



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



NAARA RIBEIRO LEMOS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PLANEJAMENTO DE CAVA A CÉU ABERTO
EM FUNÇÃO DE PARÂMETROS ECONÔMICOS: UMA ABORDAGEM
CONCEITUAL APLICADA À MINERAÇÃO DE NIÓBIO

Ouro Preto – MG
2026

NAARA RIBEIRO LEMOS

naara.lemos@aluno.ufop.edu.br

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PLANEJAMENTO DE CAVA A CÉU ABERTO
EM FUNÇÃO DE PARÂMETROS ECONÔMICOS: UMA ABORDAGEM
CONCEITUAL APLICADA À MINERAÇÃO DE NIÓBIO**

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

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L556a Lemos, Naara Ribeiro.

Análise de sensibilidade do planejamento de cava a céu aberto em função de parâmetros econômicos [manuscrito]: uma abordagem conceitual aplicada à mineração de nióbio. / Naara Ribeiro Lemos. - 2026. 46 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e recursos minerais - Planejamento. 2. Mineração a céu aberto. 3. Nióbio. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.014

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Naara Ribeiro Lemos

**Análise de sensibilidade do planejamento de cava a céu aberto em função de parâmetros econômicos:
Uma abordagem conceitual aplicada à mineração de nióbio**

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

Aprovada em 27 de (mês por extenso) de 2026

Membros da banca

Dr - Hernani Mota de Lima - Orientador - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr - Carlos Enrique Arroyo Ortiz - (Universidade Federal de Ouro Preto))
Dr. Henrique Nogueira Soares

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2026, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1067358** e o código CRC **AF0C3541**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.002705/2026-04

SEI nº 1067358

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591590 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, cujas mãos criaram todas as coisas, mãos que me sustentaram quando o cansaço me alcançou. Sem o Senhor, nada do que foi feito teria sido feito.

Aos meus pais, Auxiliadora e Gedilson, por muito caminharem debaixo do sol, para que eu chegasse até aqui, na sombra.

À Gabriela, por ter cuidado de mim todos os dias da minha existência. Se fosse me concedido o direito de escolher uma irmã mil vezes, em todas elas eu a escolheria.

Aos que escolhi chamar de amigos: Henrique, Luísa, Marcelo e Naílly, vocês certamente encheram minha caminhada de sorrisos, choraram comigo meus tropeços e sorriram minhas alegrias.

Por fim, ao ensino superior público, gratuito e de qualidade, ponte que me aproximou de um lugar que muitos, outrora, disseram inalcançável.

Na verdade, existem minas de prata e lugares onde se refina o ouro.
O ferro é tirado da terra, e da pedra se funde o cobre.
Os homens põem limites às trevas
e exploram até os confins as pedras na escuridão e nas mais densas trevas.
Abrem um poço longe do lugar onde moram, em lugares esquecidos pelos viajantes;
longe dos homens, penduram-se e balançam de um lado para o outro.
Mas onde se achará a sabedoria?
O homem não sabe quanto vale a sabedoria; ela não se encontra na terra dos viventes.
O abismo diz: Não está em mim; e o mar diz: Não está comigo.
Não pode ser comprada com ouro fino, nem será trocada a peso de prata.
Nem pode ser avaliada em ouro fino de Ofir, nem em pedras preciosas de berilo ou safira.
O ouro ou o cristal não se podem comparar com ela; nem se pode trocá-la por joias de ouro
fino.
Não se fará menção de coral nem de jaspe; porque a aquisição da sabedoria é superior à das
pérolas.
O topázio da Etiópia não se igualará a ela, nem pode ser comprada com ouro puro.
De onde, então, vem a sabedoria?
Está encoberta aos olhos de todo vivente, oculta às aves do céu.
Deus conhece o seu caminho, só ele sabe onde ela fica.
Pois perscruta até as extremidades da terra; sim, Ele vê tudo o que há debaixo do céu.
Quando regulou a força do vento e fixou a medida das águas;
quando estipulou leis para a chuva e caminho para o relâmpago dos trovões;
então viu a sabedoria e a manifestou; estabeleceu-a e esquadrinhou-a.
E disse ao homem:
— O temor do Senhor é a sabedoria.

RESUMO

O planejamento de lavra a céu aberto constitui uma etapa fundamental no desenvolvimento de projetos minerários, sendo fortemente influenciado por parâmetros econômicos como preço do produto mineral, custos operacionais e recuperação metalúrgica. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de uma abordagem conceitual baseada em relações econômicas clássicas, a sensibilidade do planejamento de cava frente a variações desses parâmetros, aplicando o modelo a um cenário hipotético de mineração de nióbio. A metodologia adotada baseou-se na definição de um cenário econômico base e na aplicação de equações clássicas para determinação da receita unitária, margem econômica, teor de corte econômico e relação estéril/minério limite. A análise de sensibilidade foi conduzida por meio da variação sistemática dos parâmetros econômicos, avaliando seus impactos sobre os indicadores econômicos do projeto. Os resultados demonstraram que o preço do produto mineral exerce a maior influência sobre a viabilidade econômica e sobre o limite econômico da cava, seguido pela recuperação metalúrgica e pelos custos operacionais do minério. O aumento do preço e da recuperação resultou na expansão da cava, enquanto o aumento dos custos operacionais tornou o planejamento mais restritivo. A abordagem conceitual adotada mostrou-se eficaz para a compreensão da influência relativa dos parâmetros econômicos, evidenciando sua utilidade como ferramenta de apoio à tomada de decisão em fases iniciais de projetos minerários.

Palavras-chave: planejamento de mina; análise de sensibilidade; teor de corte; relação estéril/minério; mineração de nióbio.

ABSTRACT

Open-pit mine planning is a critical stage in mining project development and is strongly influenced by economic parameters such as commodity price, operating costs, and metallurgical recovery. In this context, this study aims to evaluate, through a conceptual approach based on classical economic relationships, the sensitivity of open-pit planning to variations in these parameters, applying the model to a hypothetical niobium mining scenario. The methodology was based on defining a base economic scenario and applying classical equations to determine unit revenue, economic margin, cut-off grade, and limiting stripping ratio. Sensitivity analysis was performed by systematically varying economic parameters and evaluating their effects on the project's economic indicators. The results showed that commodity price has the greatest influence on economic viability and pit limits, followed by metallurgical recovery and operating costs. Increases in price and recovery resulted in pit expansion, while increases in operating costs made the planning more restrictive. The conceptual approach proved effective in understanding the relative influence of economic parameters, demonstrating its usefulness as a decision-support tool in early stages of mining projects.

Keywords: mine planning; sensitivity analysis; cut-off grade; stripping ratio; niobium mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do Planejamento de Mina.....	19
Figura 2: Brasil e Produção de Nióbio e produção mundial de Nióbio	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros econômicos e influência no planejamento.	23
Tabela 2: Parâmetros econômicos adotados no cenário base.....	33
Tabela 3: Variação do preço do produto mineral comparado a um cenário base	38
Tabela 4: Relação entre o OPEX unitário do minério e o SR_{lim}	40
Tabela 5: Relação entre o OPEX unitário do estéril e o SR_{lim}	40
Tabela 6: Sensibilidade de SR_{lim} à recuperação metalúrgica	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	- Agência Nacional de Mineração
CAPEX	- Capital Expenditure
CBMM	- Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CFEM	- Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
CMOC	- China Molybdenum Company
CNI	- Confederação Nacional da Indústria
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
EIA	- Estudo de Impacto Ambiental
IBRAM	- Instituto Brasileiro de Mineração
ICMM	- International Council on Mining and Metals
MRI	- Magris Resources Inc.
OPEX	- Operational Expenditure
PAE	- Plano de Aproveitamento Econômico
RFP	- Relatório Final de Pesquisa
RIMA	- Relatório de Impacto Ambiental

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Formulação do Problema.....	12
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	15
1.4	Estrutura do Trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Fundamentos do planejamento de lavra a céu aberto	18
2.1.1	Planejamento de Mina e a legislação brasileira.....	20
2.1.2	Parâmetros econômicos no planejamento de mina.....	22
2.1.3	Valor Econômico do material e critério de lavra.....	23
2.1.4	Teor de corte econômico.....	24
2.1.5	Relação estéril/minério e limite econômico da cava	25
2.2	Análise de sensibilidade aplicada ao planejamento de mina.....	26
2.3	Abordagens conceituais no planejamento de mina	26
2.4	O nióbio e o contexto brasileiro.....	27
2.5	Integração dos parâmetros econômicos e análise de sensibilidade	29
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	Natureza e delineamento da pesquisa	32
3.2	Premissas e hipóteses adotadas.....	32
3.3	Parâmetros econômicos analisados.....	33
3.4	Formulação do modelo econômico conceitual	33
3.4.1	Receita unitária do minério	33
3.4.2	Margem econômica operacional	33
3.4.3	Determinação do teor de corte econômico.....	34
3.4.4	Relação estéril/minério limite	34
3.4.5	Procedimento de análise de sensibilidade	35
3.5	Limitações da metodologia.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Resultados do cenário econômico base	37
4.2	Sensibilidade do planejamento ao preço do produto mineral	38
4.3	Sensibilidade do planejamento ao custo operacional do minério (OPEX do minério)	39
4.4	Sensibilidade do planejamento ao custo operacional do estéril (OPEX do estéril).....	40
4.5	Sensibilidade do planejamento à recuperação metalúrgica.....	41
4.6	Comparação da influência dos parâmetros econômicos	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43

1 INTRODUÇÃO

A atividade minerária exerce papel relevante no desenvolvimento econômico e social, especialmente em regiões onde a mineração representa uma das principais fontes de geração de emprego, renda e arrecadação. No entanto, por se tratar de uma atividade que provoca alterações significativas no meio físico e social, torna-se fundamental que os empreendimentos minerais sejam planejados de forma criteriosa desde as fases iniciais do projeto, buscando conciliar a viabilidade econômica com a minimização de impactos ambientais e sociais. Nesse contexto, o planejamento de lavra a céu aberto assume papel estratégico, uma vez que decisões relacionadas ao limite econômico da cava, às taxas de produção e ao aproveitamento do recurso mineral influenciam diretamente a quantidade de material movimentado, a geração de estéreis e rejeitos e a vida útil do empreendimento (Hustrulid; Kuchta; Martin, 2013).

A análise de sensibilidade aplicada ao planejamento de cava constitui uma ferramenta fundamental para a avaliação da robustez econômica de projetos minerários, permitindo compreender como variações em parâmetros econômicos, tais como preço do produto mineral, custos operacionais e teor de corte, impactam as decisões de lavra. Essa abordagem é amplamente empregada em estudos de planejamento de mina por possibilitar a identificação de cenários mais conservadores ou mais favoráveis, auxiliando na redução de riscos econômicos e na tomada de decisão em ambientes caracterizados por incertezas de mercado (Newman et al., 2010; Dimitrakopoulos; Farrelly; Godoy, 2014).

No caso do nióbio, mineral estratégico amplamente utilizado na produção de aços de alta resistência, superligas e materiais avançados, a aplicação de metodologias que contribuam para o aprimoramento do planejamento de sua lavra apresenta elevada relevância econômica e tecnológica. O nióbio desempenha papel fundamental em setores como infraestrutura, transporte, energia e indústria aeroespacial, sendo considerado um insumo crítico para o desenvolvimento industrial moderno (United States Geological Survey, 2023).

Adicionalmente, o Brasil ocupa posição de destaque no cenário mundial da produção e da comercialização de nióbio, concentrando a maior parte das reservas conhecidas e respondendo pela maior parcela da oferta global desse mineral. Nesse contexto, estudos que avaliem a sensibilidade econômica do planejamento de minas de nióbio, ainda que em nível conceitual e com dados hipotéticos fundamentados na literatura, podem contribuir para a compreensão dos fatores que condicionam a viabilidade econômica e a sustentabilidade desses

empreendimentos, além de reforçar a importância estratégica do setor mineral brasileiro (ANM, 2022).

Mesmo na ausência de modelos geométricos detalhados ou do uso de ferramentas computacionais específicas, a análise conceitual baseada em relações econômicas clássicas, como o teor de corte econômico e a relação estéril/minério limite, fornece subsídios relevantes para a definição do limite econômico da cava em fases iniciais de projetos minerários. Essas abordagens são amplamente utilizadas em estudos de pré-viabilidade e viabilidade conceitual, nos quais o objetivo principal é avaliar a sensibilidade do empreendimento frente às principais variáveis econômicas, antes do refinamento geométrico do projeto (DOWD, 1994; LANE, 1988).

1.1 Formulação do Problema

O planejamento de lavra a céu aberto constitui uma das etapas mais críticas do ciclo de vida de um empreendimento minerário, uma vez que define os limites econômicos da cava, o aproveitamento do recurso mineral e os principais indicadores técnicos e econômicos do projeto. Decisões tomadas nessa fase influenciam diretamente a viabilidade econômica, a quantidade de material movimentado, a geração de estéréis e rejeitos e os impactos ambientais associados à operação, sendo, portanto, fortemente dependentes de parâmetros econômicos como preço do produto mineral, custos operacionais e teor de corte (Open Pit Mine Planning and Design).

Entretanto, esses parâmetros econômicos estão sujeitos a incertezas e variações ao longo do tempo, especialmente em função da volatilidade dos mercados minerais, da instabilidade de custos operacionais e de mudanças no cenário macroeconômico. Pequenas alterações nesses parâmetros podem resultar em mudanças significativas no limite econômico da cava, na relação estéril/minério e na vida útil da mina, o que torna o processo decisório complexo e sujeito a riscos econômicos relevantes (NEWMAN et al., 2010; DIMITRAKOPOULOS; FARRELLY; GODOY, 2014).

Nas fases iniciais de projetos minerários, como estudos conceituais e de pré-viabilidade, é comum que informações geológicas detalhadas e modelos geométricos refinados ainda não estejam disponíveis. Nesses casos, a utilização de abordagens conceituais baseadas em relações econômicas clássicas, como a definição do teor de corte econômico e da relação estéril/minério

limite, torna-se fundamental para avaliar a atratividade do projeto e orientar decisões preliminares de planejamento (The Economic Definition of Ore; DOWD, 1994).

A análise de sensibilidade surge, nesse contexto, como uma ferramenta essencial para investigar o comportamento do planejamento de cava frente a variações controladas dos principais parâmetros econômicos. Ao permitir a avaliação de diferentes cenários, essa abordagem contribui para a identificação de projetos mais robustos, capazes de suportar flutuações econômicas adversas, além de auxiliar na redução de riscos associados à tomada de decisão em ambientes de elevada incerteza (SME, 2011; DIMITRAKOPOULOS, 2018).

No caso do nióbio, mineral estratégico amplamente utilizado em aplicações industriais de alto valor agregado, como a produção de aços de alta resistência e materiais avançados, a necessidade de um planejamento de lavra economicamente eficiente torna-se ainda mais relevante. A importância desse mineral para a sociedade moderna e sua aplicação em setores como infraestrutura, transporte, energia e indústria aeroespacial reforçam a necessidade de estudos que avaliem, de forma criteriosa, a sensibilidade econômica de projetos de mineração de nióbio (United States Geological Survey, 2023).

Adicionalmente, considerando que o Brasil detém posição de destaque na produção e na comercialização mundial de nióbio, a avaliação de metodologias que auxiliem a compreensão dos fatores econômicos que influenciam o planejamento de minas desse mineral, apresenta relevância estratégica para o país. Apesar disso, observa-se que muitos estudos acadêmicos se concentram em análises baseadas em modelos geométricos detalhados e ferramentas computacionais avançadas, havendo uma lacuna na literatura no que se refere à aplicação de análises de sensibilidade em nível conceitual, fundamentadas em dados hipotéticos e relações econômicas clássicas, especialmente no contexto da mineração de nióbio (Agência Nacional de Mineração, 2022).

Diante desse cenário, o problema que norteia o presente trabalho pode ser formulado da seguinte maneira: como as variações nos principais parâmetros econômicos influenciam o planejamento de cava a céu aberto em projetos de mineração de nióbio, quando avaliados por meio de uma abordagem conceitual baseada em relações econômicas clássicas e análise de sensibilidade? A resposta a essa questão busca contribuir para a compreensão dos limites e potencialidades desse tipo de abordagem, fornecendo subsídios para a tomada de decisão em fases iniciais de projetos minerários.

1.2 Justificativa

A tomada de decisão no planejamento de minas a céu aberto ocorre, em grande parte, sob condições de incerteza, especialmente no que se refere aos parâmetros econômicos que fundamentam a viabilidade dos empreendimentos minerários. Preço do produto mineral, custos de lavra e beneficiamento e teor de corte são variáveis que podem sofrer alterações significativas ao longo do tempo, impactando diretamente a atratividade econômica de um projeto. Diante desse cenário, torna-se essencial compreender como essas variáveis influenciam o planejamento da cava, de modo a subsidiar decisões mais consistentes e menos suscetíveis a riscos econômicos (NEWMAN et al., 2010).

Embora a literatura apresente um número expressivo de estudos que empregam modelos geométricos detalhados e ferramentas computacionais avançadas para a análise do planejamento de cava, observa-se que, em fases iniciais de projetos minerários, tais recursos nem sempre estão disponíveis ou são economicamente justificáveis. Nessas etapas, abordagens conceituais baseadas em relações econômicas clássicas continuam sendo amplamente utilizadas para avaliar a viabilidade preliminar de projetos, desempenhando papel fundamental na orientação de investimentos futuros (LANE, 1988; SME Mining Engineering Handbook).

Nesse contexto, a aplicação da análise de sensibilidade em nível conceitual apresenta-se como uma alternativa metodológica relevante, pois permite avaliar a robustez do planejamento frente a diferentes cenários econômicos, mesmo na ausência de modelos de blocos detalhados. Essa abordagem contribui para a identificação de parâmetros críticos, para a compreensão dos limites econômicos da cava e para a redução de incertezas associadas à tomada de decisão em projetos minerários, sendo amplamente reconhecida como ferramenta de apoio estratégico no planejamento de mina (DIMITRAKOPOULOS; FARRELLY; GODOY, 2014; DOWD, 1994).

No caso do nióbio, a realização de estudos dessa natureza assume importância adicional em função do caráter estratégico desse mineral para a indústria moderna. O nióbio é amplamente empregado na produção de aços de alta resistência e em aplicações tecnológicas avançadas, sendo considerado um insumo essencial para setores como infraestrutura, transporte, energia e indústria aeroespacial (United States Geological Survey, 2023). Assim, aprimorar o entendimento dos fatores econômicos que condicionam o planejamento de sua lavra contribui não apenas para a eficiência técnica dos projetos, mas também para a segurança do suprimento desse recurso estratégico.

Adicionalmente, considerando que o Brasil detém posição dominante na produção e na comercialização mundial de nióbio, estudos acadêmicos que abordem o planejamento econômico da lavra desse mineral apresentam relevância estratégica nacional. A análise conceitual da sensibilidade do planejamento de cava permite gerar conhecimento aplicável à realidade brasileira, ao mesmo tempo em que respeita limitações relacionadas à confidencialidade de dados industriais, ampliando a disseminação de conhecimento técnico no meio acadêmico (Agência Nacional de Mineração, 2022).

Do ponto de vista acadêmico, a realização deste trabalho justifica-se ainda por possibilitar a aplicação integrada de conceitos fundamentais dos conhecimentos adquiridos durante a graduação de Engenharia de Minas, como planejamento de cava, economia mineral e análise de sensibilidade, promovendo o desenvolvimento do raciocínio crítico e analítico do profissional. Ao adotar uma abordagem conceitual baseada em dados hipotéticos fundamentados na literatura, o estudo contribui para a formação de forma ética e transparente, reforçando a compreensão do papel da engenharia de minas na busca por empreendimentos ambiental e socialmente responsáveis, bem como economicamente viáveis (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar, por meio de uma abordagem conceitual baseada em relações econômicas clássicas, a sensibilidade do planejamento de cava a céu aberto frente a variações em parâmetros econômicos fundamentais, tais como preço do produto mineral, custos operacionais e teor de corte, visando compreender a influência dessas variáveis na definição do limite econômico da cava em projetos de mineração de nióbio, especialmente em fases iniciais de planejamento (SME Mining Engineering Handbook; LANE, 1988).

1.3.2 Objetivos Específicos

Inicialmente, busca-se identificar e caracterizar os principais parâmetros econômicos que influenciam o planejamento de cavas a céu aberto, tais como preço do produto mineral, custos operacionais de lavra e beneficiamento e teor de corte econômico, a partir de fundamentos consolidados da literatura técnica e científica da Engenharia de Minas e da

Economia Mineral. Esses parâmetros são amplamente reconhecidos como determinantes da viabilidade econômica de projetos minerários e da definição do limite econômico da cava (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002; LANE, 1988).

Em seguida, pretende-se aplicar relações econômicas clássicas do planejamento de mina, incluindo a determinação do teor de corte econômico e da relação estéril/minério limite, de modo a estabelecer critérios conceituais para a definição do limite econômico da cava em um cenário hipotético de mineração de nióbio. Essa abordagem permite avaliar a atratividade econômica do empreendimento de forma preliminar, sem a necessidade de modelos geométricos detalhados (DOWD, 1994; SME Mining Engineering Handbook).

Posteriormente, objetiva-se realizar análises de sensibilidade dos principais indicadores econômicos associados ao planejamento de cava, por meio da variação controlada dos parâmetros econômicos selecionados. Essa etapa visa avaliar a resposta do projeto frente a diferentes cenários econômicos, possibilitando a identificação de parâmetros críticos e a compreensão do grau de robustez do planejamento conceitual diante de incertezas inerentes ao mercado mineral (WHITTLE, 1999; DIMITRAKOPOULOS, 2018).

Na sequência, busca-se comparar os resultados obtidos nos diferentes cenários analisados, avaliando a influência relativa de cada parâmetro econômico sobre a viabilidade do planejamento de cava e sobre os limites econômicos do empreendimento. Essa análise comparativa permite identificar quais variáveis exercem maior impacto sobre o desempenho econômico do projeto, contribuindo para uma tomada de decisão mais fundamentada em fases iniciais do planejamento de mina (NEWMAN et al., 2010).

Por fim, pretende-se discutir as implicações dos resultados obtidos para o planejamento conceitual de minas de nióbio, considerando tanto a importância estratégica desse mineral para a indústria moderna quanto a posição de destaque do Brasil no cenário mundial de produção. Essa discussão busca evidenciar as contribuições e limitações da abordagem conceitual adotada, bem como seu potencial de aplicação como ferramenta de apoio à tomada de decisão (United States Geological Survey, 2023; Agência Nacional de Mineração, 2022).

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos, estruturados de forma a permitir o desenvolvimento progressivo do tema, partindo da contextualização do problema até a apresentação das conclusões obtidas.

Inicialmente, a introdução apresenta o contexto geral da pesquisa, destacando a importância do planejamento de lavra a céu aberto e da análise de sensibilidade no âmbito da mineração. Nesse momento são definidos o problema de pesquisa, a justificativa do estudo, bem como os objetivos geral e específicos que orientam o desenvolvimento do trabalho.

Em seguida, é apresentada a revisão bibliográfica, na qual são discutidos os principais conceitos relacionados ao planejamento de minas a céu aberto, bem como a influência da legislação brasileira sobre todas as etapas de uma mina. Posteriormente, são discutidos os parâmetros econômicos que influenciam a definição do limite da cava e à aplicação da análise de sensibilidade no planejamento de mina. Também é abordado o contexto do nióbio, com ênfase em sua relevância econômica e na posição de destaque do Brasil no cenário mundial de produção desse mineral.

Na sequência, descreve-se a metodologia adotada, detalhando a natureza da pesquisa, as premissas e hipóteses consideradas, bem como o modelo econômico conceitual empregado. São apresentados os parâmetros econômicos analisados, as formulações utilizadas e os procedimentos adotados para a realização da análise de sensibilidade, além das principais limitações associadas à abordagem proposta.

Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, com ênfase na avaliação da influência das variações dos parâmetros econômicos sobre o planejamento de cava a céu aberto. A discussão busca relacionar os resultados às bases teóricas apresentadas anteriormente, permitindo uma análise integrada do comportamento do planejamento frente a diferentes cenários econômicos.

Por fim, são apresentadas as considerações finais, nas quais são sintetizadas as principais conclusões do estudo, retomando-se os objetivos propostos e destacando as contribuições e limitações da abordagem conceitual adotada. Além disso, também são apontadas possíveis direções para o desenvolvimento de estudos futuros relacionados ao tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentos do planejamento de lavra a céu aberto

O planejamento de lavra a céu aberto constitui um processo técnico e econômico cujo objetivo principal é definir a geometria, a sequência de lavra e a estratégia de extração de um depósito mineral, de modo a maximizar o valor econômico do empreendimento ao longo de sua vida útil. Esse processo envolve a integração de informações geológicas, geotécnicas, operacionais e econômicas, sendo fundamental para a avaliação da viabilidade e para a otimização do aproveitamento dos recursos minerais (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013).

Do ponto de vista econômico, o planejamento de mina busca determinar quais porções do depósito devem ser lavradas e em que sequência, considerando que cada unidade de material possui um valor econômico associado. Esse valor é função do teor do minério, do preço do produto mineral, da recuperação metalúrgica e dos custos envolvidos em sua extração e processamento. Dessa forma, o limite final da cava corresponde à fronteira entre regiões economicamente lavráveis e regiões economicamente inviáveis, sendo definido a partir da maximização do valor econômico do projeto (RUNGE, 1998).

Em termos conceituais, o planejamento de mina pode ser dividido em diferentes níveis, incluindo o planejamento estratégico, que define o limite final da cava e a vida útil da mina, o planejamento de longo prazo, que estabelece a sequência anual de lavra, e o planejamento de curto prazo, voltado para a execução operacional diária ou mensal (SME, 2011). Vale ressaltar, que dentro de diferentes empresas, esses horizontes podem ser divididos de forma distintas, variando o julgamento do que é curto, médio ou longo prazo. Ademais, entre essas etapas, a definição do limite econômico da cava representa uma das decisões mais críticas, pois determina diretamente a quantidade de minério aproveitável, a quantidade de estéril a ser removida e o valor econômico do empreendimento.

Observa-se na Figura 1 o fluxograma do Planejamento de Mina.



Figura 1: Fluxograma do Planejamento de Mina.

Fonte: (Autora, 2026).

2.1.1 Planejamento de Mina e a legislação brasileira

O planejamento de mina no Brasil está diretamente condicionado ao arcabouço jurídico, ambiental e técnico que regula a atividade minerária no país. Diferentemente do que muitas vezes é apresentado apenas sob a ótica da engenharia, o planejamento brasileiro não pode ser entendido somente como a definição de cavas, sequenciamento de lavra ou avaliação econômica. Na prática, ele representa um processo integrado entre engenharia, direito minerário, gestão ambiental e governança institucional, sendo construído simultaneamente à obtenção das autorizações legais necessárias para viabilizar o empreendimento mineral (BRASIL, 1967; SÁNCHEZ, 2013).

A atividade minerária brasileira é regida principalmente pelo Código de Mineração (Decreto-Lei nº 227/1967), posteriormente atualizado por legislações complementares e pela criação da Agência Nacional de Mineração (ANM), instituída pela Lei nº 13.575/2017, responsável pela gestão dos títulos minerários e fiscalização do setor. Assim, o planejamento de mina inicia-se ainda na fase de pesquisa mineral, quando são desenvolvidas campanhas geológicas, sondagens, modelagem de recursos e estudos de viabilidade. Ao final dessa etapa, deve ser apresentado o Relatório Final de Pesquisa (RFP) à ANM, documento que comprova a existência da jazida e sustenta tecnicamente o pedido de concessão de lavra (BRASIL, 1967; ANM, 2021).

A aprovação do Relatório Final de Pesquisa marca a transição entre o conhecimento geológico e o planejamento efetivo da exploração mineral. Nesse contexto, destaca-se o Plano de Aproveitamento Econômico (PAE), documento técnico obrigatório que descreve o método de lavra, sequenciamento operacional, infraestrutura, estimativas econômicas e vida útil da mina. O PAE possui caráter legal e vinculante, sendo analisado pela ANM antes da concessão de lavra, estabelecendo compromisso técnico entre o empreendimento minerário e o Estado brasileiro (ANM, 2021).

Paralelamente ao processo minerário ocorre o licenciamento ambiental, considerado um dos principais fatores condicionantes do desenvolvimento de projetos minerários no Brasil. O licenciamento segue os princípios da Política Nacional do Meio Ambiente, estabelecida pela Lei nº 6.938/1981, e regulamentada pela Resolução CONAMA nº 237/1997. Para empreendimentos minerários, o processo normalmente é estruturado em Licença Prévia, Licença de Instalação e Licença de Operação, sendo a Licença Prévia baseada na elaboração

do Estudo de Impacto Ambiental e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), instrumentos destinados à avaliação dos impactos ambientais e sociais do projeto (BRASIL, 1981; CONAMA, 1997; SÁNCHEZ, 2013).

Após a obtenção da Licença Prévia, o projeto executivo é detalhado visando a obtenção da Licença de Instalação, que autoriza a construção das estruturas minerárias, incluindo cava, pilhas de estéril, usinas de beneficiamento e sistemas de drenagem. Somente após o cumprimento das condicionantes ambientais é concedida a Licença de Operação, permitindo o início da produção mineral. Nesse contexto, o planejamento de mina torna-se dinâmico, sendo constantemente ajustado para atender restrições ambientais, territoriais e sociais impostas durante o licenciamento (IBRAM, 2016; SÁNCHEZ, 2013).

Além das autorizações ambientais e minerárias, o empreendimento deve atender às normas técnicas e de segurança operacional estabelecidas pela Agência Nacional de Mineração, incluindo requisitos relacionados à estabilidade de taludes, segurança de barragens, gestão de riscos e monitoramento geotécnico. Após os rompimentos de barragens ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), houve significativo endurecimento regulatório, reforçando a integração entre planejamento de lavra, gestão de riscos e segurança operacional no setor mineral brasileiro (ANM, 2019; CNI, 2020).

Outro elemento fundamental é a integração do planejamento com instrumentos econômicos e fiscais. As empresas mineradoras devem declarar produção à ANM, recolher a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) e apresentar relatórios periódicos de lavra, garantindo o acompanhamento estatal da exploração dos recursos minerais, considerados bens da União conforme a Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988; ANM, 2021).

Nos últimos anos, o planejamento de mina no Brasil passou também a incorporar formalmente o fechamento de mina desde as fases iniciais do projeto. A legislação mineral e ambiental passou a exigir a apresentação do Plano de Fechamento de Mina, contemplando recuperação ambiental, estabilidade física das estruturas e mitigação dos impactos socioeconômicos pós-mineração. Essa abordagem reflete a evolução do conceito de mineração sustentável e alinhamento às boas práticas internacionais da indústria mineral (IBRAM, 2016; ICMM, 2019).

Dessa forma, o planejamento de mina brasileiro deve ser entendido como um processo contínuo que acompanha todo o ciclo de vida do empreendimento mineral, desde a pesquisa geológica até o fechamento da operação. Mais do que um exercício de otimização econômica, trata-se de um instrumento técnico-legal que assegura que a exploração mineral ocorra em conformidade com princípios de viabilidade econômica, segurança operacional, responsabilidade ambiental e governança pública (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002; SÁNCHEZ, 2013).

2.1.2 Parâmetros econômicos no planejamento de mina

Os parâmetros econômicos desempenham papel central no planejamento de minas a céu aberto, uma vez que condicionam a viabilidade do aproveitamento do recurso mineral. Entre os principais parâmetros destacam-se o preço do produto mineral, os custos de lavra e beneficiamento, a recuperação metalúrgica e o teor de corte econômico. A interação entre essas variáveis determina quais porções do depósito podem ser lavradas com lucro e quais devem ser classificadas como estéril (RUNGE, 1998).

O preço do produto mineral é um dos fatores mais relevantes, pois influencia diretamente a receita gerada pela lavra. Em mercados caracterizados por elevada volatilidade, como o de commodities minerais, oscilações de preço podem modificar substancialmente os resultados econômicos de um projeto, afetando decisões relacionadas à expansão ou retração da cava (NEWMAN et al., 2010).

Os custos operacionais, por sua vez, incluem despesas associadas à lavra do minério e do estéril, ao beneficiamento, ao transporte e à administração da mina. O aumento desses custos tende a reduzir a margem econômica do empreendimento, restringindo o limite econômico da cava e exigindo maior seletividade na lavra. Dessa forma, a compreensão da influência dos custos, exibidos na Tabela 1, no planejamento de mina é fundamental para a avaliação da robustez econômica do projeto (SME Mining Engineering Handbook).

Tabela 1: Parâmetros econômicos e influência no planejamento.

Parâmetro	Influência no planejamento
Preço do produto	Expansão/retração da cava
Custo de lavra	Viabilidade de blocos marginais
Recuperação	Receita efetiva
Cut-off	Seleção de minério

Fonte: (Autora, 2026).

2.1.3 Valor Econômico do material e critério de lavra

O conceito fundamental que orienta o planejamento de lavra é o valor econômico do material, que representa a diferença entre a receita gerada pela extração do minério e os custos associados à sua lavra e processamento. Esse valor pode ser expresso pela Equação (1):

$$V = (P * g * R) - C_m \quad (1)$$

Onde:

V = valor econômico por tonelada de minério;

P = preço do produto mineral;

g = teor do minério;

R = recuperação metalúrgica;

C_m = custo operacional do minério.

Quando o valor econômico é positivo, a lavra do material gera lucro e é considerada economicamente viável. Por outro lado, quando o valor econômico é negativo, a lavra resulta em prejuízo e o material é classificado como estéril do ponto de vista econômico (LANE, 1988).

Esse conceito constitui a base da definição do limite econômico da cava, uma vez que apenas os materiais com valor econômico positivo contribuem para a geração de valor do empreendimento. Dessa forma, o planejamento de mina consiste essencialmente na

identificação e extração das porções do depósito que maximizam o valor econômico total do projeto (WHITTLE, 1999).

2.1.4 Teor de corte econômico

O teor de corte econômico constitui um dos conceitos mais importantes do planejamento de mina, pois estabelece o critério mínimo de teor a partir do qual um material pode ser considerado minério economicamente lavrável. Em linhas gerais, ele é o teor mínimo de um elemento útil em um bloco de minério para que ele possa ser lavrado e processado economicamente com lucro, assim, blocos com teor abaixo desse valor são considerados estéril ou material não econômico. Matematicamente, o teor de corte econômico pode ser expresso pela Equação (2):

$$g_{cut} = \frac{C_m}{P} * R \quad (2)$$

Onde:

g_{cut} = teor de corte econômico;

C_m = custo operacional do minério;

P = preço do produto mineral;

R = recuperação metalúrgica.

Segundo a definição clássica proposta por The Economic Definition of Ore, o teor de corte deve ser determinado de forma a maximizar o valor econômico do empreendimento, considerando custos, preços e recuperações. Segundo Lane (1988), o teor de corte pode ser definido como o teor que iguala a receita obtida com o processamento do minério aos custos totais associados à lavra, beneficiamento e comercialização. Assim, ele representa o limite econômico entre minério e estéril.

A definição adequada do teor de corte permite otimizar o aproveitamento do recurso mineral, evitando tanto a lavra de material economicamente inviável quanto a perda de minério potencialmente lucrativo. Em estudos conceituais, o teor de corte é frequentemente utilizado como ferramenta para avaliar a sensibilidade do projeto frente a variações econômicas, sendo recalculado para diferentes cenários de preço e de custo (DOWD, 1994).

2.1.5 Relação estéril/minério e limite econômico da cava

A relação estéril/minério, também conhecida como *strip ratio*, representa a quantidade de estéril que deve ser removida para cada unidade de minério lavrada. Esse parâmetro pode ser expresso pela Equação (3):

$$SR = \frac{Q_e}{Q_m} \quad (3)$$

Onde:

SR = relação estéril/minério;

Q_e = quantidade de estéril removido;

Q_m = quantidade de minério lavrado.

Do ponto de vista econômico, existe um valor máximo dessa relação, denominado relação estéril/minério limite, acima do qual a lavra deixa de ser economicamente viável. Esse limite pode ser determinado pela Equação (4):

$$SR_{lim} = \frac{V}{C_e} \quad (4)$$

Onde:

SR_{lim} = relação estéril/minério limite;

V = valor econômico do minério;

C_e = custo de remoção do estéril.

Esse parâmetro representa o critério econômico fundamental para a definição do limite da cava, pois estabelece a quantidade máxima de estéril que pode ser removida economicamente para acessar o minério. Quando a relação estéril/minério de uma determinada região excede esse valor, a lavra deixa de ser economicamente viável, definindo o limite final da cava (RUNGE, 1998).

2.2 Análise de sensibilidade aplicada ao planejamento de mina

A análise de sensibilidade é amplamente utilizada em engenharia de minas como ferramenta para avaliar o impacto de incertezas associadas aos parâmetros econômicos e técnicos de um projeto. Essa abordagem consiste na variação sistemática de um ou mais parâmetros de entrada, mantendo-se constantes os demais, com o objetivo de avaliar a resposta dos indicadores de desempenho do empreendimento (DIMITRAKOPOULOS; FARRELLY; GODOY, 2014).

No contexto do planejamento de mina, a análise de sensibilidade permite compreender como alterações em preços, custos ou teores influenciam o limite econômico da cava, a relação estéril/minério e a viabilidade do projeto. Essa metodologia é particularmente relevante em fases iniciais de planejamento, nas quais as incertezas são elevadas e decisões estratégicas precisam ser tomadas com base em informações limitadas (NEWMAN et al., 2010).

Estudos na área de planejamento de lavra demonstram que a análise de sensibilidade constitui uma ferramenta fundamental para avaliação da robustez econômica de projetos mineiros, permitindo identificar parâmetros críticos e compreender o impacto das incertezas econômicas sobre a viabilidade do empreendimento. Trabalhos clássicos e recentes indicam que, mesmo quando aplicada de forma conceitual, sem modelagem geométrica detalhada, a análise de sensibilidade fornece suporte consistente à tomada de decisão estratégica em planejamento de minas (DIMITRAKOPOULOS, 2018; HALL, 2014; NEWMAN et al., 2010).

2.3 Abordagens conceituais no planejamento de mina

Projetos minerários são tradicionalmente desenvolvidos em etapas, que incluem estudos conceituais, estudos de pré-viabilidade e estudos de viabilidade. Nas fases iniciais, o objetivo principal não é a definição detalhada da geometria da cava, mas a avaliação preliminar da atratividade econômica do empreendimento e a identificação de riscos associados (AusIMM, 2012).

Nesse contexto, abordagens conceituais baseadas em relações econômicas clássicas desempenham papel fundamental, pois permitem avaliar a viabilidade do projeto de forma simplificada, transparente e compatível com o nível de informação disponível. A literatura reconhece que tais abordagens são essenciais para orientar decisões de investimento e priorizar estudos mais detalhados em etapas subsequentes do projeto (RUNGE, 1998).

2.4 O nióbio e o contexto brasileiro

O nióbio é um elemento metálico de número atômico 41, pertencente ao grupo dos metais de transição, caracterizado por elevada resistência mecânica, alta resistência à corrosão e excelente estabilidade térmica. Essas propriedades tornam o nióbio um elemento estratégico para aplicações industriais de alto desempenho, especialmente na produção de aços microligados de alta resistência mecânica (USGS, 2023).

A principal aplicação do nióbio ocorre na indústria siderúrgica, que consome aproximadamente 90% da produção mundial desse elemento. O nióbio é adicionado ao aço, geralmente na forma de ferronióbio (FeNb), em teores típicos entre 0,02% e 0,1%, promovendo refinamento do tamanho de grão e aumento significativo da resistência mecânica sem comprometer a ductilidade. Esse efeito permite a produção de aços de alta resistência e baixa liga (HSLA – High Strength Low Alloy), amplamente utilizados em estruturas críticas como oleodutos, gasodutos, pontes, plataformas offshore, estruturas automotivas e equipamentos industriais (LINS; GONZAGA, 2016).

Na indústria de petróleo e gás, por exemplo, a utilização de aços microligados com nióbio permite a fabricação de tubos com maior resistência mecânica e menor espessura, reduzindo o peso e o custo de instalação de dutos. Estima-se que a adição de pequenas quantidades de nióbio possa aumentar a resistência do aço em até 30%, contribuindo significativamente para a eficiência estrutural e econômica desses sistemas (CBMM, 2022).

Além da indústria siderúrgica, o nióbio também é utilizado na produção de superligas metálicas aplicadas em turbinas aeronáuticas, motores a jato e sistemas aeroespaciais, devido à sua elevada resistência à fluência e à oxidação em altas temperaturas. Outra aplicação relevante ocorre na produção de ligas supercondutoras, como Nb-Ti e Nb₃Sn, utilizadas em equipamentos de ressonância magnética (MRI), aceleradores de partículas e sistemas avançados de geração de energia (USGS, 2023).

No contexto mundial, o Brasil ocupa posição dominante na produção e nas reservas de nióbio. De acordo com dados do United States Geological Survey (USGS, 2023), o Brasil responde por aproximadamente 88% da produção global de nióbio e detém cerca de 94% das reservas conhecidas desse elemento. Essa posição confere ao país importância estratégica no fornecimento global desse recurso mineral.

As principais jazidas brasileiras de nióbio estão associadas a complexos carbonatíticos, destacando-se os depósitos de Araxá (MG), operado pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), e Catalão (GO), operado pela CMOC Brasil. O depósito de Araxá é considerado o maior e mais importante depósito de nióbio em operação no mundo, com produção anual superior a 80 mil toneladas de ferronióbio. O complexo de Catalão também possui relevância significativa, com produção anual superior a 10 mil toneladas de ferronióbio (ANM, 2022; USGS, 2023).

Esses depósitos são caracterizados pela presença do mineral pirocloro ((Na,Ca)₂Nb₂O₆(OH,F)), principal fonte econômica de nióbio, associado a rochas carbonatíticas. Os teores típicos de Nb₂O₅ nesses depósitos variam entre 0,3% e 1,5%, valores significativamente superiores aos observados em depósitos de outros países, contribuindo para a elevada competitividade da mineração brasileira de nióbio (LINS; GONZAGA, 2016).

Do ponto de vista econômico, o nióbio apresenta alto valor agregado, sendo comercializado principalmente na forma de ferronióbio. O preço do ferronióbio pode variar entre US\$ 30.000 e US\$ 50.000 por tonelada, dependendo das condições de mercado e da pureza do produto (USGS, 2023). Esse elevado valor econômico reforça a importância do planejamento eficiente da lavra, uma vez que pequenas variações nos parâmetros operacionais podem impactar significativamente a viabilidade econômica do empreendimento.

Além disso, devido à elevada concentração da produção mundial em poucos depósitos, o nióbio é considerado um mineral estratégico e crítico por diversas economias globais, incluindo Estados Unidos, União Europeia e Japão. Essa classificação decorre da sua importância tecnológica e da limitada diversificação geográfica da oferta, o que reforça a relevância estratégica dos depósitos brasileiros (USGS, 2023).

Nesse contexto, o planejamento econômico eficiente de minas de nióbio assume papel fundamental, uma vez que a maximização do aproveitamento dos recursos minerais e a otimização das operações de lavra contribuem diretamente para a sustentabilidade econômica desses empreendimentos e para a manutenção da posição estratégica do Brasil no mercado global de nióbio. Observa-se na Figura 2 a comparação do Brasil, relacionada à toda produção mundial em Nióbio, especialmente nos estados de Minas Gerais e Goiás quando comparada com outros países.

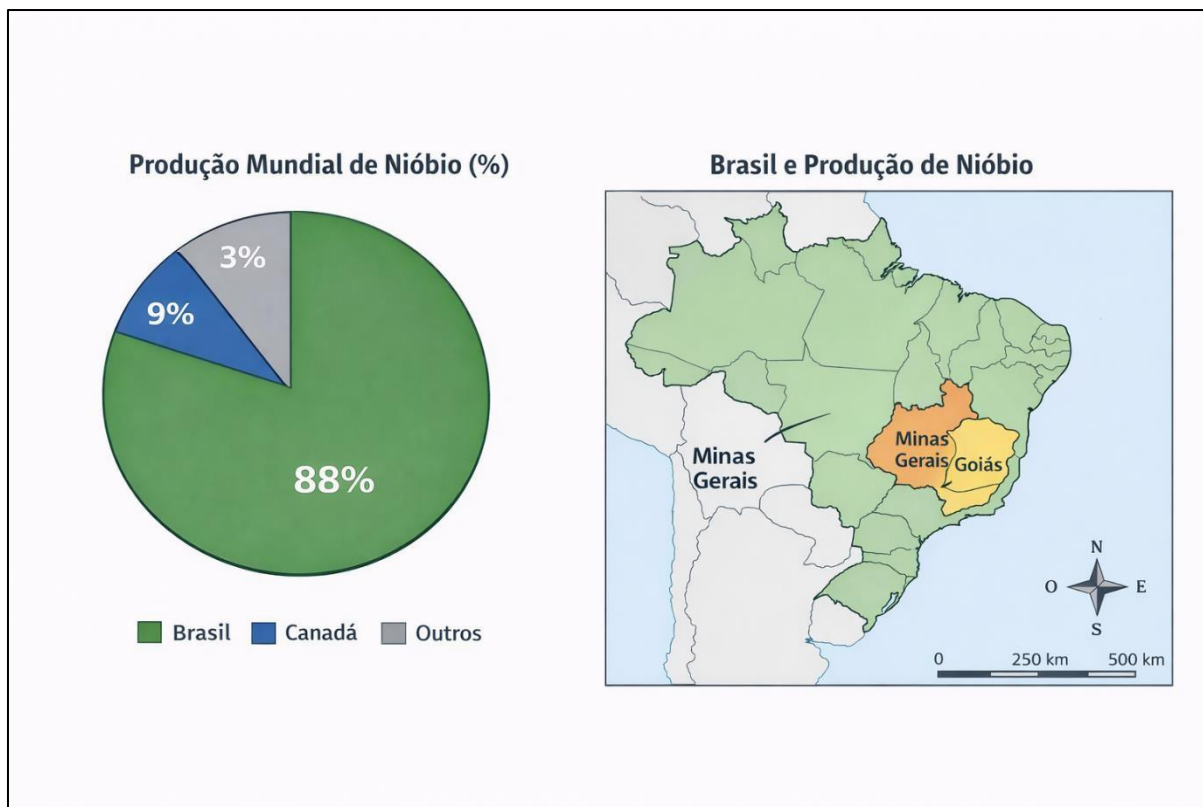


Figura 2: Brasil e Produção de Nióbio e produção mundial de Nióbio

Fonte: Adaptado (Agência Nacional de Mineração - ANM).

2.5 Integração dos parâmetros econômicos e análise de sensibilidade

No planejamento de minas a céu aberto, os parâmetros econômicos não influenciam o projeto de forma isolada, mas sim por meio de um sistema integrado de relações que determina o valor econômico incremental do avanço da cava. O limite econômico da lavra não é controlado diretamente por um único parâmetro, mas pela interação entre receita incremental e custo incremental associados à extração de cada unidade adicional de minério.

Do ponto de vista econômico, o avanço da cava ocorre enquanto a receita incremental gerada pela lavra de uma unidade adicional de minério for superior ao custo incremental necessário para acessá-la. Esse custo incremental inclui não apenas o custo de processamento do minério, mas também o custo adicional de remoção de estéril necessário para expor essa unidade mineralizada. Dessa forma, o limite econômico da cava é atingido quando o valor econômico incremental tende a zero, caracterizando uma condição de equilíbrio marginal (LANE, 1988; RUNGE, 1998).

Essa condição de equilíbrio marginal é altamente sensível às condições econômicas do projeto. Pequenas variações no preço do produto mineral, por exemplo, podem alterar significativamente o equilíbrio entre receita e custo incremental, deslocando o limite econômico da cava. Um aumento no preço eleva o valor econômico incremental do minério, tornando economicamente viável o acesso a regiões anteriormente consideradas inviáveis. Por outro lado, reduções no preço reduzem esse valor incremental, resultando na retração do limite econômico da lavra (WHITTLE, 1999).

Esse comportamento ocorre porque o limite da cava é definido por blocos marginais, ou seja, blocos cujo valor econômico é próximo de zero. Esses blocos são particularmente sensíveis a variações econômicas, pois pequenas alterações nos parâmetros podem converter blocos economicamente viáveis em inviáveis, ou vice-versa. Como consequência, o limite econômico da cava apresenta elevada elasticidade em relação aos parâmetros econômicos, especialmente em projetos caracterizados por margens econômicas moderadas (NEWMAN et al., 2010).

Além disso, existe uma relação não linear entre os parâmetros econômicos e o limite da cava. Variações em parâmetros como preço e custo não produzem necessariamente respostas proporcionais no planejamento de lavra, uma vez que o efeito dessas variações depende da distribuição espacial dos teores e da geometria do depósito. Em depósitos com grande volume de material marginal, pequenas variações econômicas podem produzir alterações significativas no volume total lavrável e na vida útil da mina (DIMITRAKOPOULOS, 2018).

Essa característica torna a análise de sensibilidade uma ferramenta essencial no planejamento de mina, pois permite avaliar a robustez econômica do projeto frente a variações nos parâmetros econômicos. Ao analisar a resposta do limite da cava e dos indicadores econômicos a diferentes cenários econômicos, é possível identificar quais parâmetros exercem maior influência sobre o planejamento e avaliar o grau de exposição do projeto a riscos econômicos.

Do ponto de vista prático, essa análise permite identificar regiões do depósito que apresentam comportamento econômico crítico, nas quais a viabilidade da lavra depende diretamente das condições econômicas. Essas regiões correspondem tipicamente às zonas periféricas da cava, onde a relação estéril/minério é elevada e o valor econômico incremental é reduzido. A identificação dessas regiões é fundamental para o planejamento estratégico da

lavra, pois permite avaliar a estabilidade econômica do projeto frente a diferentes cenários de mercado.

Além disso, a integração dos parâmetros econômicos constitui a base dos algoritmos de otimização de cava utilizados na indústria mineral. Esses algoritmos avaliam o valor econômico de cada unidade do depósito e determinam o limite ótimo da cava com base na maximização do valor econômico total do projeto. Dessa forma, o limite da cava emerge como resultado direto da interação entre os parâmetros econômicos e as características geológicas do depósito, refletindo a condição de equilíbrio econômico do sistema (WHITTLE, 1999).

Nesse contexto, a compreensão da interação entre os parâmetros econômicos e sua influência sobre o limite da cava é fundamental para o desenvolvimento de planejamentos de mina economicamente robustos. Essa compreensão permite não apenas avaliar a viabilidade econômica do projeto em um cenário específico, mas também antecipar o comportamento do empreendimento frente a variações econômicas, contribuindo para a tomada de decisões mais seguras e fundamentadas em projetos de mineração a céu aberto.

3 METODOLOGIA

3.1 Natureza e delineamento da pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como um estudo conceitual de natureza quantitativa, de caráter analítico e exploratório, desenvolvida a partir de uma abordagem determinística e conceitual aplicada ao planejamento de cavas a céu aberto. O método adotado fundamenta-se em relações econômicas clássicas da Engenharia de Minas e da Economia Mineral, com o objetivo de avaliar a sensibilidade do planejamento de lavra frente a variações em parâmetros econômicos fundamentais, sem o emprego de modelos geométricos detalhados ou ferramentas computacionais de otimização.

A escolha dessa abordagem está alinhada às práticas adotadas em estudos conceituais e de pré-viabilidade, nos quais o foco reside na compreensão das relações econômicas dominantes e na identificação de parâmetros críticos que influenciam a viabilidade do empreendimento, antes do avanço para fases de maior detalhamento técnico (CARRASCO; GUJ, 2007; DOWD; ONUR, 1993).

3.2 Premissas e hipóteses adotadas

A metodologia desenvolvida baseia-se em um conjunto de premissas simplificadoras, compatíveis com estudos de natureza conceitual:

- Os dados econômicos são hipotéticos, porém consistentes com ordens de grandeza reportadas na literatura internacional;
- O depósito mineral é tratado de forma homogênea, representado por um teor médio constante;
- Não são consideradas restrições geométricas explícitas, como estabilidade de taludes ou sequenciamento operacional;
- Os parâmetros econômicos são considerados estáticos, não sendo avaliada a dinâmica temporal de preços ou custos;
- Efeitos de diluição, perdas de lavra e restrições metalúrgicas detalhadas não são incorporados.

Tais hipóteses são amplamente adotadas em análises econômicas preliminares e não comprometem a validade da análise de sensibilidade, cujo objetivo principal é avaliar

tendências e ordens de influência relativa entre variáveis econômicas (WHITTLE; BOZORGHADAD, 2009; AZZAM; LITTLE, 2016).

3.3 Parâmetros econômicos analisados

O modelo econômico foi estruturado a partir da definição explícita de um cenário econômico base, apresentado na Tabela 2, cujos valores foram adotados de forma hipotética, porém compatíveis com a literatura sobre projetos de mineração de nióbio.

Tabela 2: Parâmetros econômicos adotados no cenário base.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Preço do produto	(P)	R\$ 40.000/t
Teor médio do minério	(g)	0,6% Nb ₂ O ₅
Recuperação metalúrgica	(R)	70%
OPEX do minério	(OPEX _m)	R\$ 120/t
OPEX do estéril	(OPEX _e)	R\$ 25/t

Fonte: (Autora, 2026).

Esses parâmetros representam uma condição média de operação e constituem a base para a realização das análises de sensibilidade desenvolvidas neste trabalho.

3.4 Formulação do modelo econômico conceitual

3.4.1 Receita unitária do minério

A receita unitária associada à lavra do minério foi estimada por meio da relação direta entre preço, teor médio e recuperação metalúrgica, conforme a Equação (5):

$$Receita_m = P * g * R \quad (5)$$

Essa formulação é amplamente utilizada em análises econômicas preliminares e representa a base para a avaliação da atratividade econômica de diferentes cenários de lavra (CARRASCO; GUJ, 2007).

3.4.2 Margem econômica operacional

A margem econômica operacional por tonelada de minério foi determinada pela diferença entre a receita unitária e o custo operacional do minério, conforme a Equação (6):

$$Margem_m = Receita_m - OPEX_m \quad (6)$$

A margem operacional constitui um dos principais indicadores econômicos utilizados para avaliar a viabilidade da lavra e a tolerância do projeto à remoção de estéril adicional (TOPAL, 2008; SABOUR; WOODS, 2015).

3.4.3 Determinação do teor de corte econômico

O teor de corte econômico foi estimado a partir da condição de equilíbrio entre receita e custo operacional, conforme a Equação (7):

$$g_{cut} = \frac{OPEX_m}{P * R} \quad (7)$$

Essa expressão corresponde à formulação clássica do teor de corte em regime estacionário e é amplamente empregada em estudos conceituais de planejamento de mina, particularmente quando o objetivo é avaliar a sensibilidade do projeto a variações de preço e custo (DOWD; ONUR, 1993; SABOUR; WOODS, 2015).

Aplicando o cenário base, temos então a Equação (8):

$$g_{cut} = \frac{120}{40.000 * 0,70} \quad (8)$$

Convertendo para porcentagem, conforme a Equação (9):

$$g_{cut} = 0,4286\% Nb_2O_5 \quad (9)$$

3.4.4 Relação estéril/minério limite

A relação estéril/minério limite (SR_{lim}) foi determinada com base na margem econômica do minério e no custo de remoção do estéril, conforme a Equação (10):

$$SR_{lim} = \frac{Margem_m}{OPEX_e} = \frac{P * g * R - OPEX_m}{OPEX_e} \quad (10)$$

Aplicando o cenário base, observa-se o resultado exibido na Equação (11):

$$SR_{lim} = \frac{48}{25} = 1,92 \quad (11)$$

Esse parâmetro representa o critério econômico fundamental para a definição do limite da cava em análises conceituais, sendo amplamente discutido na literatura de planejamento econômico de minas a céu aberto (WHITTLE; BOZORGHADAD, 2009; TOPAL, 2008).

Do ponto de vista econômico, o valor de $SR_{lim}=1,92$ indica que, no cenário base analisado, a margem gerada pela lavra de uma tonelada de minério é suficiente para custear a remoção de até 1,92 toneladas de estéril, além de cobrir os custos operacionais associados ao próprio minério. Esse parâmetro representa, portanto, o limite econômico de remoção de estéril e constitui um critério fundamental para a definição do limite da cava em nível conceitual. Relações estéril/minério inferiores a esse valor indicam regiões economicamente lavráveis, enquanto valores superiores implicam inviabilidade econômica unitária, ainda que o teor do minério seja superior ao teor de corte econômico. Dessa forma, o SR_{lim} traduz, de maneira direta, a interação entre margem econômica e custo de acesso ao minério, sendo amplamente utilizado como critério de decisão no planejamento econômico de minas a céu aberto (DOWD; ONUR, 1993).

3.4.5 Procedimento de análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi conduzida por meio da variação univariada dos principais parâmetros econômicos, mantendo-se constantes os demais, conforme metodologia amplamente adotada em estudos de planejamento econômico de minas (TOPAL, 2008; SABOUR; WOODS, 2015).

Inicialmente, definiu-se um cenário econômico base, a partir do qual foram calculados o teor de corte, a margem operacional e a relação estéril/minério limite. Inicialmente, o preço do produto P foi variado e manteve-se constante g, R, $OPEX_m$ e $OPEX_e$ e. Foram utilizados os fatores de preço, conforme disposto abaixo:

$$f_P \in \{0,70; 0,85; 1,00; 1,15; 1,30\} \quad (12)$$

Logo, para cada cenário, apresenta-se por meio da Equação (13):

$$P_i = f_{P,i} * P_{base} \quad (13)$$

Em cada P_i , foram recalculados a receita unitária, o teor de corte econômico, a relação estéril/minério limite pelas Equações (1)–(4).

3.5 Limitações da metodologia

As principais limitações do método adotado estão associadas à ausência de representação geométrica detalhada da cava e à simplificação das condições geológicas e operacionais. Além disso, não são considerados efeitos estocásticos, tais como incertezas na estimativa de teores ou variações temporais de preços e custos. Além das limitações já mencionadas, destaca-se que o modelo adotado não considera aspectos geométricos reais da cava, como restrições de estabilidade de taludes, geometria do depósito ou sequenciamento operacional, os quais exercem influência significativa no planejamento de mina em condições reais. Adicionalmente, o modelo não incorpora análises de fluxo de caixa descontado, investimentos de capital (CAPEX) ou variações temporais de preços e custos, que são elementos fundamentais em estudos de viabilidade econômica completos.

Outra limitação refere-se à utilização de um depósito hipotético homogêneo, o que não representa a variabilidade geológica típica de depósitos minerais reais. No entanto, tais simplificações são compatíveis com estudos conceituais e não comprometem o objetivo principal do trabalho, que consiste em avaliar a influência relativa dos parâmetros econômicos sobre o planejamento de cava (DOWD; ONUR, 1993; AZZAM; LITTLE, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo econômico conceitual descrito no Capítulo 3, bem como a discussão dos efeitos das variações dos principais parâmetros econômicos sobre o planejamento de cava a céu aberto. As análises foram conduzidas por meio de variações univariadas dos parâmetros selecionados, mantendo-se constantes os demais, permitindo avaliar a sensibilidade do planejamento frente a diferentes cenários econômicos.

4.1 Resultados do cenário econômico base

No cenário econômico base, adotaram-se os seguintes parâmetros: preço do produto de R\$ 40.000/t, teor médio do minério de 0,6% Nb₂O₅, recuperação metalúrgica de 70%, custo operacional do minério de R\$ 120/t e custo operacional do estéril de R\$ 25/t.

A aplicação do modelo econômico resultou em uma receita unitária de R\$ 168 por tonelada de minério, obtida a partir do produto entre preço, teor médio e recuperação metalúrgica. Subtraindo-se o custo operacional do minério, obteve-se uma margem econômica positiva de R\$ 48 por tonelada de minério, indicando viabilidade econômica unitária da lavra nas condições analisadas. Essa margem econômica unitária obtida (R\$ 48/t) encontra-se dentro da ordem de grandeza observada em operações minerais de commodities, nas quais a viabilidade econômica é predominantemente condicionada ao volume de produção e não necessariamente a elevadas margens unitárias. Assim, pequenas variações em parâmetros econômicos podem produzir impactos significativos no valor do projeto.

O teor de corte econômico calculado para o cenário base foi de aproximadamente 0,43% Nb₂O₅, o que indica que materiais com teor inferior a esse valor não seriam economicamente lavráveis nas condições consideradas. Além disso, a relação estéril/minério limite resultou em um valor de 1,92, indicando que o projeto é capaz de suportar economicamente a remoção de até 1,92 toneladas de estéril para cada tonelada de minério lavrada. Esses resultados estabelecem a condição de referência para as análises de sensibilidade discutidas nas seções subsequentes.

Do ponto de vista econômico, o valor obtido para a relação estéril/minério limite ($SR_{lim} = 1,92$) indica uma condição de viabilidade moderada, na qual o empreendimento apresenta capacidade econômica suficiente para suportar a remoção de quantidades significativas de

estéril, porém ainda sensível a variações adversas nos parâmetros econômicos. Essa margem econômica, embora positiva, pode ser significativamente impactada por oscilações de preço ou aumentos nos custos operacionais.

Além disso, o teor de corte econômico calculado de 0,43% Nb₂O₅ evidencia que uma parcela relevante do depósito pode ser classificada como minério economicamente lavrável nas condições base consideradas. No entanto, esse limite pode variar substancialmente em função das condições econômicas, reforçando a importância da análise de sensibilidade.

Esses resultados são consistentes com os princípios clássicos do planejamento econômico de minas a céu aberto, nos quais a viabilidade do empreendimento está diretamente associada à margem econômica unitária e à capacidade de suportar a remoção de estéril necessária para acessar o minério.

4.2 Sensibilidade do planejamento ao preço do produto mineral

A sensibilidade do planejamento de cava ao preço do produto mineral foi avaliada por meio da aplicação de variações percentuais de -30%, -15%, +15% e +30% em relação ao preço base, mantendo-se constantes os demais parâmetros econômicos, conforme a Tabela 3:

Tabela 3: Variação do preço do produto mineral comparado a um cenário base.

Cenário	Preço (R\$/t)	Margem econômica (R\$/t)	SR _{lim}
-30%	84	4	0,2
-15%	102	22	1,1
Base	120	40	2
15%	138	58	2,9
30%	156	76	3,8

Fonte: (Autora, 2026).

Os resultados demonstram que o preço exerce influência direta e altamente significativa sobre a relação estéril/minério limite. Quando o preço é reduzido em 30%, de 120 R\$/t para 84 R\$/t, a margem econômica diminui drasticamente de 40 R\$/t para apenas 4 R\$/t, resultando em um SR_{lim} de 0,20. Esse valor indica que praticamente não é economicamente viável remover estéril, tornando o planejamento extremamente restritivo e limitando severamente a expansão da cava.

No cenário de redução de 15%, o SR_{lim} calculado foi de 1,10, representando uma diminuição de aproximadamente 45% em relação ao cenário base. Isso implica redução

significativa no volume de estéril economicamente removível e, consequentemente, redução no volume de reservas lavráveis.

Por outro lado, o aumento do preço melhora significativamente a viabilidade econômica. No cenário de aumento de 15%, o SR_{lim} aumenta para 2,90, representando um incremento de 45% em relação ao cenário base. Já no cenário de aumento de 30%, o SR_{lim} atinge 3,80, praticamente o dobro do valor base.

Esse comportamento indica que preços mais elevados aumentam a tolerância econômica à remoção de estéril, permitindo a expansão do limite econômico da cava e a inclusão de porções adicionais do depósito no plano de lavra.

Esses resultados confirmam que o preço do produto mineral é um dos parâmetros econômicos mais sensíveis no planejamento de minas a céu aberto, influenciando diretamente a geometria final da cava, o volume de reservas economicamente lavráveis e a viabilidade econômica do empreendimento.

4.3 Sensibilidade do planejamento ao custo operacional do minério (OPEX do minério)

A análise de sensibilidade ao custo operacional do minério foi conduzida por meio da variação do OPEX do minério em torno do valor base, mantendo-se constantes os demais parâmetros.

Os resultados mostraram que o aumento do OPEX do minério reduz diretamente a margem econômica unitária, resultando em elevação do teor de corte econômico e em diminuição da relação estéril/minério limite. Esse efeito torna o planejamento mais conservador, exigindo maior seletividade da lavra e reduzindo a capacidade de remoção de estéril.

Em contrapartida, a redução do OPEX do minério aumenta a margem econômica, reduz o teor de corte econômico e eleva o valor da relação estéril/minério limite. Esse comportamento indica que melhorias na eficiência operacional e na produtividade exercem impacto direto sobre a viabilidade econômica do planejamento de cava, os resultados da análise são exibidos na Tabela 4:

Tabela 4: Relação entre o OPEX unitário do minério e o SR_{lim} .

Cenário	OPEX do minério, C_m (R\$/t)	Margem ($P - C_m$) (R\$/t)	SR_{lim}
-30%	56	64	3,2
-15%	68	52	2,6
Base	80	40	2
15%	92	28	1,4
30%	104	16	0,8

Fonte: (Autora, 2026).

Esses resultados evidenciam que o custo operacional do minério é um parâmetro crítico para a sustentabilidade econômica do empreendimento, especialmente em projetos com margens relativamente estreitas.

4.4 Sensibilidade do planejamento ao custo operacional do estéril (OPEX do estéril)

A sensibilidade ao custo de remoção do estéril foi avaliada mantendo-se constantes os demais parâmetros econômicos. Diferentemente do OPEX do minério, o OPEX do estéril não afeta diretamente a margem econômica do minério, mas atua como um fator limitante da expansão da cava, conforme a Tabela 5:

Tabela 5: Relação entre o OPEX unitário do estéril e o SR_{lim} .

Cenário	OPEX do estéril, C_w (R\$/t)	Margem ($P - C_m$) (R\$/t)	SR_{lim}
-30%	14	40	2,86
-15%	17	40	2,35
Base	20	40	2
15%	23	40	1,74
30%	26	40	1,54

Fonte: (Autora, 2026).

Os resultados indicaram que o aumento do custo de remoção do estéril reduz o valor da relação estéril/minério limite, tornando o planejamento mais restritivo e limitando a quantidade de estéril que pode ser economicamente removida. Por outro lado, a redução do OPEX do estéril aumenta o valor de SR_{lim} , ampliando a viabilidade econômica da remoção de material estéril.

Esse comportamento ressalta a importância dos custos de movimentação de material no planejamento de minas a céu aberto, especialmente em projetos com elevadas relações estéril/minério.

4.5 Sensibilidade do planejamento à recuperação metalúrgica

A recuperação metalúrgica é um parâmetro particularmente relevante para projetos de nióbio, devido à complexidade dos processos de beneficiamento associados a esse mineral. A análise de sensibilidade mostrou que aumentos na recuperação resultam em elevação direta da receita unitária, da margem econômica e da relação estéril/minério limite, conforme a Tabela 6.

Tabela 6: Sensibilidade de SR_{lim} à recuperação metalúrgica.

Cenário	Recuperação R (%)	Receita efetiva (P·R) (R\$/t)	Margem (P·R – Cm) (R\$/t)	SR_{lim}
-30%	49	58,8	-21,2	-1,06
-15%	59,5	71,4	-8,6	-0,43
Base	70	84	4	0,2
15%	80,5	96,6	16,6	0,83
30%	91	109,2	29,2	1,46

Fonte: (Autora, 2026).

Melhorias na recuperação metalúrgica permitem reduzir o teor de corte econômico, ampliar a quantidade de minério economicamente aproveitável e aumentar a tolerância à remoção de estéril. Em contrapartida, reduções na recuperação impactam negativamente todos os indicadores econômicos, tornando o planejamento mais restritivo.

Esses resultados evidenciam a forte interdependência entre o desempenho do beneficiamento mineral e as decisões de planejamento de lavra, reforçando a necessidade de integração entre as áreas de mina e usina, especialmente em projetos de nióbio.

4.6 Comparação da influência dos parâmetros econômicos

A comparação entre os parâmetros analisados indica que o preço do produto mineral exerce a maior influência sobre o planejamento econômico da cava, seguido pela recuperação metalúrgica e pelo custo operacional do minério. O custo operacional do estéril, embora relevante, apresentou impacto relativamente menor quando comparado às demais variáveis.

Essa hierarquização dos parâmetros é coerente com a literatura sobre planejamento econômico de minas a céu aberto e reforça a importância da realização de análises de sensibilidade em fases iniciais de projetos minerários, como forma de identificar variáveis críticas e orientar a tomada de decisão.

Do ponto de vista prático, os resultados obtidos possuem aplicação direta no planejamento estratégico de empreendimentos minerários reais. A identificação do preço do

produto mineral como principal parâmetro de influência evidencia a necessidade de monitoramento contínuo das condições de mercado e da adoção de estratégias operacionais que permitam manter a viabilidade econômica mesmo em cenários desfavoráveis.

Adicionalmente, a forte influência dos custos operacionais e da recuperação metalúrgica ressalta a importância da eficiência operacional e da integração entre as etapas de lavra e beneficiamento mineral. Melhorias na produtividade, redução de custos operacionais e otimização dos processos de beneficiamento podem contribuir significativamente para a expansão do limite econômico da cava e para o aumento da vida útil do empreendimento.

Dessa forma, a análise de sensibilidade constitui uma ferramenta essencial para o suporte à tomada de decisão no planejamento de mina, permitindo a avaliação de diferentes cenários econômicos e contribuindo para o desenvolvimento de projetos mais robustos e economicamente sustentáveis.

Os princípios econômicos utilizados neste estudo são diretamente compatíveis com aqueles empregados em softwares de planejamento de mina amplamente utilizados na indústria mineral, como Whittle e Deswik. Nessas ferramentas, o limite econômico da cava é definido com base na avaliação econômica dos blocos, considerando parâmetros como preço do produto, custos operacionais e recuperação metalúrgica, os quais determinam o valor econômico e a viabilidade de lavra de cada porção do depósito.

Nesse contexto, a relação estéril/minério limite e o teor de corte econômico constituem parâmetros fundamentais também nos modelos computacionais, sendo utilizados como base para a otimização da geometria da cava e para a definição do planejamento estratégico de lavra. Dessa forma, o modelo conceitual desenvolvido neste trabalho representa uma simplificação dos fundamentos econômicos aplicados em softwares profissionais, contribuindo para a compreensão dos mecanismos que controlam o planejamento econômico de minas a céu aberto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar, por meio de uma abordagem conceitual baseada em relações econômicas clássicas, a sensibilidade do planejamento de cava a céu aberto frente a variações em parâmetros econômicos fundamentais, aplicando o modelo a um cenário hipotético de mineração de nióbio.

Os resultados obtidos demonstraram que o planejamento econômico da cava apresenta elevada sensibilidade às variações dos parâmetros analisados. O preço do produto mineral foi identificado como o fator de maior influência sobre a viabilidade econômica e sobre a relação estéril/minério limite, seguido pela recuperação metalúrgica e pelo custo operacional do minério. O custo operacional do estéril, embora relevante, apresentou influência relativamente menor quando comparado aos demais parâmetros.

Observou-se que aumentos no preço do produto mineral e na recuperação metalúrgica resultam em elevação da margem econômica e expansão do limite econômico da cava, enquanto aumentos nos custos operacionais tornam o planejamento mais restritivo. Esses resultados evidenciam a importância do controle de custos e da eficiência operacional para a viabilidade econômica de empreendimentos minerários.

A abordagem conceitual adotada mostrou-se eficaz para a compreensão da influência relativa dos parâmetros econômicos e para a identificação de variáveis críticas no planejamento de mina, mesmo na ausência de modelos geométricos detalhados. Dessa forma, o estudo contribui para o entendimento dos fundamentos econômicos que orientam o planejamento de lavra em fases iniciais de projetos minerários.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a aplicação da metodologia em modelos de blocos com representação geométrica real, bem como a incorporação de análises econômicas mais completas, incluindo fluxo de caixa descontado e análise de risco, de modo a ampliar a aplicabilidade dos resultados a projetos minerários reais.

REFERÊNCIAS BIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM).** *Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas*. Brasília: ANM, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM).** *Guia para elaboração do Plano de Aproveitamento Econômico (PAE)*. Brasília: ANM, 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM).** *Resoluções sobre segurança de barragens de mineração*. Brasília: ANM, 2019.
- AUSTRALASIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY (AusIMM).** *Mine planning and equipment selection*. Carlton: AusIMM, 2012.
- Azzam, I.; little, J.** A review of economic analysis techniques for mining projects. *Resources Policy*, v. 49, p. 136–145, 2016.
- BRASIL.** *Constituição (1988): Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.
- BRASIL.** *Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967*. Código de Mineração. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 fev. 1967.
- BRASIL.** *Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981*. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2 set. 1981.
- BRASIL.** *Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017*. Cria a Agência Nacional de Mineração e extingue o Departamento Nacional de Produção Mineral. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2017.
- Carrasco, P.; Guj, P.** Mineral project evaluation: using discounted cash flow techniques. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 107, n. 3, p. 169–178, 2007.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI).** *Segurança de barragens e gestão de riscos na mineração brasileira*. Brasília: CNI, 2020.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA).** *Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997*. Dispõe sobre o licenciamento ambiental. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 dez. 1997.
- Dimitrakopoulos, R.** Stochastic optimization for strategic mine planning: a decade of developments. *Journal of Mining Science*, v. 54, n. 4, p. 699–720, 2018.
- Dimitrakopoulos, R.; FARRELLY, C.; GODOY, M.** Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design. *Mining Technology*, v. 123, n. 2, p. 82–88, 2014.
- Dowd, P. A.** Risk assessment in reserve estimation and open-pit planning. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, v. 103, p. A148–A154, 1994.
- Dowd, P. A.; Onur, A. H.** Risk assessment in mine planning. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, v. 102, p. A75–A83, 1993.
- Hartman, H. L.; MUTMANSKY, J. M.** *Introductory mining engineering*. 2. ed. New York: Wiley, 2002.
- Hustrulid, W.; Kuchta, M.; Martin, R.** *Open pit mine planning and design*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM).** *Gestão para sustentabilidade na mineração*. Brasília: IBRAM, 2016.
- INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM).** *Integrated mine closure: good practice guide*. London: ICMM, 2019.
- Lane, K. F.** *The economic definition of ore: cut-off grades in theory and practice*. London: Mining Journal Books, 1988.
- Lins, F. A. F.; Gonzaga, G. M.** Nióbio: propriedades, aplicações e importância econômica. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 13, n. 1, p. 1–10, 2016.
- Newman, A. M.; Rubio, E.; Caro, R.; Weintraub, A.; Eureka, K.** A review of operations research in mine planning. *Interfaces*, v. 40, n. 3, p. 222–245, 2010.
- Runge, I. C.** *Mining economics and strategy*. Littleton: SME, 1998.
- Sánchez, L. E.** *Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- Sabour, S. A.; Woods, R.** Cut-off grade optimization under economic uncertainty. *Mining Technology*, v. 124, n. 3, p. 141–150, 2015.
- SOCIETY FOR MINING, METALLURGY & EXPLORATION (SME).** *SME mining engineering handbook*. 3. ed. Englewood: SME, 2011.
- Topal, E.** Evaluation of a mining project using discounted cash flow analysis. *Mining Technology*, v. 117, n. 3, p. 141–150, 2008.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS).** *Mineral commodity summaries: niobium*. Reston: U.S. Geological Survey, 2023.
- Whittle, J.** *Four-X strategic planning*. Melbourne: Whittle Consulting, 1999.
- Whittle, J.; Bozorghdad, S.** Open pit optimization and economic analysis. In: *Proceedings of the APCOM Symposium*. Vancouver: APCOM, 2009.