



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
ENGENHARIA DE MINAS

GIORDANNA BATISTA RIBEIRO

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE UTILIZANDO O MODELO MARVIN
PARA RELATÓRIOS DE RESERVAS BASEADO NA NI43101

ARAXÁ-MG
2023

GIORDANNA BATISTA RIBEIRO

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE UTILIZANDO O MODELO MARVIN
PARA RELATÓRIOS DE RESERVAS BASEADO NA NI43101**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador(a): Ma. Silvia de Castro Martins

ARAXÁ-MG

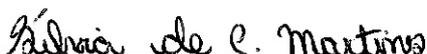
2023

GIORDANNA BATISTA RIBEIRO

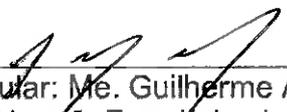
**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE UTILIZANDO O MODELO MARVIN
PARA RELATÓRIOS DE RESERVAS BASEADO NA NI43101**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

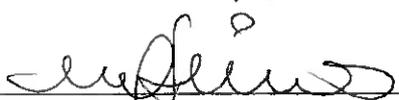
Data de Defesa: Araxá, 04 de julho de 2023.



Presidente e Orientador(a): Ma. Silvia de Castro Martins
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá


Membro Titular: Me. Guilherme Alzamora Mendonça

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá


Membro Titular/ Dra. Marly Aparecida da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

*À minha família, que sempre acreditou no meu potencial,
em especial à minha mãe e irmãs, que estiveram no meu lado todos esses anos,
me apoiando em cada passo dos meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me permitido chegar aqui e sempre ter colocado as pessoas certas no meu caminho. À toda a espiritualidade e meus guias por estarem sempre ao meu lado me guiando e me intuindo aos melhores caminhos, mesmo quando tudo parece estar colapsando. E por me mostrar os aprendizados nos momentos mais difíceis.

À minha mãe, Sandra Silva, e irmãs, Giovanna e Giulliana Ribeiro, por terem me apoiado por toda a trajetória e incentivado cada passo para chegar até aqui. Também aos meus amigos Kelli Cristina dos Santos e Rafael Rodrigues de Paula, que não largaram a minha mão nos momentos mais difíceis, ouvindo desabafos em meio a correria do final de projeto e faculdade, aconselhando e não me deixando desistir.

À minha orientadora, Sílvia de Castro Martins, por ter aceitado o desafio de pegar esse projeto faltando dois meses para sua finalização e auxiliado com maestria durante esse tempo na parte prática e conclusão do trabalho. Além da professora Silvânia Braga, que também aceitou a orientação após a saída do professor Allan Erlikhman, mas que também por seus motivos não pode dar continuidade, mas não sem antes serem peças fundamentais para o desenvolvimento teórico do estudo.

Ao CEFET-MG por ter me proporcionado tanto conhecimento e oportunidade de crescimento durante os 7 anos em que estou na instituição, considerando também o curso técnico. Agradeço pela oportunidade de realizar o intercâmbio de 6 meses em Portugal, o que muito agregou para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Aproveito para estender o meu agradecimento à FEUP por ter me acolhido durante esse tempo e por ter permitido amizades tão especiais como Giovanna Rossato, Marina Rito, Pedro Dantas e Tainá Bueno.

À *MiningMath*, por ter dado uma oportunidade à uma iniciante, sem experiência nenhuma e preparo, e me lapidado como pessoa e profissional ao longo desses 3 anos e meio, sempre com o incrível espírito de família.

RESUMO

O relatório de reservas é um dos documentos mais importantes durante a abertura da mina e nele é feita a submissão da cava ótima, não podendo mais ser alterada. Normalmente, não é feita uma análise de sensibilidade para esse relatório, procedimento este que é muito importante para o andamento do planejamento de lavra. Ao longo do planejamento da mina, vários tipos de riscos podem ser encontrados e como não há a possibilidade de modificar a cava ótima submetida ao relatório, pode-se gerar prejuízo no futuro. Ao fazer esta análise de sensibilidade, é possível identificar os riscos previamente. O objetivo geral deste trabalho é elaborar o relatório de reservas empregando-se a análise de sensibilidade de variáveis econômicas e geométrica, avaliando-se os possíveis riscos do projeto para que os mesmos já sejam identificados e reduzidos. Para isso, foi utilizado o modelo de relatório canadense NI43101, uma vez que o mesmo é uma das grandes referências para informe de reserva para a bolsa de valores no mundo. Os cenários avaliados na análise de sensibilidade foram gerados no *software MiningMath*, utilizando-se o modelo de blocos Marvin, de uso livre. Por fim, comprovou-se a eficácia na análise de sensibilidade, incrementando o VPL em cerca de 11% para esse projeto. Além disso, obteve-se êxito na realização da mesma de forma prática, para a taxa de desconto, preço do minério e custos, e teórica, para o teor. Ademais, mostrou-se a relevância da inclusão das variáveis geométricas nesta análise prévia, ao identificar que seus impactos podem variar de 12% de ganho à 95% de perda no VPL. Este resultado justifica a importância do estudo e melhor compreensão destas variáveis e seus respectivos impactos no projeto, afirmando a classificação teórica das mesmas como não-lineares.

Palavras-chave: Planejamento de lavra. Sequenciamento direto de blocos. Relatório de reserva.

ABSTRACT

The reserves report is one of the most important documents during the opening of the mine and it contains the submission of the optimal pit, which can no longer be changed. Normally, a sensitivity analysis is not carried out for this report, a procedure that is very important for the progress of mine planning. Throughout the mine planning, several types of risks can be found and, as there is no possibility of modifying the optimal pit submitted to the report, it can generate losses in the future. By doing this sensitivity analysis, it is possible to identify the risks in advance. The general objective of this work is to prepare the reserves report using the sensitivity analysis of economic and geometric variables, evaluating the possible risks of the project so that they are already identified and reduced. For this, the Canadian report model NI43101 was used, since it is one of the major references for reserve reporting for the stock exchange in the world. The scenarios evaluated in the sensitivity analysis were generated in the *MiningMath* software, using the Marvin block model, which is free to use. Finally, the effectiveness of the sensitivity analysis was proven, with success in its practical form, such as the discount rate, ore price and costs, and theoretical, such as grade. Furthermore, the relevance of including geometric variables in this previous analysis was shown, confirming the theoretical classification of these variables as non-linear.

Keywords: Mine Planning. Direct Block Scheduling. Reserve Report.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo típico de lavra de minas.	11
Figura 2 - Classificação de recursos e reservas.....	13
Figura 3 - Comparativo entre os códigos dos países..	15
Figura 4 - Passos da metodologia Lerchs-Grossman/Pseudoflow.	17
Figura 5 - Pontos negativos da metodologia Lerchs-Grossman/Pseudoflow.	18
Figura 6 - Esquema sobre o DBS.....	19
Figura 7 - Comparativo entre LG e DBS.	20
Figura 8 - Variáveis geométricas.....	21
Figura 9 - Fluxograma da metodologia.....	25
Figura 10 - Cava final obtida no <i>software MiningMath</i>	28
Figura 11 - Gráfico da variação de taxa de desconto.....	28
Figura 12 - Gráfico da variação de preço do minério.	29
Figura 13 - Gráfico da variação da Largura de Mina.	30
Figura 14 - Gráfico da variação do Avanço Vertical.	31
Figura 15 - Gráfico da variação da Largura de Fundo.....	32
Figura 16 - Gráfico de produção do minério.....	33
Figura 17 - Gráfico de produção total.....	33
Figura 18 - Gráfico de produção de estéril.	34
Figura 19 - Tabela de produção por período.	34
Figura 20 - Principais variáveis do arquivo " <i>Mined Blocks</i> ".	35
Figura 21 - Principais informações do " <i>Mined Blocks</i> " com filtro de teor.....	36

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Modelos de blocos disponibilizados pelo Minelib.	22
Tabela 2 - Lucro máximo conhecido dos modelos de blocos disponibilizados pelo Minelib.	22
Quadro 1 - Parâmetros base do projeto Marvin	23
Quadro 2 - Variáveis padrão definidas para o projeto Marvin	26
Quadro 3 - Variáveis para a análise de sensibilidade.	26
Quadro 4 - Sequência de casos padrão.	27
Quadro 5 - Análise combinada.	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Recursos e reservas	13
2.1.1	RECURSOS.....	14
2.1.2	RESERVAS	14
2.2	Códigos de declaração de recursos e reserva.....	14
2.2.1	CÓDIGO CANADENSE	15
2.3	<i>Softwares</i>	16
2.3.1	LERCH-GROSSMAN/PSEUDOFLOW	16
2.3.2	Sequenciamento direto de blocos.....	18
2.3.2.1	<i>Modelo Marvin</i>	21
3	METODOLOGIA	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5	CONCLUSÕES.....	37
	REFERÊNCIAS.....	38

1 INTRODUÇÃO

Segundo Curi (2017), o estudo da lavra é um campo demasiado abrangente, de forma que são tantos os conhecimentos e especialidades que seria impossível explorar todos os possíveis assuntos em um único trabalho. Dito isso, o presente trabalho se aprofundará na área de planejamento de lavra, que consiste em elaborar um plano estratégico de produção de forma que haja um máximo aproveitamento das reservas e simultaneamente uma maior economicidade do projeto.

Em adição a isso, atualmente ainda muito se muda no planejamento durante a vida útil da mina. Ainda segundo Curi (2017), o processo de um projeto de lavra acontece de forma simultânea com outros procedimentos conforme ilustra a Figura 1 a seguir.

Figura 1 – Ciclo típico de lavra de minas.



Fonte: Curi (2017)

Devido a essa simultaneidade, muitas vezes inicia-se o projeto com determinadas características e parâmetros e estes vão se modificando ao longo do tempo. Sendo assim, é necessário ter-se um planejamento prévio que já considere tais possíveis mudanças de forma que sendo necessário fazê-las, as mesmas não impactem o projeto de forma brusca.

Partindo deste princípio e com o objetivo de detalhar cada vez mais o tema proposto, é imprescindível passar pelos temas de declaração de reservas e análise de sensibilidade. O primeiro tópico é extremamente relevante uma vez que “as reservas minerais declaradas representam um ativo de grande importância para uma empresa de mineração” (TULCANAZA, 2015, p. 219). Porém, apesar de se

encontrar artigos e materiais relacionados à análise e caracterização de reservas, ainda há um foco maior no que diz respeito a declaração de recursos. Já o segundo é um tópico de alta relevância em qualquer área de atuação que abra margem para alteração de variáveis. Na mineração, há alguns trabalhos importantes dentro da temática do planejamento de mina como Amorim (2018), Flores e Cabral (2008) e Peroni (2002).

Contudo, ainda não há um conteúdo que agregue ambos os temas e é a partir desta circunstância que se elucida a relevância do presente trabalho. Portanto, a atual pesquisa parte do seguinte questionamento: Como fazer um relatório de reservas no qual uma análise de sensibilidade seja previamente considerada?

Ademais, sugere-se como hipótese que é possível realizar uma análise de sensibilidade previamente à elaboração do relatório de reservas, pode-se obter melhores resultados durante e ao final do planejamento de lavra. Logo, o objetivo geral deste trabalho é realizar um relatório de reserva que considere uma análise de sensibilidade prévia, enquanto se comprova que é possível fazê-la por meio da metodologia de sequenciamento direto de blocos (DBS), bem como a importância das variáveis geométricas.

Com a finalidade de atingir o objetivo proposto, o *software* utilizado será o *MiningMath*, o qual ainda é um programa relativamente novo que está ainda buscando abrir o seu espaço no mercado mineiro e reconhecimento como *software* habilitado para realizar tal relatório.

Nos próximos capítulos uma revisão bibliográfica será apresentada para introdução de alguns assuntos relevantes para o andamento do trabalho, assim como a metodologia utilizada para desenvolvimento dos cenários estudados. Por fim, os resultados serão evidenciados, bem como as devidas conclusões acerca dos mesmos.

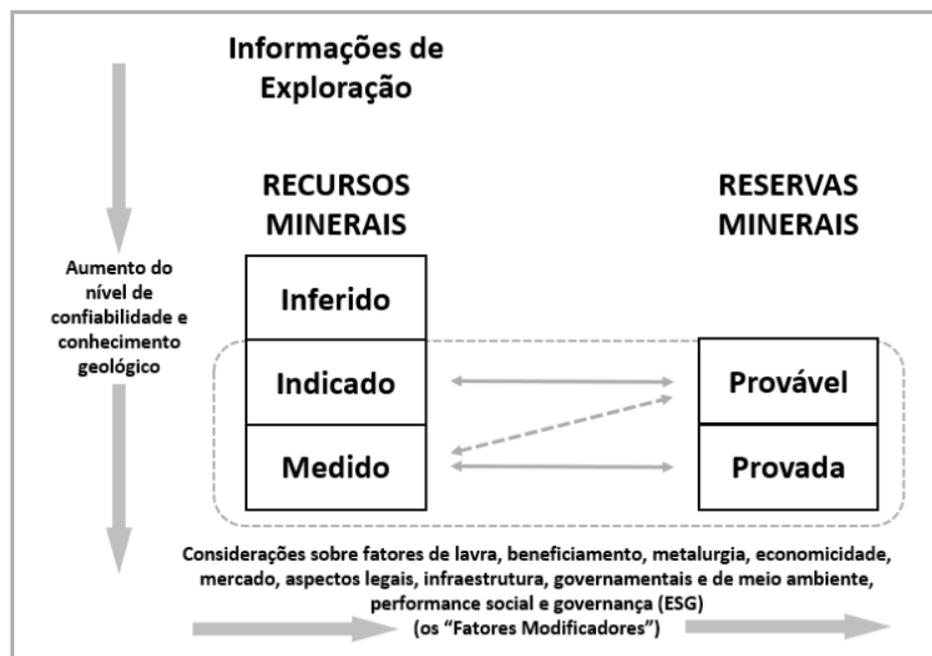
2 REFERENCIAL TEÓRICO

A indústria mineira é demasiada extensa para ser compreendida em uma única definição. Para facilitar seu estudo e compreensão, segundo Curi (2014) foram divididas em quatro estágios conceituais principais, embora a execução dos mesmos esteja atrelada. São eles: prospecção, exploração, desenvolvimento e lavra, já levando em consideração o fechamento de mina. Para delimitar melhor o campo de atuação deste trabalho, doravante serão tratados temas relacionados à exploração e à lavra.

2.1 Recursos e reservas

Uma das partes cruciais do desenvolvimento de um projeto de mineração consiste na pesquisa e quantificação da jazida mineral. Tais jazidas são descobertas a partir de anomalias, sejam elas químicas ou físicas, que identificam os elementos e/ou minerais que estão *in situ*. Todavia, conforme a Figura 2 elucida, há diferentes definições para o mesmo depósito geológico baseado no grau de conhecimento sobre o mesmo.

Figura 2 – Classificação de recursos e reservas.



Fonte: CBRR (2022)

2.1.1 RECURSOS

Os recursos são a classificação de um depósito com baixo ou nenhum nível de conhecimento, seja ele econômico, técnico, ambiental ou legal. Já no âmbito geológico, há três possíveis categorias: os recursos inferidos, indicados e medidos. O primeiro é referente ao menor grau de conhecimento geológico e ocorre quando há sinais de ocorrência de um depósito, mas não é certa a continuidade do mesmo. O segundo apresenta um nível médio de informação, enquanto o último dispõe de um elevado nível de conhecimento geológico sobre teores, forma, tonelagem e demais características relevantes. Segundo Curi (2017), ainda há uma quarta categoria possível, os recursos potenciais, os quais não se enquadram nas classificações acima, mas ainda há uma possibilidade aceitável de que haja aproveitamento.

2.1.2 RESERVAS

Os recursos podem ser convertidos em reservas a partir do aumento do estudo do depósito geológico com relação à economicidade e legalidade, além de aspectos técnicos e ambientais. Ademais, em similaridade ao que ocorre com os recursos, as reservas também possuem diferentes classificações baseadas no seu grau de conhecimento geológico. Elas podem ser divididas em reservas prováveis e provadas e estão relacionadas com os recursos indicado e medido, respectivamente, assim como os mesmos níveis de informação. Sendo assim, as reservas constituem as partes economicamente viáveis de um recurso.

2.2 Códigos de declaração de recursos e reserva

Os códigos de declaração de recursos e reservas são partes importantes das leis de cada país. Sendo assim, cada país tem o seu código, apesar de alguns serem mais aceitos mundialmente do que outros. Os códigos mais conhecidos, antigos e com maior reconhecimento no mercado são aqueles provenientes de países com forte atividade mineira como Austrália, Canadá, Estados Unidos, África do Sul, entre outros. Segundo Miskelly (2003), até o início dos anos 90, pouco ainda

havia se desenvolvido no que diz respeito a padrões internacionais de informe de reservas. Começou-se com o JORC (sigla para “Joint Ore Reserves Committee”), na Austrália, em 1989, sendo referência até os dias atuais. Este foi seguido pelos códigos americano e inglês em 1991, até culminar em um Conselho de Institutos de Mineração e Metalurgia em 1993. Neste conselho houve a incorporação de representantes também da Austrália e África do Sul.

Além disso, no Brasil, também há um código de declaração e que foi atualizado recentemente, em 2018. A Figura 3 a seguir mostra um comparativo entre os códigos de alguns países de acordo com Santos (2017).

Figura 3 - Comparativo entre os códigos dos países.

PAÍSES	DOMÍNIO DOS BENS MINERAIS	AÇÃO GOVERNAMENTAL	GESTÃO AMBIENTAL
BRASIL	União	União legisla sobre os recursos minerais	União (MMA, IBAMA e CONAMA) Estados e Municípios (Agências atuam nas questões ambientais)
EUA	Proprietário do solo	A gestão mineral é compartilhada entre o Governo Federal e os Estados	O Governo Federal através do Ministério do Interior e o EPA, juntamente com os Estados fazem a gestão do meio ambiente
CANADÁ	Proprietário do solo (exceto ouro, prata e petróleo)	O controle efetivo da mineração está a cargo das Províncias. O Governo Federal atua supletivamente quando a mineração interfere em questões de pesca, direitos indígenas, negócios e comércio, ferrovias e energia atômica.	O Departamento Nacional de Meio Ambiente juntamente com a CEEA As reservas indígenas (<i>Indian Act</i>) Reservas Federais (Prq. Nacionais) - Gov. Federal Parques e terras provinciais - Gov. Provincial
AUSTRÁLIA	Coroa, Estados e Territórios (Bens sobre a suas respectivas jurisdições)	Os bens minerais pertencem a Coroa, Estados e Territórios que possuem jurisdição sobre os seus recursos naturais.	COMMONWELTH, Ministérios dos Recursos Naturais do Meio Ambiente e EPA (avaliam impactos ambientais juntamente com os Estados e Territórios)

Fonte: Santos (2017)

2.2.1 CÓDIGO CANADENSE

O código canadense é comumente chamado de NI 43-101, que faz referência ao número da norma nacional, que são chamadas de Instrumentos Nacionais (NI). Segundo Miskelly (2003), o mesmo foi implantado em 2001 e, apesar de se manter em vigor até os dias atuais, passou por revisões e alterações, sendo a última feita em 2019. Esta regulamentação responde ao Instituto Canadense de Mineração, Metalurgia e Petróleo, visando o fornecimento de informações mais precisas e confiáveis pelas empresas mineiras.

Outrossim, no que diz respeito à parte de declaração da cava e planejamento inicial da mina, as informações pedidas estão listadas a seguir.

- Tonelagem da mina (Minério e total);
- Teor de corte;
- Relação estéril-minério;
- Considerar a diluição;
- Categoria de reserva provada e provável;
- Soma da tonelagem e teor de cada categoria.

Em adição, outras informações também são pedidas e não serão abordadas por não serem englobadas pela área deste estudo como: método de lavra, circuito de beneficiamento detalhado, balanço metalúrgico da usina, entre outros. Além disso, a NI também prevê uma análise de sensibilidade, porém com um foco nos parâmetros econômicos, como taxa de desconto, preço do minério, teor, custos e outros parâmetros que a pessoa responsável julgar importantes.

2.3 Softwares

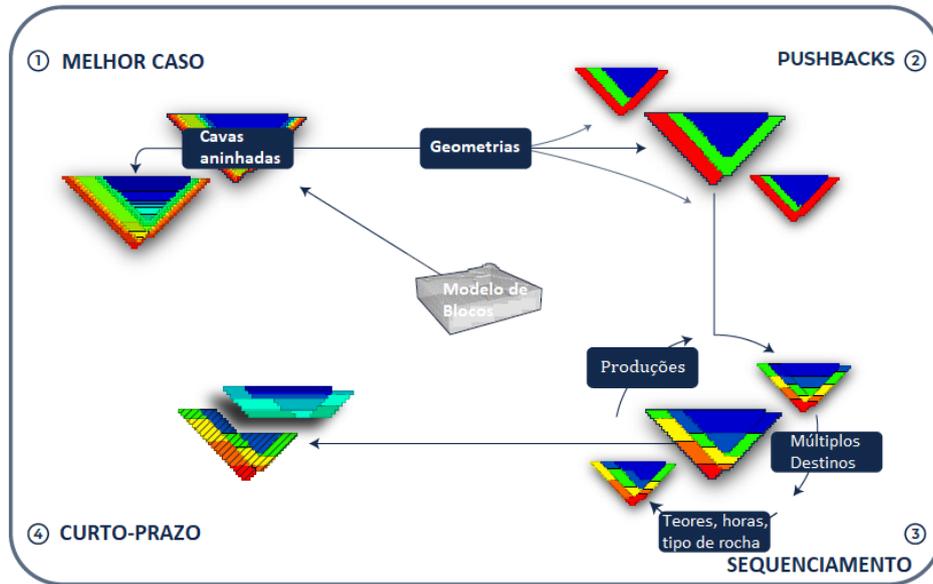
A tecnologia é uma parte importante na evolução de qualquer indústria e possui grande impacto na indústria mineira. Os *softwares* compõem uma das partes da tecnologia mais presentes no mundo da mineração. Para a área de planejamento de lavra, especificamente, os *softwares* mais comuns são os de sequenciamento de mina e os principais utilizam os algoritmos de Lerch-Grossman/Pseudoflow.

2.3.1 LERCH-GROSSMAN/PSEUDOFLOW

O algoritmo de Lerch-Grossman foi criado em 1965, por Helmut Lerchs e Ingo Grossmann, porém somente na década de 90, com a acessibilidade das novas tecnologias é que veio a primeira aplicação prática, com a criação do Whittle. Até a virada do século, a metodologia já havia se tornado referência e praticamente obrigatória por todo mundo, o que perdura até a atualidade. Na década de 2000 algumas melhorias foram feitas, como o algoritmo Pseudoflow, que traz o mesmo resultado, porém com uma maior rapidez nos resultados.

Esta metodologia trabalha por passos e é baseada na precedência de blocos. O passo a passo interno está ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Passos da metodologia Lerchs-Grossman/Pseudoflow.

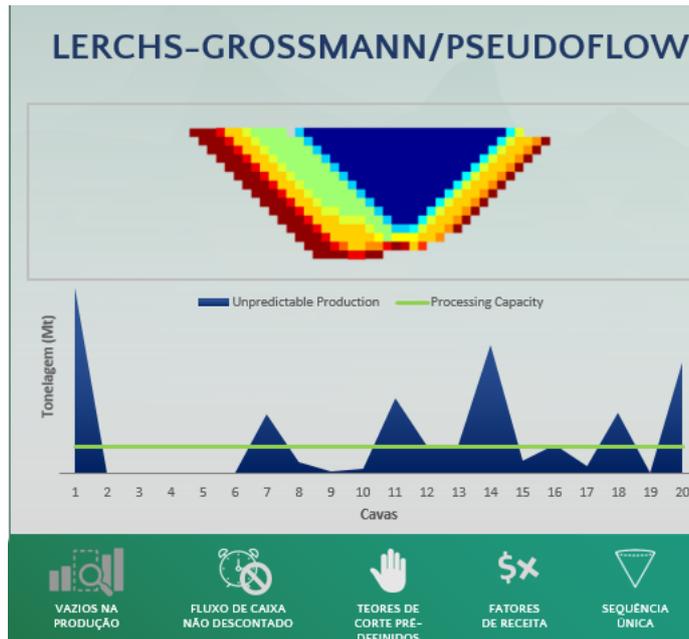


Fonte: Adaptado de miningmath.com

Segundo a teoria apresentada pelo tutorial da MiningMath, primeiro passo é a geração das cavas aninhadas, que visa escolher a cava final que maximize o fluxo de caixa não descontado. Em seguida, são incluídas as geometrias, para a definição dos chamados *Pushbacks* e mais uma vez, escolhido com qual prosseguir. Já na parte seguinte, a de sequenciamento propriamente dito, se inclui o restante das restrições para ter a sequência de lavra. Por fim, se necessário, escolhe-se o melhor sequenciamento para o desenho do planejamento de curto prazo.

Porém, esse sistema de passos pode gerar a perda de possíveis melhores soluções, uma vez que uma decisão limita a próxima. Além disso, a metodologia apresenta alguns problemas operacionais de resultados que não englobam todas as variáveis presentes em um projeto real de mineração, e estes estão ilustrados na Figura 5 a seguir.

Figura 5 - Pontos negativos da metodologia Lerchs-Grossman/Pseudoflow.



Fonte: Adapado de miningmath.com

O primeiro tópico é o problema de produção, que não se mantém estável na linha verde, que seria o esperado. Ao invés disso, ocorrem picos e vazios na produção, o que não é algo viável na vida real. Ademais, consideram um fluxo de caixa não descontado, ou seja, não considera a variação do valor monetário no tempo para tomada de decisão. Além disso, necessita de um teor de corte predefinido e gera uma única sequência baseada em fatores de receita. Este fato atrela a sequência ao fato de receita, ou seja, quanto maior o fator de receita, maior a cava em diâmetro e profundidade, porém a sequência sempre permanecerá a mesma.

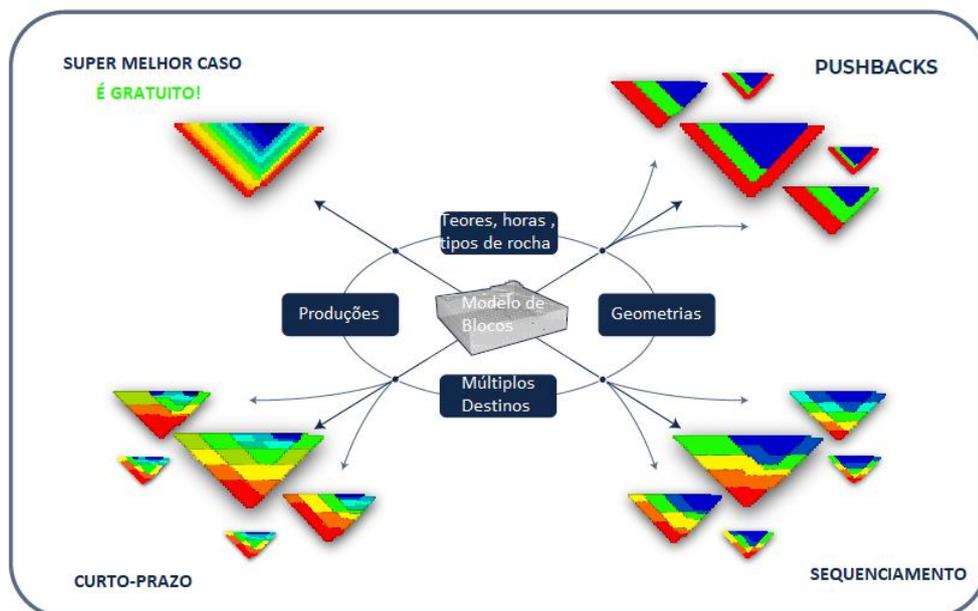
2.3.2 Sequenciamento direto de blocos

A metodologia de Sequenciamento Direto de blocos, ou, em inglês, DBS, foi criada na década de 60, porém, não foi utilizada até os anos 2000 por falta de poder computacional. Somente nessa época, com o surgimento da tecnologia 64 *bits*, foi possível a implementação prática de tal metodologia. A primeira aplicação foi da empresa MiningMath, no ano de 2013, com o lançamento do *software* agora homônimo, e até os dias atuais se mantém pioneira no uso desta tecnologia.

Atualmente há também no mercado o programa Deswik Go, da Deswik, e o Doppler, desenvolvido na Universidade do Chile, implementando também a metodologia DBS em parte de seus algoritmos, porém ambos ainda com algumas etapas do algoritmo de Lerchs-Grossman.

Diferentemente dos *softwares* que utilizam LG, o DBS não utiliza um processo passo a passo, e na verdade realiza uma otimização global, considerando todas as variáveis possíveis em uma única tomada de decisão. A Figura 6 a seguir apresenta um esquema sobre o assunto.

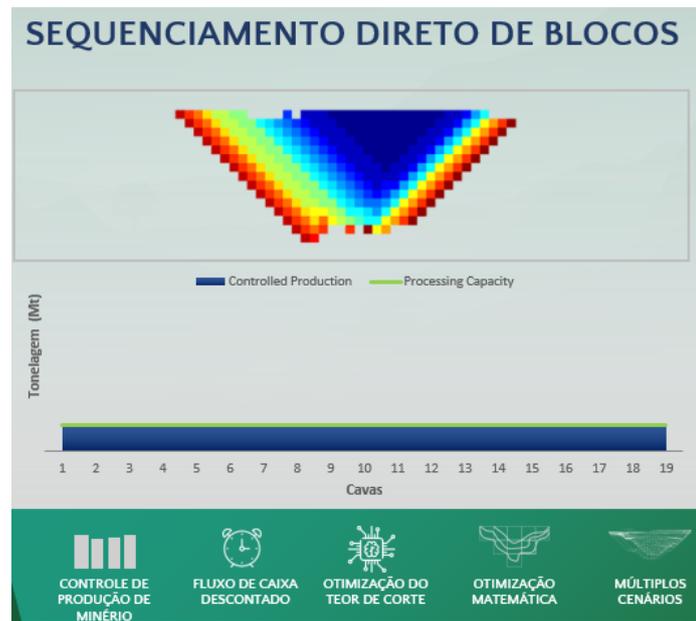
Figura 6 - Esquema sobre o DBS.



Fonte: Adaptado de miningmath.com

Ademais, estudos como Marinho (2013) comprovam as vantagens de se utilizar o DBS para realizar o sequenciamento de mina. Para complementar, a Figura 7 mostra algumas dessas diferenças.

Figura 7 - Comparativo entre LG e DBS.



Fonte: Adaptado de miningmath.com

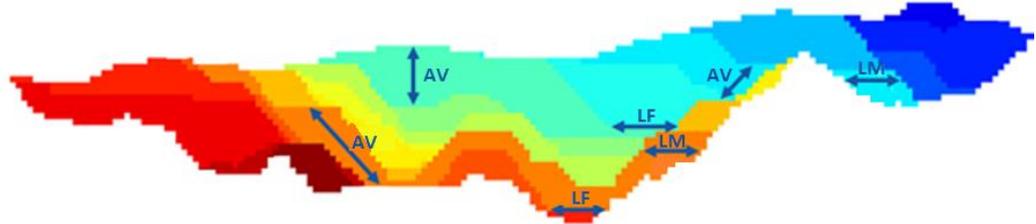
Das comparações, o item mais relevante é a capacidade de geração de múltiplos cenários a partir da modificação de qualquer variável. É esta característica que faz esse *software* adequado para realização de uma análise de sensibilidade, uma vez que qualquer pequena variação de valor pode gerar uma sequência de extração completamente diferente.

Outrossim, é importante ressaltar que diferentemente dos algoritmos tradicionais, que utilizam precedência de blocos, o MiningMath utiliza superfícies. Segundo Marinho (2015), as superfícies são uma série de pontos de elevações, as quais dividem os períodos dentro de um sequenciamento. Além disso, também diz que esse tipo de abordagem facilita a otimização, já que reduz a quantidade de restrições de ângulos e permite a inclusão de outras restrições geométricas.

Em segundo plano, as geometrias são parâmetros operacionais fundamentais para o bom funcionamento da extração. Uma vez definidos, dificilmente podem sofrer grandes alterações após a mina entrar em operação, já que impactam diretamente no dimensionamento dos equipamentos que serão utilizados. Ademais, se tratam de variáveis não lineares, ou seja, não possuem comportamento previsível em relação ao seu impacto no resultado do projeto. As variáveis geométricas, como avanço vertical (AV), largura de fundo (LF) e largura de

mina (LM), ilustradas na Figura 8 a seguir, serão incluídas na análise de sensibilidade deste projeto pelos motivos acima apresentados.

Figura 8 - Variáveis geométricas.



Fonte: Adaptado de miningmath.com

Por fim, o artigo de Marinho (2015), também traz conceito de otimização estocástica, mostrando que o *MiningMath* também suporta simulações de uma determinada variável, gerando uma sequência final que respeite todas as simulações. Esta abordagem evita que uma jazida seja inviabilizada como consequência das incertezas ao redor das estimativas de teores por exemplo.

2.3.2.1 Modelo Marvin

O software *MiningMath* já vem com um modelo de demonstração previamente configurado, chamado Modelo Marvin, o mesmo disponibilizado pelo Whittle e amplamente testado. Este modelo foi extraído do site Minelib, site que disponibiliza modelos geológicos abertos, de forma gratuita, para realização de estudos. A Tabela 1 a seguir, mostra todos os modelos disponíveis na plataforma e suas características.

Tabela 1 – Modelos de blocos disponibilizados pelo Minelib.

Nome	Número de blocos	Número de precedentes	Número de períodos
Newman1	1,060	3,922	6
Zuck small	9,400	145,640	20
D	14,153	219,778	12
Zuck medium	29,277	1,271,207	15
P4HD	40,947	738,609	10
Marvin	53,271	650,631	20
W23	74,260	764,786	12
Zuck large	96,821	1,053,105	30
SM2	99,014	96,642	30
McLaughlin limit	112,687	3,035,483	15
McLaughlin	2,140,342	73,143,770	20

Fonte: Adaptado de Espinoza (2013).

Em adição, segundo Espinoza (2013), a Tabela 2 a seguir mostra o VPL máximo já conhecido por uma solução inteira até o momento do estudo, para cada um dos modelos disponíveis.

Tabela 2 – Lucro máximo conhecido dos modelos de blocos disponibilizados pelo Minelib.

Nome	$ D $	$ R $	LP máximo	Melhor resultado conhecido	Diferença (%)
Newman1	2	2	24,486,549	23,658,230	3.4 %
Zuck small	2	2	905,878,172	872,372,967	3.7 %
D	2	2	410,891,003	406,871,207	1.0 %
Zuck medium	2	2	750,519,109	675,931,038	9.9 %
Marvin	2	2	911,704,665	885,968,070	2.8 %
W23	4	7	387,693,394	0	100 %
Zuck large	2	2	57,938,790	57,334,014	1.0 %
SM2	2	2	1,652,394,327	1,650,439,213	0.1 %
McLaughlin limit	2	1	1,324,829,727	1,321,662,551	0.2 %
McLaughlin	2	1	1,512,971,680	1,510,126,435	0.2 %

Fonte: Adaptado de Espinoza (2013).

Por ser o modelo de demonstração do software *MiningMath*, os parâmetros base utilizados estão listados no Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 – Parâmetros base do projeto Marvin

Parâmetro	Valor
Tamanho do bloco	27000 m ³ (30x30x30)
Au – Preço de venda	12 \$/g
Au – Custo de venda	0.2 \$/g
Au – Recuperação	0.60
Cu – Preço de venda	2000 \$/t
Cu – Custo de venda	720 \$/t
Cu – Recuperação	0.88
Custo de mina	0.9 \$/t
Custo de processamento	4.0 \$/t
Taxa de desconto	10% ao ano
Densidade padrão	2.75 t/m ³
Ângulo padrão	45 graus

Fonte: Adaptado de miningmath.com

3 METODOLOGIA

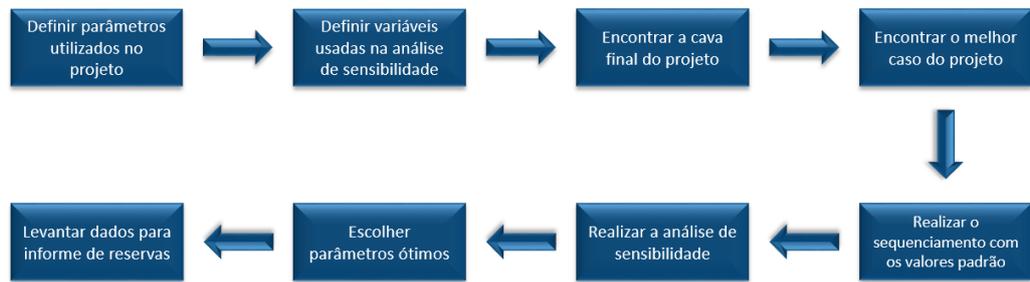
Em função da junção da aceitação mundial com a facilidade em encontrar informações, o código escolhido para ser usado neste trabalho foi o canadense. Além disso, será elucidada a possibilidade de realização da análise de sensibilidade para os parâmetros obrigatórios, e se enfocará nas variáveis operacionais.

Devido a ser um dos modelos mais bem testados da lista e por ser o modelo de demonstração do *software* que será utilizado, facilitando trâmites de licenças de estudo, o modelo utilizado será o Marvin. Ademais, a metodologia estudada será baseada na realização de testes e análise dos resultados conforme descrito a seguir:

- Definir os parâmetros usados no projeto, baseado nos valores utilizados nos tutoriais;
- Determinar as variáveis a serem avaliadas da análise de sensibilidade, variando a taxa de desconto, o preço do minério, o avanço vertical, a largura de fundo e a largura de mina;
- Encontrar a cava final do projeto no *software MiningMath*;
- Encontrar o melhor caso;
- Encontrar o sequenciamento com os valores padrão;
- Realizar a análise de sensibilidade no *MiningMath*;
- Escolher os melhores parâmetros a partir da análise de sensibilidade;
- Finalização do sequenciamento no *MiningMath*;
- Levantar dados para realização do informe de reservas segundo o código canadense.

Esta metodologia está visual e resumidamente descrita no fluxograma presente na Figura 9 a seguir.

Figura 9 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em primeiro lugar, o Quadro 2 mostra a escolha das variáveis padrão utilizadas no projeto.

Quadro 2 – Variáveis padrão definidas para o projeto Marvin

Variável	Valor
Taxa de desconto (%a.a.)	10
Custo de mina (custo/t)	0.9
Custo de remanejo (\$/t)	0.2
Produção do processo (Mt)	10
Produção total (Mt)	40
Teor máximo de Cu na planta (%)	70
Largura mínima de Fundo (m)	100
Largura mínima de Mina (m)	50
Taxa máxima de Avanço Vertical (m)	150

Fonte: Autor

Além das variações obrigatórias, foram escolhidas as variáveis geométricas para incluir-se na análise de sensibilidade. Dessa forma, o Quadro 3 mostra como foi feita a análise de sensibilidade.

Quadro 3 – Variáveis para a análise de sensibilidade.

Variável	Status
Taxa de desconto	Feito
Preço do minério	Feito
Teor	Pode ser feito por otimização estocástica
Custos	Pode ser feito de forma análoga ao preço do minério
Largura Mínima de Fundo	Feito
Largura Mínima de Mina	Feito
Taxa Máxima de Avanço Vertical	Feito

Fonte: Autor

A análise de sensibilidade do teor não foi feita por falta de dados simulados, já que com o modelo Marvin só há uma coluna de teor, mas mostra-se que é possível ser feita por meio da otimização estocástica. Já a análise de sensibilidade do custo é muito similar à do preço, uma vez que ambos têm impacto no valor econômico, portanto, o que muda é o valor econômico dentro do programa.

Definidas as variáveis, os cenários base foram executados, começando pela cava final, passando pelo melhor caso, que representa o VPL máximo, sem restrições e com a vida útil normal da mina, e finalizando no sequenciamento propriamente dito, com todas as restrições, como mostra o Quadro 4.

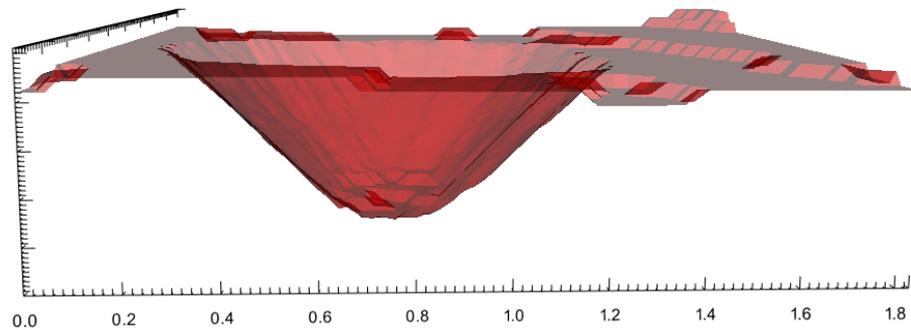
Quadro 4 – Sequência de casos padrão.

Cenário	VPL
Cava Final	1403.3
Melhor caso	557.3
Sequenciamento livre	474.2
Sequenciamento 20 anos	424.0

Fonte: Autor

É importante comentar que, a cava final, ilustrada pela Figura 10, gerada no *MiningMath* é uma representação da cava ótima do Lerch-Grossman, uma vez que não utiliza taxa de desconto para definição do destino dos blocos. Para esse caso, obteve-se de resultado 1403,3 M\$, representando um aumento de 58% no valor máximo do projeto, quando comparado com o lucro máximo conhecido do projeto apresentado por Espinoza (2013). Além disso, encontrou-se um sequenciamento de 30 anos. Por este motivo, fez-se o teste travando a vida útil da mina em 20 anos como havia sido informado, o que representou uma perda de 50,2 M\$. Por isso, optou-se por avançar para a fase de análise de sensibilidade com os períodos livres.

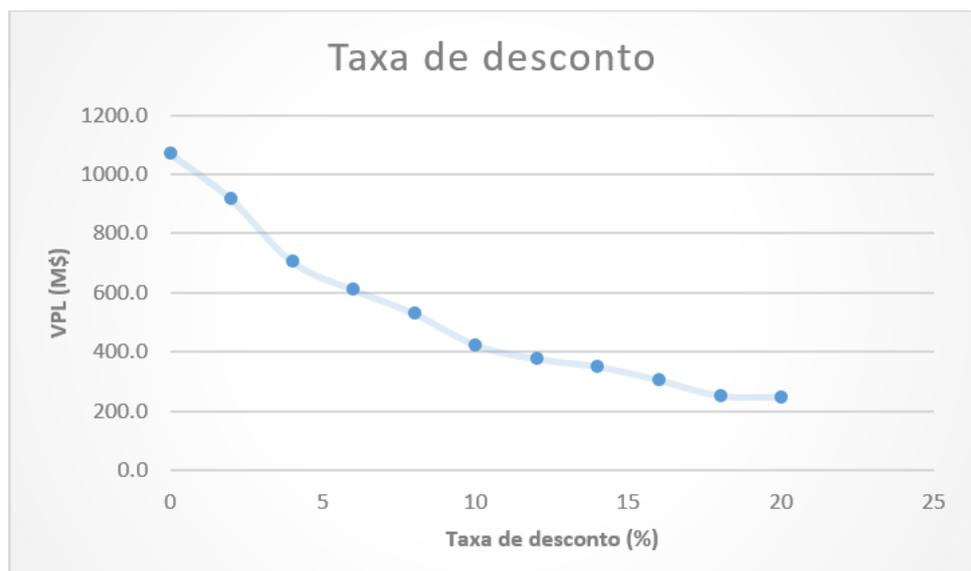
Figura 10 – Cava final obtida no software *MiningMath*.



Fonte: Resultados do *MiningMath*

Nesta nova etapa, iniciou-se com a análise da taxa de desconto. A Figura 11 mostra o gráfico desta variação.

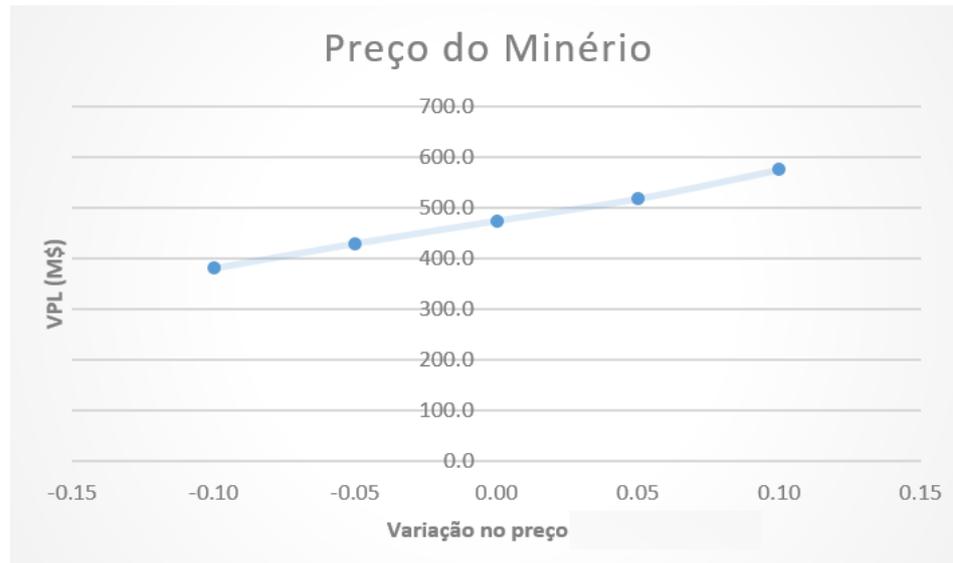
Figura 11 – Gráfico da variação de taxa de desconto.



Fonte: Autor

Como já era esperado, a taxa de desconto tem um efeito inversamente proporcional no resultado do projeto. Ou seja, quanto maior o valor da taxa, menor será o meu retorno final.

Figura 12 – Gráfico da variação de preço do minério.

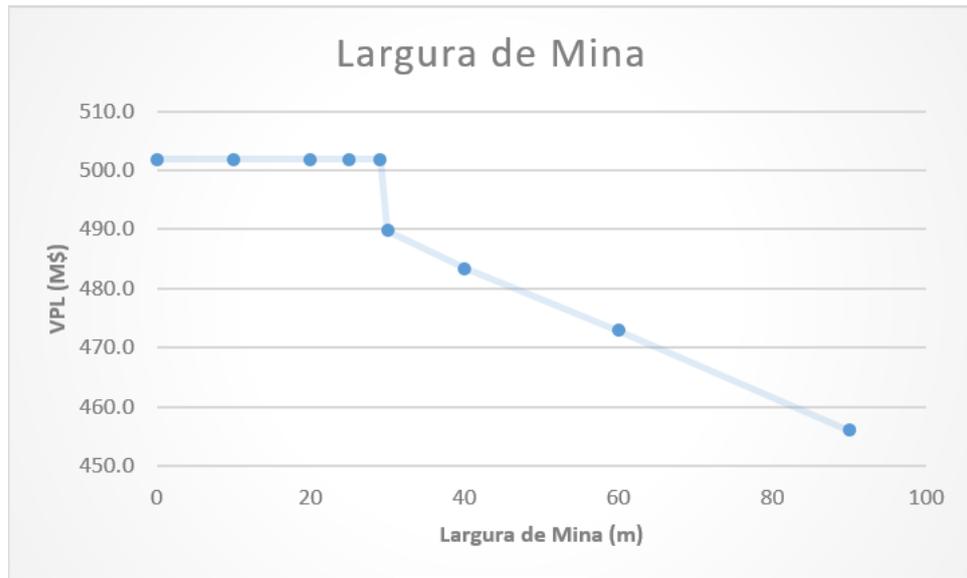


Fonte: Autor

Já para o preço do minério ocorre o contrário, quanto maior o preço, maior será VPL do projeto. De forma análoga ao preço, e levando em consideração que o cálculo do VPL se dá, em sua base, por receita menos o custo, para a variação do custo, quanto maior o custo, menor será o retorno.

Iniciando as análises das geometrias, é importante comentar que as variações iniciaram de 30 m em 30 m, uma vez que é a dimensão dos blocos nos três eixos. Eventualmente, em alguns intervalos, foram feitas análises mais próximas para verificar valores mais próximos ao valor desejado ou resultados contrastantes. Os resultados da variação da largura de mina estão ilustrados na Figura 13.

Figura 13 – Gráfico da variação da Largura de Mina.

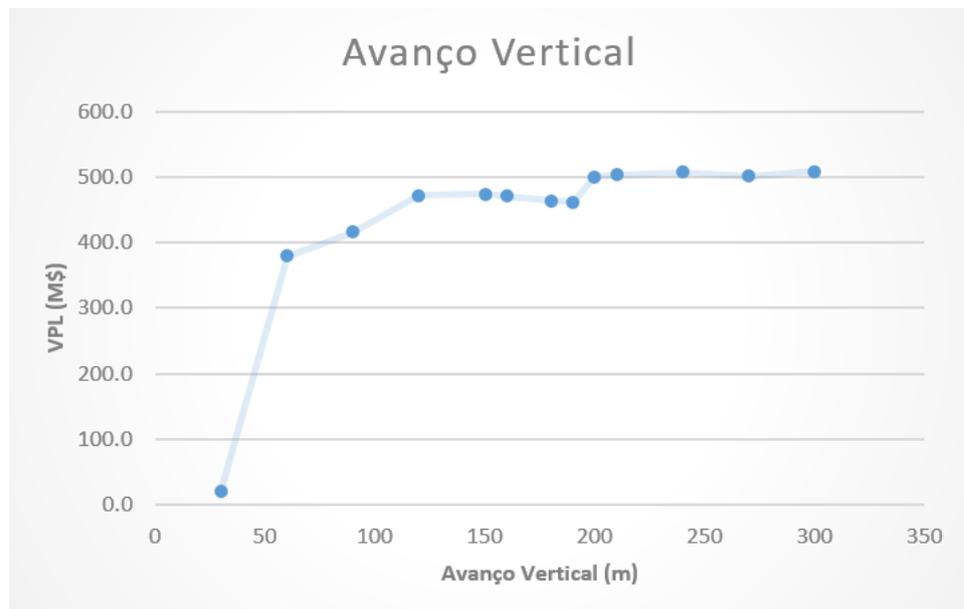


Fonte: Autor

Como o previsto, a largura de mina não é uma variável linear, portanto, não segue uma previsibilidade nos resultados. Isso pode ser evidenciado na constância de resultados para as variações de 0 m a 29 m, sendo este último o valor mais próximo do padrão, 50 m, com VPL acima de 500 M\$. Por este motivo, foi o valor escolhido para a análise combinada.

Já para o avanço vertical, este fato se evidencia para os pontos de 160 m, 180 m, 190 m e 270 m, os quais sofreram uma queda nos resultados ao invés de aumento, como ilustra a Figura 14.

Figura 14 – Gráfico da variação do Avanço Vertical.

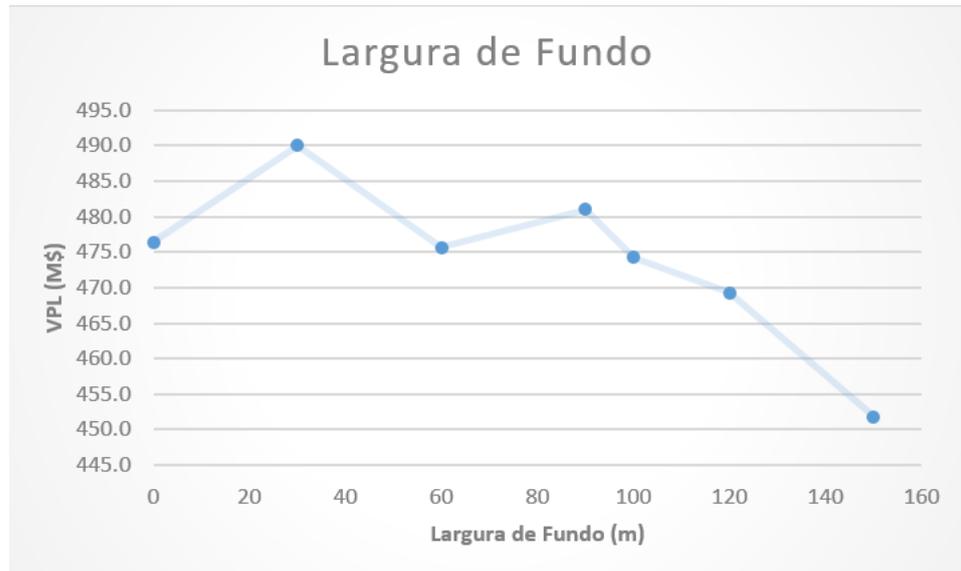


Fonte: Autor

A escolha de qual avanço vertical seguir é um pouco mais delicada, uma vez que apesar de ser uma variável não linear, é frequente que a tendência seja por aumentar o VPL quanto maior a profundidade que o otimizador pode atingir por período, uma vez que recupera-se materiais mais ricos e sofrendo menos aplicação da taxa de desconto. Porém, não é algo fácil de ser feito na prática. Por isso, foram escolhidos os valores com melhor lucro, mas mais próximos do valor desejado, já que é sim possível ter certa flexibilidade. Portanto, na análise combinada, utilizou-se os valores padrão, 200 m, 210 m e 270 m.

Por fim, a largura de fundo confirma o mesmo fato da não linearidade, e foi escolhido o valor com maior retorno, como ilustra a Figura 15.

Figura 15 – Gráfico da variação da Largura de Fundo.



Fonte: Autor

Antes de passar para a próxima etapa, foi feita uma análise combinada, na qual se mantiveram os valores de largura de fundo e largura de mina escolhidos, de 30 m e 29 m, respectivamente, variando o avanço vertical com os melhores valores. Os resultados estão no Quadro 5.

Quadro 5 – Análise combinada.

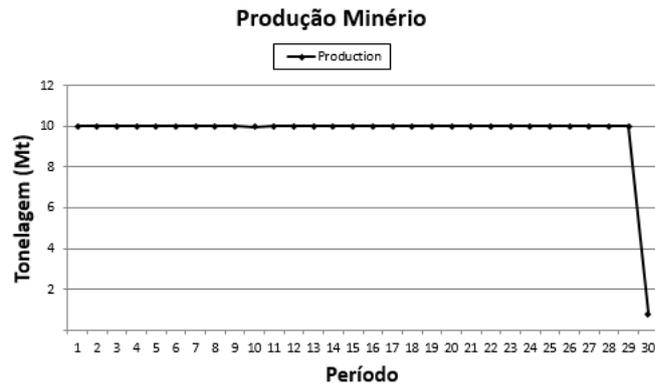
Avanço Vertical (m)	VPL
150	501.4
200	526.0
210	526.1
270	530.9

Fonte: Autor

Devido à baixa diferença, o cenário escolhido foi o de avanço vertical de 200 m, o qual também está mais próximo do valor inicialmente desejado. Dessa forma, com a análise de sensibilidade, foi possível incrementar o VPL em cerca de 11% para esse projeto, quando comparado com o sequenciamento inicial com todas as variáveis. Já para as variáveis geométricas identificou-se que seus impactos podem variar de 12% de ganho à 95% de perda, justificando a importância do estudo e melhor compreensão das mesmas e seus respectivos impactos no projeto.

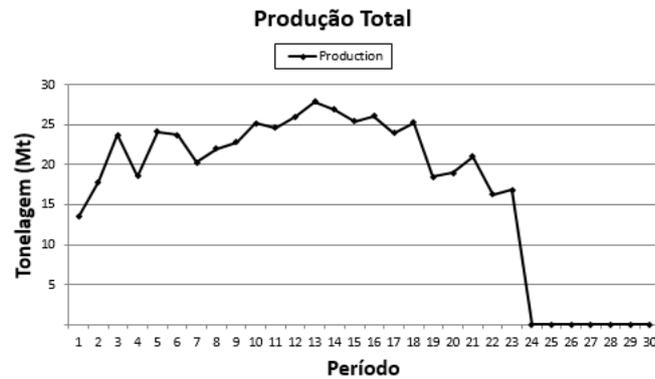
Feito isso, basta encontrar as informações pedidas pela norma internacional. As Figuras 16, 17 e 18 a seguir mostram as massas de minério e total, conforme pedido, e também a de estéril. É importante ressaltar que a extração da mina ocorre apenas até o período 23, porém, devido ao material estocado e retomado ao processo, a planta opera até o período 30.

Figura 16 – Gráfico de produção do minério.



Fonte: Resultados do *MiningMath*

Figura 17 – Gráfico de produção total.



Fonte: Resultados do *MiningMath*

Figura 18 – Gráfico de produção de estéril.



Fonte: Resultados do *MiningMath*

No mesmo arquivo de resultado, é possível ver a tabela com os valores de produção de cada destino, para cada um dos períodos, como mostra a Figura 19. Desta forma, é possível calcular não somente a relação Estéril-Minério total, mas também por ano. Para este projeto, a REM total é de 1:1,04.

Figura 19 – Tabela de produção por período.

Period	Production
1	9.998573877
2	9.988657209
3	9.99752625
4	9.996972939
5	9.99588789
6	9.99445473
7	9.999619938
8	9.99817992
9	9.999253548
10	9.98463807

Fonte: Resultados do *MiningMath*

Já no arquivo de resultado chamado "*Mined Blocks*" é possível encontrar as informações ilustradas na Figura 20, além de outras como densidade, ângulo, coordenadas, entre outros.

Figura 20 – Principais variáveis do arquivo “*Mined Blocks*”.

Período Processado	Destino	Teor_CU_%	Teor_AU_ppm	Valor Econômico	Categoria
23	1	0.436558	0.219401	111366	2
23	1	0.672963	0.787037	590465	1
23	1	0.607037	0.788889	538271	2
22	1	0.667076	0.784703	585354	2
22	1	0.731838	0.378789	417972	2
22	1	0.688685	0.723111	571711	2
21	1	0.579629	0.788148	515806	1
22	1	0.585926	0.66037	456152	2
22	1	0.67	0.519629	452615	2
23	1	0.749406	0.613262	570350	1
23	1	0.462924	0.225262	123794	1
21	1	1.01383	0.304974	592602	1
20	1	1.03923	0.567945	781487	1

Fonte: Resultados do *MiningMath*

Todo o restante de informações necessárias pode ser obtido a partir dessas informações, porém é importante aclarar que o destino 1 se refere ao minério e o destino 2 ao estéril. De maneira análoga, a categoria 1 classifica o bloco como medido, enquanto o 2 classifica como inferido, dando assim as classificações de reserva provada e provável.

Para identificação do teor de corte marginal, basta realizar-se um filtro na coluna de destino, selecionando apenas os blocos considerados como minério e, em seguida, filtrar o valor mínimo de teor para cada um dos elementos. Para este cenário em específico, o teor de corte do cobre foi de 0,079969% e o do ouro de 0,075164 ppm, desconsiderando os blocos de estéril que foram para o processo, como mostra a Figura 21. Porém, pode-se evidenciar a necessidade de alteração das exigências para englobar novos tipos de metodologia, como por exemplo a alternativa de se apresentar o teor de corte ou o teor médio total.

Figura 21 – Principais informações do “*Mined Blocks*” com filtro de teor.

Período Minerac	Período Processa	Destinc	Teor_CU_	Teor_AU_ppr	Valor Econômi	Catego
11	11	1	0	0	-174887	2
11	11	1	0	0	-142798	1
7	7	1	0	0	-317520	2
10	10	1	0	0	-162860	1
11	11	1	0	0	-145533	2
10	10	1	0	0	-190138	1
11	11	1	0	0	-174029	2
11	11	1	0	0	-171441	1
7	7	1	0	0	-273739	1
10	10	1	0	0	-215207	2
10	10	1	0	0	-218130	2
7	7	1	0.079969	0.075164	-223972	2
23	23	1	0.439259	0.082222	45072.7	1
15	30	1	0.297407	0.122593	-49353.1	2
23	29	1	0.304815	0.122593	-43315.1	2
15	29	1	0.322947	0.128949	-24469.6	2
23	27	1	0.386499	0.131793	27743.8	2
23	30	1	0.291111	0.133333	-48982.5	1
22	22	1	0.495555	0.136667	118024	1
10	10	1	0.282500	0.138410	48225.2	1

Fonte: Resultados do *MiningMath*

Ademais, isso leva à questão da diluição, uma vez que a metodologia utilizada faz a escolha a partir do valor econômico maior, mesmo que isso signifique menor perda, enviando assim alguns blocos de estéril para a planta. Porém, é uma ocorrência de fácil localização e, a partir dos teores, é possível realizar o cálculo da diluição para cada um dos elementos.

Por fim, pode-se facilmente encontrar a informação de categorias de reserva provada e provável por meio da última coluna. Coluna esta que deve ser incluída de forma prévia a importação do modelo no *software* para que conste nesse arquivo de resultado. Utilizando os filtros do *Excel*, é possível isolar os blocos de cada uma das categorias e, desta forma, encontrar as massas e teores para cada uma delas.

5 CONCLUSÕES

Em suma, conclui-se que é possível gerar um relatório de reservas utilizando a metodologia de sequenciamento direto de blocos, uma vez que, por meio do *software MiningMath*, pode-se encontrar todas as informações exigidas pela norma NI 43-101, que foi a base deste estudo. As informações comprovadas praticamente foram a tonelagem de minério, tonelagem total, teor de corte, relação estéril-minério, categoria de reserva, bem como a tonelagem e teor de cada uma. Porém, sugere-se a flexibilização das exigências de teor para a abrangência de outras metodologias, uma vez que a utilizada não utiliza o teor de corte para definição do destino dos blocos.

Além disso, comprovou-se também a eficácia na análise de sensibilidade, com uma melhoria de 11% no VPL, e obtendo êxito em sua realização para as variáveis obrigatórias de forma prática, como a taxa de desconto, preço do minério e custos, e teórica, como de teor. No último caso, sugere-se como tema de um trabalho futuro, a modelagem prática deste tipo de análise de sensibilidade utilizando a otimização estocástica.

Por fim, evidenciou-se a importância da inclusão das variáveis operacionais na análise de sensibilidade, obtendo-se um impacto ente 12% de ganho e 95% de perda. Outrossim, esta análise é relevante principalmente no pré-projeto, uma vez que desta forma é possível realizar o dimensionamento de frota e planejamento de mina já tendo o conhecimento dos valores ótimos de cada variável geométrica. Esta relevância passa também pela comprovação prática da classificação dessas variáveis como não-lineares, uma vez que não seguem um padrão de crescimento ou decréscimo previsível.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, Natalia Barbosa de. **Análise de sensibilidade da variação da altura e largura do banco na operacionalização da cava final**. 2018. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018. Disponível em: <https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/12/Natalia-Barbosa-de-Amorim-min.pdf>. Acesso em: 14 set. 2022.
- CURI, Adilson. **Lavra de Minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 453 p.
- CURI, Adilson. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 374 p.
- ESPINOZA, D. et al. **MineLib: a library of open pit mining problems**. Universidade Adolfo Ibañez, 2012. Disponível em: <https://ficpubs.uai.cl/files/246_Espinoza_etal2013.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2023.
- FLORES, B. A.; CABRAL, I. E. **Análise de sensibilidade na otimização econômica de uma cava**. Revista Escola de Minas, v. 61, p. 449-454, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672008000400007&script=sci_arttext>. Acesso em: 06 mar. 2015.
- GUIMARÃES, O.; MARINHO, A. **SEQUENCIAMENTO DIRETO DE BLOCOS**. 2013. Disponível em: <<https://miningmath.com/research/>>. Acesso em: 14 jun. 2023.
- MARINHO, A.; DIMITRAKOPOULOS, R. **A surface constrained stochastic mine production scheduling method and its application at a copper deposit**. Departamento de Engenharia de Minas e Materiais da Universidade de McGill, 2015. Disponível em: <<https://miningmath.com/research/>>. Acesso em: 14 jun. 2023
- MISKELLY, N. **Progress on International Standards for Reporting of Mineral Resources and Reserves**. Chairman, Combined Reserves International Reporting Standards Committee, 2003. Disponível em: <https://www.yermam.org.tr/uploads/kutuphane/627742_progress_nmrestonpaper.pdf>. Acesso em 11 mai. 2023.
- PERONI, Rodrigo de Lemos. **Análise da sensibilidade do sequenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico**. 2002. 143 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1967/000362581.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 set. 2022.
- Santos, Fábio Cesar Muniz dos. **Análise comparativa do código de mineração do Brasil Com outros códigos de mineração internacionais**. São Cristóvão, SE, 2018. Monografia (bacharelado em Geologia) – Curso de Geologia, Departamento

de Geologia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

TULCANAZA, Edmundo. **Avaliação de empreendimentos e recursos minerais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 303 p.