



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



**APLICAÇÃO DE MODELO MULTICRITÉRIO NA SELEÇÃO DO MÉTODO DE
LAVRA SUBTERRÂNEA EM DEPÓSITOS PEGMATÍTICOS RICOS EM LÍTIO**

Marcos Taylor Rodrigo de Castro

Ouro Preto - MG

2026

MARCOS TAYLOR RODRIGO DE CASTRO

**APLICAÇÃO DE MODELO MULTICRITÉRIO NA SELEÇÃO DO MÉTODO DE
LAVRA SUBTERRÂNEA EM DEPÓSITOS PEGMATÍTICOS RICOS EM LÍTIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia de
Minas da Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Minas.

Área de Concentração: Lavra de Minas /
Planejamento de Mina

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da
Silva

Ouro Preto - MG

2026



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcos Taylor Rodrigo de Castro

Aplicação de modelo multicritério na seleção do método de lavra subterrânea em depósitos pegmatíticos ricos em lítio

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 6 de julho de 2026

Membros da banca

Doutor - José Margarida da Silva -

Orientador- Universidade Federal de Ouro Preto

Doutora - Tatiana Barreto dos Santos - Universidade Federal de Ouro Preto
Engenheira de Minas - Lóren Letícia Rocha Santos

José Margarida da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Jose Margarida da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/09/2026, às 14:08, 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 **1143173** e o código CRC **C4C83F27**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.007998/2026-16

SEI nº 1143173

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, em especial à minha mãe, Joelma, pelo amor, apoio incondicional e carinho ao longo de toda essa jornada. Mesmo com a distância, seu afeto, incentivo e dedicação sempre estiveram presentes, mostrando que nenhum quilômetro é capaz de diminuir o amor de uma mãe. Sua força e confiança foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Aos meus avós, que nunca duvidaram da minha capacidade e sempre acompanharam esta jornada com entusiasmo, carinho e expectativa. O apoio, o incentivo e a confiança de vocês foram fundamentais para que este momento se tornasse realidade.

Gostaria de agradecer também à Nexa Resources, por me proporcionar uma experiência ímpar durante o período de estágio. Essa oportunidade contribuiu de forma significativa para o meu crescimento pessoal e profissional, permitindo o aprendizado prático, o desenvolvimento de novas competências e a convivência com profissionais de excelência. Levarei essa experiência comigo por toda a minha carreira, pois ela teve um papel fundamental na formação do profissional que estou me tornando.

Ao meu orientador, Professor José Margarida, pelo incentivo e confiança depositada em mim desde o período da iniciação científica, que deu origem a este trabalho. Agradeço também pelo apoio constante, pelos valiosos ensinamentos e pela disponibilidade ao longo de toda a sua elaboração, especialmente nesta etapa final. Sua contribuição foi fundamental para a concretização desta etapa e para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), ao Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) e à gloriosa Escola de Minas, por me proporcionarem uma formação de excelência por meio de um ensino público, gratuito e de qualidade. Agradeço também a todos os professores que fizeram parte dessa trajetória, pelos ensinamentos, incentivo e dedicação, contribuindo de forma decisiva para a minha formação acadêmica, pessoal e profissional. Tenho orgulho de levar comigo os valores e o conhecimento adquiridos nesta instituição que tanto marcou a minha vida.

RESUMO

Com o aumento da demanda global por lítio impulsionado pelo mercado de veículos elétricos, a otimização da lavra de pegmatitos graníticos, que são a principal fonte do metal no Brasil, tornou-se estratégica. Em depósitos como o de Volta Grande (Nazareno/MG), o aprofundamento das operações eleva substancialmente a relação estéril-minério, tornando a exploração a céu aberto economicamente inviável a longo prazo e justificando a transição para métodos subterrâneos. Este estudo avalia métodos de lavra subterrânea aplicáveis ao depósito de Volta Grande utilizando o método multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e o método quantitativo de Nicholas modificado (UBC), fundamentados em parâmetros geológicos, geométricos e geotécnicos locais. A partir da modelagem por Nicholas modificado, as alternativas mais indicadas foram: lavra a céu aberto, *cut and fill*, *sublevel stoping*, *longwall* e *room and pillars*. O modelo AHP, por sua vez, estabeleceu a ordem prioritária de preferência em lavra a céu aberto, *cut and fill*, *room and pillars* e *sublevel stoping*. Os resultados demonstram que o modelo AHP, em convergência com a abordagem de Nicholas modificada, constitui uma ferramenta eficaz e consistente de suporte à decisão para análises preliminares de planejamento mineiro, servindo como diretriz robusta para estudos subsequentes de viabilidade técnica.

Palavras-chave: lítio, pegmatito, lavra subterrânea, seleção de método de lavra, métodos multicritério de tomada de decisão, AHP

ABSTRACT

With the increasing global demand for lithium driven by the electric vehicle market, optimizing the mining of granitic pegmatites, the primary source of lithium in Brazil, has become strategically important. In deposits such as Volta Grande (Nazareno, Minas Gerais, Brazil), the progressive deepening of mining operations substantially increases the stripping ratio, making open-pit mining economically unfeasible in the long term and justifying the transition to underground mining methods. This study evaluates underground mining methods applicable to the Volta Grande deposit using the Analytic Hierarchy Process (AHP), a multicriteria decision-making method, and the Modified Nicholas (UBC) quantitative method, based on local geological, geometrical, and geotechnical parameters. According to the Modified Nicholas method, the most suitable mining alternatives were open-pit mining, cut and fill, sublevel stoping, longwall, and room and pillar. The AHP model, in turn, ranked the alternatives in the following order of preference: open-pit mining, cut and fill, room and pillar, and sublevel stoping. The results demonstrate that the AHP model, in agreement with the Modified Nicholas approach, is an effective and consistent decision-support tool for preliminary mine planning analyses, providing a robust basis for subsequent technical feasibility studies.

Keywords: lithium; pegmatite; underground mining; mining method selection; multicriteria decision-making methods; Analytic Hierarchy Process (AHP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos métodos de lavra subterrânea.	8
Figura 2: Diagrama do método Longwall para rocha dura.	10
Figura 3: Representação esquemática do método Rooms and Pillars	11
Figura 4: Representação esquemática do método Cut and fill	12
Figura 5: Método por Realces em Subníveis (sublevel stoping).	14
Figura 6: Método de lavra por recalque (shrinkage stoping).	15
Figura 7: Método por abatimento de subníveis (Sublevel Caving)	16
Figura 8: Método por abatimento de blocos (Block Caving)	16
Figura 9: Mapa litoestrutural com a localização dos diversos corpos pegmatíticos da Mina de Volta Grande.	27
Figura 10: Grid utilizado para gerar seções no Corpo A.	28
Figura 11: Grid utilizado para gerar seções no Corpo A.	29
Figura 12: Estrutura hierárquica básica	33
Figura 13: Vistas laterais do Corpo A e suas seções.	43
Figura 14: Vistas laterais do Corpo C e suas seções.	46
Figura 15: Estruturação do problema de seleção de método de lavra para os Corpos A e C.	52
Figura 16: Representação esquemática da variante post room-and-pillar mining.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela comparativa entre os métodos de lavra.	21
Tabela 2: Classificação das características geométricas e geomecânicas do depósito mineral segundo o Método da UBC.	30
Tabela 3: Pontuações para características geométricas e distribuição de teores segundo o Método da UBC.	31
Tabela 4: Pontuações das características geomecânicas do depósito mineral segundo o Método da UBC.	31
Tabela 5: Pontuações das características geomecânicas do depósito mineral segundo o Método da UBC.	32
Tabela 6: Escala numérica de Saaty.	33
Tabela 7: Índice de consistência randômico.	35
Tabela 8: Principais produtores mundiais de lítio contido em 2025.	36
Tabela 9: Distribuição mundial das reservas de Lítio contido em 2025.	37
Tabela 10: Distribuição mundial do recurso de Lítio contido em 2025	37
Tabela 11: Características e métodos de lavra de depósitos pegmatíticos litiníferos em operação.	38
Tabela 12: Parâmetros geométricos do Corpo A.	45
Tabela 14: Parâmetros geomecânicos dos Corpos A e C.	49
Tabela 15: Dados de entrada do método UBC para os Corpos A e C.	49
Tabela 16: Ranking final dos métodos de lavra após a aplicação do método UBC para os Corpos A e C.	50
Tabela 17: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério forma.	52
Tabela 18: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério mergulho.	53
Tabela 19: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério espessura.	53
Tabela 20: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério profundidade.	53
Tabela 21: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério uniformidade.	54
Tabela 22: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RMR do	

minério.	54
Tabela 23: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RSS do minério.	54
Tabela 24: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RMR da capa.	54
Tabela 25: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RSS da capa.	55
Tabela 26: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RMR da lapa.	55
Tabela 27: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RSS da lapa.	55
Tabela 28: Análise de consistência lógica das matrizes de comparações pareadas das alternativas.	56
Tabela 29: Matriz de decisão normalizada.	56
Tabela 30: Matriz de comparações pareadas dos critérios à luz do problema de seleção de método de lavra.	57
Tabela 32: Vetor de Prioridade global.	58

LISTA DE NOTAÇÕES E SÍMBOLOS

AHP = Analytic Hierarchy Process

BS = Bench Stoping

IC = Índice de Consistência

KDI = Key Deposit Indicators

KMI = Key Mining Method Indicators

LHD = Load-Haul-Dump

MCDM = Multi-Criteria Decision Making

MMS = Mining Method Selection

MSAHP = Mining Selection Analytic Hierarchy Process

PG = Prioridade Global

PML = Prioridades Médias Locais

RC = Razão de Consistência

REM = Relação estéril-minério

RMR = Rock Mass Rating

RQD = Rock Quality Designation

RSS = Rock Substance Strength

UBC = University of British Columbia

VRM = Vertical Retreat Mining

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Lítio no mundo	3
2.2. Lítio no Brasil (2025)	4
2.3. Mineração de lítio	5
2.4. Mineração Subterrânea	5
2.4.1. Conceitos Gerais da Mineração Subterrânea	5
2.4.2. Aplicações da Mineração Subterrânea	6
2.4.3. Vantagens da Mineração Subterrânea	6
2.4.4. Limitações e Desafios da Mineração Subterrânea	6
2.5. Métodos de Lavra Subterrânea	7
2.5.1. Frente longa (Longwall)	9
2.5.2. Método por Câmaras e Pilares (Rooms and Pillars)	10
2.5.3. Método por Corte e enchimento (Cut and Fill)	11
2.5.4. Método de lavra por subníveis (Sublevel Stopping)	12
2.5.5. Lavra por recalque (Shrinkage stoping).	14
2.5.6. Abatimento de subníveis (Sublevel Caving)	15
2.5.7. Abatimento de blocos (Block Caving)	16
2.6. Aplicações do Método AHP na Seleção de Métodos de Lavra	17
2.6.1. Mina de Bauxita de Jajarm – bauxita; Irã	17
2.6.2. Eskişehir-Karaburun – cromita; Turquia	18
2.7. Relação Estéril-Minério	18
2.8. Fundamentos do Desmonte de Rochas com Explosivos	19
2.9. Metodologias para a seleção de métodos de lavra	20
3. OBJETIVOS	25
3.1. Objetivo geral	25
3.2. Objetivos específicos	25
4. METODOLOGIA	25

4.1. Caracterização da área de estudo	26
4.2. Avaliação do cenário mundial de minas de lítio	27
4.3. Definição dos parâmetros geométricos do depósito	27
4.4. Método de Nicholas Modificado (Método UBC)	29
4.5. Modelo multicritério de tomada de decisão AHP	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1. Cenário mundial da mineração de lítio	35
5.1.1. Principais produtores mundiais (2025)	35
5.1.2. Reservas mundiais de Lítio (2025)	36
5.1.4. Caracterização de depósito pegmatíticos ricos em lítio	38
5.2. Descrição dos parâmetros geométricos dos Corpos A e C	42
5.3. Método de Nicholas Modificado (UBC)	49
5.4. Método AHP	51
CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

As propriedades físicas e químicas únicas do lítio fazem com que ele apresente aplicações nas mais diversas indústrias, incluindo a fabricação de baterias, cerâmicas, vidros, lubrificantes, polímeros, medicamentos, armas nucleares e outros. Importantes nos esforços para a redução do aquecimento global por meio da substituição de veículos a combustão por veículos movidos por energias renováveis, as baterias íons-lítio dominaram 88% do consumo global de lítio em 2025 (Jaskula, 2026). Considerando que um sistema alternativo de armazenamento de energia no mesmo nível ou melhor que as baterias íons-lítio ainda está longe de ser realizado e implementado no mercado (Habib *et al.*, 2020; Kavanagh *et al.*, 2018), a tendência é que a demanda por lítio continue aumentando nos próximos anos. O Banco Mundial já prevê que, em 2050, a demanda anual por lítio aumente em torno de 5 vezes em comparação com a produção de 2018 (Hund *et al.*, 2020).

Por ser um elemento quimicamente muito ativo, o lítio nunca ocorre na natureza em sua forma pura, podendo apenas ser encontrado na forma de minerais em rochas e solos, ou como um sal estável em salmouras enriquecidas de lítio, lagos salgados ou mesmo no oceano.

No Brasil, os recursos de lítio encontram-se associados a pegmatitos graníticos, rochas ígneas plutônicas de textura complexa e granulação grosseira variável, que ocorrem tipicamente na forma de lentes, diques ou veios (BGS, 2016; London, 2018). Esses corpos rochosos constituem uma das principais fontes de lítio em escala global, sendo caracterizados por mineralizações associadas a ambientes ígneos evoluídos e enriquecidos em elementos raros. Em razão dessas características e de seu elevado potencial econômico, os pegmatitos têm sido amplamente estudados na literatura geológica (Wang *et al.*, 2021).

Visto que o Brasil, hoje, se posiciona como o detentor de 0,53% dos recursos globais de lítio e como a oitava maior reserva conhecida no mundo (USGS, 2022), fazer o melhor uso desses recursos e reservas, que se encontram na forma de depósitos pegmatíticos, por meio da aplicação do método de lavra mais adequado é essencial. Os custos de extração do bem mineral impactam diretamente no valor do produto, sendo assim, essencial a otimização de todos os processos envolvidos na extração do bem mineral. Segundo Namin *et al.* (2022), o alto custo envolvido no desenvolvimento de uma mina, justifica o aumento da atenção e da importância de utilizar um método de lavra que seja o mais adequado para a realização do projeto. Uma vez implementado um método sem sucesso, alterações, quando possíveis, podem representar um alto custo, podendo, inclusive, tornar o projeto antieconômico.

Dada toda a complexidade envolvida nessa etapa de suma importância para o empreendimento mineiro, diversas metodologias foram desenvolvidas com o intuito de auxiliar no processo de seleção do método de lavra. Essa complexidade da seleção decorre da necessidade de considerar simultaneamente características geológicas, geomecânicas, geométricas, econômicas, operacionais e ambientais do depósito. Nesse contexto, Nieto (2011) propôs a utilização dos *Key Deposit Indicators* (KDI) e dos *Key Mining Method Indicators* (KMI), indicadores que são utilizados para organizar e avaliar de maneira sistemática as características presentes no depósito de interesse e quais os requisitos necessários para a aplicação dos diferentes métodos de lavra. Com isso, é possível avaliar a compatibilidade entre eles de forma estruturada. Esses indicadores reforçam que a seleção do método de lavra deve considerar múltiplos fatores interdependentes, e não exclusivamente os aspectos econômicos ou geométricos do depósito (Nieto, 2011).

Até 1980, as principais metodologias aplicadas foram modelos qualitativos que utilizavam fluxogramas e tabelas de classificação para a seleção do método de lavra. Nicholas (1981) foi o primeiro a desenvolver uma metodologia quantitativa que, por meio de tabelas de classificação numérica das características do depósito, permitia obter um ranking final dos métodos de lavra. Baseado no método de Nicholas (1981), Miller-Tait *et al.* (1995) também propuseram uma metodologia quantitativa, denominada método da UBC ou método de Nicholas Modificado, a fim de representar melhor a prática canadense no que se refere à lavra subterrânea.

Segundo Garza-Cruz e Pierce (2020), é notável que os procedimentos evoluíram de análises qualitativas para métodos quantitativos e, posteriormente, para modelos híbridos que combinam sistemas especialistas, lógica *fuzzy*, inteligência artificial e métodos multicritério de tomada de decisão (do inglês *Multi-Criteria Decision Making* – MCDM). Também afirma que não existe uma metodologia universalmente aplicável, sendo a escolha do método de lavra, associada às características do depósito, a disponibilidade de dados e os objetivos do projeto.

Nesse contexto, com o intuito de ponderar diversos parâmetros de entrada e considerar critérios e objetivos frequentemente conflitantes envolvidos na seleção de um método de lavra, diferentes modelos multicritério de tomada de decisão passaram a ser amplamente aplicados a partir dos anos 2000 (Baloyi e Meyer, 2020; Abuchain *et al.*, 2026).

Entre os métodos multicritério, o Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process* – AHP) destaca-se por permitir a estruturação hierárquica do problema, a comparação pareada entre critérios e alternativas e a verificação da consistência dos julgamentos. Balt e

Goosen (2020) propuseram a metodologia MSAHP (*Mining Selection Analytic Hierarchy Process*), baseada no método AHP, com o objetivo de tornar o processo de seleção de métodos de lavra mais sistemático e menos dependente da subjetividade dos avaliadores. Segundo os autores, a metodologia contribui para uma tomada de decisão mais estruturada e transparente.

Considerando o aprofundamento das cavas, a redução de corpos mineralizados próximos à superfície e a necessidade de se reduzir o impacto ambiental da mineração, a lavra subterrânea passará a ser uma opção cada vez mais comum para o aproveitamento de pegmatitos litiníferos. Dado esse contexto, esta pesquisa propõe a aplicação da metodologia multicritério AHP para a avaliação de métodos de lavra subterrânea para o depósito pegmatítico de Volta Grande, Nazareno/MG. Dessa forma, o estudo se mostra relevante diante do potencial apresentado pelo lítio e da perspectiva de aumento da demanda mundial desse bem mineral no futuro.

Ressalta-se que parte dos estudos apresentados neste Trabalho de Conclusão de Curso foi desenvolvida no âmbito do projeto de Iniciação Científica "**Seleção de Método de Lavra Subterrânea para Depósito Pegmatítico Rico em Lítio por Meio de Modelo Multicritério de Tomada de Decisão**" (Castro; Silva; Zorzal, 2024), realizado no Programa de Iniciação à Pesquisa (PIP) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Os resultados obtidos nesse projeto constituíram a base para o aprofundamento das pesquisas desenvolvidas neste trabalho e serviram de subsídio para a tese de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM/UFOP), intitulada "Seleção de métodos de lavra subterrânea para pegmatitos litiníferos" (Zorzal, 2026).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Lítio no mundo

Nas últimas décadas, o lítio se tornou um recurso estratégico em escala mundial, o que está relacionado à expansão tecnológica e a busca pela redução da emissão de gases do efeito estufa. Essa transição energética proporciona a criação e aplicação de novas fontes de energia, principalmente, o uso das baterias de íons de lítio utilizadas em veículos elétricos, equipamentos eletrônicos e alguns sistemas de armazenamento de energia renovável (IEA, 2024).

Segundo Jaskula (2026), o mercado global de lítio foi impulsionado pela expansão da indústria de baterias recarregáveis. Apesar da alta demanda mundial pelo minério, o aumento

da capacidade produtiva em diversos países, resultou em um cenário de maior oferta, o que contribuiu para a redução dos preços do minério ao longo do ano de 2025. Ainda assim, a crescente adoção de fontes de energia renováveis reforça a importância estratégica do lítio para a transição energética global, o que culminou na necessidade do abastecimento desse mineral para governos, fabricantes de bateria, montadoras de veículos e outros.

2.2. Lítio no Brasil (2025)

A mineração de lítio no Brasil evoluiu de uma atividade, em sua maioria, de pequena escala, voltada principalmente para a produção de minerais industriais, para empreendimentos de grande porte destinados ao mercado global de materiais para baterias. Essa transformação foi impulsionada pela crescente demanda por veículos elétricos, pela descoberta e ampliação de recursos no Vale do Jequitinhonha e pelos investimentos em novos projetos de mineração e beneficiamento (Zorzal *et al.*, 2025).

De acordo com o *Mineral Commodity Summaries* (2026), publicado pelo *U.S. Geological Survey* (USGS), o Brasil apresentou uma produção estimada de 12.000 toneladas de lítio em 2025. O país possui reservas estimadas em 540.000 toneladas, enquanto seus recursos identificados alcançam aproximadamente 1,4 milhão de toneladas. A produção nacional é concentrada no estado de Minas Gerais, especialmente na região do Vale do Jequitinhonha e Mucuri, considerada a principal província brasileira de pegmatitos litíferos (Laio; Heider, 2024). Atualmente, destacam-se as operações da Companhia Brasileira de Lítio, que atuam nas minas de Cachoeira e Barreiro, e da Sigma Lithium, responsável pelo complexo Grota do Cirilo, que engloba os depósitos Xuxa, Barreiro, Murial e outros corpos pegmatíticos (Atlas Lithium, 2024; Latin Resources, 2024).

Além do aumento da produção mineral, observa-se um avanço na cadeia de valor do lítio no Brasil, impulsionado por investimentos em plantas de concentração, produção de concentrado de espodumênio e perspectivas de agregação de valor por meio da fabricação de compostos químicos destinados à indústria de baterias. Nesse contexto, as perspectivas para o setor são favoráveis, em função da expansão dos projetos existentes, do avanço da exploração mineral e do crescente interesse de investidores nacionais e internacionais, fatores que reforçam o potencial do país para consolidar sua posição entre os principais produtores mundiais de lítio em rocha dura (*hard rock*) e ampliar sua participação na cadeia global de suprimento de minerais críticos para a transição energética (Zorzal *et al.*, 2025).

2.3. Mineração de lítio

Os depósitos pegmatíticos podem ser explotados por métodos convencionais de lavra, cuja escolha depende principalmente da geometria do corpo mineralizado, da profundidade da mineralização, das características geomecânicas do maciço rochoso e da viabilidade técnico-econômica da operação. Pegmatitos aflorantes ou localizados em pequenas profundidades são, em geral, lavrados a céu aberto. À medida que a mineralização se estende para maiores profundidades, os métodos subterrâneos passam a ser mais adequados (Hartman; Mutmansky, 2002; Hustrulid; Bullock, 2001). Em muitos casos, o aprofundamento da cava aumenta a relação estéril-minério (REM), elevando os custos da operação e tornando a continuidade da lavra a céu aberto economicamente inviável. Nesses casos, pode ocorrer a transição para a lavra subterrânea. Um exemplo é a mina Whabouchi, no Canadá, cujo plano de lavra prevê uma etapa inicial de exploração a céu aberto, seguida pela utilização do método longhole stoping para aproveitar as reservas localizadas em maiores profundidades, aumentando a vida útil da mina (Hartman; Mutmansky, 2002; Darling, 2011; Darling, 2023; Nemaska Lithium, 2018).

2.4. Mineração Subterrânea

2.4.1. Conceitos Gerais da Mineração Subterrânea

A mineração subterrânea consiste em um conjunto de métodos de lavra empregados para a extração de recursos minerais localizados em profundidades que tornam inviável ou economicamente desvantajosa a exploração por métodos a céu aberto. Esse tipo de mineração é caracterizado pela construção de estruturas de acesso, como poços, rampas e galerias, que permitem alcançar e remover o minério de forma segura e eficiente. A escolha da lavra subterrânea depende de fatores geológicos, geotécnicos, econômicos e ambientais, que influenciam diretamente o planejamento e a viabilidade da operação (Hartman; Mutmansky, 2002).

Segundo Hustrulid e Bullock (2001), a mineração subterrânea abrange diferentes métodos de lavra, cuja seleção depende da geometria do corpo mineralizado, da estabilidade do maciço rochoso, da profundidade da jazida e da taxa de produção desejada. Além da extração mineral, esse sistema exige infraestrutura complementar para ventilação, drenagem, transporte de materiais, comunicação e segurança operacional, tornando o planejamento um aspecto fundamental para o sucesso da atividade.

2.4.2. Aplicações da Mineração Subterrânea

A mineração subterrânea é amplamente utilizada na exploração de depósitos minerais profundos, especialmente quando a remoção do material estéril por métodos superficiais se torna excessivamente onerosa ou tecnicamente inviável. Esse método é empregado na produção de diversos minerais metálicos e não metálicos, incluindo ouro, cobre, chumbo, zinco, níquel, minério de ferro e carvão mineral (Darling, 2023).

Além dos aspectos econômicos, fatores ambientais e sociais também contribuem para a adoção da lavra subterrânea. Em áreas urbanizadas ou ambientalmente sensíveis, a redução da ocupação superficial pode representar uma alternativa mais sustentável quando comparada à lavra a céu aberto. Dessa forma, a mineração subterrânea desempenha papel estratégico na garantia do suprimento de recursos minerais essenciais para diversos setores industriais (Tasoglu *et al.*, 2026).

2.4.3. Vantagens da Mineração Subterrânea

Entre as principais vantagens da mineração subterrânea destaca-se a possibilidade de exploração de depósitos minerais localizados em grandes profundidades, ampliando o aproveitamento econômico de jazidas que não poderiam ser exploradas por métodos superficiais. Além disso, esse sistema geralmente apresenta menor interferência visual na paisagem e menor área de ocupação superficial, reduzindo alguns impactos ambientais associados à atividade mineradora (Hartman; Mutmanský, 2002).

Outra vantagem relevante refere-se à maior seletividade da lavra, permitindo a extração direcionada das porções economicamente mais importantes do depósito mineral (Silva, 2024). Essa característica pode contribuir para a redução da diluição do minério e para o aumento da eficiência operacional. Adicionalmente, a lavra subterrânea possibilita a continuidade da exploração mineral em regiões onde restrições ambientais ou urbanísticas limitam a utilização de métodos a céu aberto (Afum; Ben-Awuah, 2021)

2.4.4. Limitações e Desafios da Mineração Subterrânea

Apesar das vantagens, a mineração subterrânea apresenta desafios técnicos e econômicos significativos. Os custos de implantação e operação tendem a ser mais elevados devido à necessidade de escavações, sistemas de ventilação, drenagem, sustentação das aberturas e monitoramento constante das condições geotécnicas. Esses fatores exigem investimentos substanciais em infraestrutura e tecnologia (Darling, 2023).

Os riscos relacionados à segurança ocupacional também representam uma importante limitação. Instabilidades geomecânicas, quedas de blocos, incêndios, explosões e exposição a gases nocivos figuram entre os principais perigos associados ao ambiente subterrâneo. Em minas profundas, esses desafios podem ser intensificados pelo aumento das tensões no maciço rochoso e pelas elevadas temperaturas encontradas em grandes profundidades (Xie; Gao; Ju, 2017).

Além dos aspectos operacionais, questões ambientais relacionadas à subsidência do terreno, drenagem ácida de minas e contaminação de recursos hídricos demandam atenção crescente por parte das empresas mineradoras e dos órgãos reguladores. Nesse contexto, tecnologias de automação, monitoramento remoto e gestão ambiental têm sido desenvolvidas para aumentar a segurança e a sustentabilidade das operações subterrâneas (Tasoglu *et al.*, 2026).

2.5. Métodos de Lavra Subterrânea

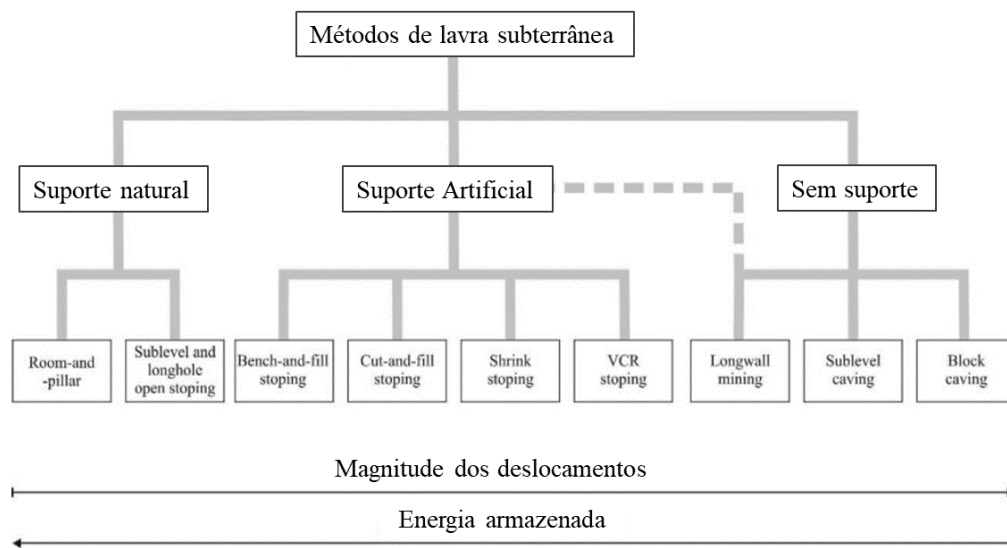
Ao contrário da mineração a céu aberto, em que as atividades de extração são realizadas na superfície terrestre e em contato direto com a atmosfera, na mineração subterrânea as operações são desenvolvidas no interior da crosta terrestre, por meio de acessos como galerias, rampas e poços (Afum; Ben-Awuah, 2021). Assim a escolha entre os métodos de lavra constitui uma etapa fundamental do planejamento mineiro, uma vez que influencia diretamente a viabilidade técnica e econômica do empreendimento. De modo geral, o objetivo central de um projeto de mineração é maximizar o retorno sobre o investimento, tornando essencial a seleção do método de exploração que proporcione maior aproveitamento econômico da jazida ao menor custo operacional possível (Bohnet, 2011; Afum; Ben-Awuah, 2021).

Comparativamente, o planejamento de minas a céu aberto tende a apresentar menor complexidade devido à relativa uniformidade dos sistemas de lavra empregados. Em contrapartida, a mineração subterrânea envolve uma ampla variedade de métodos e configurações operacionais, cuja seleção depende de fatores como geometria do corpo mineralizado, profundidade da jazida, condições geomecânicas do maciço rochoso e taxa de produção desejada. Essa diversidade de alternativas torna o processo de planejamento e dimensionamento de minas subterrâneas mais complexo quando comparado às operações de superfície (Hustrulid; Bullock, 2001; Darling, 2023).

Os métodos de lavra subterrânea compreendem o conjunto de técnicas empregadas

para a extração econômica e segura de depósitos minerais localizados abaixo da superfície terrestre. A seleção do método mais adequado depende de diversos fatores geológicos, geomecânicos, operacionais e econômicos, incluindo a geometria do corpo mineralizado, a estabilidade do maciço rochoso, a profundidade da jazida, a taxa de produção requerida e os custos de implantação e operação (Hartman; Mutmansky, 2002). A Figura 1 apresenta a classificação dos métodos de lavra de acordo com o tipo de suporte empregado.

Figura 1: Classificação dos métodos de lavra subterrânea.



Fonte: Adaptado de Brady e Brown (2006).

De forma geral, os métodos de lavra subterrânea podem ser classificados em três grandes grupos: métodos com abatimento natural do maciço (*caving methods*), métodos com suporte artificial (*supported methods*) e métodos autossustentados (*unsupported methods*). Cada grupo apresenta características específicas quanto à estabilidade das escavações, recuperação do minério, produtividade e custos operacionais (Hustrulid; Bullock, 2001).

Os métodos autossuportantes se aplicam a minérios e rochas encaixantes que apresentam características que permitem trabalhar com alargamentos sem a necessidade de um sistema regular de suporte artificial. Nesses métodos, as tensões induzidas geradas pela escavação são absorvidas, predominantemente, por suportes naturais como os pilares de rocha. Os métodos com suporte artificial, por sua vez, são aqueles que, obrigatoriamente, empregam algum sistema de suportes artificiais sistematicamente para absorver uma parcela das tensões induzidas pela escavação. Os suportes artificiais aplicados podem ser: esteios (rígidos ou deformáveis), arcos, ancoragens, enchimentos e outros. Vale ressaltar que a

aplicação do suporte artificial acaba aumentando os custos da lavra e reduzindo a produtividade uma vez que aumenta o ciclo de lavra. Por fim, nos métodos de lavra sem suporte é empregado o abatimento controlado do teto. Portanto, para a aplicação desses métodos, a subsidência da superfície acima do corpo de minério deve ser tolerada. Neles, o avanço da frente de lavra provoca o desabamento do teto, a uma distância controlada, ao invés de promover a sua sustentação. Dessa forma, é possível dissipar parte da energia armazenada no maciço, com o consequente alívio das tensões instaladas nas vizinhanças da escavação. Além disso, a rocha desabada empola, o que inibe a progressão do abatimento a partir do momento em que os blocos começam a exercer reações apreciáveis sobre o teto, favorecendo a sua sustentação (Hustrulid, 1982).

Dessa forma, tanto os métodos a céu aberto quanto os subterrâneos apresentam características específicas, vantagens e limitações próprias. As diferentes modalidades de lavra empregadas em cada sistema são geralmente agrupadas em classes de métodos de mineração, cuja seleção deve considerar aspectos técnicos, econômicos, ambientais e de segurança operacional para garantir a sustentabilidade e a rentabilidade do empreendimento mineral. Além disso, entre os métodos, houve a origem de adaptações operacionais desenvolvidas para atender características específicas de determinadas jazidas (Silva, 2024), dentre as quais se destacam os métodos *Vertical Retreat Mining* (VRM) e *Bench Stopping* (BS) (variação do *Sublevel Stopping*).

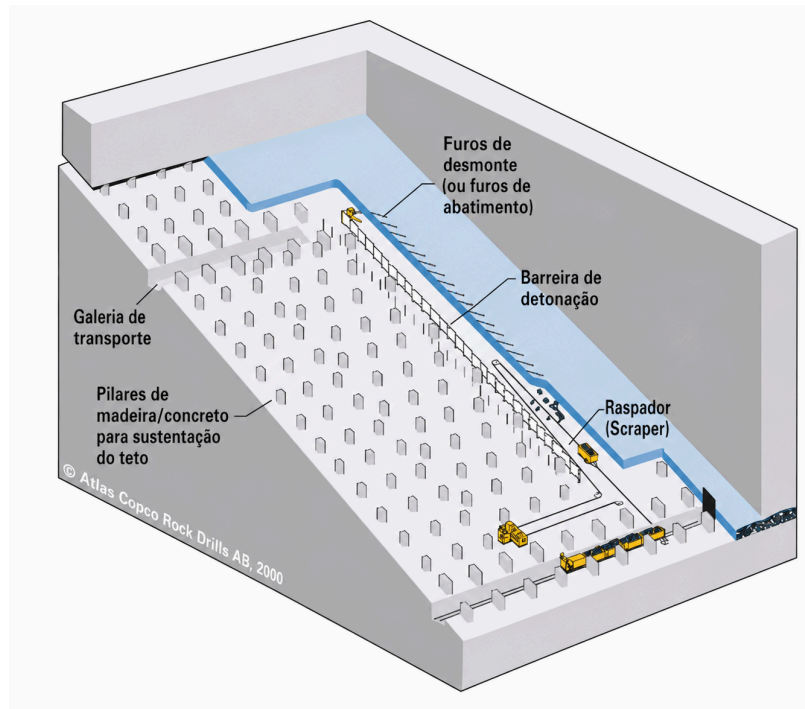
Segundo Hartman e Mutmansky (2002), os métodos são definidos conforme as condições geotécnicas, estruturais e geométricas dos corpos mineralizados. Ambos os métodos são altamente mecanizados e aplicados em corpos de minério subverticais e contínuos, com espessuras médias a grandes (6–15 m, segundo Aires, 2025) e rochas encaixantes de boa qualidade.

2.5.1. Frente longa (*Longwall*)

A lavra por frente longa (*longwall*), um método por abatimento muito utilizado na extração de carvão, se aplica a depósitos de rochas compactas ou macias de espessura pequena e que possuam grande extensão horizontal (Hustrulid e Bullock, 2001). Para rochas duras, o piso e o teto devem manter sua integridade, então a capa e lapa devem ser compostas por rochas duras e competentes e, para rochas macias, como na mineração de carvão, a integridade do teto da área recém minerada, não é mantida, deslocando e ocupando o espaço

vazio onde o minério foi retirado atrás do suporte automarchante (Brady e Brown, 2006). A Figura 2 apresenta o diagrama do método *Longwall* para rocha dura.

Figura 2: Diagrama do método *Longwall* para rocha dura.



Fonte: Adaptado de Atlas Copco, 1997.

2.5.2. Método por Câmaras e Pilares (*Rooms and Pillars*)

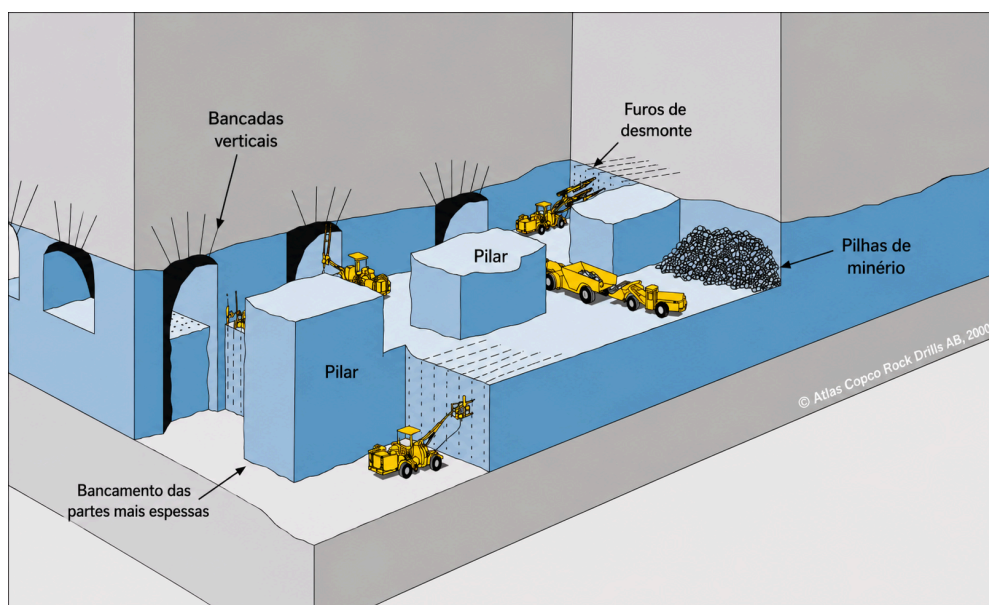
Câmaras e pilares é um dos métodos de lavra subterrânea indicado para corpos de minério tabulares, horizontais ou com baixo ângulo de mergulho, normalmente de até 25°, desde que as rochas encaixantes apresentem resistência suficiente para serem sustentadas pelos pilares durante a fase de extração (Hartman, 1996). Esse método consiste na escavação de galerias paralelas, mantendo-se porções do próprio minério entre as aberturas, sendo utilizado como pilares estruturais. Esses pilares têm a função de sustentar o maciço rochoso sobre a escavação, garantindo a estabilidade da mina durante as operações. Em alguns casos, parte desses pilares podem ser recuperados ao final da vida útil da mina por meio do processo conhecido como “*pillar robbing*”. Apesar de poder ser retirado, esse minério residual nos pilares, é considerado como não recuperável (Hartman, 1996).

Para facilitar o planejamento e a mecanização das atividades de lavra, os pilares costumam ser distribuídos de maneira regular, formando uma malha geométrica. As

configurações mais frequentes são quadradas ou retangulares, porém suas dimensões variam conforme as características geológicas e geomecânicas do depósito. (Hartman, 1996).

Quando comparado a métodos como corte e enchimento (*cut and fill*) e recalque (*shrinkage stoping*), o método de câmaras e pilares apresenta vantagens relacionadas à simplicidade de implantação, elevada produtividade e facilidade de mecanização, fatores que contribuem para sua ampla aplicação na mineração subterrânea (Hustrulide, 1982).

Figura 3: Representação esquemática do método *Rooms and Pillars*



Fonte: Adaptado de Atlas Copco, 2000.

2.5.3. Método por Corte e enchimento (*Cut and Fill*)

O método de lavra por corte e enchimento é uma das técnicas mais empregadas na mineração subterrânea para a exploração de depósitos minerais de alto valor econômico, especialmente aqueles que apresentam geometria irregular, variações significativas de espessura e condições geotécnicas desfavoráveis. Esse método consiste na remoção do minério em etapas sucessivas, seguida do preenchimento dos vazios gerados durante a lavra, garantindo a estabilidade do maciço rochoso e viabilizando o avanço das operações (Hustrulid; Bullock, 2001).

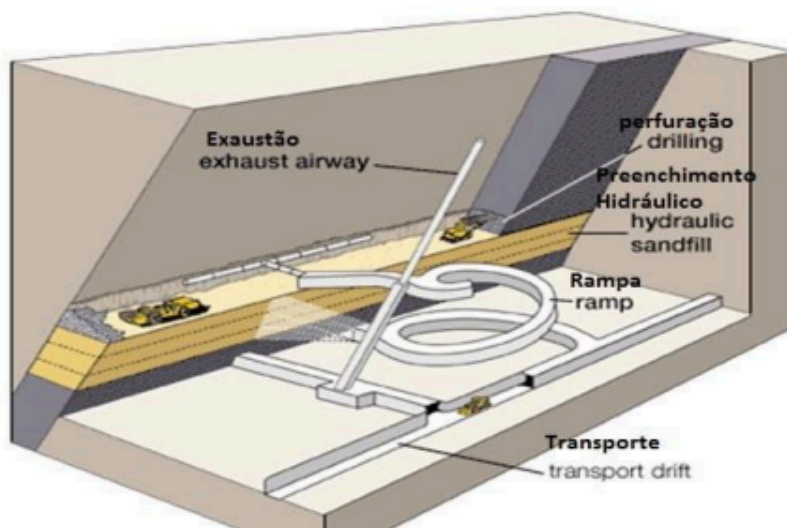
De acordo com Hamrin (2001), o corte e enchimento também é um método indicado para depósitos que apresentam mergulho acentuado e alto valor teor de minério, uma vez que proporciona excelente seletividade operacional, ou seja, pode minimizar a diluição durante a operação. Além disso, a elevada taxa de recuperação do minério constitui uma das principais

vantagens do método, podendo superar 90% em determinadas condições operacionais (Darling, 2023).

O material de enchimento, que tem como principais funções suportar as paredes e fornecer plataforma de trabalho para a lavra da próxima fatia de minério, pode consistir de rocha estéril distribuída mecanicamente (a seco), assim como de enchimento hidráulico (*back fill*), uma mistura de rejeitos e água distribuída através de tubulações. Em alguns casos, cimento também é misturado ao material de enchimento para proporcionar uma superfície mais dura e durável com melhores características de suporte (Hustrulid e Bullock, 2001).

Quanto à sua aplicabilidade, o método de Corte e Enchimento pode ser utilizado em depósitos com diferentes condições geomecânicas, inclusive em rochas encaixantes de resistência moderada ou baixa. Quando necessário, podem ser mantidos pilares naturais ou artificiais para reforçar a sustentação das escavações. O método é adequado para veios, camadas e corpos maciços, inclusive aqueles que apresentam formas irregulares ou descontinuidades. Além disso, é especialmente indicado para jazidas de alto teor, podendo ser empregado em diferentes inclinações do corpo mineralizado, embora seja tradicionalmente associado a depósitos de forte mergulho.

Figura 4: Representação esquemática do método *Cut and fill*



Fonte: Adaptado de ATLAS COPCO, 2007.

2.5.4. Método de lavra por subníveis (*Sublevel Stopping*)

Segundo Villaescusa (2014), para corpos com alto grau de mergulho, de forma quase vertical e estreitos e possuindo espessura menor que 15 m, as câmaras são orientadas paralelamente ao rumo do corpo mineral, sendo assim, caracterizando os subníveis

longitudinais. Os subníveis transversais são aplicados quando o corpo mineralizado apresenta espessura maior, onde as câmaras são orientadas de forma perpendicular ao rumo (*strike*) do corpo mineralizado, nesta variação do método são deixados pilares entre os realces primários (Villaescusa, 2014). O método apresenta, ainda, variações de acordo com as particularidades do corpo mineralizado, de forma a otimizar as operações realizadas, podendo apresentar duas disposições diferentes, sendo elas longitudinal e transversal (Bündrich, 2017).

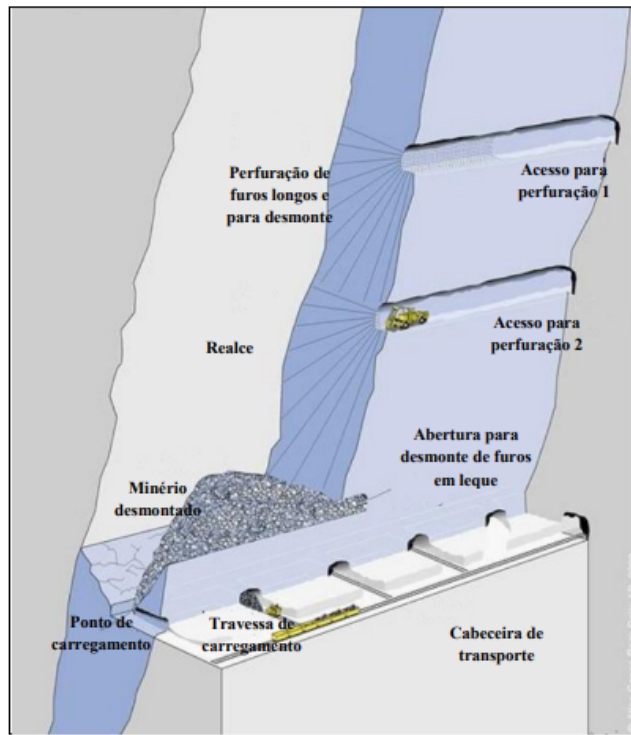
O minério é desmontado em etapas verticais ou subverticais (Figura 4), é dividido em intervalos regulares (*stopes*), que serão lavrados de maneira individual e posteriormente preenchidos com enchimento, permitindo melhor controle operacional e maior flexibilidade na sequência de lavra (Hustrulid; Bullock, 2001).

Após o desmonte, o minério fragmentado é recuperado por gravidade e carregado por carregadeiras de perfil rebaixado, LHD (*Load-Haul-Dump*) em caminhões por travessas, galerias de transporte, vagões correias ou em poços diretamente para a superfície (Silva, 2024; Hustrulid e Bullock, 2001). Esse método quando aplicado, pode garantir elevada produtividade e boa recuperação do minério. A diluição é controlada por meio da precisão na perfuração e do sequenciamento dos blocos.

Ressalta-se que o *Sublevel Stopping* apresenta baixo custo unitário operacional, comparado ao corte e enchimento, mas exige alto grau de mecanização, sendo apropriado para lavra em grandes volumes. A diluição e a recuperação do minério dependem da precisão da perfuração e do controle da fragmentação, tornando essencial o monitoramento das operações de carregamento e enchimento (Hartman e Mutmanský, 2002). O método continua sendo uma das principais alternativas para minas subterrâneas de médio e grande porte, equilibrando produtividade, segurança e economia (Sotoudeh *et al.*, 2020).

Para que o método seja aplicado com segurança e eficiência, é necessário que as condições geomecânicas do maciço rochoso sejam favoráveis, principalmente em relação à resistência das rochas adjacentes. Isso ocorre porque a técnica demanda a manutenção de grandes aberturas durante parte das operações de lavra. Em situações nas quais a estabilidade estrutural representa uma preocupação, pode-se recorrer ao preenchimento dos vazios minerados com material de suporte (*backfill*), aumentando a segurança operacional e a estabilidade da escavação (Atlas Copco, 2010). A Figura 5 apresenta uma representação esquemática do método de lavra por realces em subníveis, destacando as etapas de preparação, perfuração, desmonte, carregamento e transporte do minério.

Figura 5: Método por Realces em Subníveis (*sublevel stopping*).

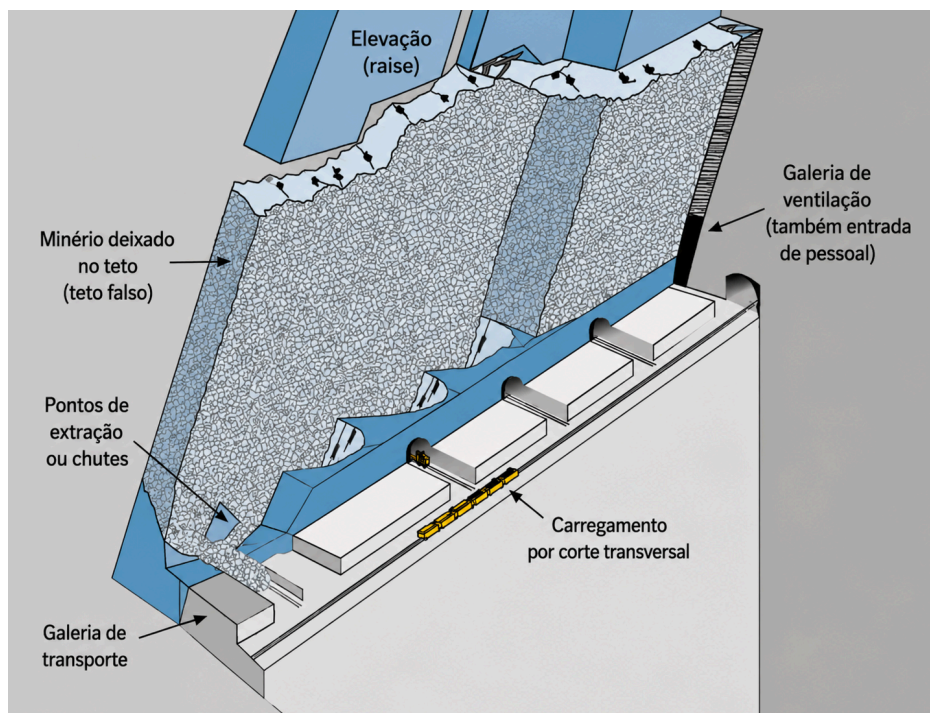


Fonte: Adaptado de ATLAS COPCO, 2007.

2.5.5. Lavra por recalque (*Shrinkage stopping*):

A lavra por recalque se baseia na escavação do minério em fatias horizontais, de forma ascendente. Parte do minério desmontado é extraído, enquanto o material remanescente é temporariamente deixado dentro do realce, servindo como suporte para as paredes e como plataforma de trabalho para perfuração da tira seguinte, geralmente realizada manualmente. Isso é possível, visto que com o desmonte ocorre o empolamento da rocha de forma que o volume relativo ao material empolado é extraído e o restante é recuperado ao final da lavra (Hustrulid e Bullock, 2001). A Figura 6 apresenta uma representação esquemática do método de lavra por recalque, destacando os locais estratégicos utilizados durante a operação de lavra.

Figura 6: Método de lavra por recalque (*shrinkage stoping*).

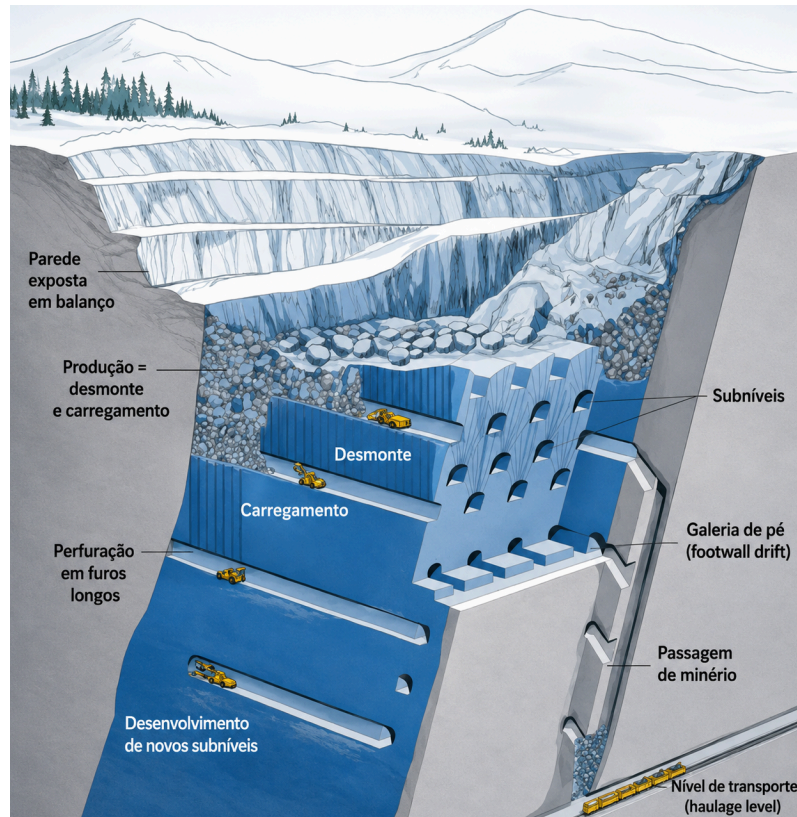


Fonte: Adaptado de ATLAS COPCO, 2007.

2.5.6. Abatimento de subníveis (*Sublevel Caving*)

O *sublevel caving* se adapta a corpos de minério maciços e tabulares de grandes dimensões, com mergulhos acentuados, limites regulares e continuidade em profundidade. A capa deve apresentar características que permitam seu abatimento (deformável e pouco resistente), enquanto o minério deve ser competente o suficiente para permanecer sem excessivo suporte. Portanto, para a aplicação do método a subsidência da superfície acima do corpo de minério deve ser tolerada (Hustrulid e Bullock, 2001). A Figura 7 mostra a representação esquemática do método de abatimento por subníveis (*Sublevel Caving*), evidenciando os principais elementos envolvidos na operação de lavra.

Figura 7: Método por abatimento de subníveis (Sublevel Caving)

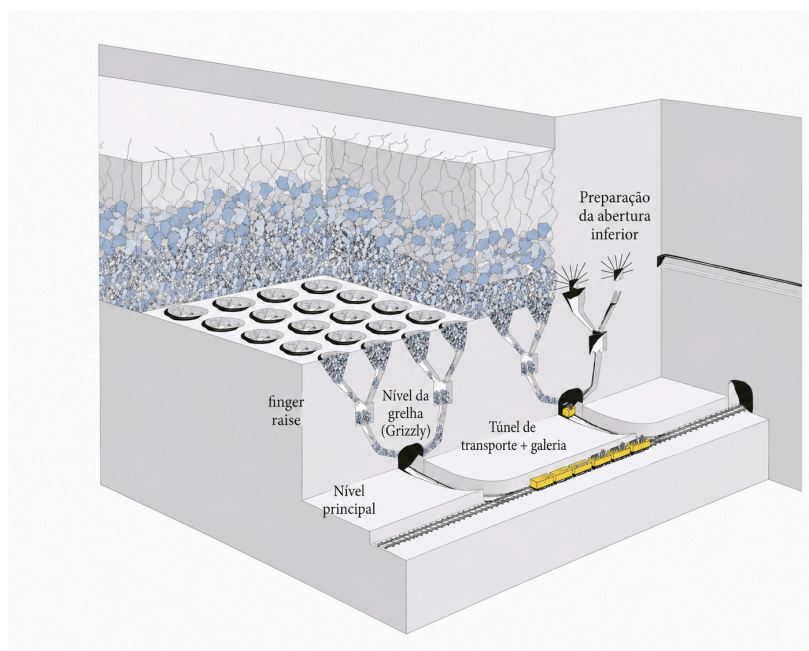


Fonte: Adaptação de ALAS COPCO, 2007.

2.5.7. Abatimento de blocos (*Block Caving*)

Já o método de lavra por abatimento em blocos (*block caving*) é aplicável a depósitos de minério maciços de grandes dimensões, nos quais a massa, os painéis ou os blocos de minério são solapados para induzir o abatimento e permitir que o minério fragmentado seja escoado para baixo. Esse método baseia-se na ação combinada da gravidade e das tensões *in situ* para fragmentar o maciço rochoso, exigindo um mínimo de perfuração e desmonte. Dessa forma, o método se torna uma opção econômica para depósitos de minério de baixo teor, uma vez que o custo operacional será reduzido (Hustrulid e Bullock, 2001). A Figura 8 demonstra a representação esquemática do método de abatimento de blocos (*Block Caving*), destacando seus principais componentes operacionais.

Figura 8: Método por abatimento de blocos (*Block Caving*)



Fonte: Adaptação de ALAS COPCO, 2007.

2.6. Aplicações do Método AHP na Seleção de Métodos de Lavra

2.6.1. Mina de Bauxita de Jajarm – bauxita; Irã

Um exemplo da aplicação do Analytic Hierarchy Process (AHP) na seleção de métodos de lavra é apresentado por Ataei *et al.* (2008). No estudo, o problema foi estruturado tipicamente em uma hierarquia composta por três níveis: o objetivo, correspondente à seleção do método de lavra mais adequado, os critérios de decisão, e as alternativas de métodos de lavra.

Para a avaliação das alternativas, foram considerados 13 critérios relacionados às características do corpo mineralizado, do maciço rochoso e às condições de exploração, incluindo aspectos como espessura, mergulho, profundidade, geometria do depósito, distribuição de teores, resistência do minério, resistência da rocha encaixante e demais fatores geotécnicos e operacionais. As alternativas analisadas compreenderam seis métodos de lavra subterrânea: *Conventional Cut and Fill*, *Mechanized Cut and Fill*, *Shrinkage Stopping*, *Sublevel Stopping*, *Bench Mining* e *Stull Stopping*. Após a aplicação do AHP e a ponderação dos critérios de decisão, o método *Conventional Cut and Fill* foi classificado como a alternativa mais adequada para as condições do depósito mineral estudado (Ataei *et al.*, 2008).

2.6.2. Eskişehir-Karaburun – cromita; Turquia

Alpay e Yavuz (2009) propuseram um sistema computacional denominado *Underground Mining Method Selection* (UMMS), baseado nos métodos *Analytic Hierarchy Process* e *Yager's method*, com o objetivo de avaliar diferentes alternativas de lavra subterrânea considerando múltiplos critérios de decisão.

A metodologia foi estruturada a partir da definição de critérios relacionados às características do depósito mineral e às condições de lavra. O modelo AHP utilizado considerou até 36 critérios de avaliação, agrupados em seis categorias principais, envolvendo aspectos como geometria do corpo mineralizado, características geomecânicas do minério e das rochas encaixantes, condições estruturais do maciço, fatores econômicos, segurança e requisitos operacionais.

Como estudo de caso, os autores aplicaram a metodologia na seleção do método de lavra subterrânea para um depósito de cromita de Eskişehir-Karaburun, na Turquia. Foram analisadas diferentes alternativas de métodos subterrâneos para identificar a opção mais adequada às características do depósito.

A aplicação do modelo indicou o método de lavra mais adequado para as condições avaliadas, foi *Square Set Stopping* (método de realce com escoramento em madeira), demonstrando que a combinação do AHP com outras ferramentas de decisão multicritério, permite o aumento do número de critérios no processo de tomada de decisão, tornando o problema mais complexo, porém aumentando a confiabilidade da decisão obtida.

2.7. Relação Estéril-Minério

A Relação Estéril-Minério (REM), também conhecida pelo termo em inglês *Stripping Ratio* (SR), é um dos principais indicadores técnicos e econômicos utilizados no planejamento de minas a céu aberto. Esse parâmetro representa a quantidade de estéril que deve ser removida para possibilitar a extração de uma determinada quantidade de minério (Hartman; Mutmanský, 2002; Darling, 2023).

A Relação Estéril-Minério (REM) pode ser expressa pela razão entre o volume ou a massa de estéril e o volume ou a massa de minério. Em operações de mineração, sua representação mais utilizada é em massa, sendo obtida pela divisão da massa de estéril, em toneladas, e pela massa de minério, também em toneladas. Por exemplo, uma REM de 4:1 indica que, para cada tonelada de minério produzida, é necessário remover quatro toneladas de estéril. Esse indicador influencia diretamente os custos operacionais da mina, pois o

aumento da quantidade de estéril movimentada implica maiores gastos com perfuração, desmonte, carregamento, transporte e disposição desse material. Dessa forma, o aumento da REM reduz a rentabilidade da operação e pode limitar a profundidade economicamente viável da lavra a céu aberto (Hartman; Mutmanský, 2002; Hustrulid; Kuchta; Martin, 2013; Darling, 2023).

2.8. Fundamentos do Desmonte de Rochas com Explosivos

O desmonte de rochas com explosivos constitui uma das operações unitárias mais importantes da mineração e da engenharia civil, sendo responsável pela fragmentação do maciço rochoso em dimensões adequadas às etapas subsequentes de carregamento, transporte e beneficiamento (Jimeno; Jimeno; Carcedo, 1995). O processo consiste na utilização controlada da energia liberada por uma reação explosiva para promover a ruptura da rocha e sua movimentação, buscando maximizar a eficiência operacional e minimizar impactos ambientais e geotécnicos (Jimeno; Jimeno; Carcedo, 1995). A eficiência do desmonte depende da interação entre as propriedades do maciço rochoso, as características do explosivo empregado e os parâmetros geométricos do plano de desmonte por explosivo, como afastamento, espaçamento, profundidade dos furos e razão de carga. Dessa forma, o planejamento adequado do desmonte é fundamental para garantir produtividade, segurança e controle dos custos operacionais (Jimeno; Jimeno; Carcedo, 1995; Hustrulid, 1999).

A fragmentação da rocha ocorre devido à ação combinada das altas pressões geradas pelos gases da explosão e das ondas de choque propagadas no interior do maciço. Inicialmente, a detonação produz uma onda compressiva que provoca o esmagamento da rocha nas proximidades do furo. Em seguida, desenvolvem-se fraturas radiais decorrentes das tensões de tração induzidas pela propagação da onda. Após a passagem da onda de choque, os gases de detonação penetram nas fraturas formadas, promovendo sua expansão e contribuindo para a separação dos blocos rochosos. Esse mecanismo resulta na fragmentação e no deslocamento do material desmontado (Langefors; Kihlström, 1978; Konya; Walter, 1990).

A energia liberada durante a detonação não é utilizada integralmente na fragmentação da rocha. Apenas parte dessa energia é convertida em trabalho útil, enquanto o restante é dissipado na forma de vibrações, ruído, calor e projeção de fragmentos (Jimeno; Jimeno; Carcedo, 1995). Segundo a literatura (Olofsson, 1990; Hustrulid, 1999), a distribuição da energia explosiva é influenciada pelas características do explosivo, pelo grau de confinamento da carga e pelas condições geológicas do maciço. Quanto melhor o confinamento da carga explosiva e a adequação dos parâmetros de perfuração, maior tende a ser a parcela de energia

aproveitada no processo de fragmentação. Dessa forma, a otimização do plano de fogo busca direcionar a maior quantidade possível de energia para a ruptura eficiente da rocha (Olofsson, 1990; Hustrulid, 1999).

As vibrações induzidas por desmontes representam um dos principais impactos associados ao uso de explosivos, podendo causar danos em estruturas próximas, instabilização de taludes e degradação do maciço remanescente. A magnitude dessas vibrações depende principalmente da carga máxima por espera, da distância ao ponto monitorado e das características geológicas locais. Para minimizar esses efeitos, é realizado o controle das vibrações é realizado por meio da adequação do plano de fogo, utilizando técnicas como o controle da carga por espera, emprego de sistemas eletrônicos de iniciação e otimização das sequências de detonação, visando reduzir danos e preservar as condições geotécnicas da escavação (Dowding, 1996; Olofsson, 1990).

2.9. Metodologias para a seleção de métodos de lavra

A seleção do método de lavra (do inglês *mining method selection*, MMS) é uma etapa que tem como objetivo principal definir o método de lavra que maximize os lucros e a recuperação de minério, assim como minimize os impactos ambientais e proporcione um ambiente de trabalho seguro. Nesse processo, para a tomada de decisão mais assertiva, múltiplos fatores devem ser considerados, incluindo características geométricas, geológicas e geotécnicas do depósito mineral e das áreas adjacentes; custos de investimento e de capital; e questões técnicas, políticas, ambientais e sociais (Nicholas, 1992).

Dada a complexidade dessa etapa, diversas metodologias foram desenvolvidas para auxiliar na seleção do método de lavra. Até a década de 1980, predominavam modelos qualitativos baseados em fluxogramas e tabelas de classificação.

Os MCDM são ferramentas de Pesquisa Operacional, aplicadas em diferentes indústrias, que atuam na facilitação do processo de tomada de decisão na presença de múltiplos critérios. Em comparação com os métodos tradicionais, os modelos multicritério apresentam como principal vantagem a possibilidade de atribuir diferentes pesos aos critérios de avaliação, além de incorporar aspectos específicos das condições locais do depósito. Apesar disso, Namin *et al.* (2022), em um estudo de revisão sistemática da literatura, não identificaram estudos de seleção de métodos de lavra por meio de modelos multicritério de tomada de decisão realizados em depósitos de lítio ou mesmo em qualquer depósito mineral do Brasil.

Considerando o aprofundamento das cavas, a redução dos corpos mineralizados próximos à superfície e a crescente necessidade de minimizar os impactos ambientais da mineração, a lavra subterrânea tende a se tornar uma alternativa cada vez mais utilizada para o aproveitamento de pegmatitos litiníferos. Nesse cenário, a seleção adequada do método de lavra é fundamental para garantir a viabilidade técnica e econômica do empreendimento.

Na Tabela 1 pode ser consultada a aplicabilidade de cada método de lavra subterrânea citado, em comparação à lavra a céu aberto, com base em Gertsch e Bullock (1998); Hustrulid e Bullock (2001); Hartman e Mutmanský (2002) e Brady e Brown (2006). Para a apresentação desse comparativo, foi privilegiada a referência mais recente.

Tabela 1: Tabela comparativa entre os métodos de lavra.

Método	Forma	Mergulho	Espessura	Uniformidade do minério	Profundidade de	Resistência do minério	Resistência dos encaixantes
Lavra a céu aberto	Qualquer; de preferência paralelo à superfície	Qualquer; de preferência baixo	Pequena (se depósito de grandes dimensões) a grande	Qualquer; de preferência uniforme	Pequena; limitada pela relação estéril-minério	Qualquer	Qualquer
Room and Pillar	Tabular, lenticular	Baixo: <15°; de preferência horizontal; variações podem permitir até 30°	Pequena: de preferência, menor que 4,5m; trabalhar em passes quando >6m	De preferência, relativamente e uniforme. Se variável, deixar minério de baixo teor ou estéril como pilares	Baixa a moderada	Fraca a forte (conceito variável frente ao sacrifício da recuperação)	Moderada a forte
Sublevel Stopping	Tabular, lenticular; de preferência com limites e mergulhos regulares	Relativamente forte: >45°; de preferência de 60 - 90°	Moderada a grande: 6 - 30m	Relativamente e uniforme	Relativamente baixa a grande	Moderada a forte	Relativamente forte a forte

Continuação da tabela 1

<i>Cut and Fill</i>	Tabular, irregular, descontínuo	Moderado a relativamente forte: depósitos de 35 a 90°; de preferência, >45°	Pequena a moderada: 2 - 30m	Moderada a variável	Baixa a alta	Moderada mente fraca a forte; de preferência a de boas condições geomecânicas	Relativamente fraca a fraca
<i>Shrinkage Stopping</i>	Tabular, Lenticular, com limites e mergulhos regulares	Relativamente forte a forte: > 45°; de preferência de 60 - 90°	Pequena a moderada: 1 - 30m	Uniforme	Baixa a moderada	Forte	Relativamente forte a forte
<i>Long Wall</i>	Tabular	Baixo: < 12°, de preferência horizontal e uniforme	Pequena e uniforme: 1 - 5m	Uniforme	Moderada a muito profundo para não-carvão	Qualquer que permita desmonte mecânico; de preferência a fraca	Fraca a moderada com abatibilidad e
<i>Sublevel Caving</i>	Tabular, maciço, pode ser moderadamente irregular	Relativamente forte a forte: 60° - 90°; pode ser relativamente horizontal se suficiente mente espesso	Moderada a grande: > 6 m	Moderada	Moderada	Moderada a relativamente forte	Fraca a forte com abatibilidad e

Continuação da tabela 1

Block Caving	Tabular espesso, maciço, relativament e regular.	Relativame nte forte a forte: 60 - 90°; pode ser	Grande: >30 m.	Relativament e uniforme e homogêneo	Moderada	Fraca a relativame nte forte com abatibilida de	Fraca a moderada com abatibilidad e
		relativame nte horizontal se suficiente mente espesso					

Fonte: Adaptação de Gertsch e Bullock (1998); Hustrulid e Bullock (2001); Hartman e Mutmanský (2002) e Brady e Brown (2006).

Nicholas (1981) foi o primeiro a propor uma ferramenta quantitativa para a seleção de métodos de lavra. O método, que utiliza tabelas de rankings numéricos para selecionar o método de lavra mais adequado, é aplicável tanto para minas a céu aberto quanto para minas subterrâneas. Por meio dele é possível classificar numericamente as características do depósito, considerando diversos fatores, tais como: características do maciço rochoso do corpo de minério, da capa e da lapa, assim como a geometria do minério e a distribuição do teor. Utilizando diferentes tabelas de pesos, pontuações são dadas para cada método de lavra considerando cada parâmetro analisado (Nicholas, 1992). Os valores das tabelas de pesos indicam a adequabilidade de uma dada característica para um determinado método de lavra. A soma dos pesos obtidos por cada método resultará em um ranking final. Os métodos de lavra que apresentarem as classificações numéricas gerais mais altas devem ser analisados economicamente, para, assim, poder decidir qual é o melhor método de lavra nos sentidos técnico e econômico.

O método da UBC ou Nicholas modificado, desenvolvido por Miller-Tait *et al.* (1995), é baseado no Método de Nicholas (1981) e direcionado para métodos de lavra subterrânea. Ele foi criado com o intuito de representar melhor a prática canadense no que se refere à lavra subterrânea (Miller-Tait *et al.*, 1995). A abordagem de Nicholas foi modificada com o intuito

de colocar mais ênfase na lavra de realces em lugar da lavra em massa, tais como métodos de abatimento.

O sistema numérico do método da UBC segue um padrão muito similar ao método de Nicholas (1981), ao classificar e pontuar a adequabilidade de cada método de lavra aos parâmetros pré-definidos. Uma modificação proposta consiste em utilizar o RMR (*Rock Mass Rating*) em substituição ao RQD (*Rock Quality Designation*) aplicado no método de Nicholas (1981). Além disso, sabendo que as características mecânicas do corpo de minério e das rochas encaixantes exercem diferentes influências a depender do método de lavra, Miller-Tait *et al.* (1995) consideram essa influência relativa pela ponderação de fatores diretamente nas tabelas de pesos. Por fim, somando-se todas as pontuações obtém-se a pontuação final de cada método.

Os métodos que recebem a pontuação mais alta são ranqueados no topo da lista e são considerados os mais adequados. No entanto, Miller-Tait *et al.* (1995) afirmam que, assim como o método de Nicholas, esse processo de seleção é somente uma análise preliminar para identificar o mais provável e favorável método de lavra. Não é uma análise que determina o método final a ser selecionado e deve ser considerada durante a fase de estudos de pré-viabilidade.

Devido à complexidade e à importância da etapa de MMS, e à necessidade de se considerar múltiplos objetivos e critérios conflitantes, os modelos multicritérios de tomada de decisão também passaram a ser considerados como opções para a seleção de métodos de lavra. Segundo Gomes e Gomes (2019), tais modelos devem levar em consideração o bom senso e a experiência humana e não apenas os fatores intrínsecos à lógica do algoritmo, definindo assim, um processo de tomada de decisão sistemático, consistente e transparente.

Dentre os métodos multicritérios possíveis de serem aplicados à avaliação de métodos de lavra para depósitos minerais, Namin *et al.*, (2022), em um estudo de revisão sistemática da literatura, identificaram que o método *Analytical Hierarchical Process* (AHP) e suas variações foram os principais métodos aplicados na literatura para a seleção de métodos de lavra (Yavuz e Alpay, 2003; Alpay e Yavuz, 2007; Ataei *et al.*, 2008; Bogdanovic *et al.*, 2012; Nolan e Kecojevic, 2014; Stevanovic *et al.*, 2018; Yetkin and Ozfirat, 2019; Balt and Goosen, 2020; entre outros). Proposto por Thomas Saaty em 1980, o AHP realiza a análise da situação proposta de forma gráfica e hierárquica, utilizando a comparação pareada de critérios estabelecidos, a fim de definir pesos dos critérios e subcritérios e suas respectivas prioridades, de acordo com uma escala desenvolvida por Saaty (Saaty, 2001).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo realizar a avaliação de métodos de lavra subterrânea para os depósitos pegmatíticos de Volta Grande por meio de comparação direta entre o resultado da aplicação do método de Nicholas modificado e posteriormente o método AHP.

3.2. Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos desta pesquisa, podem ser destacados os seguintes.

- Realizar uma revisão bibliográfica dos principais métodos de lavra utilizados em depósitos de lítio no mundo, correlacionando sua aplicação às características geológicas, geométricas e geomecânicas desses depósitos;
- Definir parâmetros geométricos, geológicos e geotécnicos dos depósitos pegmatíticos de Volta Grande;
- Aplicar os métodos de Nicholas modificado e o método AHP para a avaliação preliminar de métodos de lavra subterrânea para os depósitos pegmatíticos de Volta Grande;
- Comparar os resultados obtidos pelos diferentes métodos de seleção de lavra, avaliando sua capacidade de indicar o método mais adequado e identificando as necessidades de estudos futuros.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo teve como objetivo selecionar o método de lavra subterrânea mais adequado para a continuidade da exploração do depósito pegmatítico de Volta Grande. Para isso, foi desenvolvido um procedimento composto por cinco etapas sequenciais, integrando análises técnicas, comparação de métodos de lavra e ferramentas de apoio à tomada de decisão.

Inicialmente, foi realizado um levantamento do cenário mundial da mineração de lítio, com ênfase em operações subterrâneas desenvolvidas em depósitos pegmatíticos, visando identificar as práticas e os métodos de lavra mais frequentemente empregados nesse contexto. Em seguida, procedeu-se à caracterização geométrica do depósito de Volta Grande, por meio da definição dos parâmetros geológicos e geométricos relevantes para a seleção do método de lavra. Na terceira etapa, os métodos de lavra subterrânea potencialmente aplicáveis ao

depósito foram avaliados utilizando o Método de Nicholas Modificado (Miller-Tait *et al.*, 1995), permitindo uma primeira seleção das alternativas tecnicamente viáveis. Posteriormente, os métodos previamente selecionados foram submetidos a uma análise multicritério por meio do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), considerando critérios técnicos, operacionais e econômicos relevantes para a tomada de decisão. Por fim, os resultados obtidos pelo modelo AHP foram comparados com aqueles gerados pelo Método de Nicholas Modificado, com o objetivo de verificar a consistência das análises e identificar a alternativa mais adequada para as condições do depósito estudado.

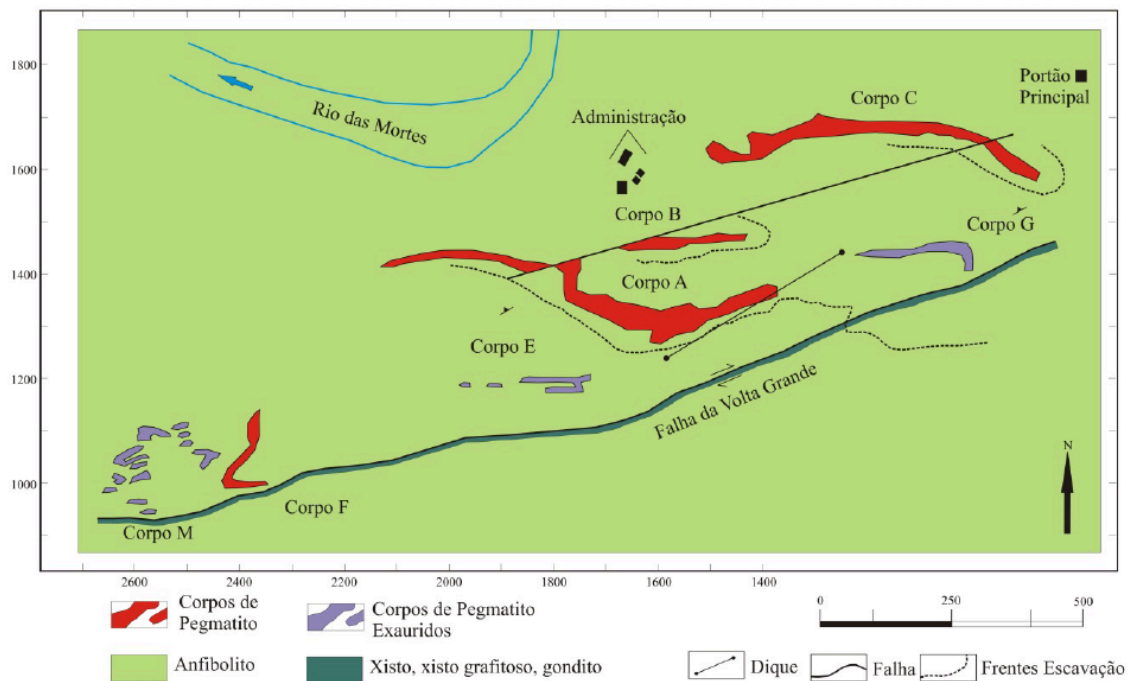
4.1. Caracterização da área de estudo

A Mina de Volta Grande se localiza às margens do Rio das Mortes, dentro dos limites territoriais do município de Nazareno, na mesorregião do Campo das Vertentes no sul de Minas Gerais. Os depósitos pegmatíticos se encontram inseridos na província pegmatítica de São João Del-Rei, no *Greenstone Belt* Barbacena, no Cinturão Mineiro, localizado a sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, na extremidade sul do Cráton São Francisco. A intrusão granítica que resultou nos pegmatitos de Volta Grande se deu em maciço encaixante de anfibolito, fortemente cisalhado pela Falha de Volta Grande, a qual delimita os corpos de pegmatito da área de estudo (Jaques, 2014). Dessa forma, os corpos pegmatíticos ocorrem encaixados discordantemente das rochas anfibolíticas do *greenstone belt* Rio das Mortes (Assumpção, 2015).

Os pegmatitos de Volta Grande formam corpos tabulares sub-horizontais de grandes dimensões, com 700 a 1000 m de comprimento (Lagache e Quéméneur, 1997), alongados segundo a direção ENE com mergulho variável para sul (aproximadamente 20°), interrompidos pela falha de Volta Grande de direção SW-NE (AMG, 2018). As formas dos pegmatitos são, em partes, controladas pela rede de fraturas que afeta os anfibolitos, visto que as intrusões aproveitaram especialmente os sistemas de fraturas de menor mergulho do anfibolito para se alojarem (AMG, 2018).

Os pegmatitos, denominados de corpos A, B, C, D, E e F (Figura 9) são litiníferos, sendo constituídos, primariamente, por espodumênio e, secundariamente, por lepidolita. Dentre os corpos pegmatíticos presentes na Mina de Volta Grande, destacam-se, em funções de suas significativas dimensões e teores, os corpos A e C. A Figura 9 apresenta o mapa litoestrutural da Mina de Volta Grande, evidenciando a localização dos corpos pegmatíticos e sua relação com as principais estruturas geológicas da área.

Figura 9: Mapa litoestrutural com a localização dos diversos corpos pegmatíticos da Mina de Volta Grande.



Fonte: Assumpção (2015).

4.2. Avaliação do cenário mundial de minas de lítio

A análise do cenário mundial da mineração de lítio foi conduzida por meio de revisão bibliográfica de literatura especializada, complementada por consulta a relatórios técnicos disponíveis no SEDAR e em *sites* institucionais de empresas do setor. O foco desta etapa consistiu na caracterização dos principais depósitos pegmatíticos de lítio, bem como na análise dos métodos de lavra empregados para a exploração e aproveitamento desses corpos mineralizados.

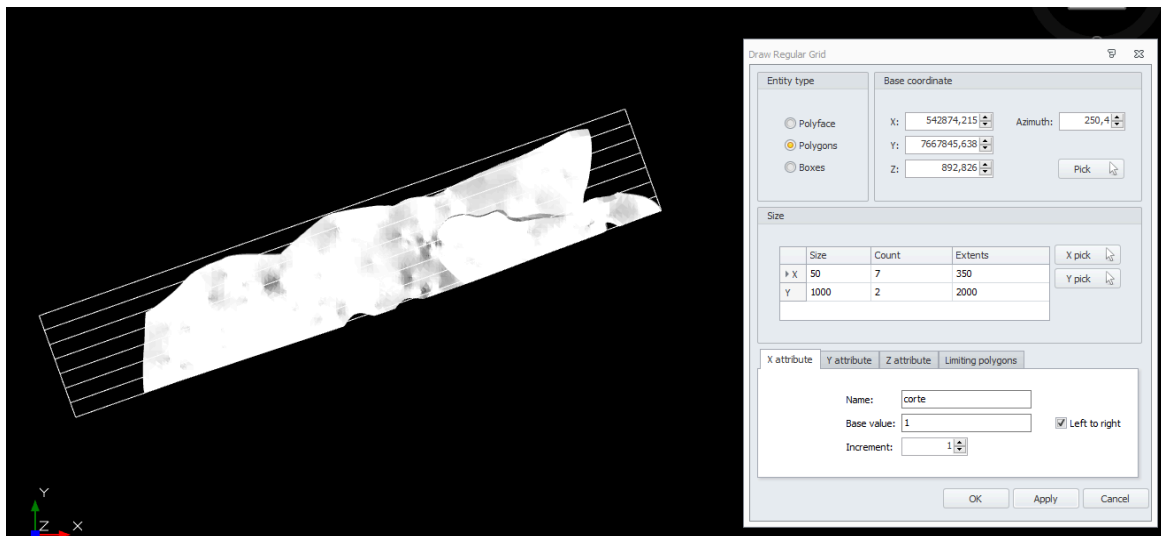
4.3. Definição dos parâmetros geométricos do depósito

A descrição dos corpos foi realizada através do *software* Deswik Cad, utilizando as ferramentas disponíveis na plataforma. As medidas foram realizadas através da criação de sessões (*grids*), combinada com a utilização de ferramentas auxiliares como *distance* para realizar a medição das distâncias. Dentre os parâmetros geométricos avaliados estão o comprimento, espessura, mergulho e profundidade dos Corpos A e C.

Para a estimativa dos parâmetros geométricos do Corpo A, foram geradas sete seções, distantes uma das outras em 50 metros ao longo dos aproximados 350 m de largura do corpo,

conforme pode ser observado na Figura 10. Em cada uma das seções geradas por esse *grid*, foi possível realizar medidas da espessura e mergulho médios de cada seção. A espessura e o mergulho médios do corpo, por sua vez, foram obtidos por meio da média simples das espessuras e mergulhos de cada seção.

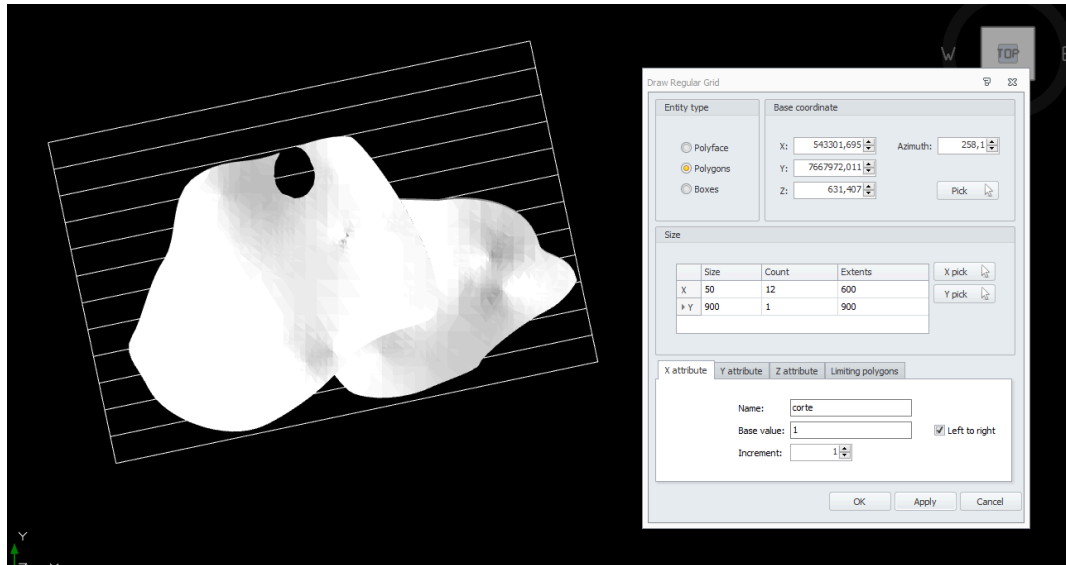
Figura 10: *Grid* utilizado para gerar seções no Corpo A.



Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024 - Deswik Cad (2024).

Já para a estimativa dos parâmetros geométricos do corpo C, foram geradas dez seções, distantes uma das outras em 50 metros ao longo dos aproximados 500 m de largura do corpo, conforme pode ser observado na Figura 11. As medidas de espessura e mergulho médios de cada sessão, bem como de mergulho e espessuras médias do corpo, foram tomadas da mesma forma que para o Corpo A.

Figura 11: *Grid* utilizado para gerar seções no Corpo A.



Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024 - Deswik Cad.

Além disso, foi também obtida a profundidade máxima alcançada pelos corpos.

4.4. Método de Nicholas Modificado (Método UBC)

Para a seleção do método de lavra pelo método de Nicholas modificado, foi necessário, primeiramente, classificar o depósito mineral de acordo com suas características geométricas (formato, espessura, mergulho, profundidade, distribuição dos teores) e geomecânicas (RMR e *Rock Substance Strength* - RSS - do minério, da capa e da lapa) detalhadas na Tabela 2. O RSS, um dos parâmetros geomecânicos utilizados, é dado pela razão entre a resistência à compressão uniaxial e o principal esforço. As Tabelas 3, 4 e 5, por sua vez, representam as tabelas de pesos que devem ser utilizadas para dar pontuações para cada método de lavra considerando cada parâmetro analisado. Por fim, somando-se todas as pontuações obtém-se a pontuação final de cada método. Os métodos que recebem a pontuação mais alta são ranqueados no topo da lista e são considerados os mais adequados.

Tabela 2: Classificação das características geométricas e geomecânicas do depósito mineral segundo o Método da UBC.

1) Formato geral		
Equidimensional	E	Todas as dimensões têm a mesma ordem de magnitude
Tabular	T	Duas dimensões maiores muitas vezes que espessura, que usualmente não excede 35 m
Irregular	I	Dimensões irregulares
2) Espessura do corpo de minério		
Muito estreito	Met	< 3 m
Estreito	Et	3 – 10 m
Intermediário	I	10 – 30 m
Espesso	Ep	30 – 100 m
Muito espesso	Mep	> 100 m
3) Mergulho do corpo de minério		
Baixo	B	< 20°
Intermediário	I	10 - 55°
Forte	F	> 55°
4) Profundidade do corpo de minério		
Pouco profundo	Pp	0 – 100 m
Intermediário	I	100 – 600 m
Profundo	P	> 600 m
5) Distribuição de teores		
Uniforme	U	Os teores de qualquer ponto do depósito não diferem significativamente do teor médio
Gradacional	G	Valores dos teores têm características zonais, variando gradualmente de um ponto a outro do corpo
Errático	E	Valores dos teores mudam radicalmente em pequenas distâncias e não exibem um padrão na variação
6) RMR		
Muito		
Incompetente	MI	0 – 20
Incompetente	I	20 – 40
Moderado	M	40 – 60
Competente	C	60 – 80
Muito		
Competente	MC	80 – 100

Continuação da tabela 2

7) RSS (Resistência à compressão uniaxial/principal esforço)

Muito Fraco	MFr	< 5
Fraco	Fr	5 – 10
Moderado	M	10 – 15
Forte	Fo	> 15

Fonte: Adaptado de Miller-Tait *et al.*, (1995).

Tabela 3: Pontuações para características geométricas e distribuição de teores segundo o Método da UBC.

Método de lavra	Formato geral			Espessura					Mergulho			Distr. Teores			Profundidade		
	E	T	I	Met	Et	I	Ep	Mep	B	I	F	U	G	E	PP	I	P
Lavra a céu aberto	4	2	3	1	2	3	4	4	3	3	1	3	3	2	4	0	-49
<i>Block caving</i>	4	2	0	-49	-49	0	3	4	3	2	4	3	2	2	2	3	3
<i>Sublevel stoping</i>	3	4	1	-10	1	3	4	3	2	1	4	4	4	3	3	4	2
<i>Sublevel caving</i>	3	4	1	-49	-49	0	4	4	1	1	4	3	2	2	3	2	2
<i>Longwall</i>	-49	4	-49	4	3	0	-49	-49	4	0	-49	4	1	0	2	2	3
<i>Room and pillars</i>	0	4	2	4	3	1	-49	-49	4	0	-49	4	2	0	3	3	2
<i>Shrinkage stoping</i>	0	4	2	4	4	0	-49	-49	-49	0	4	3	2	2	3	3	2
<i>Cut and Fill</i>	1	4	4	3	4	4	1	0	1	3	4	2	3	4	2	3	4
<i>Top slicing</i>	1	2	0	1	1	0	2	1	4	2	0	2	1	1	2	1	1
<i>Square set stoping</i>	0	1	4	4	3	2	0	0	2	3	2	0	1	3	1	1	2

Fonte: Adaptado de Miller-Tait *et al.*, (1995).

Tabela 4: Pontuações das características geomecânicas do depósito mineral segundo o Método da UBC.

Método de lavra	RMR minério					RMR capa					RMR lapa				
	MI	I	M	C	MC	MI	I	M	C	MC	MI	I	M	C	MC
Lavra a céu aberto	3	3	3	3	3	2	3	4	4	4	2	3	4	4	4
<i>Block caving</i>	4	3	2	0	-49	3	3	3	2	2	3	3	3	2	2
<i>Sublevel stoping</i>	1	3	4	4	4	-49	0	3	4	4	0	0	2	3	3
<i>Sublevel caving</i>	3	4	3	1	0	4	4	3	2	2	1	2	3	3	3
<i>Longwall</i>	6	6	4	2	2	6	5	4	3	3					
<i>Room and pillars</i>	-49	0	3	5	6	-49	0	3	5	6					
<i>Shrinkage stoping</i>	0	1	3	3	3	0	0	2	4	4	0	0	2	3	3

Continuação da tabela 4

<i>Cut and Fill</i>	0	1	2	3	3	3	5	4	3	3	3	3	2	2	2
<i>Top slicing</i>	3	2	1	1	0	0	0	2	3	3	0	0	1	2	2
<i>Square set stoping</i>	4	4	1	0	0	4	4	1	0	0	3	1	0	0	0

Fonte: Adaptado de Miller-Tait *et al.*, (1995).

Tabela 5: Pontuações das características geomecânicas do depósito mineral segundo o Método da UBC.

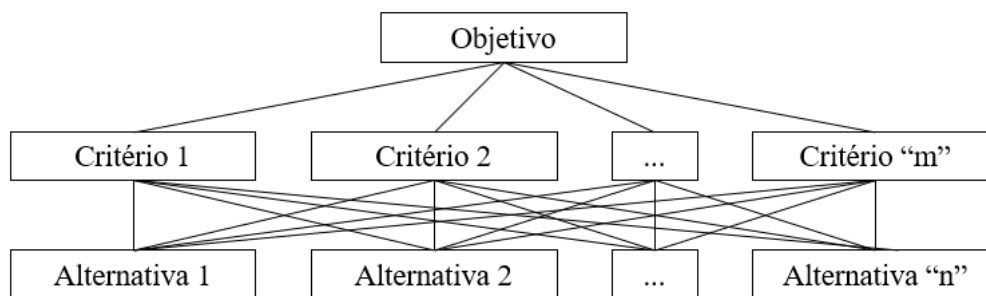
	RSS minério				RSS capa				RSS lapa			
Método de lavra	MFr	Fr	M	Fo	MF	Fr	M	Fo	MF	Fr	M	Fo
Lavra a céu aberto	4	3	3	3	3	3	4	4	3	3	4	4
<i>Block caving</i>	4	2	1	0	4	3	2	0	4	3	2	1
<i>Sublevel stoping</i>	0	2	4	4	0	1	4	5	0	1	3	3
<i>Sublevel caving</i>	2	3	3	2	4	3	2	1	1	2	2	2
<i>Longwall</i>	6	5	2	1	6	5	2	2				
<i>Room and pillars</i>	0	0	3	6	0	0	2	6				
<i>Shrinkage stoping</i>	0	1	3	4	0	1	3	4	0	2	3	3
<i>Cut and Fill</i>	0	1	3	3	3	5	4	2	1	3	2	2
<i>Top slicing</i>	3	2	1	0	3	2	2	2	2	2	1	1
<i>Square set stoping</i>	4	3	1	0	4	2	1	0	3	2	0	0

Fonte: Adaptado de Miller-Tait *et al.*, (1995).

4.5. Modelo multicritério de tomada de decisão AHP

O AHP compreende três etapas principais: 1. Construção de hierarquias; 2. Definição de pesos e prioridades; 3. Avaliação da consistência lógica. A primeira etapa referiu-se à estruturação hierárquica do problema, incluindo a identificação e definição dos critérios que serão aplicados para avaliar as alternativas possíveis ao objetivo do problema e a construção da estrutura hierárquica do problema. Conforme pode ser visto na Figura 12, o primeiro nível do problema é a meta ou objetivo; seguido por subníveis, que incluem os critérios e subcritérios; e o último nível onde se posicionam as alternativas.

Figura 12: Estrutura hierárquica básica



Fonte: Adaptado de Saaty (2001)

A segunda etapa consistiu em definir os pesos e as prioridades a partir de comparações pareadas dos elementos, à luz de determinado critério. Essas comparações ou julgamentos são expressos numericamente e representam a relação de preferência entre dois elementos que compartilham o mesmo nível hierárquico. Cada comparação indica a preferência de um elemento em relação ao outro, sendo que valores maiores indicam uma preferência mais forte. Saaty (2001) recomenda a utilização da escala apresentada na Tabela 6, em que os pesos variam de 1 a 9, onde 1 representa indiferença e 9 representa extrema importância.

Tabela 6: Escala numérica de Saaty.

Pesos	Definição	Avaliação
1	Importância igual	Ambos os elementos contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	A experiência e a opinião favorecem um elemento em relação ao outro
5	Importância grande ou essencial	A experiência e a opinião favorecem fortemente um elemento em relação ao outro
7	Importância muito grande	Um elemento é fortemente favorecido em relação a outro podendo ser demonstrado na prática
9	Importância extrema ou absoluta	A evidência favorece um elemento em relação a outro com uma ordem de magnitude de diferença
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Usado como valores de consenso entre as opiniões

Fonte: Adaptado de Saaty (2001).

Os resultados das comparações são apresentados em uma matriz quadrada A, tal que:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} & \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} & \dots & \dots & \dots & \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Os elementos da matriz A devem atender às seguintes condições (Saaty, 2001):

$$a_{ij} > 0;$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

$$a_{ii} = 1$$

$$a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk}$$

Em que a_{ij} é a comparação par a par dos elementos i e j; a_{ji} , a comparação recíproca de a_{ij} ; e a_{ii} , a comparação entre o mesmo elemento. A quantidade de julgamentos necessários para a construção de uma matriz genérica A é $n(n-1)/2$, onde n é o número de elementos pertencentes a esta matriz.

Para a obtenção das prioridades médias locais (PML), inicialmente, as matrizes de comparação pareadas são normalizadas fazendo-se a divisão de cada elemento da matriz pela soma de todos os elementos de cada coluna. As PML serão obtidas em seguida, a partir da média das linhas das matrizes normalizadas. A análise segue com o cálculo do vetor de prioridades global (PG), que é calculado a partir da combinação das PML relativas a alternativas e critérios (e subcritérios, quando existirem).

A terceira etapa consistiu na avaliação da consistência lógica. A fim de verificar se os julgamentos exercidos pelos decisores é coeso, é necessário analisar a consistência dos dados por meio da Razão de Consistência (RC). Para isso, primeiramente é realizado o cálculo do índice de consistência (IC), dado por (Saaty, 2001):

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (2)$$

em que n é a ordem da matriz e $\lambda_{\max}$, o autovalor máximo da matriz de comparação pareada.

Em seguida, a Razão de Consistência pode ser calculada, fazendo:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (3)$$

onde IR é o Índice de Consistência Randômico auferido conforme a ordem da matriz (Tabela 7). Segundo Saaty (2008), se a razão de consistência for menor do que 0,1 (10%), pode-se afirmar que há consistência para prosseguir com os cálculos do método. Caso contrário, os julgamentos devem ser refeitos até que a inconsistência seja atenuada.

Tabela 7: Índice de consistência randômico.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Adaptado de Saaty (2001).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Cenário mundial da mineração de lítio

Em 2022 existiam, aproximadamente, 45 minas de lítio em operação no mundo. A previsão da Fastmarkets (2022) era que, em 2023, mais 11 entrariam em atividade e outras 7, em 2024 (Heider e Siqueira, 2023). Atualmente, em 2026, Chile, Austrália, Argentina e China detêm juntos cerca de 95% das reservas de lítio conhecidas no mundo.

5.1.1. Principais produtores mundiais (2025)

Segundo o United States Geological Survey (USGS, 2025), poucos países concentram grande parte da produção de lítio destinada ao abastecimento da indústria. Atualmente, Austrália, Chile, China e Zimbábue destacam-se entre os principais produtores mundiais, desempenhando papel estratégico na cadeia de suprimentos de lítio. A seguir, na Tabela 8, são listados os principais produtores mundiais de lítio contido.

Tabela 8: Principais produtores mundiais de lítio contido em 2025.

País	Produção (t)
Austrália	92.000
China	62.000
Chile	56.000
Zimbábue	28.000
Argentina	23.000
Brasil	12.000
Mali	9.400
Canadá	5.600
Portugal	380

Fonte: Adaptado de Jaskula (2026)

5.1.2. Reservas mundiais de Lítio (2025)

Segundo o *United States Geological Survey* (USGS, 2025), as reservas mundiais de lítio estão concentradas principalmente na Austrália, Chile, China e EUA, países que possuem depósitos economicamente viáveis e com elevado potencial de exploração.

Além desses países, a Argentina, o Canadá, o Brasil e o Zimbábue também possuem reservas relevantes e vêm ampliando os investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novos projetos de mineração. (USGS, 2025). A Tabela 9 apresenta a distribuição mundial das reservas de lítio contido no ano de 2025.

Tabela 9: Distribuição mundial das reservas de Lítio contido em 2025.

País	Reservas (t)
Austrália	68,4 milhões
Chile	9,2 milhões
China	4,6 milhões
EUA	4,4 milhões
Argentina	4,4 milhões
Canadá	1,6 milhão
Brasil	540 mil
Zimbábue	500 mil

Fonte: Adaptado de Jaskula (2026)

5.1.3. Recursos mundiais (potencial geológico)

Os recursos mundiais de Lítio também são distribuídos em poucos territórios, com destaque para EUA, Argentina e Bolívia, que possuem os maiores recursos economicamente explotáveis (USGS, 2025). A Tabela 10 resume a concentração global das reservas de lítio contido entre os principais países produtores.

Tabela 10: Distribuição mundial do recurso de Lítio contido em 2025

País	Recursos (t)
EUA	30 milhões
Argentina	28 milhões
Bolívia	23 milhões
Chile	13 milhões
Austrália	10 milhões
China	10 milhões
Alemanha	8,9 milhões
Canadá	8,1 milhões

Fonte: Adaptado de Jaskula (2026)

5.1.4. Caracterização de depósito pegmatíticos ricos em lítio

Na tabela 11 são apresentadas as principais características de alguns depósitos pegmatíticos ricos em lítio que se encontram em operação, destacando-se os métodos de lavra que são aplicados. Nota-se que, dentre os depósitos analisados, predomina a lavra a céu aberto, principalmente em corpos pegmatíticos tabulares, espessos, contínuos e próximos à superfície, como Greenbushes, Pilgangoora, Mt Marion, Wodgina, Mt Cattlin, Xuxa, Volta Grande, James Bay, Goulamina, Arcadia, Bikita e Manono. Entretanto, a lavra subterrânea tem sido amplamente empregada em depósitos com maior profundidade, mergulhos mais elevados ou restrições geométricas, utilizando principalmente os métodos *sublevel stoping* e *longhole stoping*. Conforme a tabela 11 demonstra, é possível observar exemplos que incluem as minas de Cachoeira e Barreiro (CBL), Kathleen Valley, Earl Grey (Mount Holland), Tanco, Jiajika, Ke'eryin, Koktokay No. 3, Cinovec e Zhawulong. Alguns depósitos adotam operações híbridas, combinando lavra a céu aberto e subterrânea ao longo da vida útil da mina, como Whabouchi, Jiajika e Kamativi, evidenciando que a escolha do método de lavra está diretamente relacionada à geometria, à continuidade e à profundidade do corpo mineralizado.

Tabela 11: Características e métodos de lavra de depósitos pegmatíticos litíferos em operação.

Depósito	País	Empresa	Zoneamento	Forma	Mergulho (°)	Espessura (m)	Método de lavra	Fonte
Earl Grey (Mount Holland)	Austrália	Covalent Lithium (SQM + Wesfarmers)	Zonado	Corpo tabular (<i>sheet-like</i>)	20–60°	10–80	Lavra subterrânea (longhole open stoping)	Covalent Lithium (2023)
Finniss (Grants)	Austrália	Core Lithium	Zonado	Corpos tabulares e lentes	20–60°	5–40	Lavra por bancadas (open pit)	Core Lithium (2022)
Greenbushes	Austrália	Talison Lithium Ltd	Zonado	Tabular	30–80°	50–100	Lavra por bancadas	Ingham <i>et al.</i> (2012)
Kathleen Valley	Austrália	Liontown Resources	Fracamente zonado	Corpos tabulares subparalelos	20–60°	10–40	Longhole stoping	Liontown Resources (2023); JORC Report
Mt Cattlin	Austrália	Allkem	Zonação pouco desenvolvida	Tabular	sub-horizantal	29	Lavra por bancadas	Sweetapple (2010); Sweetapple <i>et al.</i> (2019) Donald <i>et al.</i> (2023)

Pilgangoora	Austrália	Pilbara Minerals	Zonação pouco desenvolvida/quase-homogêneo	Tabular	20-60°	1-70	Lavra por bancadas	Pilbara Minerals (2023); Sweetapple (2017)
Mt Marion	Austrália	Mineral Resources	Fracamente zonado	Tabular e Subparalelos	10-30°	15 - 20	Lavra por bancadas	Mineral Resources (2023)
Wodgina	Austrália	Mineral Resources	Zonado	Lâminas e lentes de pegmatito	20 - 50°	5 - 40	Lavra por bancadas	Mineral Resources (2023)
Barreiro (Grotta do Cirilo)	Brasil	Sigma Lithium	Zonado	Corpo tabular	20-50°	10-30	Lavra por bancadas	Sigma Lithium (2023);
Cachoeira	Brasil	Companhia Brasileira de Lítio (CBL)	Não zonado	Tabular	Mergulhos suaves a inclinados	3-4	<i>Sublevel stoping</i>	Dias (2015); Braga <i>et al.</i> (2010)
Murial	Brasil	Sigma Lithium	Zonado	Corpo tabular	20-45°	10-25	Lavra por bancadas	Sigma Lithium (2023);
Neves	Brasil	Latin Resources	Fracamente zonado	Corpo tabular	20-60°	5-20	Lavra por bancadas (projeto)	Latin Resources (2024);
Salinas	Brasil	Atlas Lithium	Zonado	Corpos tabulares de pegmatito	20-60°	5-30	Lavra por bancadas (projeto)	Atlas Lithium (2024)
Volta Grande	Brasil	AMG Mineração	Zonado	Tabular	27° (10 - 30°)	18-25	Lavra por bancadas	Jaques (2014); Assumpção (2015)
Xuxa	Brasil	Sigma Mineração	Não-zonado	Tabular	45-55°	12-13	Lavra por bancadas	Ferreira <i>et al.</i> (2021)
James Bay (Galaxy / Allkem)	Canadá	Allkem Limited	Zonado	Diques e lentes de pegmatito (<i>sheet-like</i>)	10-45°	10-60	Lavra por bancadas (<i>open pit</i>)	Allkem (2023);
Rose Lithium-Tantalum (La Corne)	Canadá	Corporation Éléments Critiques / Patriot Battery Metals	Zonado	Corpo tabular a lenticular	20-55°	15-70	Lavra por bancadas	NI 43-101 Technical Report (2022)
Sepeda Valley	Canadá	Exploração privada (Quebec district)	Fracamente zonado	Corpos tabulares de pegmatito	20-50°	5-30	Exploração / projeto	Québec Geological Survey (SIGEOM)

Continuação da Tabela 11

North American Lithium	Canadá	Sayona Mining / Piedmont Lithium	Fracamente zonado	Corpo tabular	40–70°	10–30	Lavra por bancadas	Sayona Mining (2023);
Tanco	Canadá	Sinomine Resource Group	Zonado	Lenticular	Sub-horizantal 7–12°	100	<i>Rooms and Pillars</i>	Martins <i>et al.</i> (2013); Garret 2004); Stilling <i>et al.</i> (2006)
Whabouchi	Canadá	Nemaska Lithium	Zonado	Corpo tabular a lenticular	10–40°	20–60	Lavra por bancadas (<i>open pit</i>), seguida de Longhole stoping	Nemaska Lithium (2018); Goodenough, K.; Deady, E.; Shaw (2021)
Jiajika	China	Sichuan Tianqi Lithium	Zonado	Corpos tabulares a lenticulares (<i>sheet-like</i>)	20–60°	10–80	Lavra subterrânea (sublevel open stoping) e por bancadas (<i>open pit</i>) em alguns setores	Xu <i>et al.</i> (2022); Goodenough, K.; Deady, E.; Shaw (2021)
Ke'eryin	China	Sichuan Yahua Lithium	Zonado	Corpos tabulares de pegmatito	30–70°	10–50	Lavra subterrânea (<i>longhole stoping</i>)	Xu <i>et al.</i> (2022); Goodenough, K.; Deady, E.; Shaw (2021)
Zhawulong	China	Empresas locais	Zonado	Corpos tabulares	20–60°	10–40	Lavra subterrânea	Xu <i>et al.</i> (2022); Wang <i>et al.</i> (2019)
Markam (Mangkang)	China	Tianqi Lithium / empresas locais	Zonado	Corpos tabulares a lenticulares	20–50°	20–60	Lavra por bancadas (<i>open pit</i>)	Xu <i>et al.</i> (2022); Goodenough, K.; Deady, E.; Shaw (2021)
Koktokay No. 3	China	Xinjiang Nonferrous Metals Industry Group	Fortemente zonado	Corpo tabular	70–90°	100–250	Lavra subterrânea (<i>sublevel stoping</i>)	London (2008); Černý & Ercit (2005); Wang <i>et al.</i> (2019)

Continuação da Tabela 11

Koktokay No. 3	China	Xinjiang Nonferrous Metals Industry Group	Fortemente zonado	Corpo tabular	70–90°	100–250	Lavra subterrânea (<i>sublevel stoping</i>)	London (2008); Černý & Ercit (2005); Wang <i>et al.</i> (2019)
Kings Mountain	Estados Unidos	Albemarle Corporation	Fracamente zonado	Diques tabulares de pegmatito	20–70°	10–40	Lavra por bancadas (<i>open pit</i>)	Bradley <i>et al.</i> (2017); USGS; Albemarle (2024)
Bessemer City (Hallman–Beam)	Estados Unidos	Foot Mineral	Fracamente zonado	Diques tabulares	30–70°	5–30	Lavra por bancadas (<i>open pit</i>)	USGS; Bradley <i>et al.</i> (2017)
Goulamina	Mali	Leo Lithium (Ganfeng Lithium)	Zonado	Corpo tabular a lenticular (sheet-like)	20–50°	20–120	Lavra por bancadas (<i>open pit</i>)	Leo Lithium (2023); Goodenough, Deady, Shaw (2021)
Barroso–Alvão	Portugal	Savannah Resources	Zonado	Corpos tabulares e lentes	20–60°	10–60	Lavra por bancadas	Savannah Resources (2023)
Manono	República Democrática do Congo	AVZ Minerals	Zonado	Corpo Tubular	Sub-horizontal a 20°	50–250	Lavra por bancadas (<i>open pit</i>)	AVZ Minerals (2020); Goodenough, Deady, Shaw (2021)
Cinovec	Tchéquia / Alemanha	European Metals Holdings	Fraco a moderadamente zonado	Greisen/pegmatito híbrido tabular	10–40°	20–150	Lavra subterrânea	European Metals (2023); USGS reports
Arcadia	Zimbábue	Zhejiang Huayou Cobalt (ex-Prospect Resources)	Zonado	Corpos tabulares a lenticulares	20–45°	10–50	Lavra por bancadas (<i>open pit</i>)	Prospect Resources (2021); Shaw <i>et al.</i> (2022)
Bikita	Zimbábue	Sinomine Bikita Minerals	Zonado	Tabular a Lenticular	Sub-horizontal 15–45°	30–70	Lavra por bancadas (<i>open pit</i>)	Bradley <i>et al.</i> (2017); Shaw <i>et al.</i> (2022)
Kamativi	Zimbábue	Zimbabwe Mining Development Corp. / inv. privados	Fracamente zonado	Corpos tabulares de pegmatito	20–60°	10–50	Lavra por bancadas (<i>open pit</i>) e subterrânea	Shaw <i>et al.</i> (2022)

Fonte: Adaptado de Castro; Silva; Zorzal, 2024.

De forma geral, os depósitos de corpos tabulares e próximos à superfície apresentam método de lavra preferencialmente a céu aberto. Nesses casos, a geometria favorece para que haja alta seletividade, maior produtividade e custos operacionais menores.

Nos depósitos mais profundos, que apresentam mergulhos mais acentuados ou corpos estreitos, predominam os métodos de lavra subterrânea, geralmente *longhole stoping* ou *sublevel stoping*.

Em alguns casos, ocorre uma transição entre métodos ao longo da vida útil da mina, formando operações híbridas, esse padrão reflete depósitos de grande porte e alta continuidade, nos quais há a necessidade de alteração de método de lavra devido ao aumento da profundidade do corpo mineralizado ou variação geométrica.

5.2. Descrição dos parâmetros geométricos dos Corpos A e C

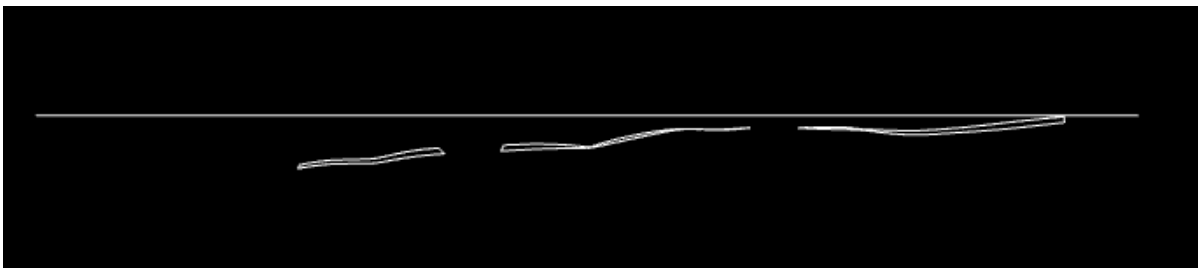
As Figuras 13 e 14 mostram as vistas laterais de cada seção dos Corpos A e C, respectivamente, enquanto os parâmetros geométricos medidos a partir dessas seções podem ser observadas na Tabela 12, para o Corpo A, e na Tabela 10 para o Corpo C. Evidencia-se que o Corpo A é um depósito tabular que possui um comprimento aproximado de 1580 m por 350 m de largura, mergulho médio global de 8° e espessura média global de 20 m. Já o Corpo C, caracteriza-se por ser também um depósito tabular de dimensões aproximadas de 566 m por 500 m, mergulho médio global de 3° e espessura média global de 16 m. Em termos de profundidade, o valor máximo obtido para ambos os depósitos foi de aproximadamente 350 m.

Figura 13: Vistas laterais do Corpo A e suas seções.

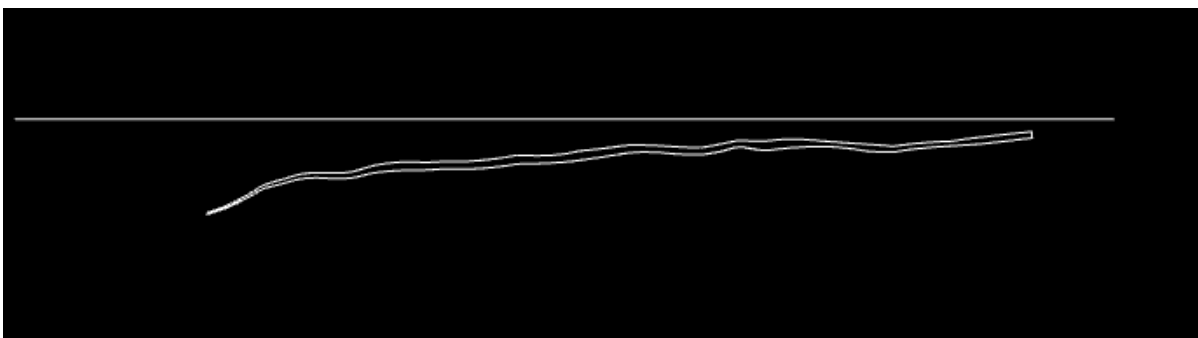


(a) Vista lateral do Corpo A.

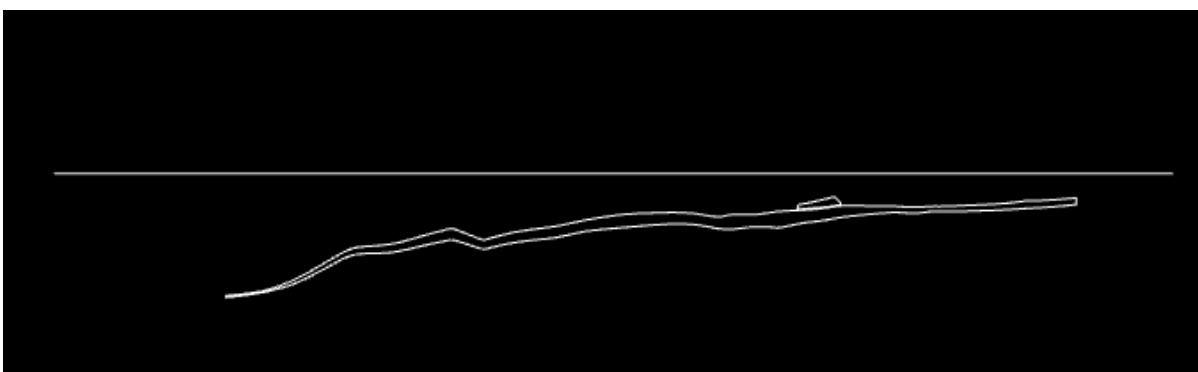
Continuação da Figura 13.



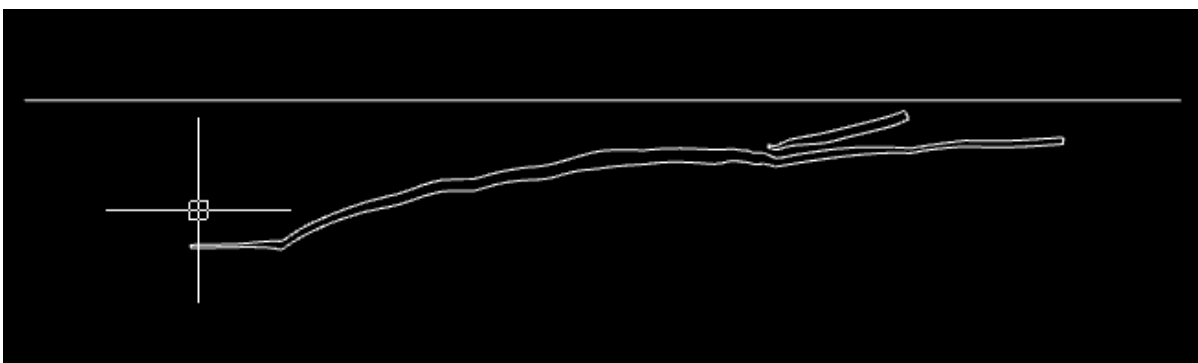
(b) Seção 1



(c) Seção 2

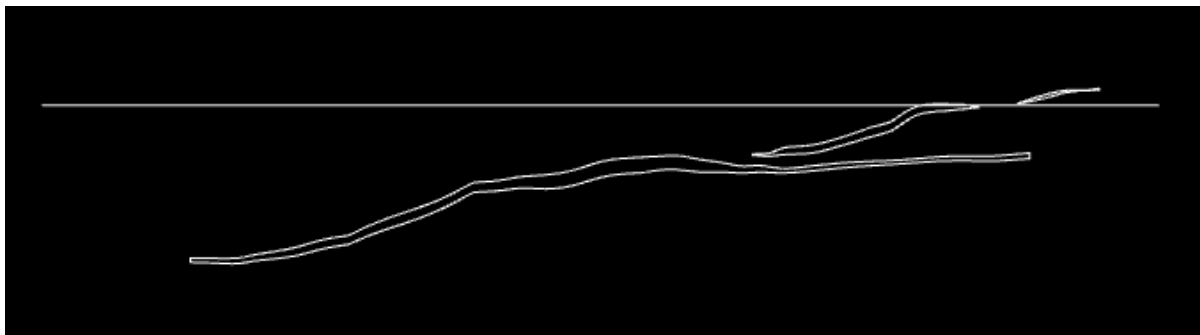


(d) Seção 3

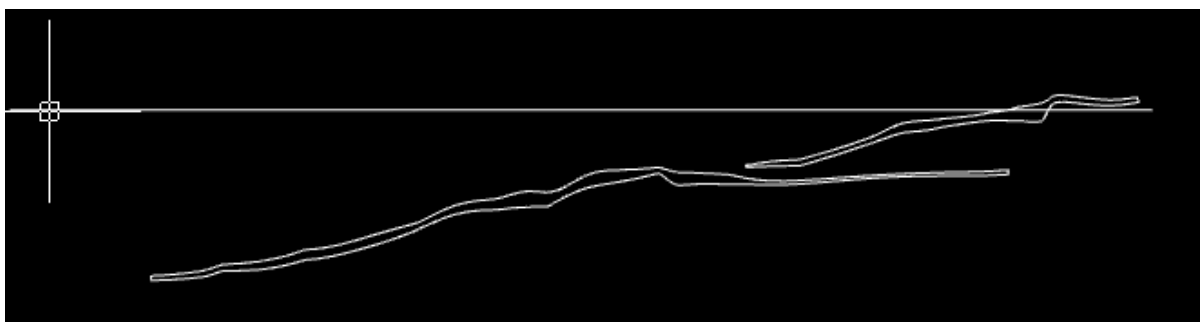


(e) Seção 4

Continuação da Figura 13.



(f) Seção 5



(g) Seção 6

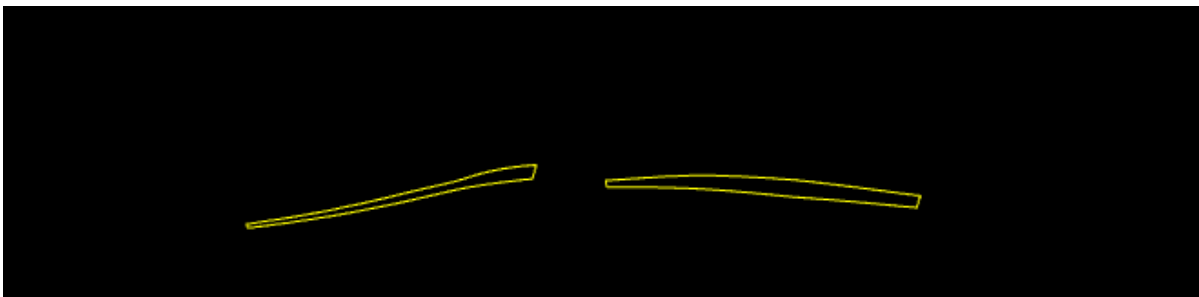


(h) Seção 7

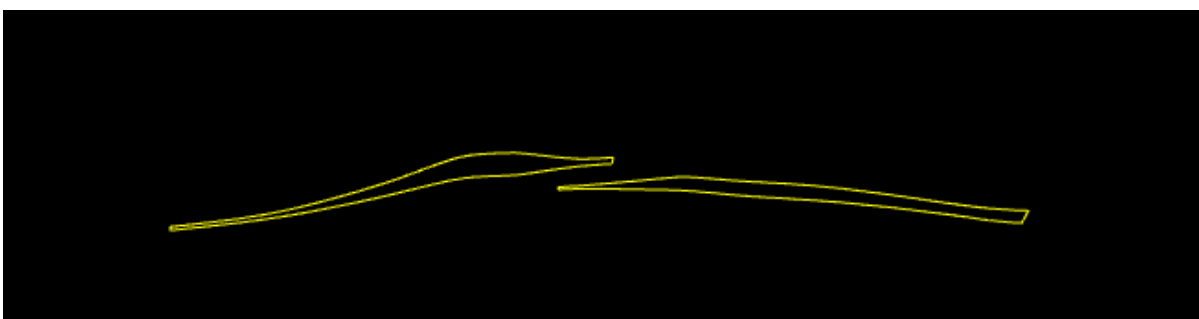
Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Nota-se, portanto, que ambos os depósitos se caracterizam como depósitos de grande extensão lateral, de baixo mergulho e espessura média. No entanto, tanto pelas imagens de cada seção, quanto pelas medidas realizadas, nota-se que o corpo C apresenta feições mais horizontalizadas que o Corpo A. Esse último, em alguns trechos, apresenta mergulhos mais acentuados do que aqueles observados no Corpo C. Portanto, tanto para o mergulho, quanto para a espessura desses corpos, para estudos futuros, salienta-se a necessidade de avaliar os valores mínimos e máximos para que se possam identificar as especificidades de cada trecho do corpo e possam ser realizadas as adequações para a aplicação do método de lavra. A

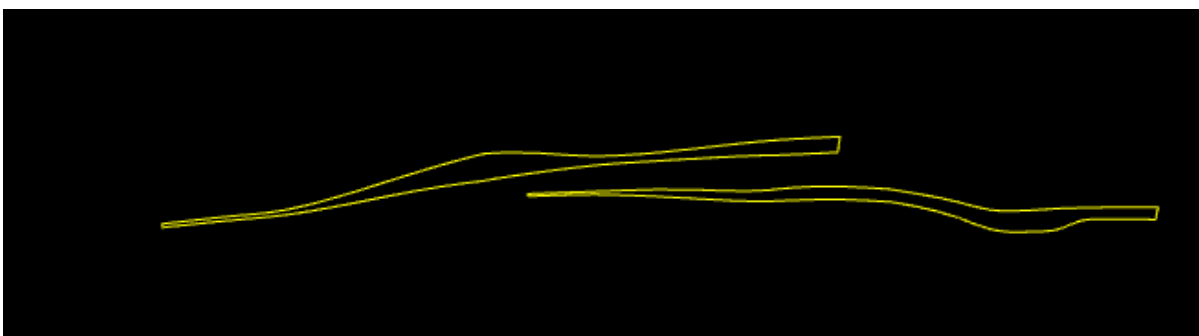
Continuação da Figura 14.



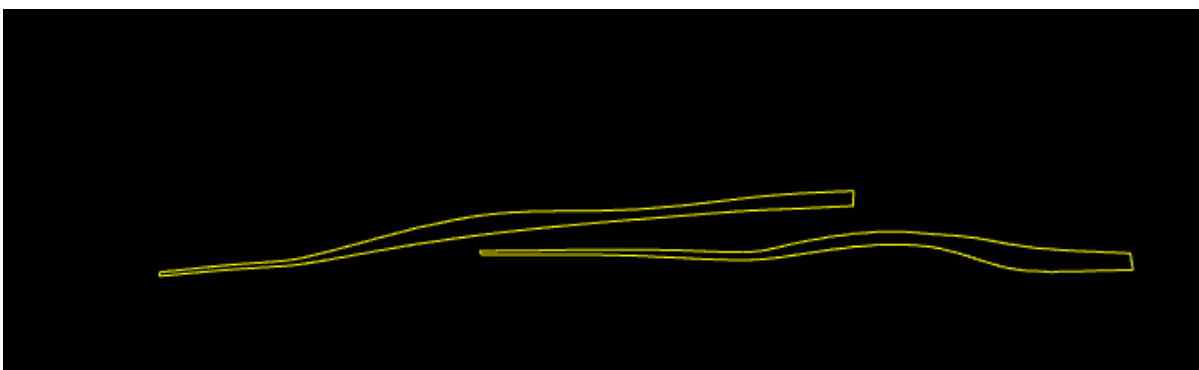
(b) Seção 1



(c) Seção 2

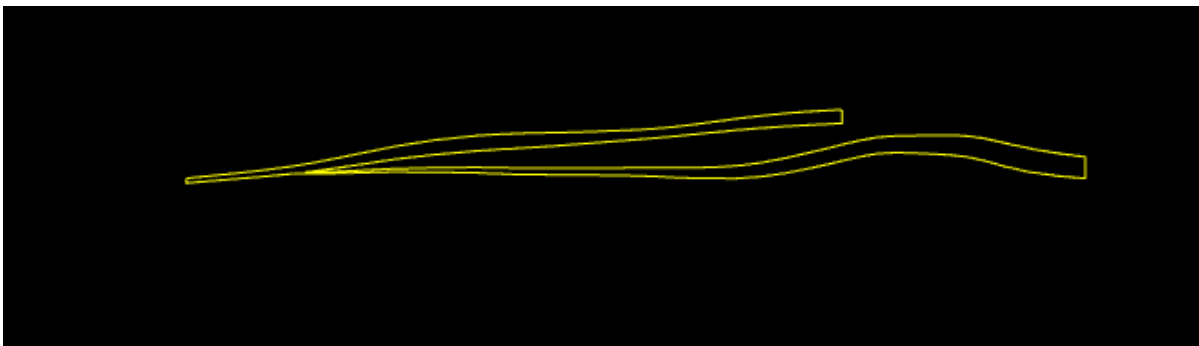


(d) Seção 3

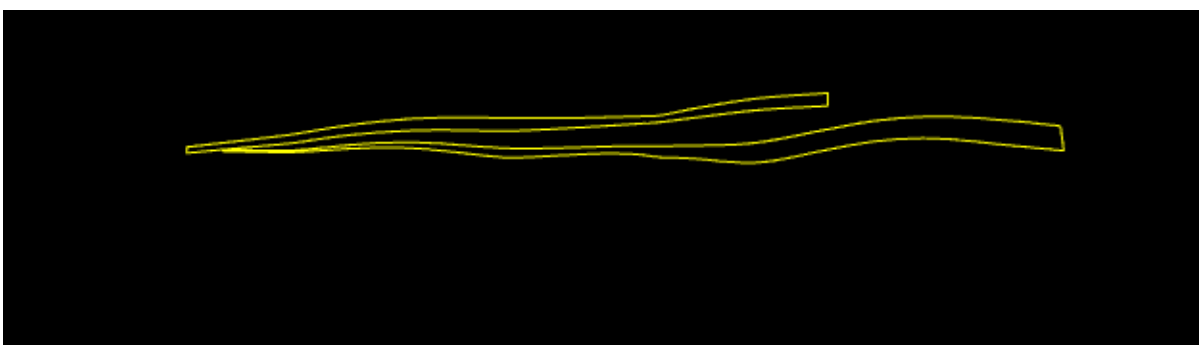


(e) Seção 4

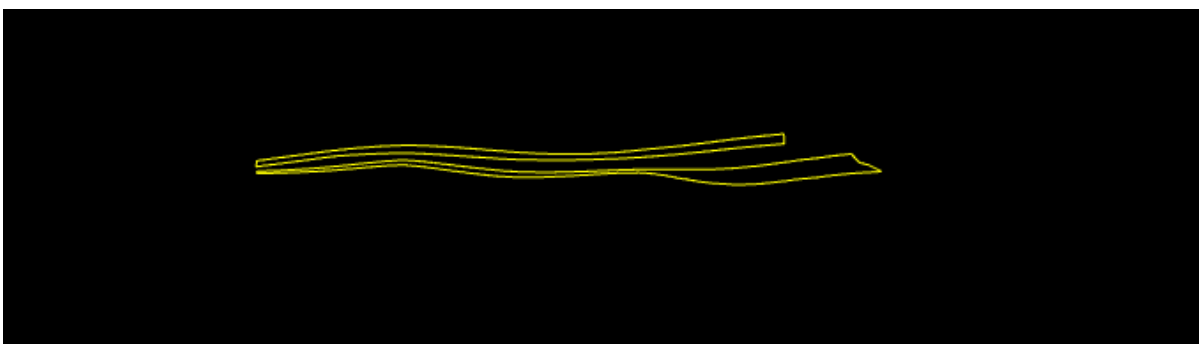
Continuação da Figura 14



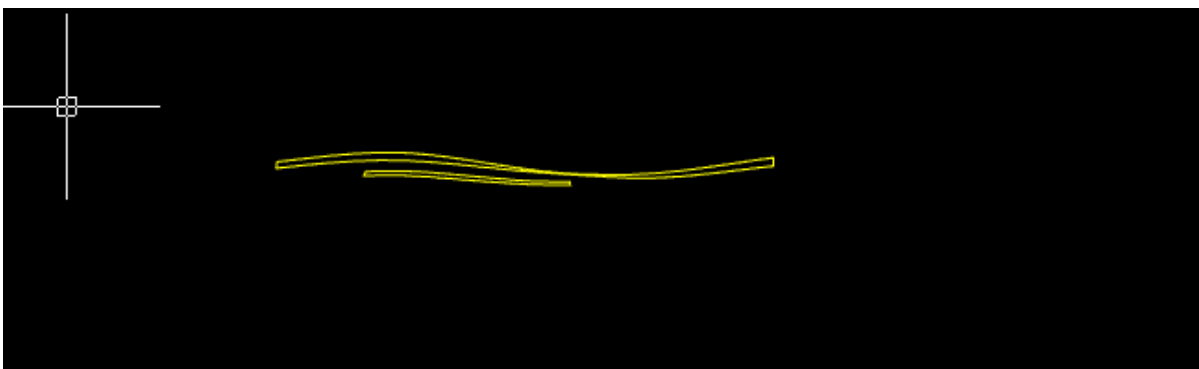
(f) Seção 5.



(g) Seção 6

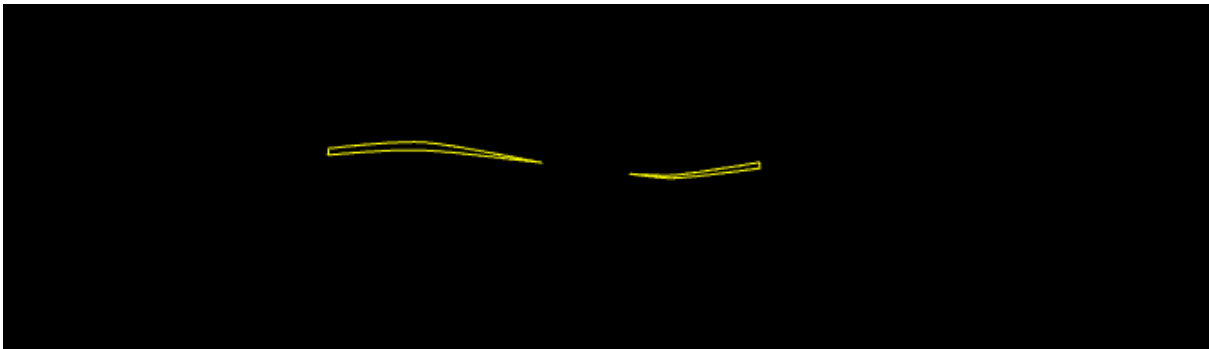


(h) Seção 7



(i) Seção 8

Continuação da Figura 14



(j) Seção 9



(k) Seção 10

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024.

De forma análoga ao Corpo A, o Corpo C também apresenta seus parâmetros geométricos caracterizados a partir das seções analisadas e das medidas realizadas, os quais podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13: Parâmetros geométricos do Corpo C.

Seção	Comprimento (m)	Espessura (m)	Mergulho (°)
1	555	17	-2
2	700	12	-1
3	813	17	2
4	806	13	4
5	735	17	5
6	684	20	2
7	530	12	1
8	403	21	2
9	358	15	3
10	80	14	2
Média	566	16	3

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024.

5.3. Método de Nicholas Modificado (UBC)

Para a aplicação do método de Nicholas modificado foram considerados os parâmetros geométricos (forma, espessura, mergulho e profundidade) previamente determinados para cada corpo no item anterior, em como suas propriedades geomecânicas, interpretadas a partir dos dados de classificação geomecânica obtidos por Jaques (2014), que foram determinados pela combinação de parâmetros geomecânicos provenientes da análise de testemunhos de sondagem dos depósitos pegmatíticos de Volta Grande, apresentados na Tabela 14. Além disso, sabendo que os pegmatitos apresentam teores com características zonais, sua distribuição de teores foi considerada gradacional. Dadas as classificações do método, apresentadas na Tabela 2, os dados de entrada para a seleção do método de lavra pelo Método da UBC foram os mesmos e são apresentados na Tabela 15.

Tabela 14: Parâmetros geomecânicos dos Corpos A e C.

	RMR	RSS
Minério (pegmatito)	73	3
Encaixantes (Anfibolito)	87	10

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024.

Tabela 15: Dados de entrada do método UBC para os Corpos A e C.

Parâmetro	Corpo A	Corpo C	Classificação UBC
Formato geral	Tabular	Tabular	Tabular
Espessura média	20 m	16 m	Intermediária (10-30m)
Mergulho médio	8°	3°	Baixo (<20°)
Distribuição de teores	Gradacional	Gradacional	Gradacional
Profundidade	350 m	350 m	Intermediária (100-600m)
RMR minério	73	73	Competente (60-80)
RSS minério	3	3	Muito fraco (<5)
RMR capa	87	87	Muito competente (80-100)
RSS capa	10	10	Fraco (5-10)
RMR lapa	87	87	Muito competente (80-100)
RSS lapa	10	10	Fraco (5-10)

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024.

O *ranking* final dos métodos de lavra obtido a partir da aplicação do Método de Nicholas modificado para os depósitos pegmatíticos A e C é apresentado na Tabela 16. A seguir serão discutidos pontos importantes sobre o *ranking* dos métodos de lavra.

Tabela 16: Ranking final dos métodos de lavra após a aplicação do método UBC para os Corpos A e C.

Método de lavra	Soma total
Lavra a céu aberto	32
<i>Cut and fill</i>	31
<i>Sublevel stoping</i>	30
<i>Longwall</i>	27
<i>Room and pillar</i>	25
<i>Block caving</i>	24
<i>Sublevel caving</i>	22
<i>Top slicing</i>	21
<i>Square set stoping</i>	15
<i>Shrinkage stoping</i>	-27

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Primeiramente, o resultado demonstra que o método de lavra por recalque seria de aplicação inviável para tais depósitos, visto que apresentou uma pontuação negativa. Isso ocorre, dado que os depósitos A e C são corpos de baixo mergulho que apresentam espessuras intermediárias, inviabilizando a aplicação de tal método. No entanto, independente desta análise, no contexto atual, a lavra por recalque, que tem o emprego intensivo de mão-de-obra, está perdendo sua relevância gradualmente e sendo substituído por métodos de lavra mais produtivos. Sob as mesmas condições, a lavra com alargamentos por subníveis, o abatimento por subníveis e a lavra por corte e enchimento podem ser praticados com considerável vantagem econômica e mais ganhos em segurança (Brady e Brown, 2006; Silva, 2024).

Entre os métodos pior ranqueados encontram-se, ainda, o *Top slicing* e o *Square set stoping*. Tais métodos, descritos em Hartman e Mutmanský (2002), também são métodos sem relevância no contexto atual que se encontram obsoletos na prática mineira recente, não demonstrando relevância a sua consideração para a lavra subterrânea dos corpos A e C.

Já dentre os métodos mais bem ranqueados, todos os métodos se encontram com pontuações significativamente próximas umas às outras, de forma que não há como afirmar que um método sobressaia significativamente sobre o outro. A lavra a céu aberto aparece em

primeiro lugar, com uma pontuação de 32, enquanto corte e enchimento aparece logo em seguida, com 31 pontos, e alargamentos em subníveis, com 30 pontos. No caso dos depósitos pegmatíticos de Volta Grande, que já são lavrados a céu aberto, partir ou não para a lavra subterrânea vai depender fortemente da relação estéril-minério praticada, fugindo do escopo desse estudo que visa estudar os métodos de lavra subterrânea aplicáveis a esses depósitos.

No entanto, o método da UBC não demonstra uma supremacia da lavra a céu aberto para esses corpos. Outro ponto a destacar é o *sublevel stoping* aparecer tão bem cotado, apesar de ser um método, preferencialmente, aplicável a depósitos de forte mergulho. Isso deve ocorrer, uma vez que não foram aplicados diferentes pesos para os variados parâmetros avaliados. De forma que, uma vez que as demais características se mostraram adequadas, o fato de o mergulho dos corpos não ser ideal para esse método recebeu peso igual aos demais critérios.

Em seguida no ranking, aparecem ainda os métodos de lavra por frente longa (*longwall*), com 27 pontos, e câmaras e pilares, com 25 pontos. Ambos os métodos são indicados para depósitos de baixo mergulho, no entanto, apesar de mais bem pontuado, o método por frente longa não seria um método aplicável já que careceria de limites e mergulhos mais regulares, bem como uma capa com abatibilidade.

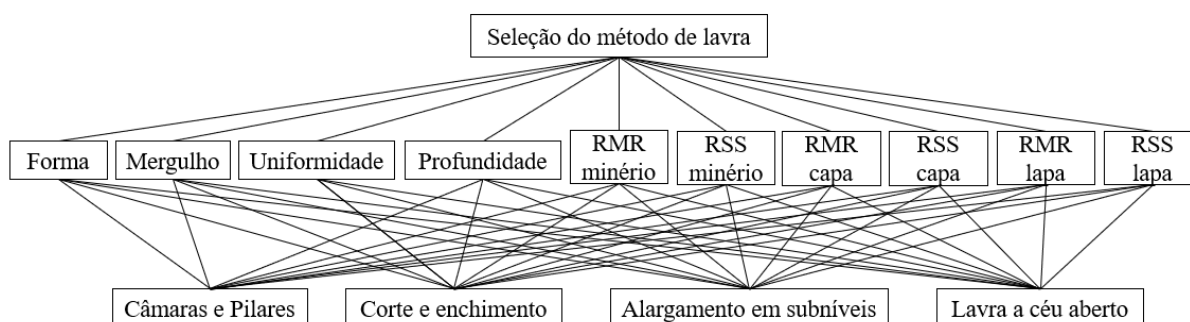
Nota-se, portanto, que o método de Nicholas modificado permitiu ranquear os métodos de lavra aplicáveis ao depósito, no entanto, alguns limitantes do método e de características dos depósitos não levaram a um ranqueamento totalmente aplicável a esse depósito. Portanto, é necessário ter critério e conhecimento técnico prévio ao se avaliar seus resultados. No entanto, vale destacar que, com exceção de frente longa, todos os demais métodos mais bem pontuados (lavra a céu aberto, corte e enchimento, subníveis e câmaras e pilares) coincidem com os métodos de lavra já aplicados para depósitos pegmatíticos litiníferos ou que estão sendo considerados para novas minas de lítio.

5.4. Método AHP

Os métodos de lavra subterrânea aplicáveis aos corpos A e C mais bem pontuados pelo método de Nicholas modificado foram selecionados para serem ranqueados a partir do método AHP. Dessa forma, foram considerados como alternativas para a solução do problema em análise, os métodos *cut and fill*, *sublevel stoping* e *rooms and pillars*, assim como o método de lavra a céu aberto, a título de comparação. Como critérios de avaliação, também foram considerados os mesmos parâmetros geológicos, geométricos e geotécnicos do método

UBC, visto que o foco desse estudo é avaliar os métodos de lavra subterrânea tecnicamente aplicáveis aos corpos pegmatíticos de Volta Grande. Portanto, parâmetros econômicos, operacionais, ambientais e sociais não foram levados em conta. Diante da definição das alternativas e critérios a serem considerados para a seleção do método de lavra para os Corpos A e C, foi possível estruturar o problema conforme demonstrado na Figura 15, com 11 critérios de avaliação e 4 alternativas de solução.

Figura 15: Estruturação do problema de seleção de método de lavra para os Corpos A e C.



Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Em seguida, dado que os critérios avaliados são qualitativos, utilizou-se da escala de Saaty para quantificar tais critérios e, por fim, gerar a matriz de decisão D para a aplicação da metodologia AHP. Para isso, foram consideradas as propriedades dos depósitos pegmatíticos A e C (Tabela 15) e utilizando a escala numérica de Saaty (Tabela 6), foram determinadas a preferência de um método em relação ao outro diante de cada critério (forma, mergulho, espessura, uniformidade, profundidade, RMR do minério, RSS do minério, RMR da capa, RSS da capa, RMR da lapa e RSS da lapa). Tais preferências foram definidas com base na Tabela 1 que traz a aplicabilidade de cada método de lavra, bem como nas pontuações apresentadas no método UBC para RMR e RSS do minério e da capa e lapa. As matrizes de comparações pareadas para cada critério são apresentadas nas Tabelas 17 a 27.

Tabela 17: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério forma.

	<i>Open Pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	3	5	1
<i>Room and Pillar</i>	1/3	1	2	1
<i>Sublevel Stoping</i>	1/5	1/2	1	1/5
<i>Cut and Fill</i>	1	1	5	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Tabela 18: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério mergulho.

	<i>Open pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	1	7	4
<i>Room and Pillar</i>	1	1	7	4
<i>Sublevel Stoping</i>	1/7	1/7	1	1/2
<i>Cut and Fill</i>	1/4	1/4	2	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Tabela 19: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério espessura.

	<i>Open Pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	1	1	1
<i>Room and Pillar</i>	1	1	1	1
<i>Sublevel Stoping</i>	1	1	1	1
<i>Cut and Fill</i>	1	1	1	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Tabela 20: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério profundidade.

	<i>Open Pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	3	3	1
<i>Room and Pillar</i>	1/3	1	1	1/3
<i>Sublevel Stoping</i>	1/3	1	1	1/3
<i>Cut and Fill</i>	1	3	3	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024 ‘

Tabela 21: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério uniformidade.

	<i>Open Pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	3	3	1
<i>Room and Pillar</i>	1/3	1	1	1/3
<i>Sublevel Stoping</i>	1/3	1	1	1/3
<i>Cut and Fill</i>	1	3	3	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Tabela 22: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RMR do minério.

	<i>Open Pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	3	3	1
<i>Room and Pillar</i>	1/3	1	1	1/3
<i>Sublevel Stoping</i>	1/3	1	1	1/3
<i>Cut and Fill</i>	1	3	3	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Tabela 23: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RSS do minério.

	<i>Open Pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	7	7	5
<i>Room and Pillar</i>	1/7	1	1	1/2
<i>Sublevel Stoping</i>	1/7	1	1	1/2
<i>Cut and Fill</i>	1/5	2	2	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Tabela 24: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RMR da capa.

	<i>Open Pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	1	1	1/2
<i>Room and Pillar</i>	1	1	1	1/2
<i>Sublevel Stoping</i>	1	1	1	1/2
<i>Cut and Fill</i>	2	2	2	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Tabela 25: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RSS da capa.

	<i>Open Pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	3	2	1
<i>Room and Pillar</i>	1/3	1	2	1/3
<i>Sublevel Stoping</i>	1/2	1/2	1	1/2
<i>Cut and Fill</i>	1	3	2	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Tabela 26: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RMR da lapa.

	<i>Open Pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	1	1	1/2
<i>Room and Pillar</i>	1	1	1	1/2
<i>Sublevel Stoping</i>	1	1	1	1/2
<i>Cut and Fill</i>	2	2	2	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Tabela 27: Matriz de comparações pareadas dos métodos em relação ao critério RSS da lapa.

	<i>Open Pit</i>	<i>Room and Pillar</i>	<i>Sublevel Stoping</i>	<i>Cut and Fill</i>
<i>Open Pit</i>	1	3	2	1
<i>Room and Pillar</i>	1/3	1	2	1/3
<i>Sublevel Stoping</i>	1/2	1/2	1	1/2
<i>Cut and Fill</i>	1	3	2	1

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

A Tabela 28 apresenta a análise de consistência lógica das matrizes de comparações pareadas das alternativas para cada critério. Observa-se que a razão de consistência (RC) obtida em todas as análises foi inferior a 10%, valor máximo indicado por Saaty (2008) como aceitável para considerar os julgamentos consistentes. Dessa forma, após a validação da consistência dos julgamentos, as matrizes de comparações pareadas apresentadas nas Tabelas 17 a 27 foram normalizadas, permitindo a obtenção dos pesos das alternativas e a construção da matriz de decisão apresentada na Tabela 29.

Tabela 28: Análise de consistência lógica das matrizes de comparações pareadas das alternativas.

	n	$\lambda_{\text{máx}}$	IC	IR	RC
Forma	4	4,13	0,044	0,90	4,93%
Mergulho	4	4,00	0,001	0,91	0,08%
Espessura	4	4,00	0,000	0,92	0,00%
Profundidade	4	4,00	0,000	0,93	0,00%
Uniformidade	4	4,00	0,000	0,94	0,00%
RMR minério	4	4,00	0,000	0,95	0,00%
RSS minério	4	4,02	0,005	0,96	0,59%
RMR capa	4	4,00	0,000	0,97	0,00%
RSS capa	4	4,16	0,053	0,98	5,84%
RMR lapa	4	4,00	0,000	0,99	0,00%
RSS lapa	4	4,16	0,053	0,100	5,84%

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Tabela 29: Matriz de decisão normalizada.

	For ma	Mer gulho	Espes sura	Profun didade	Unifor midad e	RMR minéri o	RSS minéri o	RMR capa	RSS capa	RMR lapa	RSS lapa
<i>Open Pit</i>	0.41	0.42	0.25	0.38	0.38	0.38	0.67	0.20	0.35	0.20	0.35
<i>Room and Pillar</i>	0.19	0.42	0.25	0.13	0.13	0.13	0.09	0.20	0.16	0.20	0.16
<i>Sublevel Stoping</i>	0.08	0.06	0.25	0.13	0.13	0.13	0.09	0.20	0.14	0.20	0.14
<i>Cut and Fill</i>	0.32	0.11	0.25	0.38	0.38	0.38	0.16	0.40	0.35	0.40	0.35

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Em seguida, iniciou-se a etapa de definição dos pesos e prioridades, buscando-se estabelecer a importância relativa de cada critério na seleção do método de lavra. Igualmente, foram feitas comparações pareadas entre os critérios, o cálculo da matriz normalizada, com a definição do vetor de prioridade dos critérios, por fim (Tabela 30). Nota-se que, dentre os critérios avaliados, forma e mergulho receberam maior peso, demonstrando serem os critérios de maior relevância. Em seguida, com maiores pesos, aparecem RMR e RSS da capa e da lapa. Em contrapartida, RMR e RSS do minério, recebem importância intermediárias. Por

último, como menores pesos e relevância para a seleção do método de lavra dentre os critérios avaliados, estão espessura, profundidade e uniformidade.

Tabela 30: Matriz de comparações pareadas dos critérios à luz do problema de seleção de método de lavra.

	Forma	Mer gulho	Espes sura	Profu n didade	Unifor midade	RMR min	RSS min	RMR capa	RSS capa	RMR lapa	RSS lapa	Vetor prioridade
Forma	1	1	4	5	6	2	2	1	1	1	1	0,1309
Mer gulho	1	1	4	5	6	2	2	1	1	1	1	0,1309
Espes sura	1/4	1/4	1	1	2	1/2	1/2	1/4	1/4	1/4	1/4	0,0332
Profun didade	1/5	1/5	1	1	1	1/5	1/5	1/5	1/5	1/4	1/4	0,0251
Unifor midade	1/6	1/6	1/2	1	1	1/5	1/5	1/5	1/5	1/4	1/4	0,0228
RMR minério	1/2	1/2	2	5	5	1	1	1/2	1/2	1/2	1/2	0,0751
RSS minério	1/2	1/2	2	5	5	1	1	1/2	1/2	1/2	1/2	0,0751
RMR capa	1	1	4	5	5	2	2	1	1	1	1	0,1288
RSS capa	1	1	4	5	5	2	2	1	1	1	1	0,1288
RMR lapa	1	1	4	4	4	2	2	1	1	1	1	0,1246
RSS lapa	1	1	4	4	4	2	2	1	1	1	1	0,1246

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024.

Para a avaliação da consistência lógica dos julgamentos estabelecidos, a Razão de Consistência foi calculada conforme demonstrado na Equação 3 e seus resultados foram apresentados na Tabela 31. Nota-se que a RC obtida foi de 1,1%, bem inferior ao indicado por Saaty (2008) como aceitável. Portanto, considera-se que os julgamentos realizados foram consistentes e a análise pode prosseguir.

Tabela 31: Análise de consistência lógica da matriz de comparações pareadas dos critérios.

n	11
$\lambda_{\text{máx}}$	11,16
IC	0,016
IR	1,51
RC	0,011

Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Por fim, para o cálculo do vetor de prioridades globais das alternativas, realizou-se a multiplicação da matriz de decisão normalizada (Tabela 29) pelo vetor de prioridades dos critérios (Tabela 30), obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 31. O vetor resultante permite o ranqueamento dos métodos de lavra em ordem de preferência, considerando os pesos dos critérios e as prioridades estabelecidas pelos decisores.

Tabela 32: Vetor de Prioridade global.

Alternativas	Vetor de Prioridade Global
<i>Open pit</i>	0,3514
<i>Cut and Fill</i>	0,3118
<i>Room and Pillar</i>	0,2025
<i>Sublevel Stoping</i>	0,1342

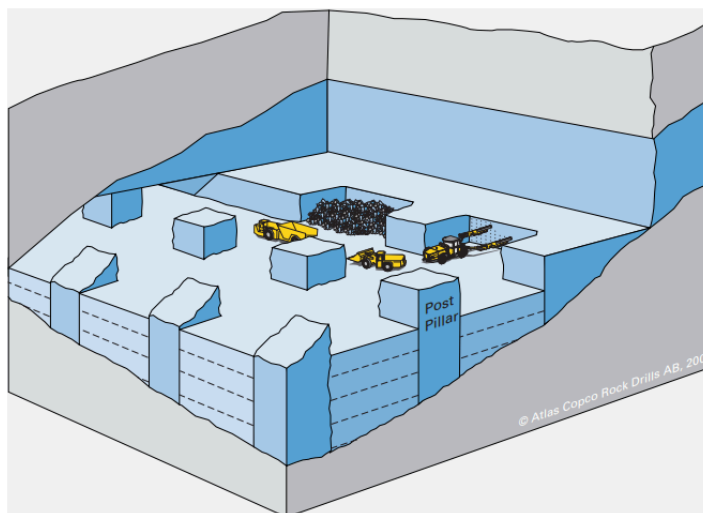
Fonte: Castro; Silva; Zorzal, 2024

Desta forma, nota-se que assim como no método da UBC, no resultado apresentado pelo método AHP, os métodos de corte e enchimento e lavra a céu aberto aparecem nas primeiras posições, inclusive com pontuações semelhantes. Desta forma, a diferença entre os valores obtidos para cada método não é significativa a ponto de afirmar-se que há uma supremacia de um método em relação ao outro. Nota-se que, em seguida, aparece o método de lavra de câmaras e pilares, indicado para corpos de baixo mergulhos, e, somente, na última posição, o método de alargamentos em subníveis que é aplicável a depósitos de forte mergulho.

Um ponto a discutir inclui o fato de que o método de corte e enchimento, em sua aplicação clássica, também seria indicado para corpos de mergulho moderado a forte (35 -

90°; Brady e Brown, 2006). Acredita-se que tal método se destacou frente ao método de câmaras e pilares, principalmente, em função das propriedades geomecânicas (RMR e RSS) apresentadas pelo minério e pela encaixante que acabam favorecendo os métodos de lavra com suporte. No entanto, vale ressaltar que a aplicação do *cut and fill* tem sido feita de maneira combinada com diversos outros métodos de lavra. Hustrulid e Bullock (2001), por exemplo, citam a aplicabilidade do *post room-and-pillar mining*, método que combina as vantagens do método de corte e enchimento e de câmaras e pilares a depósitos com mergulhos de 20 a 55° e espessuras maiores que as praticadas no *room and pillar* clássico. Portanto, o método de corte e enchimento se mostra como uma possível alternativa a ser trabalhada de maneira conjunta com câmaras e pilares nestes depósitos, principalmente, em trechos mais verticalizados do depósito.

Figura 16: Representação esquemática da variante *post room-and-pillar mining*.



Fonte: Atlas Copco (2017).

Logo, a partir dessa análise, foi possível ranquear os métodos de lavra aplicáveis aos depósitos A e C ponderando-se diversos parâmetros de entradas e considerando critérios e objetivos conflitantes envolvidos na seleção de um método de lavra. Um dos pontos fortes do método AHP em comparação com o método da UBC para a seleção de métodos de lavra é a possibilidade de considerar diferentes pesos para os critérios de avaliação, assim como levar em conta diferentes critérios relevantes para a condição local do depósito em estudo. No entanto, o papel do decisor se mostra significativamente relevante na seleção do método de lavra pelo método AHP. De forma que, assim como no método de Nicholas modificado, é

necessário ter critério e conhecimento técnico prévio para se obter e analisar os resultados encontrados.

Portanto, assim como Miller-Tait et al. (1995) destacam que o método de Nicholas modificado não constitui uma ferramenta capaz de definir, de forma definitiva, o método de lavra a ser adotado, o mesmo se aplica ao método *Analytic Hierarchy Process (AHP)*. Nesse contexto, uma limitação do presente estudo reside no fato de que a metodologia permite apenas uma avaliação preliminar dos métodos de lavra tecnicamente aplicáveis ao depósito mineral. Dessa forma, a definição do método de lavra mais adequado requer a realização de estudos técnicos mais detalhados, contemplando análises geológicas, geotécnicas, operacionais e econômicas, além da incorporação de critérios adicionais que representem outros aspectos relevantes do empreendimento.

Apesar dessa limitação, os resultados obtidos demonstram a viabilidade da aplicação do AHP como ferramenta de apoio à tomada de decisão na seleção de métodos de lavra. A metodologia mostrou-se útil para a hierarquização das alternativas tecnicamente aplicáveis ao depósito, podendo subsidiar avaliações relacionadas tanto à seleção do método de lavra mais adequado quanto à transição de operações a céu aberto para subterrâneas. Ademais, quando aplicada de forma mais abrangente e robusta, incorporando um conjunto mais amplo de critérios e informações, a metodologia apresenta potencial para contribuir com a redução de impactos financeiros, sociais e ambientais decorrentes de escolhas inadequadas do método de lavra, promovendo maior eficiência técnica, econômica e sustentabilidade nos empreendimentos mineiros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo permitiu realizar a avaliação inicial de métodos de lavra subterrâneos para os depósitos pegmatíticos litíferos de Volta Grande, sendo evidenciado pela revisão bibliográfica, uma predominância da aplicação da lavra a céu aberto, em relação aos métodos de lavra aplicáveis a minas de lítio. No que se refere à lavra subterrânea, encontrou-se aplicações e estudos dos métodos de realces em subníveis, câmaras e pilares e corte e enchimento. Pelo método de Nicholas modificado, os métodos de lavra mais bem ranqueados foram lavra a céu aberto, corte e enchimento, lavra por subníveis, frente longa e câmaras e pilares. Vale destacar que, com exceção do método de lavra por frente longa, todos os demais métodos mais bem pontuados coincidem com os métodos de lavra já aplicados para depósitos pegmatíticos litíferos ou que estão sendo considerados para novas minas de lítio. O modelo AHP permitiu ranquear as alternativas na seguinte ordem de preferência: corte e enchimento, lavra a céu aberto, câmaras e pilares e lavra por subníveis. A inversão do método mais bem ranqueado pelo segundo colocado ocorre devido à consideração das características específicas do Corpo A, uma vez que esse corpo apresenta trechos com mergulhos mais acentuados, conforme observado na Tabela 12. Entretanto, a análise inicial considerou os Corpos A e C como uma única unidade, utilizando o mergulho médio, o que favoreceu a prevalência do método de lavra a céu aberto. Dessa forma, após uma análise mais detalhada das características individuais dos corpos mineralizados, torna-se necessária a reavaliação do ranqueamento dos métodos de lavra.

Uma vantagem significativa do método AHP em comparação com o método da UBC para a seleção de métodos de lavra é sua capacidade de atribuir pesos variados aos critérios de avaliação. No entanto, para a aplicação de ambas as metodologias é necessário ter critério e conhecimento técnico prévio para se obter e analisar os resultados encontrados. Portanto, a partir dos resultados obtidos, conclui-se que ambos os métodos permitem auxiliar e embasar a decisão por um método de lavra em um primeiro momento. Todavia, ainda é necessário verificar a sua aplicabilidade técnica por meio de estudos adicionais que podem, por exemplo, incluir modelagens numéricas.

Como estudos futuros, salienta-se a necessidade de avaliar os valores mínimos e máximos dos parâmetros geométricos dos depósitos pegmatíticos, bem como ampliar as análises por meio de modelagem numérica para verificar a aplicabilidade técnica dos métodos de lavra subterrânea em diferentes cenários geomecânicos, conforme abordado por Abuchain *et al.*, (2026). Além disso, recomenda-se a implementação de estudos de caso envolvendo a adoção

de métodos de lavra subterrânea em depósitos atualmente explotados por lavra a céu aberto, possibilitando avaliar a transição entre os métodos e comparar os impactos técnicos, econômicos, sociais e ambientais decorrentes dessa mudança. Essa abordagem permitiria validar a capacidade do método de seleção em indicar alternativas viáveis e auxiliar a tomada de decisão em projetos de aprofundamento de minas.

Por fim, destaca-se a importância da inclusão de critérios econômicos, sociais e ambientais no processo de tomada de decisão, além da realização de análises de sensibilidade para avaliar a robustez dos resultados obtidos pelo método AHP. Essas análises permitiriam verificar se alterações nos pesos atribuídos aos critérios poderiam modificar o ranqueamento final dos métodos de lavra, conforme proposto por Alpay e Yavuz (2009).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUCHAIN, Gabriela Farineli; ZORZAL, Caroline Belisário; SILVA, José Margarida da; JAQUES, Daniel Silva; SOARES, Rita de Cássia Pedrosa; OLIVEIRA, Bruno Rodrigues de. Modelagem numérica da lavra subterrânea de pegmatitos de baixo mergulho. In: COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 22., 2026, Brasília. Anais... **Brasília: ABMS**, 2026.

AFUM, B. O.; BEN-AWUAH, E. A Review of Models and Algorithms for Surface-Underground Mining Options and Transitions Optimization. **Mining**, 2021.

ALBEMARLE CORPORATION. Kings Mountain Mine. Charlotte, NC, [2024]. Disponível em: **Albemarle – Kings Mountain Mine**. Acesso em: 28 jun. 2026.

ALLKEM LIMITED. James Bay Lithium Project: NI 43-101 Technical Report. **Sydney: Allkem**, 2023.

ALPAY, S.; YAVUZ, M. A decision support system for underground CO₂ sequestration. In: **Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference**, pp. 651–655, 2007.

ALPAY, S.; YAVUZ, M. Underground mining method selection by decision making tools. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 24, n. 2, p. 173–184, 2009. DOI: 10.1016/j.tust.2008.07.003

AMG. Ampliação Mina Volta Grande: Estudo de impacto ambiental – EIA - VOLUME II. **CERN**, 2018.

ASSUMPÇÃO, C. S. Caracterização mineralógica e geoquímica do pegmatito da Mina de Volta Grande. Dissertação (Mestrado) - **Universidade Federal de Ouro Preto**. Ouro Preto, MG, 2015.

ATAEI, Mohammad *et al.* Mining method selection by AHP approach. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 108, n. 12, p. 741-749, 2008.

ATLAS COPCO. *Blasthole Drilling in Open Pit Mining*. Stockholm: **Atlas Copco Rock Drills AB**, 2010.

ATLAS COPCO. *Mining Methods in Underground Mining*. 2. ed. Örebro, Sweden: **Atlas Copco Rock Drills AB**, 2007.

ATLAS COPCO. *Underground Rock Excavation Manual*. 7. ed. Stockholm: **Atlas Copco Rock Drills AB**, 2000.

ATLAS LITHIUM CORPORATION. Lithium Projects in Brazil. Boca Raton: **Atlas Lithium Corporation**, [2026] Disponível em: <https://atlas-lithium.com/projects/>. Acesso em: 20 jun. 2026.

ÁVILA ARV. Evaluación técnica y económica de una mina subterránea utilizando relleno cementado. *Memorial. Graduação. Santiago de Chile*, 2015.

AVZ MINERALS LIMITED. Manono Lithium and Tin Project: Definitive Feasibility Study. *West Perth: AVZ Minerals*, 2020.

BALOYI, V. D.; MEYER, L. D. The development of a mining method selection model through a detailed assessment of multi-criteria decision methods. *Results in Engineering*, v. 8, p. 100172, 2020.

BALT, K.; GOOSEN, R. L. MSAHP: an approach to mining method selection. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Johannesburg, v. 120, n. 8, p. 451–460, 2020. DOI: 10.17159/2411-9717/1072/2020.

BOGDANOVIC, D.; NIKOLIC, D.; IVANA, I. 2012. Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method. *An. Acad. Bras. Cienc.* 84 (1), 219–233, 2012.

BRADLEY, D. C.; MCCAULEY, A. D.; STILLINGS, L. M. Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites: U.S. *Geological Survey Scientific Investigations Report*. 2010-5070-0, 48p., 2017.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. Rock Mechanics for Underground Mining. 3rd. Ed. London: **Springer**, 2006.

BRAGA, P. F. A.; FRANÇA, S. C. A.; SANTOS, R. L. C. Panorama da indústria de lítio no Brasil. *In: II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste*, 2010.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY - BGS. Lithium Profile. *Minerals UK*, 2016. Disponível em: < https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/534440/1/lithium_profile.pdf>. Acesso em 10 jun. 2026.

BOHNET, E. Comparação de métodos de mineração de superfície. In: DARLING, P. (ed.). *SME Mining Engineering Handbook*. 3. ed. **Englewood, CO**: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011. v. 1, p. 405–413.

BÜNDRICH, L. A. Optimização das operações de desmonte de rocha com uso de explosivos em câmaras transversais (sublevel stoping). Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. Porto Alegre: **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2017.

CARELOS ANDRADE, Laura; DIMITRAKOPOULOS, Roussos. Integrated stochastic underground mine planning with long-term stockpiling: method and impacts of using high-order sequential simulations. *Minerals*, v. 14, n. 2, p. 123, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min14020123>.

CASTRO M.T.R.; SILVA J.M.; ZORZAL C.B. 2024. Seleção De Método De Lavra Subterrânea Para Depósito Pegmatítico Rico Em Lítio Por Meio De Modelo Multicritério De Tomada De Decisão - **Relatório de Iniciação Científica- Programa de Iniciação à Pesquisa-PIP. UFOP**. Disponível em: <https://zeppelin10.ufop.br/pic/pagina/projeto/index.jsp>.

ČERNÝ, P.; ERCIT, T. S. The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, v. 43, p. 2005–2026, 2005.

CHEN, J. Z.; ZHANG, H.; TANG, Y.; *et al.* Lithium mineralization during evolution of a magmatic–hydrothermal system: Mineralogical evidence from Li-mineralized pegmatites in Altai, NW China. *Ore Geology Reviews*, v. 149, art. 105058, 2022. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.105058.

COMPANHIA BRASILEIRA DE LÍTIO (CBL). A Companhia. **Araçuaí**, MG, 2026. Acesso em: 30 jun. 2026.

CORE LITHIUM LTD. Updated Mineral Resource and Ore Reserve Statement. Adelaide: **Core Lithium Ltd.**, 2022. Disponível em: Core Lithium – Resources and Reserves. Acesso em: 26 jun. 2026.

COVALENT LITHIUM. Our project. **Perth**, 2023. Disponível em: <https://www.covalentlithium.com/our-project>. Acesso em: 25 jun. 2026.

CURI, Adilson. Lavra de minas. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2017. 462 p

- DARLING, P. (Ed.). SME Mining Engineering Handbook. 3. ed. **Englewood: SME**, 2011.
- DARLING, Peter (ed.). SME Underground Mining Handbook. Englewood, CO: **Society for Mining, Metallurgy & Exploration**, 2023. 800 p. ISBN 978-0-87335-484-4.
- DIAS, C. H. Mineralogia, tipologia e causas de cor de espodumênios da província pegmatítica oriental do Brasil e química mineral de Nb-tantalatos da mina da Cachoeira (Minas Gerais). 2015. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, **Universidade Federal de Minas Gerais**. Belo Horizonte, MG, 2015.
- DONALD, D.; GIBLETT, A.; THAMM, A. G. Mt Cattlin Stage 4 Expansion Project - NI43-101 Technical Report. **Allkem Limited**, 2023.
- DOWDING, Charles H. *Construction Vibrations*. **Upper Saddle River: Prentice Hall**, 1996
- EUROPEAN MET ALS HOLDINGS. Cinovec Lithium Project: Definitive Feasibility Study. Perth: **European Metals Holdings**, 2023.
- EVANS, K. Lithium. In: GUNN, G. (ed.). Critical Metals Handbook. Hoboken: **John Wiley & Sons**, 2014. p. 230–260. DOI: 10.1002/9781118755341.ch10.
- GARRET, D. E. Handbook of lithium and natural calcium chloride, their deposits, processing, uses and properties. **Elsevier Academic Press**, pp. 476, 2004.
- GARZA-CRUZ, T.; PIERCE, M. Literature review to identify techniques for mining method selection: Resolution Copper EIS. Minneapolis: **Itasca Consulting Group**, 2020.
- GERTSCH, R. E.; BULLOCK, R. L. Techniques in Underground Mining: Selections from Underground Mining Methods Handbook. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (U.S.), **(No Title)**, 1998.
- GOMES, TMH. Estudo da estabilidade de portas de enchimento—Caso de estudo da mina da Somincor. 2016.
- GOODENOUGH, K.; DEADY, E.; SHAW, R. Lithium resources, and their potential to support battery supply chains, in Africa. **British Geological Survey**, 2021.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *SIGEOM* – Système d’information géominière du Québec: pegmatites du district de la Corne. **Québec: Ministère des Ressources naturelles**, 2023.

HABIB, K., HANSDOTTIR, S.T., HABIB, H. Critical metals for electromobility: Global demand scenarios for passenger vehicles, 2015–2050. *Resour. Conserv. Recycl.* 154, 104603, 2020.

HAMRIN, Hans. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2001.

HARTMAN, Howard L. *SME Mining Engineering Handbook*. 2. ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 1996. 2 v.

HARTMAN, H.L.; MUTMANSKY, J.M. Introductory mining engineering: Stages of mining: development and exploitation. 2. ed. *John Wiley and Sons*. 2002. p. 96-118.

HEIDER, M.; SIQUEIRA, D. F. A consolidação do lítio no Brasil – (Parte I). *In the Mine*, 2023. Disponível em: <<https://www.inthemine.com.br/site/a-consolidacao-do-litio-no-brasil-parte-i/>>. Acesso em: 18 nov. 2023.

HUND, K; LA PORTA, D.; FABREGAS, T. P.; LAING, T.; DREXHAGE, J. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. *World Bank Group*, 2022. Disponível em: <<https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf>>. Acesso em: 02 nov 2022.

HUSTRULID, W. A. BULLOCK, R. L. Underground mining methods and applications. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Littleton, Colorado: *Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, 2001.

HUSTRULID, W. A. (ed.). *Underground mining methods handbook*. New York: *Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (AIME)*, 1982.

HUSTRULID, William A. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 1999.

HUSTRULID, William A.; KUCHTA, Mark; MARTIN, Randall K. *Open Pit Mine Planning and Design*. 3. ed. **Boca Raton: CRC Press**, 2013. 2 v.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global Critical Minerals Outlook 2024. *Paris: IEA*, 2024.

INGHAM, P. D.; WHITE, R; JACKSON, S. Greenbushes lithium operations. NI 43-101 Technical Report. *Talison Lithium Limited*, 2012.

JAKUES, D. S. Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais. Dissertação (mestrado) - *Universidade Federal de Viçosa*. Viçosa, MG, 2014.

JASKULA, Brian W. Lithium. In: UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Mineral Commodity Summaries 2026*. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2026. p. 118–119. DOI: 10.3133/mcs2026. Disponível em: [USGS Mineral Commodity Summaries 2026](https://pubs.usgs.gov/commodity/2026/). Acesso em: 25 jun. 2026.

JIMENO, Carlos López; JIMENO, Emilio López; CARCEDO, Francisco Javier Ayala. *Drilling and blasting of rocks*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995. 391 p.

KAVANAGH, L., KEOHANE, J., GARCIA CABELLOS, G., LLOYD, A., CLEARY, J. Global lithium sources - Industrial use and future in the electric vehicle industry: A Review. *Resources* 7 (3), 57, 2018.

KONYA, Calvin J.; WALTER, Edward J. *Surface Blast Design*. **Englewood Cliffs: Prentice Hall**, 1990.

LAGACHE M.; QUÉMÉNEUR J. The Volta Grande pegmatites, Minas Gerais, Brazil: An example of rareelement granitic pegmatites exceptionally enriched in lithium and rubidium. *Canadian Mineralogist*. 35:153- 165, 1997.

LAIO, Mariano; HEIDER, Mathias. Caracterização da indústria extrativa do lítio no Brasil. In: *IV Seminário sobre Lítio-Brasil*, 2024, Rio de Janeiro. Apresentação. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Acesso em: 28 jun. 2026.

LANGFORS, Ulf; KIHLSSTRÖM, Bo. *The Modern Technique of Rock Blasting*. 3. ed. **New York: John Wiley & Sons**, 1978.

LATIN RESOURCES LIMITED. Salinas Lithium Project. Perth: **Latin Resources Limited**, 2024. Disponível em: <https://latinresources.com.au/projects/salinas-lithium-project/>. Acesso em: 28 jun. 2026.

LEO LITHIUM LIMITED. Goulamina Lithium Project: Definitive Feasibility Study. Perth: **Leo Lithium Limited**, 2023. Disponível em: <https://www.leolithium.com/>. Acesso em: 28 jun. 2026.

LIONTOWN RESOURCES LIMITED. Kathleen Valley Lithium Project: Definitive Feasibility Study. West Perth: **Liontown Resources Limited**, 2023. Disponível em: <https://www.liontown.com/project/kathleen-valley/>. Acesso em: 28 jun. 2026.

LONDON, D. Ore-forming processes within granitic pegmatites. **Ore Geology Reviews**, 101, 2018, p. 349–383.

MARTÍNEZ, M.I. Modelação numérica para o dimensionamento de pilares de minas subterrâneas. Dissertação de Mestrado. **UFOP**. 2017.

MARTINS, T.; KREMER, P.; VANSTONE, P. The Tanco mine: geological setting, internal zonation and mineralogy of a world-class rare element pegmatite deposit. In: **Geological Association of Canada-Mineralogical Association of Canada joint Annual Meeting, Manitoba Geological Survey, Open File OF2013-8, 17p**. 2013.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico. *Vale do Litio. Belo Horizonte*: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, 2024. Disponível em: <https://desenvolvimento.mg.gov.br/inicio/projetos/projeto/1170>. Acesso em: 26 jun. 2026.

MILLER-TAIT, L.; PAKALNIS R.; POULIN R. UBC mining method selection. In: **Proceeding of the mine planning and equipment selection symposium**. 1995. p. 163-168.

MINERAL RESOURCES. Mineral resources and ore reserves update. **Mineral Resources Limited**, 2023. Disponível em: < <https://clients3.weblink.com.au/pdf/MIN/02715088.pdf> >. Acesso em: 18 nov. 2023.

NAMIN, F. S.; GHADI, A.; SAKI, F. A literature review of Multi Criteria Decision-Making (MCDM) towards mining method selection (MMS). **Resources Policy**, 77, 2022, 102676.

NEMASKA LITHIUM INC. Whabouchi Mine: Feasibility Study. Québec: **Nemaska Lithium**, 2018.

NICHOLAS, D. E. Method Selection—A Numerical Approach. Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, Chap. Surface Mining, E.P. Pfeider, ed., 1st ed., SME-AIME, New York, 4, D. Stewart, ed., SME-AIME, **New York**, p. 39–53, 1981.

NICHOLAS, D. E. Selection Procedure. SME Mining Engineering Handbook. 2. ed. **Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration**, 1992. p. 2090–2106.

NIETO, A. Key deposit indicators (KDI) and key mining method indicators (KMI) in underground mining method selection. **Transactions of the Society for Mining, Metallurgy & Exploration**, v. 328, p. 381–396, 2010.

NOLAN, T.A.; KECOJEVIC, V. Selection of overburden surface mining method in West Virginia by analytical hierarchy process. **International Journal of Coal Science & Technology**, v. 1, n. 3, p. 306-314, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40789-014-0019-0>.

OLOFSSON, Sven Ove. *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. 2. ed. **Stockholm: Applex**, 1990.

PILBARA MINERALS. Annual Report 2023. **Pilbara Minerals Limited**, 2023. Disponível em: < <https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20230825/pdf/05t1gmnk73q9r0.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2023.

PROSPECT RESOURCES LIMITED. Arcadia Lithium Project: Definitive Feasibility Study. **Perth: Prospect Resources**, 2021.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. **Springer Science+Business Media**, LLC, 2001.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **Int. J. Services Sciences**, 1(1), 83-98, 2018.

SAVANNAH RESOURCES PLC. Barroso Lithium Project: Definitive Feasibility Study. **London: Savannah Resources**, 2023.

SAYONA MINING LIMITED. *NI 43-101 Technical Report: North American Lithium Project*. **Brisbane: Sayona Mining**, 2023.

SHAW, Richard; GOODENOUGH, Kathryn M.; DEADY, Eimear; et al. The magmatic–hydrothermal transition in lithium pegmatites: petrographic and geochemical

characteristics of pegmatites from the Kamativi area, Zimbabwe. *The Canadian Mineralogist*, v. 60, n. 6, p. 1405–1432, 2022. DOI: 10.3749/canmin.2100032.

SIGMA LITHIUM CORPORATION. NI 43-101 Technical Report – Grota do Cirilo Lithium Project. *Vancouver: Sigma Lithium Corporation*, 2024.

SILVA, José Margarida da. *MIN114 – Métodos de lavra subterrânea*. Ouro Preto: Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, *Universidade Federal de Ouro Preto*, 2024.

SOTOUDEH, Farhang; OSMANAGIC, Denisa; et al. *Selection of underground mining method using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment*. *Mining, Metallurgy & Exploration*, v. 37, n. 6, p. 1915–1930, 2020.

STEVANOVIĆ, D.; LEKIĆ, M.; KRZANOVIC, D.; RISTOVIĆ, I. Application of MCDA in selection of different mining methods and solutions. *Advances in Science and Technology Research Journal* 12 (1), 171–180, 2018. <https://doi.org/10.12913/22998624/85804>.

STILLING, A.; ČERNÝ, P.; VANSTONE, P. J. The Tanco pegmatite at bernic lake, manitoba. Xvi. Zonal and bulk compositions and their petrogenetic significance. *The Canadian Mineralogist*, Vol. 44, pp. 599-623, 2006.

SWEETAPPLE, M. T.; GRIGSON, M. W.; TORNATORA, P.; URGINE, S. The archean Mt. Cattlin spodumene pegmatite group and 3d geochemical mapping of large “unzoned” pegmatites of economic significance. *The Canadian Mineralogist*, Vol. 57, pp. 803-805, 2019.

SWEETAPPLE, M. T.; HOLMES, J.; YOUNG, J.; GRIGSON, M. W.; BARNES, L.; TILL, S. The geology and mineralogy of Pilgangoora lithium-tantalum pegmatite deposit. *Australian Ore Deposits*, 2017.

TASOGLU, Gokcececek; SENOL, Mumin Emre; OZFIRAT, Pinar Mizrak; OZFIRAT, Muharrem Kemal. Research in Underground Mining Methods Considering Rock Mechanics, Multi-Criteria Decision Making, Work Safety, and Economic Analysis. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2026. DOI: 10.1007/s42461-026-01565-5

U.S. GEOLOGICAL SURVEY - USGS. Mineral commodity summaries 2021. U.S. *Geological Survey*, 2022.

VILLAESCUSA, Ernesto. *Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping*. **Boca Raton: CRC Press**, 2014. .

WANG, Z.; LI, J.; CHEN, Z.; YAN, Q.; XIONG, X.; LI, P.; DENG, J. Evolution and Li mineralization of the No. 134 pegmatite in the Jiajika rare-metal deposit, western Sichuan, China: constraints from critical minerals. *Minerals*, v. 12, n. 1, art. 45, 2022. DOI: 10.3390/min12010045.

XIE, H.; GAO, F.; JU, Y. Opportunities and Challenges in Deep Mining: A Brief Review. *Engineering*, 2017.

XU, Z. Q.; FU, X.; WANG, R.; *et al.* Generation of lithium-bearing pegmatite deposits within the Songpan-Ganze orogenic belt, East Tibet. *Lithos*, v. 354–355, p. 105281, 2020. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.105281. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105281>. Acesso em: 28 jun. 2026.

YAVUZ, M.; ALPAY, S.A guideline for DSS system for underground mining method selection. In: International Mining Congress and Exhibition Ot Turkey-IMCET 2003, 2003.

YETKIN, M.E.; OZFIRAT, M.K. Open access selection of thick coal seam mining method using analytic hierarchy process. *J. Eng. Technol. Industr. Appl.* 5 (20), 2019. <https://doi.org/10.5935/2447-0228.20190071>.

ZORZAL, Caroline Belisário; SILVA, José Margarida da; JAQUES, Daniel Silva; SANTOS, Rita de Cássia Pedrosa. An overview of lithium mining in Brazil: From artisanal extraction to large-scale production. *Resources Policy*, v. 100, 105440, 2025. DOI: 10.1016/j.resourpol.2024.105440.

Zorzal, C. B. Seleção de métodos de lavra subterrânea para pegmatitos litiníferos. Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. *PPGEM/UFOP*, 2026. No Prelo.