem conhecimento sobre manutenções e custos operacionais por tonelada, sofrerá com baixos retornos ao longo da vida útil da mina (Darling, 2011)

Conforme Curi (2014), um projeto de mina busca prognosticar o futuro, baseando-se em estudos confiáveis. A primeira etapa para um projeto de lavra é o bom conhecimento da reserva mineral em questão, com um erro de estimativa aceitável, visto que só é possível um conhecimento completo do corpo de minério após a exaustão do mesmo. Com as informações necessárias sobre a jazida, os teores, caracterização mineralógica e avaliações geomecânicas do maciço rochoso podem ser realizadas com precisão. Trata-se de uma etapa muito importante do projeto, pois qualquer erro pode inviabilizar todo o empreendimento.

Com base neste estudo de avaliação dos recursos, seguem-se as fases de estudos conceituais, estudo preliminares, estudos de viabilidade técnica, econômica e financeira, projeto básico e projeto detalhado da mina. Os estágios são sequenciais e interdependentes, sendo que o grau de detalhamento dos

estudos vai aumentando a medida em que o projeto se mostra viável de ser realizado. Em virtude deste aprofundamento nos estudos, os custos também aumentam, sendo assim, apenas se segue para a próxima etapa se os riscos são reduzidos. Além disso, as fases iniciais possuem grande impacto em todo projeto, sendo assim, tomadas de decisões nestas etapas refletem por toda a vida útil do empreendimento. A Figura 10 retrata a influência de cada fase nos custos do projeto, destacando-se exatamente este alto impacto que as fases iniciais possuem.

Figura 10 - Influência de cada fase nos custos.



Fonte: Adaptado de Lee, 1984.

Outras considerações necessárias dentro de um projeto de mina que estão presentes nas fases de estudos citadas são as limitações práticas em relação à máxima produção, decorrentes de diversos fatores os quais devem ser dados pesos necessários:

- Condições de mercado;
- Preço do produto atual e sua tendência ao longo dos anos;
- Tempo necessário para que se inicie de fato a produção;
- Teor e tonelagem da reserva correspondente;

- Disponibilidade de fonte de energia e água e seus custos;
- Quantidade de mão de obra que deve ser obtida e treinada;
- Políticas e grau de estabilidade do governo local e nacional;
- Potencial instabilidade política no futuro.

2.4.1 Planejamento de Lavra Subterrânea

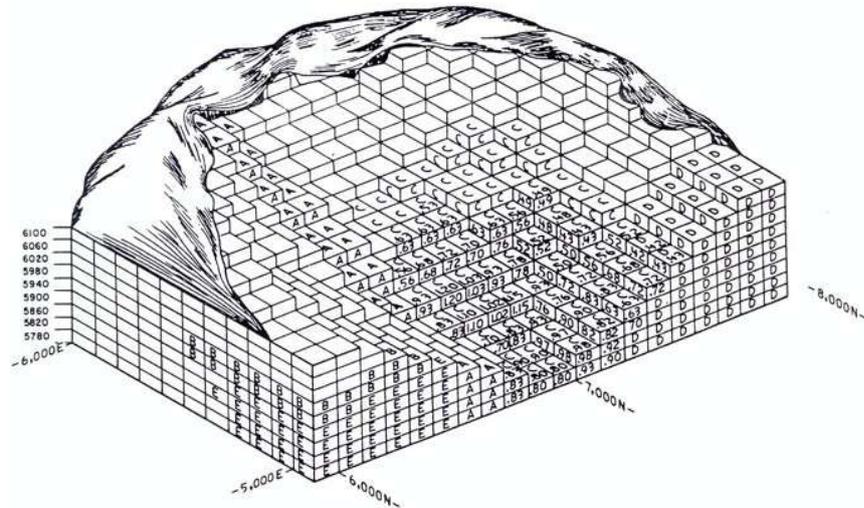
O planejamento de lavra subterrânea se diferencia do restante, pois necessita de maior cuidado na utilização de informações como parâmetros geomecânicos, os quais desde os estudos iniciais já devem conter a classificação do maciço rochoso, coesão, resistência a compressão e deformabilidade. Além disso, é necessário a identificação de zonas de fraquezas, temperaturas nas zonas onde ocorrerão as operações, gases nocivos à saúde e à possibilidade de geração de drenagem ácida (Darling, 2011).

A natureza física da massa extraída é muito importante para o plano de uma mina subterrânea, sendo determinante para várias etapas da operação. A competência da rocha irá determinar as máximas dimensões viáveis das aberturas e também os suportes necessários para mantê-la segura. A dureza, abrasividade e tenacidade do material determinam o ciclo de operações mineiras de lavra, assim como os equipamentos mais adequados a essa atividade. Se o depósito conter gases tóxicos aprisionados, a operação deve ser realizada com cuidados especiais dentro das regulamentações governamentais e boas práticas indicadas (Darling, 2011).

2.5 Modelo de Blocos

Um modelo de blocos é um modelo tridimensional do corpo de minério utilizado para aplicações de técnicas computacionais, em que o depósito é constituído de diversos blocos como representa a Figura 11. Constituem a base de todo o planejamento realizado por softwares tanto para minas a céu aberto quanto para minas subterrâneas. (Hustrulid, Kuchta, 1995).

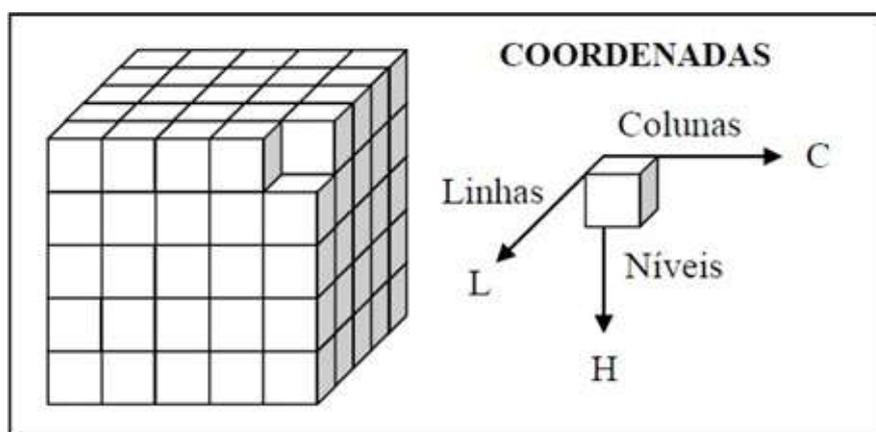
Figura 11 - Representação de um modelo de blocos.



Fonte: (Hustrulid; Kuchta, 1995).

Segundo (Curi, 2014), a cada bloco são atribuídas informações (Figura 12) sobre a localização, geologia, geotecnia, valor dos produtos e custos. A altura do bloco geralmente é igual a abertura de lavra que será usada durante a operação. Os teores são atribuídos através de técnicas geoestatísticas, a tonelagem de cada bloco pode ser encontrada facilmente através do volume do bloco, o qual será o mesmo para todos, alterando-se apenas a densidade de acordo com os materiais presentes em cada bloco. (Hustrulid; Kuchta; Martin, 2013).

Figura 12 - Coordenadas no modelo de blocos.



Fonte: (AMARAL, 2008).

Um modelo de blocos contendo informações de localização, teores, tipologia entre outros é a base para a grande maioria dos projetos de lavra desenvolvidos por computador. Através dele é possível dar seguimento no

trabalho de planejamento de lavra, adicionando através de softwares específicos os custos de cada etapa e restrições geotécnicas com o intuito de encontrar uma coleção de blocos que forneça o valor máximo possível, observando as restrições impostas pelo projeto. (Curi, 2014).

2.6 Sequenciamento

Sequenciamento é um processo ordenado e estratégico de realização de atividades, com o objetivo de otimizar os ganhos, produtos ou processos. De acordo com Pinedo e Hadavi (1992), o sequenciamento é fundamental para as indústrias modernas, as quais estão inseridas em um ambiente altamente competitivo, visto a necessidade cada vez maior de atingir metas e fazer o uso eficiente dos recursos.

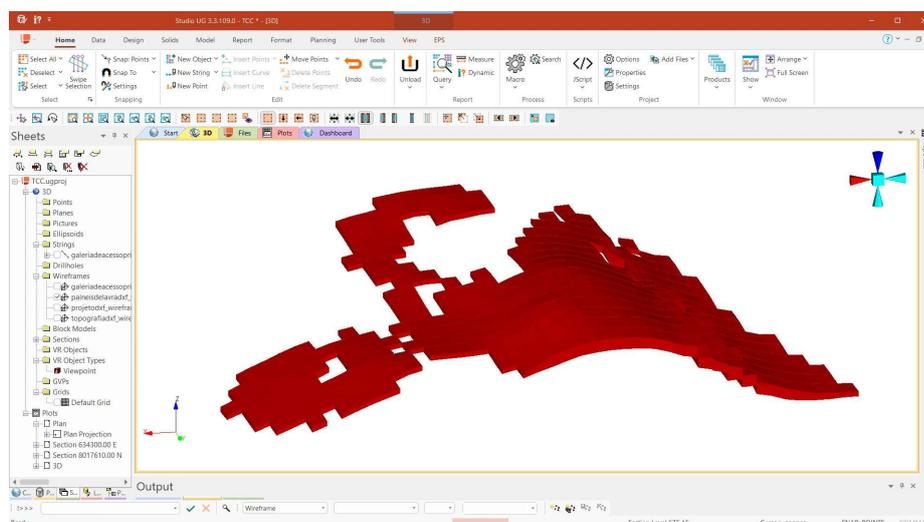
Na mineração o sequenciamento tem como objetivo encontrar uma sequência ótima de extração dos blocos, de forma que maximize o valor presente líquido, levando em conta as restrições técnicas e econômicas do projeto. (Amaral, 2008).

A seleção de uma geometria de lavra de longo prazo é determinada apenas com o intuito de maximizar o valor econômico de um projeto, baseada em uma função benefício como critério de avaliação. O sequenciamento por sua vez irá considerar o tempo em suas projeções de valores, consistindo em definir as tendências de exploração dentro das reservas totais do projeto e estabelecendo a ordem de precedência de exploração das reservas e a estratégia global de lavra (Curi, 2014).

2.7 Software Studio UG

Como base do estudo foi utilizado o software Studio UG da Datamine, o qual fornece soluções para o design e sequenciamento de uma mina subterrânea. Oferece um conjunto completo de ferramentas para todas as atividades a partir de um modelo de blocos. (Datamine Software, 2024). Sua interface está representada na Figura 13.

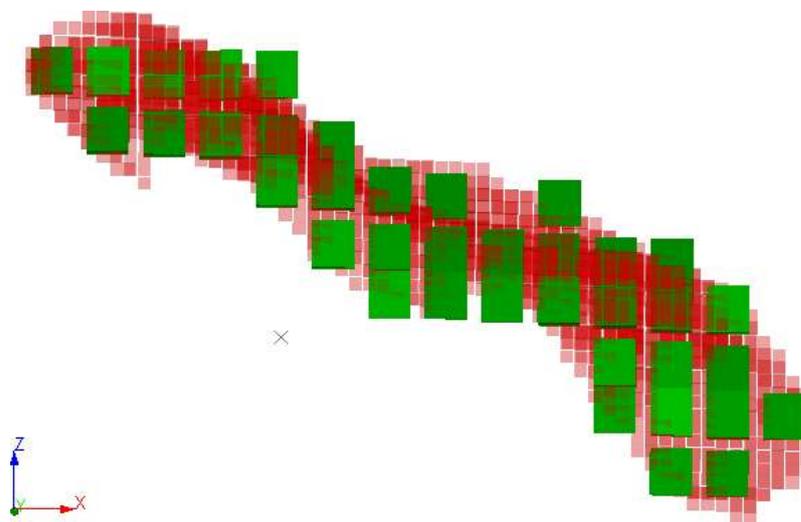
Figura 13 - Interface software Studio UG.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Dentro do Studio UG, possui o software *Mineable Shape Optimizer (MSO)*, responsável por gerar realces ideais para maximizar algum parâmetro pré-estabelecido, como teor ou massa, sem desconsiderar os parâmetros geotécnicos, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Realces gerados pelo MSO com modelo de blocos ao fundo.



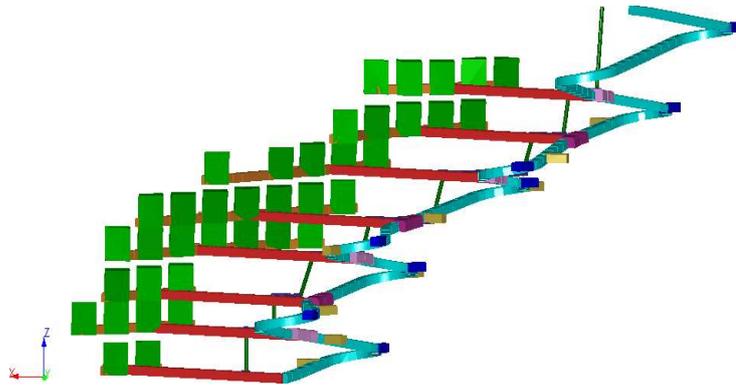
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Por meio desta ferramenta, é possível criar vários cenários para avaliar o dimensionamento dos pilares, possibilitando uma análise da influência dos pilares na recuperação, diluição, economicidade e do aspecto de segurança.

O software também possibilita a criação de várias infraestruturas de uma

mina subterrânea, desde acessos simples até estruturas mais complexas, como *raises* de ventilação. Deste modo, esta ferramenta permite que se execute projetos precisos e condizentes com a realidade encontrada no campo (Figura 15).

Figura 15 - Estruturas geradas pelo Studio UG.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

Após a definição das geometrias de desenvolvimento e lavra, o sequenciamento é realizado através da ferramenta *Enhanced Production Scheduling* (EPS), disponível também dentro do Studio UG, a qual fornece várias informações para um sequenciamento otimizado com o objetivo de extrair o valor máximo do recurso em questão.

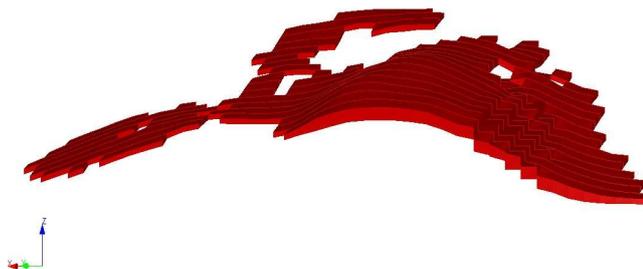
3. METODOLOGIA

A metodologia é apresentada a seguir, contendo a descrição dos materiais e procedimentos realizados neste estudo.

3.1 Base de dados

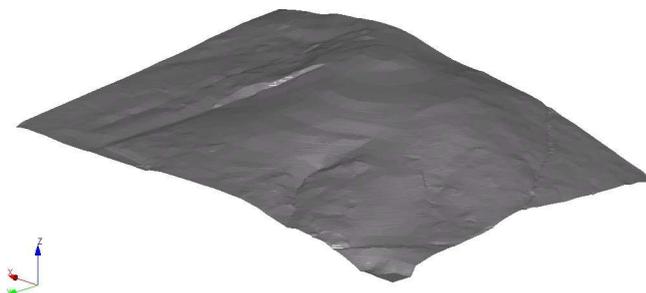
O trabalho foi desenvolvido com base em uma reserva de ouro, a qual atualmente se encontra na fase de estudos para implantação da mina. Para a execução deste estudo, os arquivos contendo parte do painel de lavra (Figura 16), topografia (Figura 17) e rampa de acesso principal (Figura 18), ligando os painéis a superfície (Figura 19), foram fornecidos pela empresa detentora. Os arquivos são apresentados a seguir:

Figura 16 – Parte do painel de lavra.



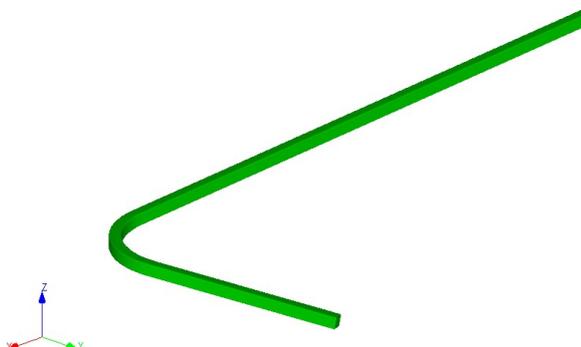
Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

Figura 17 - Topografia.



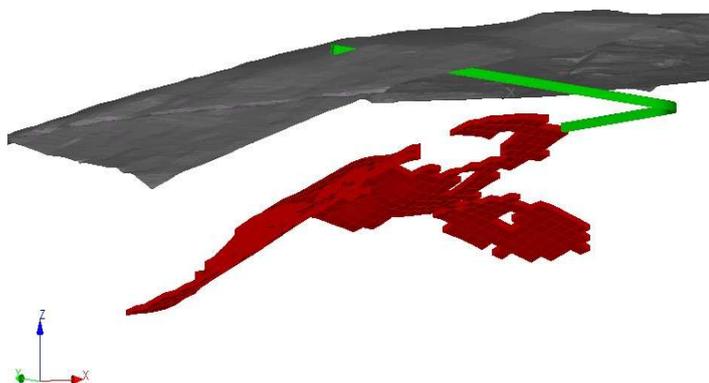
Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

Figura 18 - Rampa de acesso principal.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

Figura 19 - Projeto contendo os painéis de lavra, rampa e topografia.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

3.2 Preparação dos arquivos

Através dos arquivos fornecidos pela empresa, criou-se um modelo de blocos para a geração das câmaras e dos pilares, e também permitir a cubagem de cada estrutura.

O modelo de blocos do minério foi criado com base nos painéis de lavra, adotando-se uma densidade de $3,0 \text{ t/m}^3$ por toda extensão do corpo com uma variação de teor de ouro entre 2,5 a 4,0 g/t de forma randômica, uma vez que não se tinha informações de zonas ricas e pobres. Já o modelo de blocos da porção de estéril foi criado para todo o volume fora dos painéis de lavra, limitando-se a superfície topográfica já conhecida, adotou-se teor nulo e densidade de $2,8 \text{ t/m}^3$ para todo o estéril. A simplificação das densidades e dos teores se justifica pela abordagem qualitativa do trabalho, que visa verificar o impacto do dimensionamento dos pilares na recuperação.

Após a criação do modelo de blocos, é feita a análise do mesmo, com o intuito de verificar erros no banco de dados e corrigi-los, uma vez que este arquivo é a base de todo o estudo.

3.3 Dimensionamento

O dimensionamento das aberturas foi baseado no tamanho dos maiores equipamentos utilizados. As especificações de cada equipamento foram fornecidas pela empresa detentora da reserva. Os principais equipamentos utilizados são:

- Jumbo Atlas Copco Boomer 282;
- Caminhão Volvo FMX;
- LHD Epiroc ST-1030;
- Fandriill Sandvik DL-420.

Com as informações dos equipamentos, definiu-se as aberturas com 8 metros de largura. A altura das aberturas foi definida para coincidir com a espessura do corpo mineralizado, sendo definida em 4 metros de altura. A partir das aberturas, planejou-se pilares de seção quadrada. Para a análise da recuperação e da diluição, foram determinados 4 cenários para a dimensão dos pilares quadrados:

1. **Cenário 1:** 75% da abertura - 6 metros de largura e 4 metros de altura;
2. **Cenário 2:** 100% da abertura – 8 metros de largura e 4 metros de altura;
3. **Cenário 3:** 125% da abertura - 10 metros de largura e 4 metros de altura;
4. **Cenário 4:** 150% da abertura - 12 metros de largura e 4 metros de altura.

Logo, com esta faixa é possível verificar os impactos na recuperação de cenários extremos (75 e 150%) e intermediários (100 e 125%).

3.4 Cubagem

Através da ferramenta *Mineable Shape Optimizer* (MSO) disponível no software Studio UG, é possível realizar a otimização dos realces, visando uma maior recuperação de ouro com base no modelo de blocos, painéis de lavra, requisitos geotécnicos e restrições operacionais.

Após a geração das aberturas e pilares é realizado a cubagem dos realces, ou seja, a quantificação do que é explotado, a movimentação de massa, volume, quantidade de metal e também a metragem escavada. A cubagem permite comparar os resultados entre cenários para a análise do impacto do dimensionamento dos pilares na recuperação.

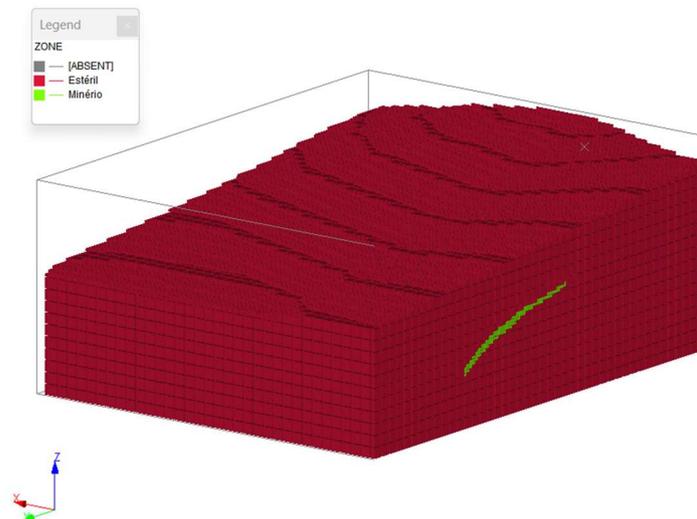
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos arquivos foram inseridos no software Studio UG Datamine para a obtenção dos resultados.

4.1 Modelo de Blocos

O modelo de blocos, o qual foi a base do estudo, está representado com uma vista em corte na Figura 20, sendo possível observar uma parte de como o corpo mineralizado está distribuído.

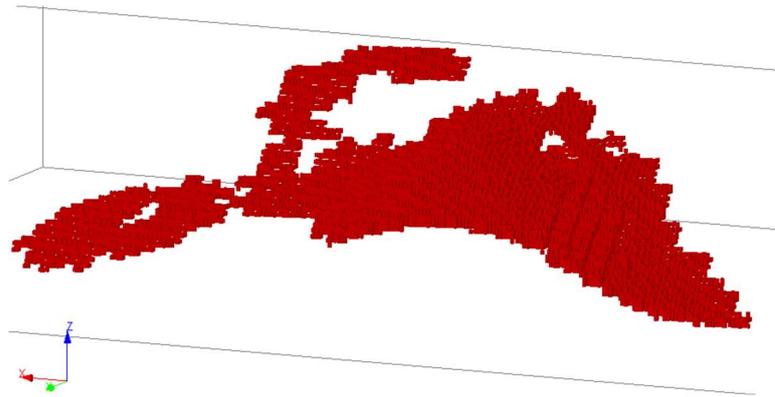
Figura 20 - Modelo de Blocos obtido.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

Para a sua obtenção, foi considerado que apenas o volume ocupado pelo painel de lavra (Figura 16) fosse minério, com um teor de ouro variando entre 2,5 a 4,0 g/t e a densidade fixa em 3,0 t/m³. A Figura 21 destaca apenas o modelo de blocos do corpo de minério.

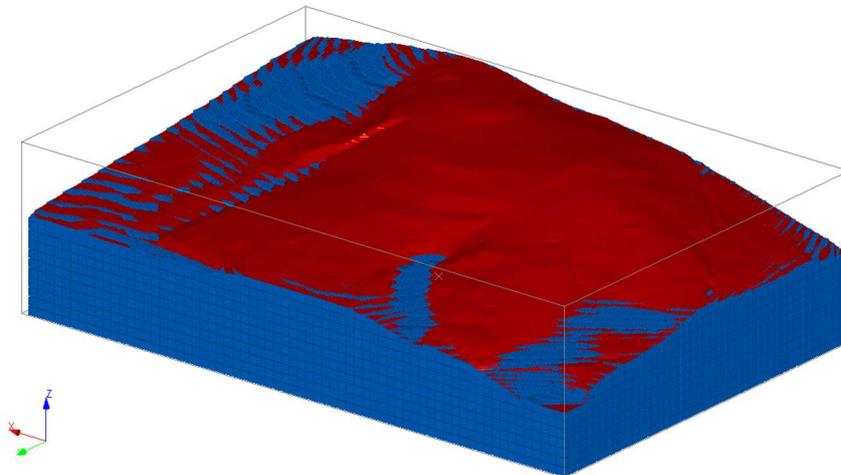
Figura 21 - Corpo de minério.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

A porção de estéril foi considerada todo o volume fora do corpo de minério, sendo limitado pela superfície topográfica fornecida pela mineradora. Nesta área foi adotado um teor de ouro igual a zero e densidade de $2,8 \text{ t/m}^3$. A Figura 22 apresenta o estéril em azul sendo limitado pela superfície topográfica em vermelho.

Figura 22 - Estéril e topografia.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

A cubagem do modelo de blocos contendo a massa, volume, teor e densidade para o estéril e minério é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1- Cubagem do modelo de blocos.

	Massa (t)	Volume (m ³)	Teor médio AU (g/t)	Massa AU (kg)	Densidade (t/m ³)
Minério	540.330	180.110	3,25	1.756	3
Estéril	92.193.925	32.926.402	0	0	2.8

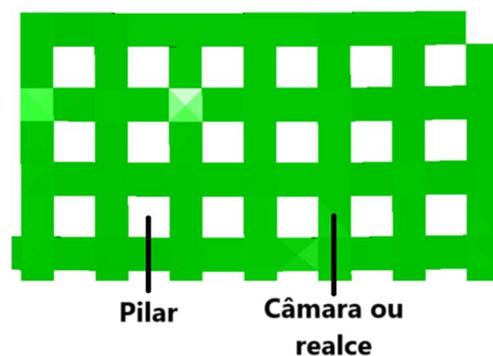
Fonte: Elaborada pelo autor.

Através da quantificação do modelo de blocos é possível observar uma massa de minério de 540.330 toneladas, representando um volume de 180.110 m³, com teor médio de ouro de 3,25 g/t, o qual indica a presença de 1.756 kg de ouro ou 56.459 onças troy.

4.2 Câmaras e Pilares

Através das especificações técnicas dos equipamentos que serão utilizados na reserva em estudo, foram definidas câmaras com dimensão de 8 metros de largura e altura de 4 metros, com base nos maiores equipamentos. A partir do tamanho da câmara foram testadas 4 dimensões diferentes para os pilares através da ferramenta *Mineable Shape Optimizer* (MSO). Esta ferramenta gerou as aberturas e os pilares respeitando as dimensões predefinidas e também o teor de corte definido como 2,5 g/t de ouro. A Figura 23 apresenta a vista superior das principais estruturas criadas pelo MSO.

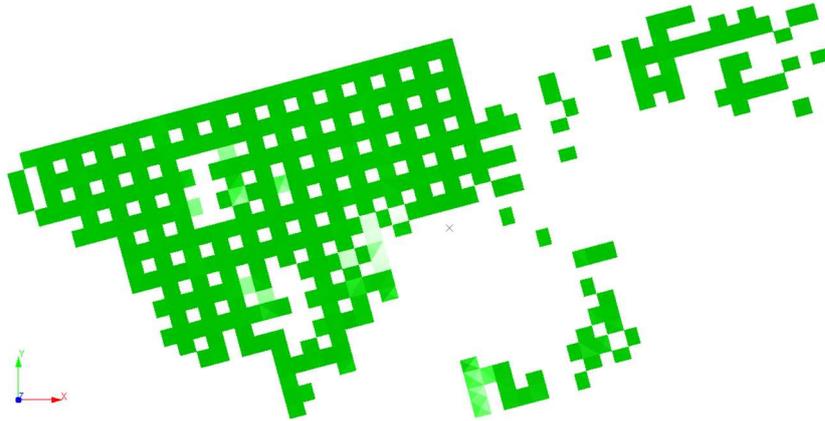
Figura 23 - Resultado câmaras e pilares pelo MSO, vista superior.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

Para o cenário 1 o pilar considerado foi de 6 metros de largura por 4 metros de altura, representando 75% da abertura. O resultado para esta situação é apresentado a seguir pela Figura 24 por uma vista superior do cenário.

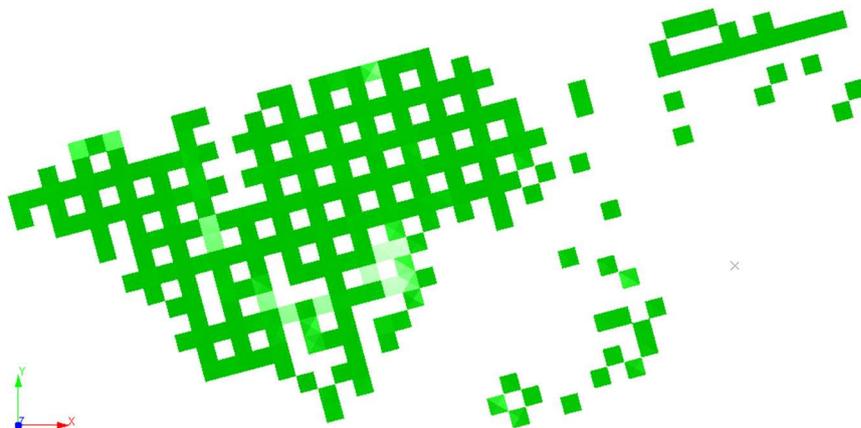
Figura 24 – Cenário 1, pilar com 75% da abertura.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

No cenário 2 considerou-se a mesma dimensão para as aberturas e os pilares, 8 metros de largura por 4 metros de altura, representando então um pilar com 100% da abertura, conforme mostra a Figura 25.

Figura 25 – Cenário 2, pilar com 100% da abertura.



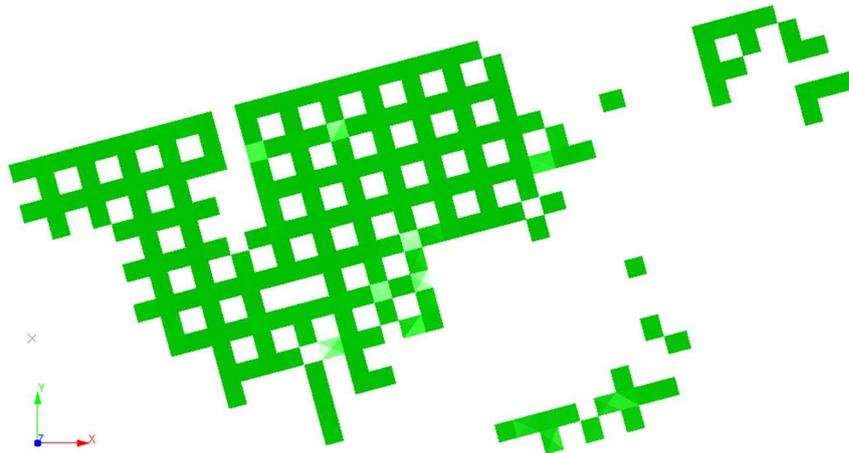
Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

Já é possível notar uma pequena diferença entre os cenários. Uma vez que os pilares estão maiores, há mais minério sendo abandonado e conseqüentemente gerando menos câmaras de exploração. Porém, devido ao abandono de pilares maiores no cenário 2, este apresenta maior segurança para

operação.

A partir do cenário 3 adotam-se pilares maiores que as aberturas, sendo que neste caso o pilar definido foi 125% da abertura, ou seja, pilares de dimensão de 10 metros de largura por 4 metros de altura, conforme apresenta a Figura 26.

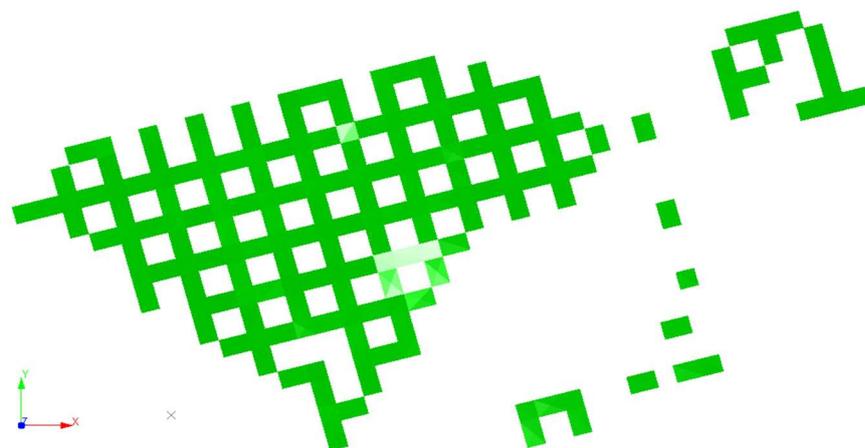
Figura 26 – Cenário 3, pilar com 125% da abertura.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

Por último, definiu-se o pilar do cenário 4 como sendo 150% do tamanho da abertura, ou seja, pilares com dimensão de 12 metros de largura por 4 de altura. Esta situação está representada na Figura 27.

Figura 27 – Cenário 4, pilar com 150% da abertura.

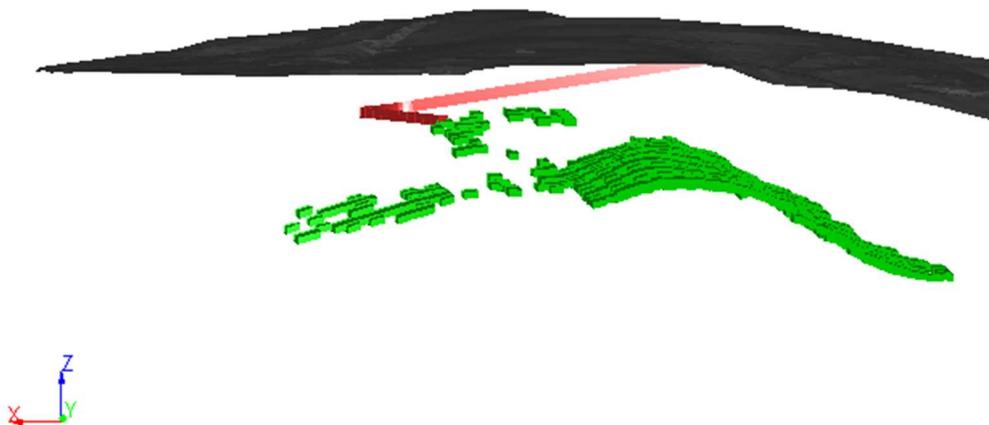


Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

4.3 Cubagem

Para a realização da cubagem, foram solidificadas as aberturas de cada cenário e também a rampa. Permitindo o cálculo de massa total, volume total e metal recuperado em cada cenário. Um dos cenários do projeto contendo as aberturas, pilares e a rampa que liga a superfície ao corpo de minério é apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Projeto cenário 1.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir do software Studio UG.

Através do software *Enhanced Production Scheduler* (EPS), presente dentro do Studio UG, foi realizada a cubagem de cada cenário. As massas e os volumes totais para cada cenário estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Massa e volume movimentados em cada cenário.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Massa total (t)	327.315	287.535	272.865	255.237
Volume total (m³)	110.954	97.469	92.497	86.521

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar uma clara tendência na diminuição da massa e volume total movimentado na medida em que as dimensões dos pilares aumentam, devido ao maior abandono de material nos pilares.

A cubagem retornou também os valores da massa e volume de minério e estéril. Os resultados de cada cenário estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Massa e volume de minério e estéril lavrados.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Massa minério (t)	292.194	251.196	235.933	219.761
Volume minério (m³)	97.398	83.732	78.644	73.254
Massa estéril (t)	35.121	36.339	36.932	35.476
Volume estéril (m³)	12.543	12.978	13.190	12.670

Fonte: Elaborada pelo autor.

A diferença entre a massa total movimentada e a massa de minério é justamente o material movimentado para a criação da rampa, pois é o único desenvolvimento que não há minério. Portanto, calculando-se a diferença entre os dois materiais movimentados em cada cenário obtêm-se uma movimentação média de 36.000 toneladas de estéril, sendo essa a quantidade necessária para a construção da via de acesso principal ao corpo de minério.

Também foi possível quantificar o ouro total extraído e a metragem escavada em cada cenário. Os resultados estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de ouro extraído e metragem escavada de cada cenário.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
AU total (kg)	868	746	706	653
AU total (oz)	27.920	23.977	22.688	20.979
Metragem (m)	391	403	409	394

Fonte: Elaborada pelo autor.

A recuperação do ouro também apresenta uma clara tendência, em que quanto maior a dimensão do pilar, menor será a quantidade de ouro extraída, sendo este o principal parâmetro do estudo.

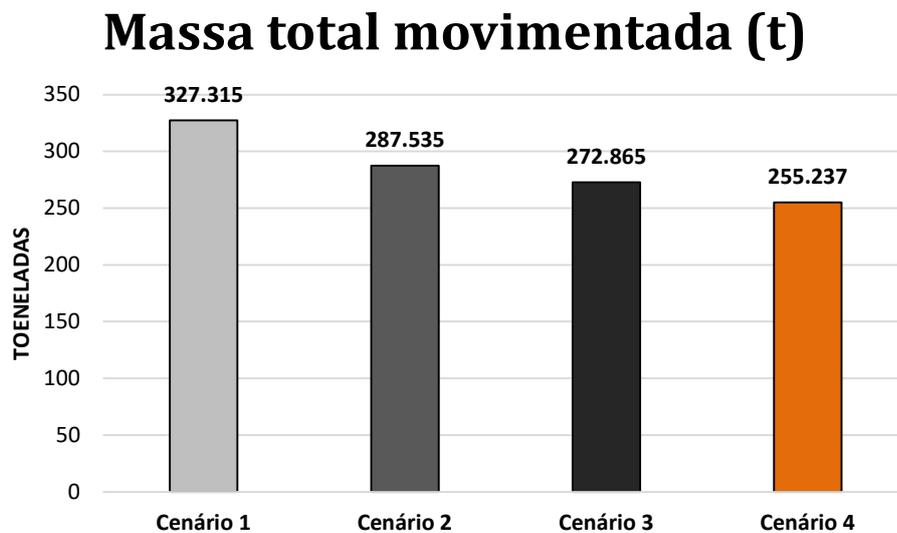
A metragem apresenta a quantidade de material retirado de forma linear.

Uma vez que a única estrutura desenvolvida é a rampa, as distâncias são bem próximas, em média 400 metros.

4.4 Análise dos resultados

Através do Gráfico 1 foi feita a análise da massa total movimentada para cada cenário.

Gráfico 1 - Massa total movimentada em cada cenário.



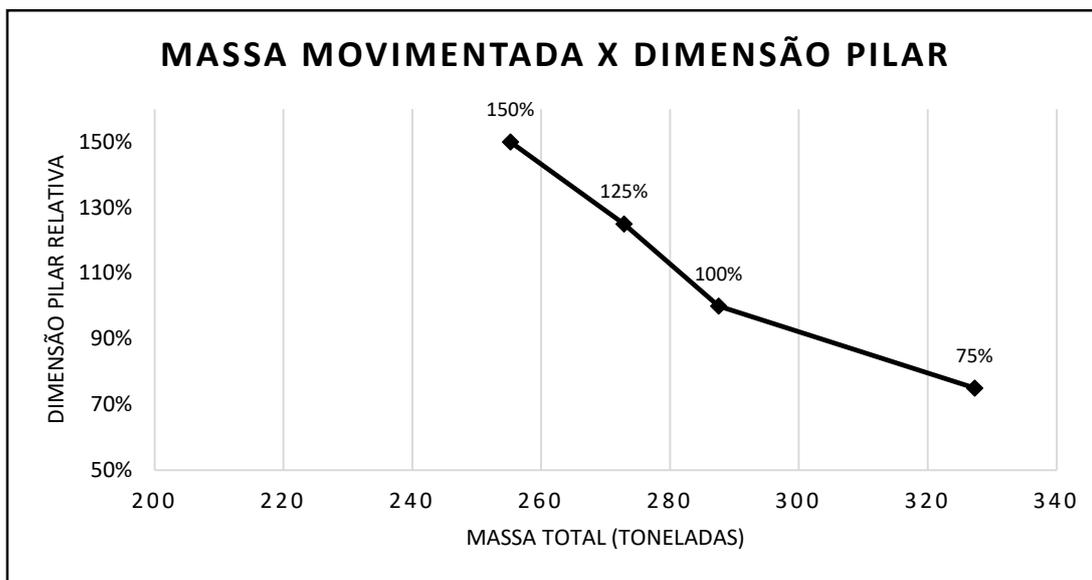
Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelo gráfico fica nítido o impacto do aumento dos pilares na massa total movimentada. Uma vez que os pilares abandonados são aumentados, diminui-se o volume disponível para a lavra, acarretando em menores quantidades movimentadas.

Entre os cenários 1 e 2 houve uma queda de 12% de massa total. Já entre os cenários 2, 3 e 4 houve uma diminuição de 5% de massa movimentada entre eles.

Relacionando a massa movimentada e a dimensão relativa do pilar de cada cenário, é possível observar o comportamento dos 2 parâmetros, como mostra o Gráfico 2.

Gráfico 2 - Comportamento do dimensionamento do pilar e da massa total movimentada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

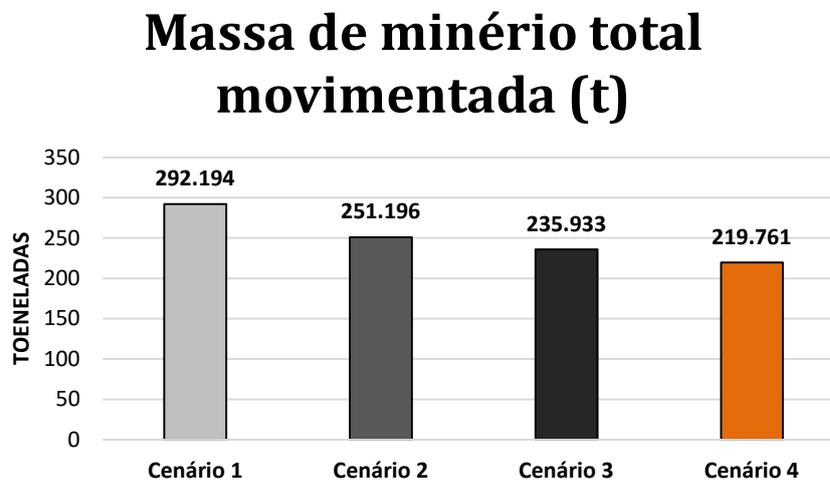
É possível observar que os 3 últimos cenários apresentam um comportamento quase proporcional, já para o pilar menor (cenário 1), o aumento na massa total movimentada ocorre de maneira desproporcional.

Partindo do cenário 1 (75%) para o cenário 2 (100%), observa-se uma grande diminuição da massa total movimentada, cerca de 40.000 toneladas, representado uma queda de 13% da massa total.

Comparando-se os cenários extremos (1 e 4), há uma queda de 72.000 toneladas de material movimentado, demonstrando o impacto da dimensão dos pilares na massa total movimentada.

Para a análise apenas da massa de minério, os resultados foram plotados no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Massa de minério total movimentada de cada cenário.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A massa de minério extraída acompanha a massa total movimentada, diminuindo de acordo com o aumento dos pilares, uma vez que quanto maiores os pilares abandonados, maiores quantidades de minério vão estar contidos neles.

Comumente usa-se a unidade onças troy para se referir a quantidade de metais preciosos, sendo que 1 onças troy equivale a 31,1035 gramas. Desta forma, levando em conta apenas o teor médio do corpo em onças troy (0,1045 oz/t), e o preço médio do ouro também em onças troy de janeiro à junho de 2025 (USD 3.077,91), obtêm-se as seguintes receitas para cada cenário:

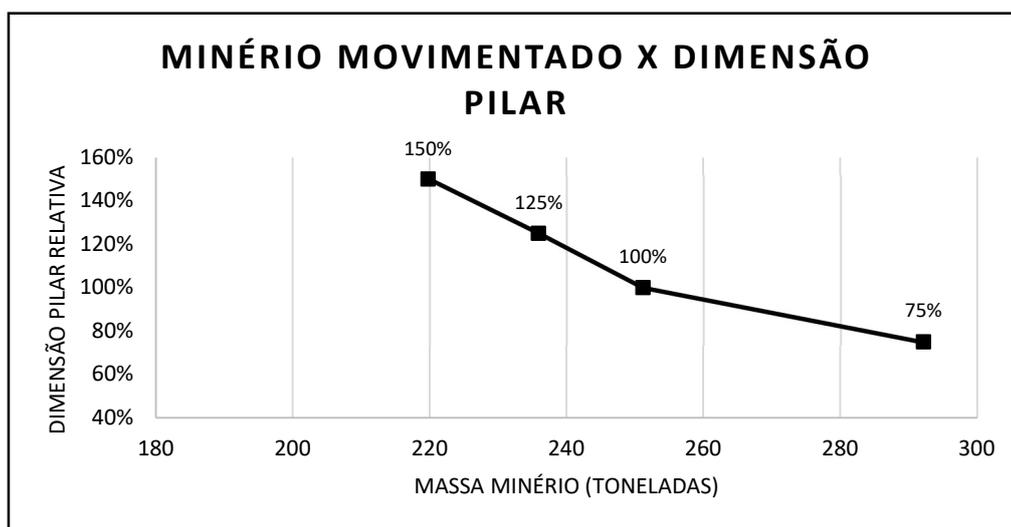
- Cenário 1: USD 85.935.247,20.
- Cenário 2: USD 73.799.048,07.
- Cenário 3: USD 69.831.622,08.
- Cenário 4: USD 64.571.473,89.

Analisando os cenários extremos, é possível ver uma diminuição na quantidade de minério recuperado de mais de 72.000 toneladas passando do cenário 1 para o cenário 4, cerca de 25%.

Esta diferença traz que 234.000 gramas de ouro, ou 7.523 oz, deixam de

ser recuperadas do cenário com pilares de 6 metros de largura para pilares com 12 metros, resultado em uma queda de 23 milhões de dólares, ou 130 milhões de reais. O comportamento entre os 2 parâmetros fica mais evidente no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Comportamento do dimensionamento do pilar e da massa de minério total movimentada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

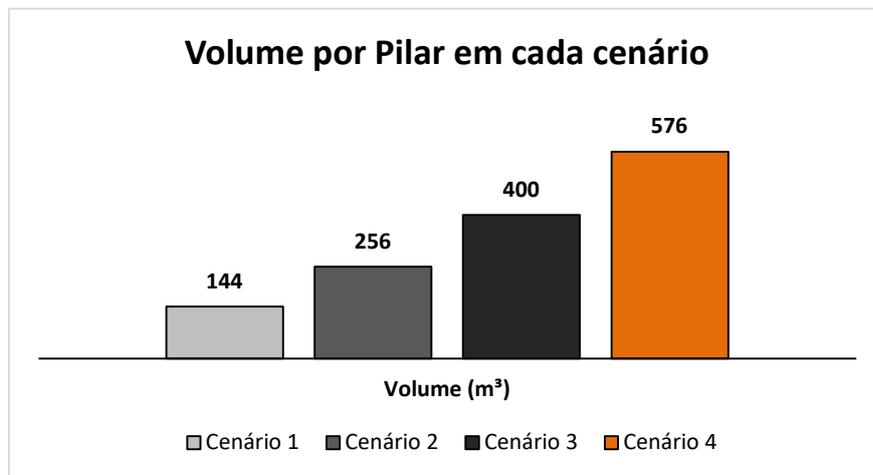
A maior diferença entre cenários próximos ocorre do cenário 2 para o cenário 1, ou seja, pilares de 8 metros de largura passam para 6 metros de largura, possuindo menor dimensão que as próprias câmaras.

Apenas entre esses dois cenários é possível ver uma diferença de 41.000 toneladas, cerca de 4.276 onças troy de ouro, gerando um impacto de mais de 13 milhões de dólares ou 75 milhões de reais, apenas entre pilares de 6 e 8 metros de largura.

Observa-se que o dimensionamento dos pilares afeta a massa de minério movimentada de forma semelhante a massa total movimentada. Esta semelhança era esperada uma vez que os realces possuem altura próxima a espessura da camada de minério, refletindo em uma baixa diluição para todos os cenários.

Esta diminuição de minério movimentado fica ainda mais evidente comparando os volumes de rocha em cada pilar, ou seja, o volume de minério que não é recuperado em cada cenário, conforme mostra o Gráfico 5:

Gráfico 5 - Volume de rocha por pilar em cada cenário.



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar que os pilares do cenário 4 possuem um volume quatro vezes maior que o volume dos pilares do cenário 1. Desta forma, cada pilar abandonado no cenário 4 equivale a 4 pilares abandonados no cenário 1, o que reflete nesta diminuição de minério recuperado.

Fazendo uma relação entre a quantidade total de minério do modelo de blocos, 540.330 toneladas, e as quantidades extraídas em cada cenário, é possível obter a recuperação de lavra de cada cenário, foco principal do trabalho. Os resultados da recuperação do minério para cada cenário estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Recuperações de lavra de cada cenário.

Recuperação de lavra	
Cenário 1	54%
Cenário 2	46%
Cenário 3	43%
Cenário 4	40%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Levando em conta a média de recuperação entre 40 e 60% no método Câmaras e Pilares, o cenário 1 teve uma alta recuperação, destoando dos

cenários restantes. Em contrapartida, o cenário 4 apresenta a recuperação mais baixa e igual ao limite inferior descrito pela literatura.

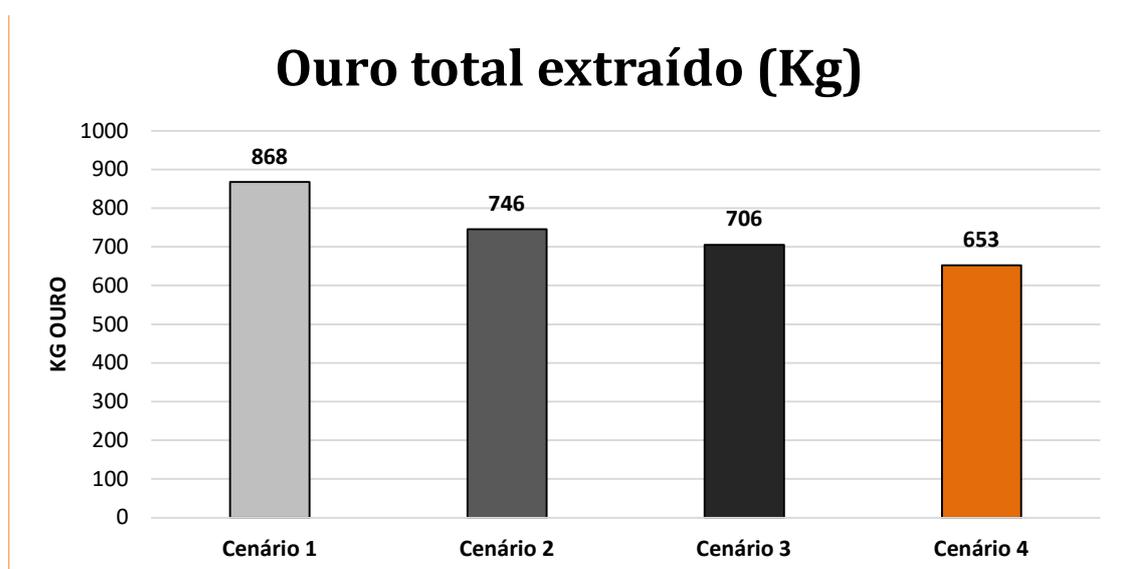
É possível observar um grande salto na recuperação do cenário 2 para o cenário 1, representando um aumento de 8% na recuperação e receita de 75 milhões de reais, reforçando que os pilares menores que as aberturas trazem ganhos expressivos.

Fica evidente que o dimensionamento dos pilares possui um importante impacto sobre a recuperação de lavra. Partindo do cenário de menor dimensão (cenário 1) para o cenário de maior dimensão de pilar (cenário 4), há uma queda de 14% da recuperação, resultando em uma diferença de 72.433 toneladas de minério entre cada situação.

A diluição em todos cenários apresentou valores desprezíveis, uma vez que a altura da câmara (4 metros) coincidiu com a altura do corpo de minério, sendo possível realizar a lavra sem se preocupar com a diluição, por se tratar de um modelo simplificado.

A quantidade de ouro extraída para cada cenário é apresentada no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Ouro total extraído em cada cenário.



Fonte: Elaborada pelo autor.

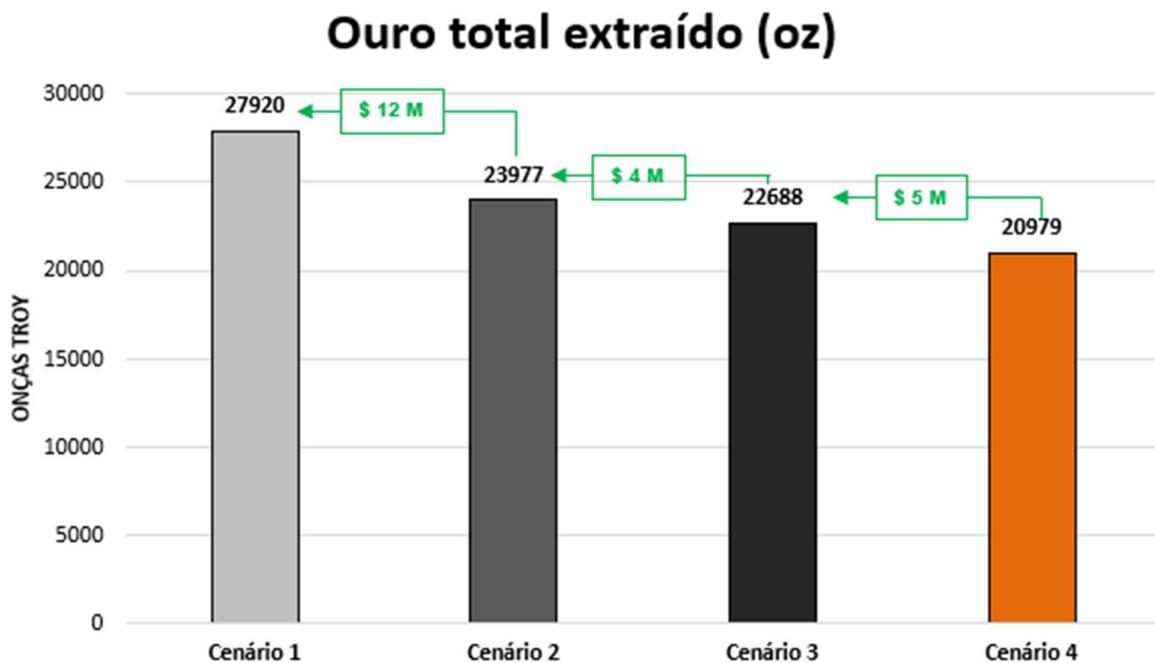
O ouro contido na reserva segue o mesmo padrão, diminui à medida em

que o dimensionamento dos pilares é maior, diminuído assim a sua recuperação. Este dado sendo um dos mais importantes no dimensionamento dos pilares, refletindo diretamente na economicidade e viabilidade do projeto.

Considerando a quantidade total de ouro no modelo de blocos, 1.756 kg, é possível observar uma boa recuperação deste ouro contido, uma vez que cerca de 50% do minério está presente nos pilares.

O Gráfico 7 apresenta a conversão para a quantidade de onças troy extraída e a diferença de receita total entre os cenários propostos.

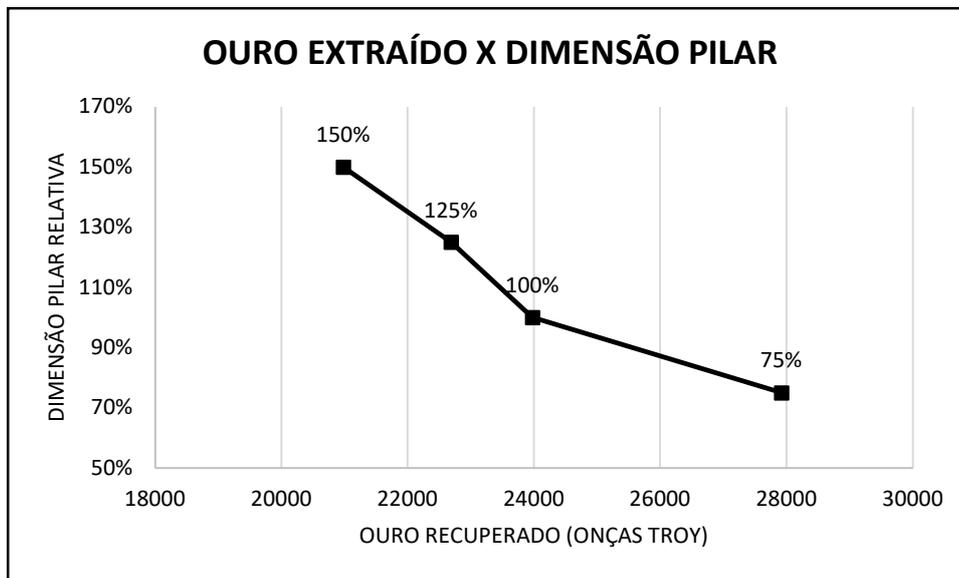
Gráfico 7 - Ouro total extraído em onças troy e receitas brutas entre cenários.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O Gráfico 8 permite avaliar o impacto do dimensionamento dos pilares na recuperação do ouro.

Gráfico 8 – Comportamento da quantidade de ouro extraída e do dimensionamento dos pilares de cada cenário.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se também um padrão entre os cenários 2, 3 e 4, porém com um grande aumento na recuperação para o cenário 1.

Observa-se a importância do dimensionamento do pilar uma vez que partindo do cenário 1 para o cenário 2, teve uma redução de 15% de ouro extraído, ou 3.933 onças troy, representando mais de 12 milhões de dólares. Já em relação ao cenário 4, houve uma redução de 25% ou 6.941 onças troy, mais de 21 milhões de dólares.

Outro dado importante de se analisar é a metragem da escavação, o qual reflete no tempo de execução dos desenvolvimentos e também nos custos. A metragem de cada cenário está na Tabela 6.

Tabela 6 - Metragem escavada de cada cenário.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Metragem de escavação (m)	391	403	409	394

Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste estudo, a metragem não é um bom indicativo, pois a única estrutura de desenvolvimento é a rampa de acesso principal, a qual não houve grande

variação entre os cenários. Caso houvesse mais estruturas, como ventilação, galerias e poços, a sua análise seria fundamental para a realização do projeto.

Do ponto de vista de segurança, é possível avaliar qualitativamente cada cenário de acordo com a dimensão dos pilares, que são as principais estruturas de suporte deste método.

O cenário 1 é o mais crítico do ponto de vista da segurança, pois é o único cenário em que o pilar é menor do que a abertura, assim sendo necessário um uso intenso de suportes, como concreto, ancoragem e telas metálicas, aumentos os custos de infraestruturas das aberturas. O cenário 2 traz um contexto em que se necessita de uma quantidade significativa de suporte e um monitoramento constante das estruturas. Os cenários 3 e 4 trazem maior segurança, devido aos pilares serem maiores que as aberturas, necessitando de menor quantidade de suporte artificial, assim reduzindo os gastos referentes à maquinários e produtos para o controle destes materiais.

Através destes resultados é notável o impacto da recuperação na segurança. Cenário com altas recuperações (1 e 2), embora geram uma receita maior pela quantidade de minério extraída, possuem gastos maiores com a instalação e manutenção de suportes, além do monitoramento constante das estruturas. Por outro lado, embora nos cenários 3 e 4 a recuperação seja menor, deve-se avaliar os ganhos relacionados a menor necessidade de infraestruturas de contenção.

Desta forma, o estudo de análise do dimensionamento de pilares deve ser feito de forma muito cuidadosa, uma vez que alterações nessas dimensões tem a capacidade de causar uma grande variação da recuperação, impactando diretamente na economia da mina, podendo até mesmo inviabilizar o empreendimento. O dimensionamento também impacta na segurança, que caso sofra algum problema, pode trazer consequências de ordem social e econômica severas.

Não há melhor cenário por se tratar de um estudo qualitativo de como o dimensionamento dos pilares interfere na segurança e na recuperação da reserva, porém é possível indicar possíveis caminhos.

Caso a rocha seja competente e os pilares possam ser menores que as aberturas, recomenda-se o cenário 1 do ponto de vista econômico, pois há um melhor aproveitamento da reserva, porém com uma movimentação de material maior, o qual deverá ser analisado também. Para um maciço fraturado, menos competente, indica-se os cenários 3 e 4, os quais embora possuem menores recuperações, trazem maior segurança para operação, sendo esta necessária em todas hipóteses para uma lavra consciente e sustentável.

5. CONCLUSÃO

O trabalho permite discussões a respeito do dimensionamento dos pilares levando em conta a segurança e a recuperação, atingindo assim seus objetivos principais.

O método Câmaras e Pilares caracteriza-se por uma baixa recuperação, onde qualquer aumento desta recuperação traz grandes retornos. Equilibrando com a baixa recuperação do metal, trata-se de um método simples de ser instalado e operado, sendo viável mesmo com uma baixa recuperação.

Com todas essas questões, foi possível observar que dentro deste método de lavra, o dimensionamento dos pilares é fundamental para realizar a análise de viabilidade do projeto, devido ao forte impacto sobre a recuperação de lavra. Passando do cenário 1 com os pilares de 6x6 metros para o cenário 2 com os pilares de 8x8 metros, houve uma queda de recuperação de 8%, representando uma diferença de quase 3.943 onças troy. Já se comparar os extremos (cenário 1 e cenário 4), há uma diferença de recuperação de 72.433 toneladas de minério e 6.941 onças troy.

Evidencia-se então a importância de um bom dimensionamento dos pilares para o método câmaras e pilares, refletindo diretamente na viabilidade do projeto de lavra. Para se obter o cenário ideal é necessário possuir as informações geotécnicas do minério e da rocha encaixante, para assim ser possível definir o tamanho mínimo dos pilares para maximizar a recuperação, respeitando os limites do maciço e garantindo assim a segurança da mina e dos trabalhadores.

Sugere-se para trabalhos futuros a elaboração do modelo contendo todo o desenvolvimento secundário e terciário da mina, e a inserção de parâmetros econômicos como receitas e custos, para uma avaliação mais completa da situação, possibilitando validar o melhor cenário.

6. REFERÊNCIAS

- ALFORD, C.; BRAZIL, M.; LEE, D. H. **Optimization in underground mining**. In: Handbook of operations research in natural resources. [S.l.]: Springer, 2007. p. 561–577.
- AMARAL, M. do. **Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- CARANASSIOS, A.; TOMI, G. F. C. D.; SILVA, N. **Utilização de software de mineração no planejamento de lavra de rochas ornamentais**. Anais, 1998.
- CURI, A. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2014.
- DARLING, P. **SME mining engineering handbook**. [S.l.]: SME, 2011. v. 1.
- FIGUEIREDO, R. de; CURI, A. **Dimensionamento ótimo de painéis, câmaras e pilares com programação não-linear**. 2004.
- HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1987.
- HUSTRULID, W.; KUCHTA, M. **Open pit mine planning and design**. volume 1-fundamentals. 1995.
- HUSTRULID, W. A.; BULLOCK, R. L. **Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies**. [S.l.]: SME, 2001.
- HUSTRULID, W. A.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. **Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack**. [S.l.]: CRC Press, 2013.
- KALVELAGE, M. R.; LIMA, A. d. A.; TOMI, G. F. de. **Estudo de caso sobre o modelamento informatizado da lavra de rochas ornamentais**. In: . [S.l.]: CETEM/MCTI, 2002.
- LEE, T. Planning and mine feasibility study—an owners perspective. **Proceedings of the 1984 NWMA Short Course „Mine Feasibility–Concept to Completion”**.(GE McKelvey, compiler) Spokane, WA, 1984.
- MACKENZIE, B. W. **Looking for the improbable needle in a haystack: the economics of base metal exploration in canada**. 1981.
- NEHRING, M.; TOPAL, E. **Production schedule optimisation in underground hard rock mining using mixed integer programming**. In: Project evaluation conference. [S.l.: s.n.], 2007. p. 169–175.

NEME, M. B. et al. **Realização de projeto de lavra de mina subterrânea com utilização de aplicativos específicos.** Rem: Revista Escola de Minas, SciELO Brasil, v. 64, p. 519–524, 2011.

PINEDO, M.; HADAVI, K. **Scheduling: theory, algorithms and systems development.** In: SPRINGER. Operations Research Proceedings 1991: Papers of the 20th Annual Meeting/Vorträge der 20. Jahrestagung. [S.l.], 1992. p. 35–42.

SILVA, J. **Lavra de mina subterrânea.** [S.l.]: Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.

SNOWDEN, D. **Practical interpretation of resource classification guidelines.** In: CITESEER. AusIMM Annual Conference, Perth. [S.l.], 1996. v. 68.

SOUZA, V. G. de et al. **Planejamento operacional de minas a céu aberto: aplicação de otimização baseada em simulação.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 9, p. 70983–70998, 2020.

TOMI, G. F. C. D.; WIESEL, H.; SILVA, N. C. S. **Aplicações de otimização em lavra subterrânea.** Anais, 2000.