

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de
Minas

LUCAS BURINI LOBO

O SEQUENCIAMENTO VERDE E SEU IMPACTO NO VALOR PRESENTE
LÍQUIDO DAS OPERAÇÕES DE LAVRA

Belo Horizonte
2023

Lucas Burini Lobo

**O SEQUENCIAMENTO VERDE E SEU IMPACTO NO VALOR PRESENTE
LÍQUIDO DAS OPERAÇÕES DE LAVRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral.

Orientador: Alizeibek Saleimen Nader

Belo Horizonte

2023

L799s	<p>Lobo, Lucas Burini. O sequenciamento verde e seu impacto no valor presente líquido das operações de lavra [recurso eletrônico] / Lucas Burini Lobo. – 2023. 1 recurso online (102 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Alizeibek Saleimen Nader.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 100-102.</p> <p>Bibliografia: f. 93-98. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia de minas – Teses. 2. Tecnologia mineral – Teses. 3. Lavra de minas – Teses. 4. Bauxita – Minas e mineração – Brasil – Teses. 5. Alumínio – Teses. 6. Companhias de mineração – Teses. 7. Impacto ambiental – Avaliação – Teses. I. Nader, Alizeibek Saleimen. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 622(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

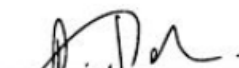
UFMG

O SEQUENCIAMENTO VERDE E SEU IMPACTO NO VALOR PRESENTE LÍQUIDO DAS OPERAÇÕES DE LAVRA

LUCAS BURINI LOBO

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 30 de junho de 2023, pela seguinte banca:



Prof. Dr. Alizeibek Saleimen Nader (UFMG)
Orientador



Documento assinado digitalmente
ROBERTO GALERY
Data: 07/07/2023 09:00:03-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Roberto Galery (UFMG)



Documento assinado digitalmente
MICHEL MELO OLIVEIRA
Data: 07/07/2023 08:09:55-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Michel Melo Oliveira (UFMG)

DEDICATÓRIA

A Deus,
a meus pais Walter e Marta,
a minha querida esposa lully e
a minha amada filha Alice.

AGRADECIMENTOS

Com gratidão, dedico este trabalho a Deus. Devo a Ele tudo o que sou.

Ao professor Alizeibek Nader, pelo incentivo e apoio para participar do programa de mestrado profissional.

Dedico este trabalho de pesquisa ao meu amigo João Paulo, que foi uma fonte de apoio no início do processo. Obrigado por tudo.

Dedico este projeto a todos os profissionais que me influenciaram na minha trajetória. Em especial à Cristiane Corradi, com quem compartilhei minhas dúvidas e angústias a respeito do tema.

Pelo carinho, afeto, dedicação e cuidado que meus pais me deram durante toda a minha existência, dedico esta dissertação a eles. Com muita gratidão.

Dedico este projeto de pesquisa à minha esposa lully Caroline, cuja presença foi essencial para a conclusão deste trabalho. Grato pela sua compreensão com as minhas horas de ausência.

RESUMO

O setor de mineração sempre foi de grande relevância no desenvolvimento social e econômico do país, porém, é uma atividade que sempre ganha destaque negativo com questões ambientais. Após grandes tragédias ambientais em solo brasileiro, como as recentes rupturas de barragens, instalou-se um estado de alerta no país e especialmente em regiões que possuem atividades de mineração em seu entorno. Em reflexo, as empresas vêm buscando soluções que reduzam o impacto ambiental causado por estruturas de resíduos. Uma das soluções é a disposição de estéril em cava. Uma dessas empresas é a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), que possui minas localizadas em várias regiões do país voltada para a extração de bauxita, matéria prima para a produção de alumínio. Em Barro Alto - Goiás, município onde está localizada uma de suas operações de lavra, foi elaborado um projeto que permite a disposição do estéril na cava concomitante com a exploração do minério. Os ganhos na pauta *ESG* (ambientais, sociais e governança) são vistos como extremamente benéficos, e o respaldo de análises econômicas para suportar exequibilidade do projeto se fazem necessários. A análise de investimento de mineração pelo cálculo do valor presente líquido (VPL) é uma das mais comumente usadas na etapa de otimização de mina. Essa metodologia foi utilizada no presente trabalho para avaliar qual o impacto econômico no VPL do empreendimento mineral tendo que estar sujeito à restrição de disposição do estéril em cava. Foi então comparado qual seria o VPL de uma otimização feita sem essa restrição e outra obedecendo a restrição de sequenciamento da disposição do estéril proposta em projeto.

Palavras-chave: Lavra de Bauxita, Sequenciamento Verde, Valor Presente Líquido.

ABSTRACT

The mining sector has always been of great importance in the social and economic development of the country, however, it is an activity that always gains negative prominence with environmental issues. After major environmental tragedies on Brazilian soil, such as the recent dam failures, a state of alert was installed in the country and especially in regions that have mining activities in their surroundings. As a result, companies are looking for solutions that reduce the environmental impact caused by waste structures. One of the solutions is the disposal of waste in the pit. One of these companies is the Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), which has mines located in various regions of the country dedicated to the extraction of bauxite, raw material for the production of aluminum. In Barro Alto - Goiás, where one of its mining operations is located, a project was prepared that allows the disposal of waste in the pit concomitant with the exploitation of the ore. The gains in the ESG agenda (environmental, social and governance) are seen as extremely beneficial, and the support of economic analyzes to support the feasibility of the project is necessary. Mining investment analysis by calculating net present value (NPV) is one of the most commonly used mine optimization steps. This methodology was used in the present work to evaluate the economic impact on the NPV of the mineral enterprise having to be subject to the restriction of waste disposal in the pit. It was then compared what would be the NPV of an optimization made without this restriction and another obeying the sequencing restriction of the waste disposal proposed in that project.

Keywords: Bauxite Mining, Green Scheduling, Net Present Value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das minas de bauxita no Brasil.	16
Figura 2 - Sequência de corte com escavadeira ao iniciar a bancada em um terreno montanhoso.	19
Figura 3 - Mina de ouro em Kalgoorlie, Austrália.	20
Figura 4 - Operações unitárias simultâneas em mina à céu aberto.	21
Figura 5 - Configuração de lavra em tiras.	23
Figura 6 - Mina de carvão em operação.	24
Figura 7 - Vista esquemática de uma matriz de bloco 3-D.	26
Figura 8 - Síntese para definição dos limites de lavra.	27
Figura 9 - Relação entre resultados de exploração, recursos e reservas.	29
Figura 10 - Cone inicial sendo extraído.	40
Figura 11 - Extração do bloco de valor +4.	41
Figura 12 - Retirada do terceiro cone.	41
Figura 13 - Quarto cone incremental não extraído.	42
Figura 14 - Desenho final por cones flutuantes.	42
Figura 15 - Geometria do corpo mineral.	44
Figura 16 - Modelo de blocos inicial valorizado economicamente.	45
Figura 17 - Modelo de blocos econômico final.	45
Figura 18 - Soma cumulativa por colunas.	46
Figura 19 - Procedimento para definir o máximo valor cumulativo e maximizar a direção.	47
Figura 20 - Progressão do processo de soma até a coluna 7.	48
Figura 21 - O processo de soma se estende para toda a seção.	48
Figura 22 - Determinação da cava ótima.	49
Figura 23 - Limite otimizado superposto ao modelo de blocos.	49
Figura 24 - (a) Cenário com pior NPV; (b) Cenário com melhor NPV.	50
Figura 25 - Pushback convencional e sequencial.	51
Figura 26 - Ilustração da fase de lançamento do método descendente.	56
Figura 27 - Ilustração da fase de lançamento do método descendente.	57
Figura 28 - Sequência de lavra em Ouéléba, Simandou, ao início das atividades de lavra.	61
Figura 29 - Sequência de lavra em Ouéléba, Simandou, no meio da vida da mina.	62
Figura 30 - Sequência de lavra em Ouéléba, ao final das atividades de lavra.	62
Figura 31 - Google Trends: Busca pelo termo ESG no mundo.*	64
Figura 32- Localização da mina de bauxita da CBA.	66
Figura 33- Direito minerário do Depósito Barro Alto (861.979/2005).	67
Figura 34 - Operações de lavra na mina de Barro Alto.	70
Figura 35 - Fases do projeto de disposição de estéril em cava.	72
Figura 36 - Situação atual da pilha de estéril na região sul do direito minerário.	73
Figura 37 - Localização das amostras utilizadas na estimativa de recursos. ...	75
Figura 38 - Representação do ângulo geral de talude.	77
Figura 39 - Resumo do processo da bauxita na CBA.	78
Figura 40 - Cava de bauxita e disposição de estéril projetadas dentro da área licenciada.	81

Figura 41 - Cava de bauxita e disposição de estéril finais projetadas.....	81
Figura 42 - Cava final divulgada no relatório JORC importada.	82
Figura 43 - Importação da cava final no software NPV Scheduler.	83
Figura 44 - Exemplo de checagem dos valores econômicos no NPV Scheduler.	84
Figura 45 - Definição da taxa de retorno no software NPV Scheduler.	84
Figura 46 - Configuração do objetivo primário no software NPV Scheduler.....	85
Figura 47 - Gráfico da taxa de produção anual de bauxita em cada cenário. ..	86
Figura 48 – Gráfico de teores de alumina aproveitável e sílica reativa nos dois cenários.....	87
Figura 49 - Gráfico com a geração de estéril e relação estéril/minério anuais. 88	
Figura 50 - Gráfico do VPL acumulado em cada cenário.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custos comumente usados na mineração.	33
Tabela 2 - Cálculo das somas cumulativas para a coluna 6.	46
Tabela 3 - Casos de disposição de estéril/rejeitos em cava.....	59
Tabela 4 - Declaração de Recursos Minerais, de 31 de dezembro de 2020....	76
Tabela 5 - Declaração de Reserva de Minério, de 31 de dezembro de 2020. .	80
Tabela 6 - Plano de produção do Cenário 2.....	90

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. Relevância da bauxita	16
3.2. Bauxita	17
3.3. Lavra de bauxita	18
3.3.1. Lavra em cava.....	18
3.3.2. Lavra em tiras	22
3.4. Planejamento de lavra.....	25
3.4.1. Recursos minerais e reservas de minério	28
3.4.2. Otimização de cava.....	31
3.4.2.1. Custos aplicados.....	32
3.4.2.2. Função benefício	34
3.4.2.3. Valor presente líquido	36
3.4.2.4. A técnica dos cones flutuantes	40
3.4.2.5. O algoritmo de Lerchs e Grossmann	43
3.4.2.5.1. O algoritmo de Lerchs e Grossmann em 2D	44
3.4.3. Sequenciamento de lavra.....	50
3.5. Disposição de estéril	54
3.5.1. Método descendente.....	55
3.5.2. Método ascendente.....	56
3.5.3. Disposição de estéril em cava.....	58
3.5.4. Planejamento de mina na disposição de rejeito em cava.....	60
3.6. Práticas ESG	63

4. VISÃO GERAL DO PROJETO	65
4.1. Companhia Brasileira de Alumínio	65
4.2. Localização do projeto.....	66
4.3. Direitos minerários.....	67
4.4. Geologia regional	68
4.5. Geologia local.....	68
4.6. Método de lavra.....	69
4.7. Pilha de estéril	71
5. MATERIAIS E MÉTODOS	74
5.1. O banco de dados	74
5.1.1. Classificação	75
5.2. Otimização de cava	77
5.2.1. Premissas	77
5.2.2. Construção da função benefício.....	78
5.2.3. Resultados da otimização	79
5.3. Sequenciamento de lavra	80
6. RESULTADOS	86
7. CONCLUSÕES.....	91
8. RECOMENDAÇÕES DE CONTINUIDADE DA PESQUISA	92
REFERÊNCIAS.....	93
ANEXOS	99

1. INTRODUÇÃO

O debate sobre formas sustentáveis de disposição de estéril vem se tornando cada vez mais comum nos últimos anos. Após rompimentos recentes de barragens no Brasil, o setor de mineração tem concentrado os investimentos na busca de melhores práticas de destino do estéril e rejeito gerado pela produção mineral para evitar o uso de estruturas que oferecem riscos geotécnicos e ambientais.

De acordo com Davies (2001) o rompimento de barragens e pilhas de estéril podem causar interrupção prolongada da produção, danos ao meio ambiente, punições econômicas e perda de vidas. Portanto, fomentar a pesquisa para o aproveitamento sustentável de estéreis e rejeitos é crucial para o futuro da mineração.

Segundo Curi (2014) se deve procurar dispor o estéril e/ou o rejeito o mais próximo possível para diminuir a distância média de transporte e, preferencialmente, em áreas já degradadas, como em cavas já exauridas, reduzindo o impacto ambiental do empreendimento. Entender os aspectos da lavra de bauxita é fundamental para embasar um método de disposição de estéril que possa estar integrado com a operação de lavra e o sequenciamento de mina.

Os benefícios obtidos através do uso de técnicas inovadoras de aproveitamento sustentável desses materiais vão além dos ganhos à própria empresa, eles permeiam toda cadeia produtiva e a região onde o empreendimento está localizado. O potencial de impacto positivo desse trabalho pode gerar robustez operacional e corporativa para o projeto de disposição de estéril na cava das operações em Barro Alto, Goiás.

Lage (2001) cita algumas vantagens da disposição de rejeitos e estéreis dentro da cava como: controle de geração de drenagem ácida, prevenção de acidentes com barragens (que deixaram de ser construídas), estabilização das paredes da cava, redução na lixiviação de metais pesados e redução de custos com manutenção da estrutura de contenção do resíduo, pois a cava é mais

estável do que uma barragem ou pilha. Porém, deve-se ter em mente que nem todas as cavas estarão aptas a receber resíduos, elas precisam ser analisadas caso a caso.

Whittle (2011) cita que o objetivo principal de um projeto de mineração é a maximização do VPL. Isto é o um objetivo que deve ser alcançado, sujeito apenas às restrições dos objetivos secundários. A busca do objetivo principal é de otimização, e apenas o máximo possível valor será satisfatório. Os objetivos secundários devem ser tratados como restrições.

Na estrutura matemática para otimização, só é possível ter um objetivo (ser minimizado ou maximizado). No entanto, nos negócios, não é incomum nomear múltiplos objetivos. Para empregar lucrativamente as estruturas matemáticas para otimização no planejamento de mina a céu aberto, um dos objetivos deve ser nomeado como o principal (por exemplo, maximizar o VPL) e todos os outros objetivos devem ser tratados como restrições. As restrições são especificadas por mínimos ou máximos (ou ambos) e agem para limitar ou modificar a busca do objetivo primário (Whittle, 2011).

2. OBJETIVOS

O trabalho busca atender a demanda atual da empresa, que precisa encontrar formas viáveis para dispor o estéril em cavas que estão em operação e, conseqüentemente, extinguir a necessidade de aquisição de novas áreas para disposição de estéril. A tendência crescente do setor mineral em adotar esse tipo de tecnologia, corrobora para o impacto da pesquisa.

Como objetivos específicos, destaco:

- Realizar uma avaliação econômica através do VPL sobre o impacto da disposição de estéril em cava no sequenciamento de mina;
- Comparar os cenários para verificar qual conseguiu atingir o melhor ganho financeiro;
- Fazer uma análise dos cenários produzidos e verificar as melhores estratégias para garantia de sua execução.

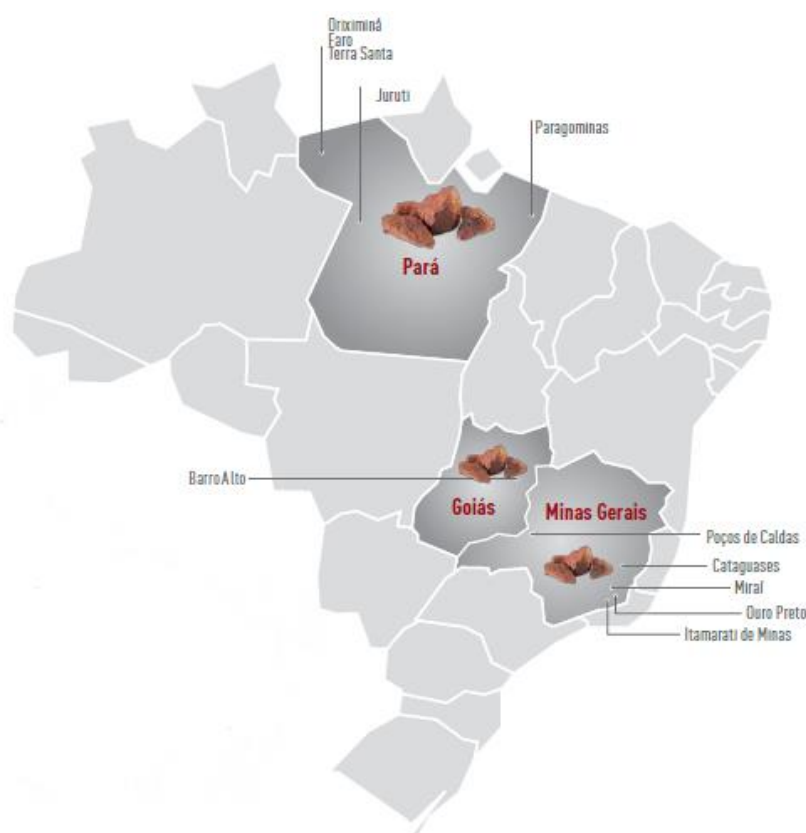
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Relevância da bauxita

A bauxita é o primeiro elo da cadeia produtiva da indústria de alumínio. Ela é a base para a verticalização das atividades industriais de produção de alumina, alumínio e produtos semimanufaturados e acabados.

Segundo a Associação Brasileira de Alumínio (ABAL), em relatório publicado no ano de 2017, em 2015 a bauxita ocupou a terceira posição de recursos naturais em volume produzido no Brasil, com cerca de 37 milhões de toneladas anuais, atrás dos agregados para construção civil (areia, brita, cascalho e cimento), com cerca de 772 milhões, e do minério de ferro, com 411 milhões de toneladas anuais. O mapa da Figura 1 apresenta a localização das minas no Brasil.

Figura 1 - Localização das minas de bauxita no Brasil.



Fonte: Associação Brasileira de Alumínio (ABAL), 2017.

O estudo mostra que o estado do Pará concentra 91% da produção de bauxita para fins de uso metálico no Brasil. A Mineração Rio do Norte (MRN), Mineração Paragominas S.A. (Hydro), Alcoa e a CBA são as principais mineradoras de bauxita.

No panorama global, a produção brasileira de bauxita em 2015 ocupa o terceiro lugar, atrás da Austrália com cerca de 81 milhões de toneladas anuais e a China, com 65 milhões. Logo atrás do Brasil, estão Guiné e Índia com 27,6 e 24,2 milhões de toneladas anuais. Especialistas avaliam que as reservas mundiais conhecidas de bauxita estão em torno de 70 bilhões de toneladas.

3.2. Bauxita

A bauxita é um material heterogêneo composto por um ou mais minerais de óxido de alumínio hidratado, além de conteúdos variáveis de sílica, óxidos de ferro hidratados, óxido de titânio e alumossilicatos, especialmente argilas, além de eventuais impurezas. O principal mineral de alumínio encontrado varia de proporção entre bauxitas e pode ser gibbsita ou polimorfos de boehmita e diásporo (Van Deursen, 2017).

São reconhecidos três tipos de bauxitas: bauxita de karst, bauxita sedimentar e bauxita laterítica. Esta última, que são depósitos derivados de rochas alumino-silicatadas, é a mais abundante, totalizando cerca de 85% dos depósitos, e é o único tipo de bauxita que ocorre no Brasil (Carvalho, 1989). Biondi (2016) explica que o desenvolvimento de um perfil laterítico completo desse tipo de bauxita depende da continuidade de processos superficiais de lixiviação, trocas químicas e precipitação, durante milhões de anos. Raramente os depósitos lavrados têm teores médios menores que 35% de Al_2O_3 , sendo que os melhores têm teores médios acima de 55%.

3.3. Lavra de bauxita

Os métodos de lavra empregados aos minérios bauxíticos variam conforme a natureza dos corpos mineralizados existentes nas jazidas. A maior parte das jazidas é lavrada a céu aberto por meio do método de lavra em tiras ou strip mining. Das bauxitas lateríticas estima-se que maior parte delas sejam lavradas a céu aberto e que apenas 20% da produção mundial de bauxita sejam efetuadas subterraneamente (Sampaio, 2008).

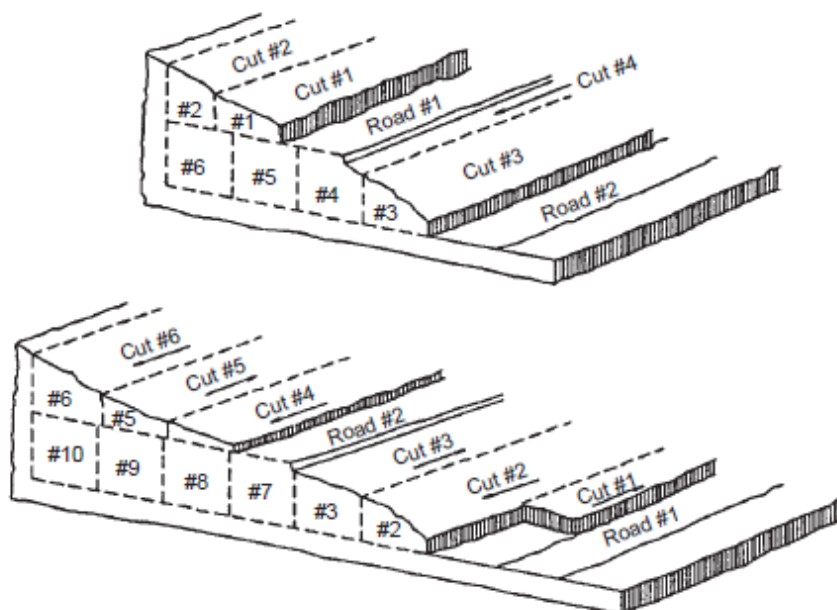
A área de mineração de bauxita é coberta pela vegetação típica do bioma onde está localizada e do solo orgânico. Logo abaixo, encontra-se o que se denomina de estéreis, que são minérios com pouco ou nenhum mineral útil, ou acompanhantes de minério, que não têm aplicação econômica.

Essa camada pode ter cerca de 20 cm, como no caso do planalto de Poços de Caldas (MG) ou até cerca de 8 metros em média, como ocorre em algumas lavras no estado do Pará. A espessura do corpo do minério também é variável, dependendo da formação geológica. A camada de bauxita abaixo dos estéreis é então removida com o uso de equipamentos pesados para ser carregada em vagões, caminhões ou correias alimentadoras, para serem processadas nas plantas de moagem e lavagem.

3.3.1. Lavra em cava

Nesse método de lavra, o *top soil* (material de cobertura) do depósito é retirado e armazenado em alguma área reservada para esse propósito. Assim que o minério é exposto, a lavra se dá na forma de bancada, que pode ter dimensões que variam de acordo com o porte dos equipamentos e a geotecnia da mina. É um método que apresenta grande recuperação e pouca diluição na lavra. Sua produtividade é bastante elevada e permite a utilização de equipamentos de grande porte (Peroni, 2008). A Figura 2 mostra como é feita a exploração do depósito pelo desenvolvimento de bancadas.

Figura 2 - Sequência de corte com escavadeira ao iniciar a bancada em um terreno montanhoso.



Fonte: Nichols, 1956.

A utilização da lavra por bancadas é condicionada pelas características geológicas, espaciais e estruturais do depósito mineral. Frequentemente o método é aplicado a grandes depósitos, mesmo com baixos teores, buscando-se atingir baixos custos em função do efeito escala, ou seja, altas taxas de produção associadas ao uso de equipamentos de grande porte. Atendidos esse pré-requisitos, os depósitos podem ter inclusive, teor de minério muito baixo e maciço rochoso pouco resistente e mesmo assim serem adequados à lavra por esse método. Convém que o depósito se situe a profundidades razoáveis que não ultrapassem os limites econômicos estabelecidos pela relação estéril/minério e os limites tecnológicos impostos aos equipamentos selecionados para a lavra (Curi, 2017).

Um exemplo onde se utiliza esse método de lavra é o depósito de ouro em Kalgoorlie, na Austrália Ocidental. A Figura 3 mostra uma imagem de um dos pits da mina.

Figura 3 - Mina de ouro em Kalgoorlie, Austrália.



Fonte: Acervo pessoal do autor, 2019.

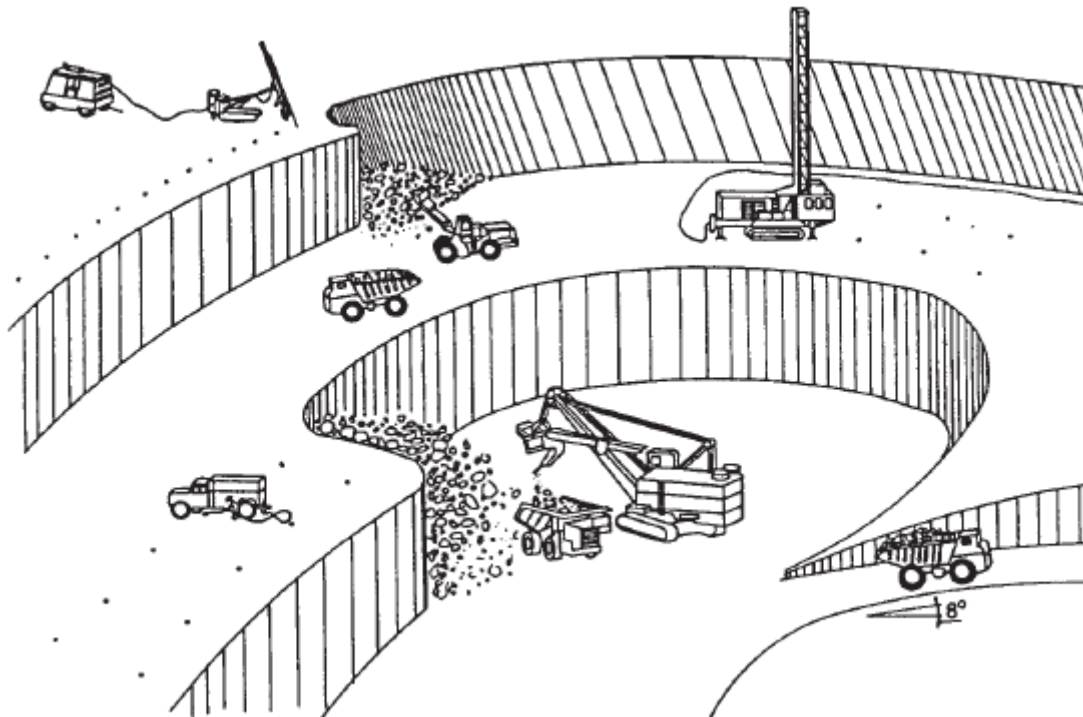
Na mineração, as operações unitárias (Figura 4) podem ser definidas como as etapas básicas necessárias para a produção de material economicamente viável a partir de um depósito e as operações auxiliares usadas para dar suporte à produção (Hartman e Mutmansky, 2002). Operações auxiliares e outras atividades relacionadas à produção incluem estéril e remoção de solo superficial, serviços de minas, monitoramento e manutenção de equipamentos. De acordo com Curi (2017), as operações unitárias em um ciclo de produção a céu aberto incluem:

- *Perfuração e detonação* (quando aplicável): o uso de grandes diâmetros reduz substancialmente o custo de perfuração, devido ao crescimento da vida útil das brocas, ao aumento da malha de perfuração (menor número de furos) e ao menor consumo de explosivos;
- *Escavação e carregamento* (capacidade, fator de enchimento, produtividade etc.): escavadeiras elétricas, escavadeiras hidráulicas, escavadeiras a cabo, escavadeiras de arrasto, carregadoras sobre pneus,

retroescavadeiras, carregadeiras frontais, *draglines* e *scraper* (minério argilosos);

- *Transporte*: caminhões, caminhões fora de estrada, correias transportadoras e ferrovias.

Figura 4 - Operações unitárias simultâneas em mina à céu aberto.



Fonte: Tamrock, 1978.

Um aspecto importante que se deve levar em consideração numa cava à céu aberto é a condição do maciço rochoso. Ele não afeta apenas o layout e a geometria da cava, mas também as práticas de detonação e, em menor grau, a seleção do equipamento de lavra e o layout do circuito de cominuição (Wyllie e Mah, 2004). Mais importante ainda, os parâmetros do maciço rochoso determinam diretamente a maior inclinação possível e o ângulo da face, mantendo um fator de segurança aceitável, tendo assim uma grande influência na lucratividade de uma operação.

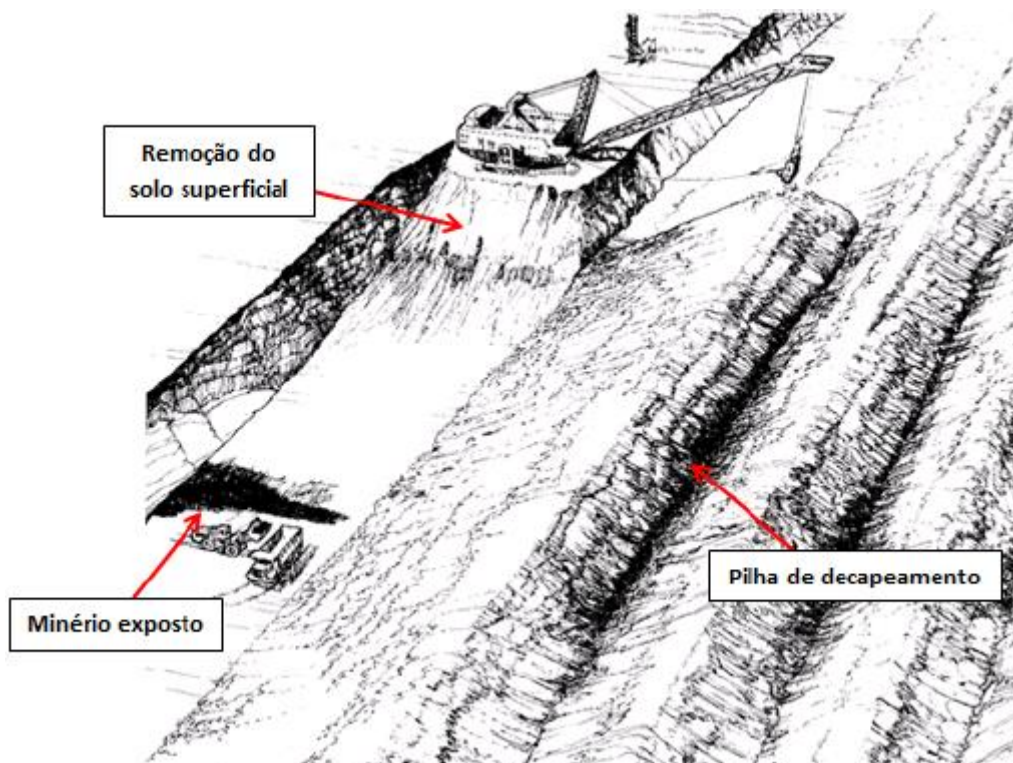
3.3.2. Lavra em tiras

A metodologia de lavra é similar à lavra por bancos, exceto por um único e crucial aspecto: o estéril não é transportado para ser depositado em pilhas, mas sim lançado diretamente em áreas adjacentes já lavradas, favorecendo o processo de reabilitação, que poderá iniciar-se imediatamente após a lavra. É utilizado em corpos minerais de forma acamada ou tabular, que se encontram dispostos horizontalmente ou sub-horizontalmente, próximos ao nível da superfície, de forma que a remoção do solo superficial e da cobertura expõe o minério (Curi, 2017).

Após a remoção da cobertura, que é escavada na forma de blocos retangulares (tiras), o corpo mineral é extraído. Essas tiras são paralelas e adjacentes, sendo retiradas sequencialmente por equipamentos e depositadas na tira lavrada no momento anterior. A Figura 5 representa a o método de lavra em tiras. O preenchimento das tiras mineradas com a cobertura removida é sistêmico e garante a recuperação da área minerada, reduzindo impactos ambientais e custos de movimentação de estéril. Todavia, diferentemente da lavra em cava, geralmente o mesmo equipamento utilizado na retirada da cobertura não pode ser utilizado para a retirada do minério, o que acarreta maiores gastos com investimento em máquinas (De Carli, 2016).

Segundo Hartman (1987), para viabilizar a aplicação do método, que utiliza os maiores equipamentos de toda a mineração e exige, conseqüentemente, altos investimentos iniciais, o depósito deve ter grande extensão lateral, continuidade e uniformidade. Uma vez atendidos tais pré-requisitos, a qualidade do minério não precisa ser necessariamente boa; ele pode ter até um teor muito baixo, desde que esteja a uma profundidade razoável que não ultrapasse os limites econômicos determinados pela relação estéril/minério máxima admissível e as limitações tecnológicas operacionais, impostas para o uso racional dos equipamentos, principalmente os de carga e transporte.

Figura 5 - Configuração de lavra em tiras.



Fonte: Hartman e Mutmanky, 2002, adaptado por De Carli, 2016.

Dyer e Hill (2011) definem que o processo de lavra em tiras desde os primeiros trabalhos até o fechamento final pode ser descrito genericamente nas seguintes etapas:

1. Limpeza e remoção do solo superficial: em virtude da importância da reabilitação ambiental no método, atenção especial deve ser dada à localização e à preservação das pilhas de solo vegetal;
2. Fragmentação: a competência da rocha influenciará na seleção dos equipamentos de escavação;
3. Remoção de estéril e colocação de estéril: incluindo restauração do solo e inicial revegetação;
4. Exploração do minério: os estoques de minério, oficinas, planta de beneficiamento e instalações de transporte devem ser localizados estrategicamente, numa posição próxima ao centro de massa da jazida;
5. Restauração, manutenção e eventual fechamento da mina.

A Figura 6 nos mostra as particularidades desse método de lavra. Devido a metodologia altamente cíclica e repetitiva da lavra por tiras, especialmente em depósitos extensos e tabulares, o planejamento não precisa ser tão elaborado quanto na lavra por bancadas.

Figura 6 - Mina de carvão em operação.



Fonte: Dyer e Hill, 2011.

A escolha desse método também está ligada à espessura do capeamento, e a seleção do equipamento de decapeamento é a decisão mais relevante a ser tomada. Considerando os sistemas de decapeamento de escavação mais populares de grande escala, um dos três tipos de equipamento de escavação mais populares tem que ser escolhido: *dragline*, escavadeira convencional ou escavadeira de rodas, provavelmente nessa ordem de preferência. O emprego dos maiores equipamentos da mineração em operação conjugada de escavação e transporte e manipulados por uma mão de obra pequena e altamente especializada faz com que se atinjam as maiores taxas de produção por empregado/frente de lavra/turno de toda a mineração (Curi, 2017).

3.4. Planejamento de lavra

A representação de corpos de minério por meio de modelos de blocos possibilitou uma revolução em termos de planejamento de lavra. Essa metodologia tornou-se notadamente uma das melhores formas para avaliar a quantidade e a qualidade dos parâmetros de interesse. Kim (1978) define que o modelo de blocos discretiza o corpo mineral em um conjunto de pequenos blocos conceituais contendo informações que serão utilizadas para a elaboração de planos de curto, médio e longo prazo.

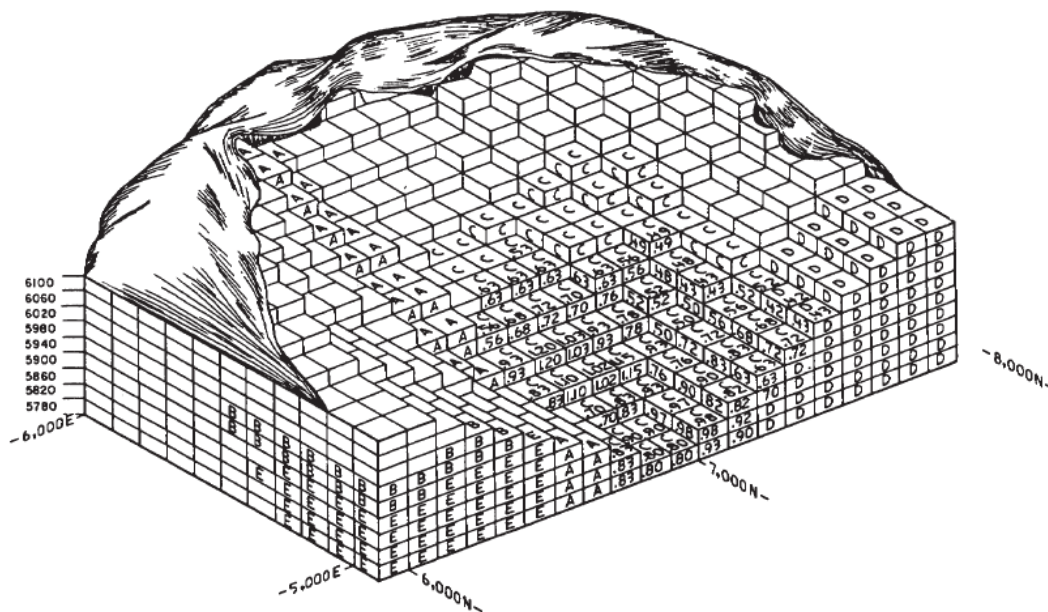
Saydam & Yalcin (2002, *apud* Peroni, 2002) comentam que a prática atual de planejamento de lavra começa com o modelo de blocos e envolve a determinação de:

- i. decisão se um bloco do modelo deve ser minerado ou não;
- ii. se for minerado quando será minerado;
- iii. uma vez minerado então quando deverá ser enviado ao processo.

Segundo Gama (1986), o conceito de bloco tridimensional, apresentado na Figura 7, tem sido essencial para o tratamento computacional, visto que constitui, simultaneamente, uma unidade de informação e um volume a ser escavado (que possui teor, valor econômico e posição espacial bem definida na jazida), permitindo uma conceituação apropriada à seleção da alternativa mais lucrativa para a mineração.

Hustrulid *et al* (2013) defende que a altura do bloco é muitas vezes a da bancada que será usada na lavra. Além disso a localização dos blocos depende de vários fatores. Por exemplo, uma elevação chave pode ser baseada em contato de minério com o estéril, a interface entre os tipos de mineralização (óxidos-sulfetos), zonas de alto teor-baixo teor etc.

Figura 7 - Vista esquemática de uma matriz de bloco 3-D.



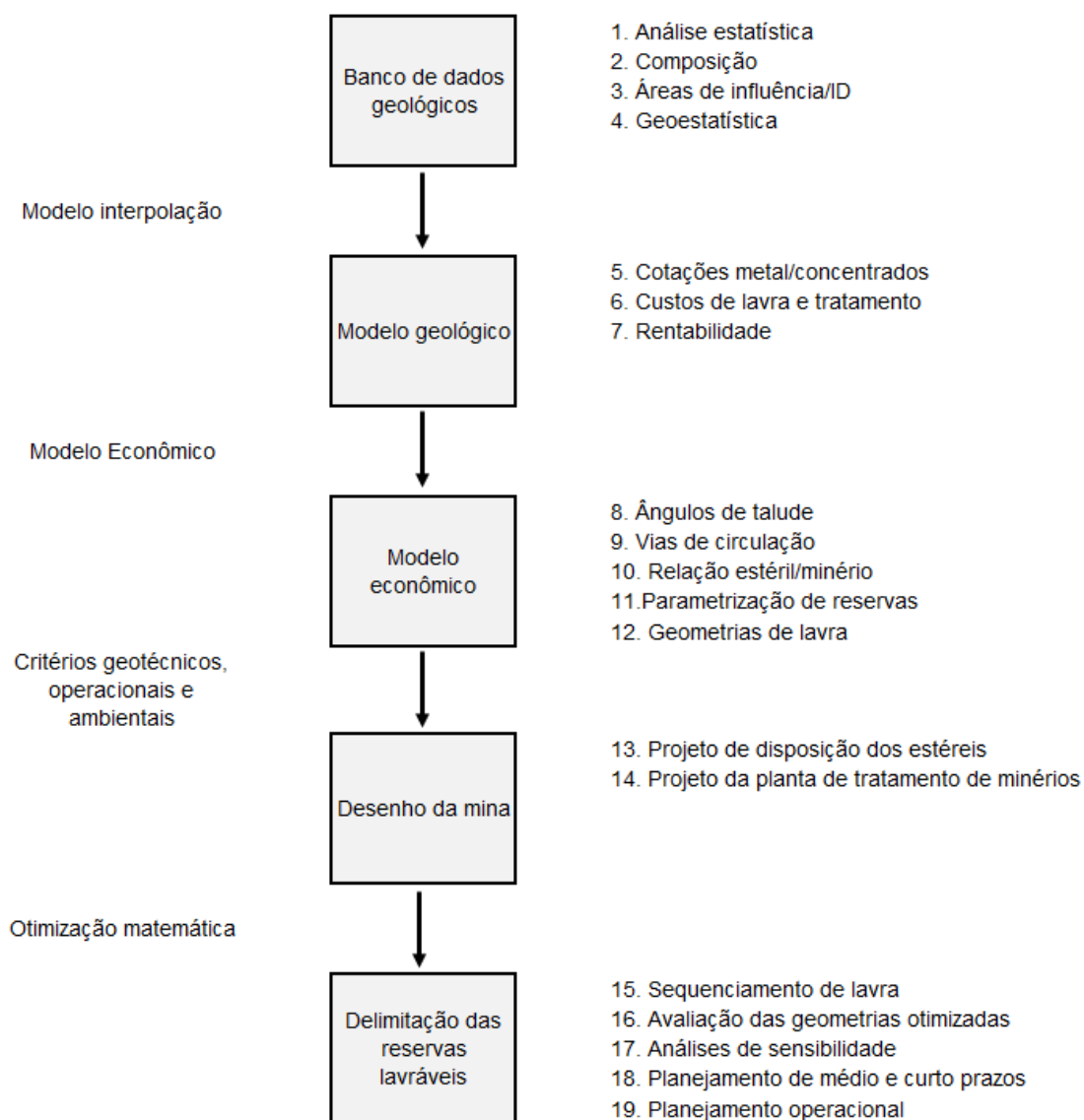
Fonte: Crawford e Davey, 1979.

De acordo com Curi (2017), normalmente, quatro tipos básicos de arquivos são requeridos para criar um modelo de blocos a ser usado pelos modelos matemáticos específicos para o planejamento de lavra de minas:

- i. *o arquivo de furos de sondagem* contendo as informações das coordenadas das bocas dos furos, referenciadas a uma origem no sistema cartesiano tridimensional, a direção e inclinação dos furos e a descrição dos testemunhos de sondagem, incluindo resultados analíticos;
- ii. *o arquivo de composição* também com as coordenadas referenciadas dos compósitos e os valores regularizados dos resultados analíticos. Esse arquivo é sempre criado com base nos dados do arquivo de furos de sondagem;
- iii. *o arquivo modelo de blocos vazio*. Para definir todo o domínio ou amplitude da jazida, é necessário determinar um bloco retangular grande o suficiente para conter todo o domínio ou volume do depósito mineral a ser estudado;
- iv. *arquivo de superfície topográfica*.

As informações contidas nos modelos de blocos serão usadas para estabelecer os limites da lavra, ou seja, para delimitar a porção lavrável do corpo mineral. O esquema de etapas desse processo pode ser observado na Figura 8. O modelo de blocos é, portanto, a base para a grande maioria dos projetos de cava desenvolvidos por computador.

Figura 8 - Síntese para definição dos limites de lavra.



Fonte: Curi, 2014.

Após a definição dos limites de cava é realizado a operacionalização do pit final e seus *pushbacks* seguindo critérios estratégicos e operacionais do empreendimento. Estudos de geotecnia, acessos e porte de equipamentos se fazem necessários para a conclusão dessa etapa.

Ao final, a sequência ótima de produção da mina é usada como base para implementação de uma estratégia para o melhor aproveitamento econômico do depósito considerando todas as restrições inerentes ao projeto. Elas são determinadas pelas características geológicas do depósito, condições de lavra e tecnologias de processamento, além dos parâmetros econômicos. Conclui-se que o sequenciamento irá refletir as condições de exploração do minério ao longo da vida útil da mina.

3.4.1. Recursos minerais e reservas de minério

A conceituação de recursos e reservas minerais tem um papel importante no mercado de mineração para aumentar a confiabilidade dos dados gerados pelas modelagens e estimativas oriundas de campanhas de exploração geológica. Instituiu-se modelos de certificações internacionais que se reporta verificações cuidadosas de todos os dados de geologia, resultados de análise, pesquisa mineral, planos de lavra, estudos técnicos/econômicos, sequenciamento da produção etc., que culminam com a definição de recursos e reservas.

Existem guias internacionais adotados na indústria de mineração, por exemplo, o código JORC (2012) e o CBRR (2016), que são utilizados para a declaração de recursos e reservas. De acordo com estes documentos, o cálculo dos recursos minerais deve considerar os seguintes fatores: confiança relativa nas estimativas de teor/tonelagem, confiabilidade dos dados de entrada, confiança na continuidade geológica, valores dos metais, qualidade, quantidade e distribuição dos dados. Adicionalmente, os resultados devem refletir apropriadamente a visão do *Qualified Person / Competent Person* sobre o depósito mineral.

As classificações de recurso mineral seguem uma ordem crescente de grau de certeza com 3 níveis, sendo elas:

- i. *Inferido*. As estimativas são baseadas em evidências geológicas e continuidade assumida em que há menos confiança do que para recursos medidos e/ou indicados. Os recursos inferidos podem ou não ser suportados por amostras ou medições, mas a inferência deve ser suportada por dados geocientíficos razoáveis (geológicos, geoquímicos, geofísicos ou outros).
- ii. *Indicado*. Quantidade e teor e/ou qualidade são calculados a partir de informações semelhantes àsquelas usadas para recursos medidos, mas os locais para inspeção, amostragem e medições estão mais distantes ou menos adequadamente espaçados. O grau de garantia, embora inferior ao dos recursos medidos, é alto o suficiente para assumir a continuidade geológica entre os pontos de observação.
- iii. *Medido*. A quantidade é calculada a partir das dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras, trabalhos ou furos de sondagem; grau e/ou qualidade são calculados a partir do resultado da amostragem detalhada. Os locais para inspeção, amostragem e medição são espaçados tão próximos e o caráter geológico é tão bem definido que tamanho, forma, profundidade e conteúdo mineral dos recursos estão bem estabelecidos.

Uma reserva mineral é a parte economicamente lavrável de um recurso mineral medido e/ou indicado. Isso inclui diluição e perdas que podem ocorrer quando o material é lavrado ou extraído e é definido apropriadamente pelos estudos nos níveis de pré-viabilidade ou de viabilidade que incluem a aplicação de fatores modificadores. Tais estudos demonstram que, no momento da declaração, sua extração pode ser adequadamente justificada (CBRR, 2016).

Hustrulid *et al* (2013) explica que o termo “reserva” não implica que todas as licenças necessárias para mineração e processamento tenham sido obtidas ou que outras questões legais tenham sido completamente resolvidas. No entanto, para que exista uma reserva, não deve haver nenhuma incerteza

significativa quanto à emissão dessas licenças ou resolução de questões legais. As reservas referem-se aos recursos da seguinte forma:

- i. *Reserva provada*. A parte de um recurso medido que satisfaz as condições para ser classificada como reserva.
- ii. *Reserva provável*. A parte de um recurso indicado que satisfaz as condições para ser classificada como reserva e, em algumas circunstâncias, de um recurso mineral medido.

3.4.2. Otimização de cava

Segundo Souza (2016), a metodologia de planejamento de lavra adotada pela indústria como padrão considera o algoritmo de determinação dos limites da cava final proposto por Lerchs-Grossmann. Para definição da programação da produção, são realizadas duas etapas diferentes:

- i. Determinação do limite final de lavra;
- ii. Utilização do limite final de lavra definido como fronteira para o sequenciamento de produção.

O algoritmo de otimização busca uma cava que possa resultar máxima lucratividade, maior valor presente líquido e maior aproveitamento dos recursos minerais. Outro método que ganhou popularidade e consequente implementação computacional foram a técnica dos cones flutuantes (Pana & Carlson, 1966; David et al., 1974; Lemieux, 1979).

Wang & Sevim (1995, apud Peroni, 2002) expõe que invariavelmente esses algoritmos contam com modelos de blocos e para cada bloco é atribuído um valor monetário líquido (de ganho ou de perda). Desde que o valor do bloco seja uma função do preço do minério e dos custos de processo, a cava projetada com esse conjunto de valores fixos, tornar-se-á obsoleto com o passar do tempo, quando os preços ou os custos sofrerem mudanças. Para acomodar as mudanças nos valores dos blocos, a “análise dos limites da cava” tem sido praticada. Nessa análise, os parâmetros econômicos são sistematicamente modificados, um de cada vez, e uma cava é projetada após cada mudança. A

saída da análise de projeto é uma série de cavas na qual cada cava possui seu próprio potencial de ser minerada sob condições econômicas específicas. De fato, a análise de projetos de cava nada mais é do que uma parametrização respeitando os parâmetros econômicos.

Invariavelmente esses algoritmos contam com modelos de blocos e para cada bloco é atribuído um valor monetário líquido (de ganho ou de perda). Desde que o valor do bloco seja uma função do preço do minério e dos custos de processo, a cava projetada com esse conjunto de valores fixos, tornar-se-á obsoleto com o passar do tempo, quando os preços ou os custos sofrerem mudanças. Para acomodar as mudanças nos valores dos blocos, a “análise dos limites da cava” tem sido praticada. Nessa análise, os parâmetros econômicos são sistematicamente modificados, um de cada vez, e uma cava é projetada após cada mudança. A saída da análise de projeto é uma série de cavas na qual cada cava possui seu próprio potencial de ser minerada sob condições econômicas específicas. De fato, a análise de projetos de cava nada mais é do que uma parametrização respeitando os parâmetros econômicos (De Carli, 2013).

3.4.2.1. Custos aplicados

De acordo com Whittle (2011), para realizar a otimização, o impacto das variáveis de decisão sobre receitas e custos devem ser incorporados ao modelo. As receitas são fluxos de caixa positivos e estão associadas à saída do produto. Os custos são fluxos de caixa negativos e devem ser associados às atividades de forma que uma mudança nas decisões tomadas no modelo de otimização seja refletida em uma mudança apropriada nos custos.

As seguintes definições básicas de modelagem são necessárias para conduzir a modelagem de custos de forma eficaz:

1. *Custos de capital*: são os custos incorridos uma vez para construir ou desbloquear a capacidade produtiva. Por exemplo, o custo de construção de uma planta de processamento adicional;

2. *Custos variáveis*: São custos que variam proporcionalmente às atividades como mineração, beneficiamento e expedição do produto acabado. Há um conjunto geralmente aceito de categorias usadas no planejamento de mina a céu aberto para custos variáveis, e elas são descritas na Tabela 1;
3. *Custos fixos*: São custos incorridos regularmente (periodicamente) e associados à manutenção de um nível de capacidade produtiva;
4. *Custos terminais*: São os custos incorridos na cessação das operações normais de mineração (normalmente custos de fechamento e reabilitação da mina).

As categorias na Tabela 1 são tudo o que é necessário para construir um modelo de custo completo para a otimização do plano de mina.

Tabela 1 - Custos comumente usados na mineração.

Tipo de Custo	Descrição e Aplicação
Custos de Mina	Esta categoria é aplicada a todo o material extraído como um valor em reais por unidade de massa (por exemplo, reais por tonelada) ou volume (por exemplo, reais por metro cúbico). Pode haver diferentes custos de mineração para diferentes áreas na mina, e o custo pode variar de acordo com a profundidade, distância da borda da cava ou tipo de rocha.
	O custo de mineração inclui perfuração, detonação, carregamento e basculamento de material.
	Esta categoria de custo deve ser aplicada a qualquer custo que varie com a quantidade de material extraído, incluindo a reabilitação contínua de áreas de mineração.
Custos de Processamento	Caso o minério custe mais para minerar do que o estéril (por exemplo, porque requer controle de teor e perfuração mais próxima), a diferença deve ser incluída no custo de processamento.
	Esta categoria é aplicada ao material processado. O custo de processamento é aplicado como uma quantia em reais por unidade de massa (por exemplo, reais por tonelada métrica seca) ou volume (por exemplo, reais por metro cúbico) de entrada no processo.
Custos de Venda	Um custo de processamento diferente será usado para cada processo disponível. O custo pode variar por tipo de rocha ou teor.
	Esta categoria é aplicada às unidades de produto resultantes do processo como reais por unidade de massa (por exemplo, reais por grama de ouro).
Custos de Reabilitação	Inclua nesta categoria os custos que variam de acordo com a quantidade de produção do produto, incluindo frete, seguro de frete, royalties e comissões.
	Esta categoria é aplicada a todo o estéril extraído em reais por unidade de massa (por exemplo, reais por tonelada seca) ou volume (por exemplo, reais por metro cúbico).
	Inclua nesta categoria quaisquer custos que variem com a quantidade de rejeitos extraídos, incluindo reabilitação contínua de depósitos de rejeitos.

Fonte: Whittle, 2011.

3.4.2.2. Função benefício

O valor econômico de cada bloco pode ser calculado através da função benefício e é de fundamental importância no planejamento de lavra. Ela é o resultado da diferença entre as receitas e os custos envolvidos em um empreendimento de mineração. Halatchev (1999 apud Peroni, 2008) apresenta uma função benefício bastante elaborada considerando diversos aspectos, os quais foram simplificados na seção a seguir, porém a análise da expressão função benefício pode nos responder a questão sobre quais parâmetros foram considerados e que influenciam a otimização das tonelagens de minério. Logicamente devem existir variáveis de custo de todos os processos tecnológicos (lavra, processo e recuperação). Os custos de mercado também influenciam as tonelagens de minério.

De Carli (2016) apresenta as equações usadas para a valoração do benefício do bloco. A função benefício para os blocos de minério considera todos os custos envolvidos, desde a lavra até o produto final, de acordo com a Equação (1).

$$PF (ORE) = (TEOR * R * (PV - CR)) - (C_L + C_P + C_{G\&A}) \quad (1)$$

Onde:

PF = Benefício do bloco;

R = Recuperação;

PV = Preço de venda;

CR = Custo de refino;

C_L = Custo de lavra do minério;

C_P = Custo de processamento;

$C_{G\&A}$ = Custos gerais e administrativos.

Para blocos de minério marginal, os custos de lavra não são considerados no cálculo da função benefício. Isto ocorre porque, independente do material ser considerado minério ou estéril, esses custos estarão presentes no valor final do bloco. Assim, quando o valor final da função benefício for positivo os blocos deverão ser tratados como minério. A Equação (2) apresenta a função benefício para blocos de teor marginal.

$$PF (MARGINAL) = (TEOR * R * (PV - CR)) - (INC + C_p + C_{G\&A}) \quad (2)$$

Onde:

INC = Custo incremental da diferença entre transportar o material para a planta de beneficiamento em relação à pilha de estéril (se distância de transporte para a planta for maior que a distância para a pilha de estéril).

Na remoção dos blocos de estéril não há geração de receita, uma vez que o material é todo enviado para a pilha de estéril. Os custos considerados no cálculo são relativos somente à lavra dos blocos, já que estes não serão processados. Assim, a função benefício desses blocos sempre resultará em um valor negativo, conforme mostra a Equação (3).

$$PF (WASTE) = -(C_{LE}) \quad (3)$$

Onde:

C_{LE} = Custo de lavra do estéril

Blocos de estéril de uma mina sempre representam benefício negativo, pois o resultado do bloco não apresenta nenhuma receita. Blocos de minério e blocos contendo minério e estéril podem apresentar benefício menor, igual ou maior do que zero, dependendo da quantidade e qualidade do material neles contido (Curi, 2014).

3.4.2.3. Valor presente líquido

A análise de investimento de mineração pelo cálculo do valor presente líquido é uma das mais comumente usadas na etapa de otimização de mina. Blank e Tarquim (2008) apresentam a análise do valor presente líquido (VPL). O método do VPL é popular porque as estimativas futuras (custos e receitas) são transformadas em reais equivalentes agora, ou seja, todos os fluxos de caixa futuro são convertidos em reais no momento atual. Isso torna fácil determinar a vantagem econômica de uma alternativa em relação à outra. O VPL das alternativas deve ser comparado ao longo do mesmo número de anos e encerrar-se ao mesmo tempo. Isso é necessário, uma vez que uma comparação do valor presente envolve calcular o montante presente equivalente de todos os fluxos de caixa futuros. Uma boa comparação somente pode ser realizada quando os valores de VPL representam custos (e recebimentos) associados a serviços iguais. O requisito de igual serviço pode ser cumprido por meio de qualquer um dos dois critérios seguintes:

- Comparar as alternativas ao longo de um intervalo de tempo igual ao *mínimo múltiplo comum* (MMC) de seus ciclos de vida.
- Comparar as alternativas usando um período de estudo em n anos de duração, o qual não leva necessariamente em consideração a vida útil das alternativas. Isso também é chamado de critério do *horizonte de planejamento*.

Na prática, a maioria das minas tende a maximizar seu rendimento durante os períodos de preços baixos, muitas vezes aumentando o teor médio do minério extraído. Eles também precisam observar a lucratividade de seu investimento de capital, que é diferente do valor implícito do depósito mineral. A sobrevivência corporativa tenderá a ter precedência sobre a maximização teórica do VPL (Crowson, 2011).

Um das maneiras de calcular o VPL é pela Equação 4, que mostra as variáveis utilizadas:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (4)$$

Onde:

VPL = Valor Presente Líquido;

FC = Fluxo de caixa no período;

t = Enésimo período no tempo em que o dinheiro será investido no projeto (começa no período 1, quando há efetivamente o primeiro fluxo de dinheiro);

n = Número de períodos;

i = Taxa de juros.

Um ponto que vale a pena ressaltar é que, se a medida econômica de um projeto de mineração é seu VPL, a maior parte desse valor está relacionada aos primeiros 15 anos de mineração, além dos quais os resultados da mineração têm um efeito significativamente menor na decisão de investimento. Portanto, considerando que todos os orçamentos de exploração têm limites, faz sentido, particularmente em projetos muito grandes, garantir que as áreas iniciais de mineração para a maior parte do VPL e, portanto, do risco de investimento, contenham uma quantidade maior de dados de exploração do que aqueles que são de prazo mais longo (Frith e Colwell, 2011).

O objetivo principal de um projeto de mineração é a maximização do VPL. Isto é o um objetivo que deve ser alcançado, sujeito apenas às restrições dos objetivos secundários. A busca do objetivo principal é de otimização, e apenas o máximo possível valor será satisfatório. Os objetivos secundários devem ser tratados como restrições. Na estrutura matemática para otimização, só é possível ter um objetivo (ser minimizado ou maximizado). No entanto, nos

negócios, não é incomum nomear múltiplos objetivos. Para empregar lucrativamente as estruturas matemáticas para otimização no planejamento de mina a céu aberto, um dos objetivos deve ser nomeado como o principal (por exemplo, maximizar o VPL) e todos os outros objetivos devem ser tratados como restrições. As restrições são especificadas por mínimos ou máximos (ou ambos) e agem para limitar ou modificar a busca do objetivo primário (Whittle, 2011). Exemplos de objetivos secundários são mostrados a seguir:

- i. manter uma posição favorável na curva de custos da indústria. Exemplo: não exceda um custo à vista de US\$ 0.80/kg: Reduzir custos é sempre um subobjetivo para maximizar o lucro. No entanto, por razões estratégicas, custos baixos podem anular o objetivo de maximizar o lucro. Esse é o caso se uma empresa tiver um objetivo de custo relativo – por exemplo, produzir cobre apenas se puder ser produzido a um custo marginal dos custos marginais para o setor.
- ii. declarar uma grande reserva. Exemplo: Planejar uma mina que permitirá o reporte de uma reserva mínima de 5 Mt. Uma importante medida não financeira usada na avaliação de ações é a reserva. Appleyard (1997) escreve: “A reserva é provavelmente o principal insumo na capacidade de uma empresa de obter financiamento de capital e, se listada, em sua classificação no mercado de ações”. Na tentativa de maximizar o preço de suas ações, algumas empresas podem estar preparadas para sacrificar o VPL para cotar uma reserva mais alta.
- iii. conservar capital. Exemplo: não exceda US\$ 100 milhões em gastos de capital. Às vezes, não é possível acessar o capital necessário para atingir a taxa ótima de produção.
- iv. aumentar a vida útil da mina para que ela abranja pelo menos dois ciclos de preços. Exemplo: Reduzir a taxa de produção para garantir uma vida útil da mina de pelo menos 10 anos. Acredita-se que muitos preços de commodities tenham comportamento cíclico. Por exemplo, a cada 3 a 7 anos, o preço passará de alto para baixo e retornará ao alto novamente. O risco de ter muito da vida da mina ocorrendo em épocas de preços baixos é reduzido se a vida da mina for estendida.

- v. evitar riscos. Exemplo: Investir na planta de processamento de \$ 50 milhões que pode ser financiada com fluxo de caixa livre, mesmo que a planta de processamento de \$ 100 milhões prometa um VPL mais alto. Walls e Eggert (1996) realizaram algumas pesquisas sobre o comportamento de tomada de decisão dos CEOs de mineração e descobriram que eles geralmente não tomam decisões de NPV mais altas - suas decisões são temperadas por um comportamento avesso ao risco. Walls descobriu que os CEOs de empresas de mineração menores tendem a ser mais avessos ao risco e sugeriu que isso ocorre porque, para as pequenas empresas, os projetos de maior risco carregam consigo um risco maior de falência da empresa. Smith (1997) sugeriu que, em vez de escolher a taxa máxima de produção de VPL, essa taxa deveria ser vista como a taxa máxima e que a taxa real deveria ser menor. Parte do raciocínio por trás da atenuação é que uma taxa máxima de produção de NPV tende a levar a uma vida útil excessivamente curta da mina, deixando um tempo mínimo para se recuperar das dificuldades iniciais.

A propósito dos novos desafios da otimização e planejamento das operações de mineração, Curi (2014) destaca os trabalhos que vêm sendo efetuados por Whittle, J. (2010) e Whittle, G. (2010) relacionados à necessidade da otimização empresarial como um todo e seus efeitos na otimização na lavra de minas. Segundo os autores, antes de iniciar o planejamento de longo prazo de uma operação de mina, deve-se definir nitidamente qual o objetivo principal. Se o objetivo principal for maximizar o valor das ações da empresa ou corporação, então o propósito não será produzir o máximo possível para maximizar as reservas ou maximizar a vida útil da mina. A meta não será também minimizar custos de mineração por tonelada ou maximizar a recuperação. Para maximizar a lucratividade do acionista, o objetivo principal será maximizar o VPL.

3.4.2.4. A técnica dos cones flutuantes

Segundo Peroni (2002), basicamente, o método considera se o material que estiver contido dentro do cone (construído por taludes respeitando as restrições físicas e geomecânicas locais) contém uma quantidade de minério que proporcione um retorno financeiro, dessa maneira o cone considerado será extraído. O processo se repete até que não existam mais cones economicamente mineráveis.

A principal ferramenta utilizada nos algoritmos heurísticos é a suposição de que todo cone na cava ótima é lucrativo, considerando que de fato uma cava ótima pode consistir em uma coleção de cones, não necessariamente apenas com valores positivos. Alguns cones compartilham valores de blocos negativos, mas a soma destes cones tem que ser positiva para se obter uma cava final positiva (Miranda, 2018).

O exemplo a seguir foi originalmente apresentado por Barnes (1982) em sua dissertação de mestrado e demonstrado posteriormente por Hustrulid e Kuchta (2006), considerando o valor econômico de cada bloco e ângulo de talude de 45°.

- a) O primeiro nível apresenta um bloco com valor positivo; posto que não existem blocos superiores, sua extração geraria resultados positivos, sendo o valor do cone do bloco (+1), conforme abaixo (vid. Figura 10).

Figura 10 - Cone inicial sendo extraído.

-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
	-2	-2	+4	-2	-2	
		+7	+1	-3		

Fonte: Hustrulid e Kuchta, 2006.

- b) O cone seguinte (Figura 11) será definido pelo bloco do nível 2 e coluna 4 (+4). O valor do cone será: $-1-1-1+4 = +1$.

Figura 11 - Extração do bloco de valor +4.

-1	-1	-1	-1	-1		-1
	-2	-2	+4	-2	-2	
		+7	+1	-3		

Fonte: Hustrulid e Kuchta, 2006.

- c) O bloco seguinte a ser analisado (Figura 12) será o do nível 3 e coluna 3 (+7). O valor desse cone será +1 ($-1-1-2-2+7$).

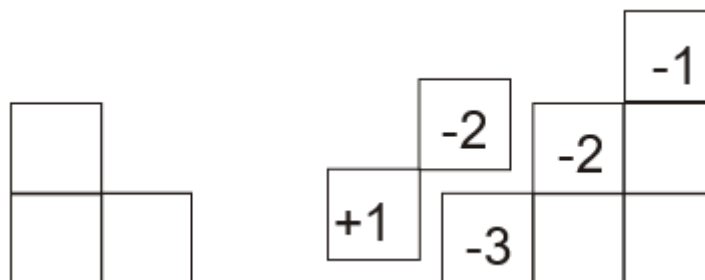
Figura 12 - Retirada do terceiro cone.

-1	-1					-1
	-2	-2		-2	-2	
		+7		+1	-3	

Fonte: Hustrulid e Kuchta, 2006.

- d) Finalmente, o último cone será definido pelo nível 3 e coluna 4 (+1), cuja extração gerará o valor -1 ($-2+1$). Neste caso, o valor é negativo por isso não será extraído (Figura 13).

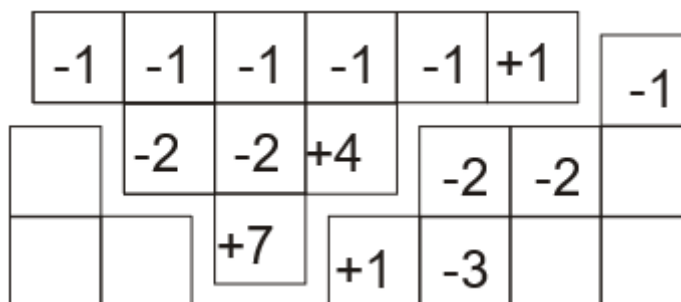
Figura 13 - Quarto cone incremental não extraído.



Fonte: Hustrulid e Kuchta, 2006.

Assim atinge-se o limite de extração pelo método dos cones flutuantes e, então, o desenho da cava final fica conforme ilustrado na Figura 14, sendo o valor da cava de +3.

Figura 14 - Desenho final por cones flutuantes.



Fonte: Hustrulid e Kuchta, 2006.

Nesse exemplo simples, o valor encontrado é um ótimo, mas o algoritmo de cones flutuantes, porém, não é um otimizador. Segundo Barnes (BARNES, 1982) apud Hustrulid e Kuchta (2006) as principais falhas são:

- i. O primeiro problema se apresenta quando blocos positivos são analisados individualmente. A extração de um único bloco positivo pode não se justificar, mas a combinação deste bloco com outros blocos que se sobrepõem pode-se gerar um cone com valores positivos.
- ii. Possibilidade de estender o limite da cava além dos limites da cava ótima, pois pode incluir na cava final blocos não lucrativos e, com isso, reduzir o valor da cava.

- iii. A combinação dos dois fatores citados, pois essa situação pode-se apresentar com grande facilidade em jazidas reais, e a otimização simples pelo método dos cones flutuantes não a considera.

3.4.2.5. O algoritmo de Lerchs e Grossmann

Helmut Lerchs e Ingo F. Grossmann (1965) apresentaram 2 algoritmos, baseados no método da teoria dos grafos para a resolução do problema de determinação da cava ótima final e desde esta data muitos autores o desenvolveram e muitas técnicas de programação lhe foram aplicadas. Foram apresentados a aplicação de teoria dos grafos para:

- i. um algoritmo simples de programação dinâmica para cavas em duas dimensões (ou uma simples seção vertical de uma mina);
- ii. um algoritmo gráfico mais elaborado para o caso geral de cavas em três dimensões.

As principais características do método são:

- Trabalhar com valor benefício dos blocos;
- Considere a precedência entre os blocos;
- Garante encontrar o contorno com o maior valor global;

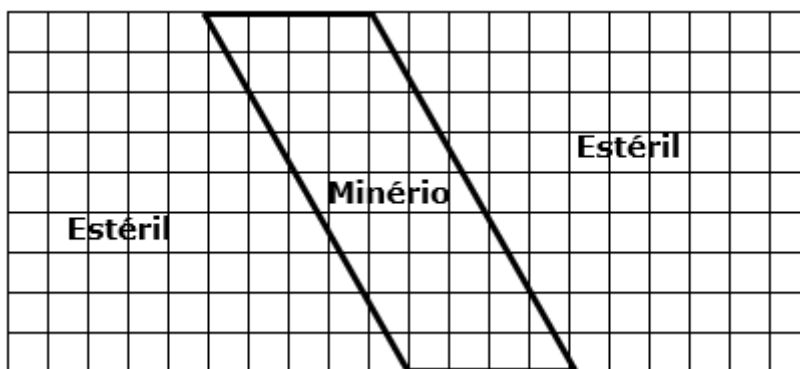
De acordo com Tulcanaza (2015), a metodologia trata-se de unir os blocos entre si em ramos. Há ramos fortes (por exemplo, balanço econômico positivo) e fracos (balanço econômico negativo). Para extrair um ramo forte, é necessário extrair os ramos que condicionam sua extração. A configuração de blocos estabelecida para a análise da extração deve considerar uma expansão cônica que abarque normalmente três níveis e seja baseada em condições geotécnicas.

3.4.2.5.1. O algoritmo de Lerchs e Grossmann em 2D

Autores preferem apresentar a metodologia através de um exemplo, tornando simples assimilação. Abaixo é mostrado como é feito o processo de otimização:

Supondo um corpo mineral, onde os blocos estéreis tenham um valor presente líquido (custo) de -4000 unidades monetárias/bloco, e os blocos de minério apresentem um valor presente líquido de 12000 um/bloco, o ângulo geral de talude adotado será de $35,50$ para uma geometria de bloco com a relação altura/comprimento de $5/7$. A Figura 15 apresenta um esquema do comportamento do corpo mineral superposto aos blocos.

Figura 15 - Geometria do corpo mineral.



Fonte: Lerchs e Grossmann, 1965.

A Figura 16 apresenta os blocos com os respectivos VPLs. Como pode ser observado, os blocos do limite do corpo mineral pertencem tanto ao domínio do minério quanto ao domínio do estéril. Uma ponderação foi utilizada para obter a configuração apresentada na Figura 17. A posição dos blocos será denotada utilizando a notação (i,j) para posicionar espacialmente os blocos, onde i representa a linha e j a coluna em que um determinado bloco está localizado.

Figura 16 - Modelo de blocos inicial valorizado economicamente.

-4	-4	-4	-4	-4	-4	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
	-4	-4	-4	-4	-4	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
		-4	-4	-4	-4	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
			-4	-4	-4	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
				-4	-4	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
					-4	12	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
						-4	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
							-4	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
								-4	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
									-4	12	12	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4

Fonte: Lerchs e Grossmann, 1965.

Figura 17 - Modelo de blocos econômico final.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	-4	-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
②		-4	-4	-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
③			-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
④				-4	-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑤					-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑥						-4	-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑦							-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑧								-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
⑨									-4	12	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4

Fonte: Lerchs e Grossmann, 1965.

O primeiro passo do método é calcular os benefícios cumulativos do modelo econômico, para cada coluna de blocos partindo do topo em direção à base. Cada coluna vertical é independente das outras, esse processo se dá de acordo com a Equação 5 e está exemplificado o cálculo para a coluna 6 do modelo.

$$M_{ij} = \sum_{k=1}^n m_{kj} \quad (5)$$

Onde: M_{ij} é o benefício obtido extraído-se uma única coluna do bloco (1,j) até a sua base e m_{kj} corresponde ao valor presente do bloco (k,j). A Tabela 2 apresenta o cálculo das somas cumulativas para a coluna 6.

Tabela 2 - Cálculo das somas cumulativas para a coluna 6.

Linha	Valor do bloco	Valor cumulativo atualizado
i=1	12	$M_{16} = \sum_{k=1}^1 m_{k6} = m_{16} = 12$
i=2	12	$M_{26} = \sum_{k=1}^2 m_{k6} = m_{16} + m_{26} = 12 + 12 = 24$
i=3	8	$M_{36} = \sum_{k=1}^3 m_{k6} = m_{16} + m_{26} + m_{36} = 12 + 12 + 8 = 32$
i=4	0	$M_{46} = \sum_{k=1}^4 m_{k6} = m_{16} + m_{26} + m_{36} + m_{46} = 12 + 12 + 8 + 0 = 32$
i=5	-4	$M_{56} = \sum_{k=1}^5 m_{k6} = m_{16} + m_{26} + m_{36} + m_{46} + m_{56} = 12 + 12 + 8 + 0 - 4 = 28$
i=6	-4	$M_{66} = \sum_{k=1}^6 m_{k6} = m_{16} + m_{26} + m_{36} + m_{46} + m_{56} + m_{66}$ $M_{66} = 12 + 12 + 8 + 0 - 4 - 4 = 24$
i=7	-4	$M_{76} = \sum_{k=1}^7 m_{k6} = m_{16} + m_{26} + m_{36} + m_{46} + m_{56} + m_{66} + m_{76}$ $M_{76} = 12 + 12 + 8 + 0 - 4 - 4 - 4 = 20$
i=8	-4	$M_{86} = \sum_{k=1}^8 m_{k6} = m_{16} + m_{26} + m_{36} + m_{46} + m_{56} + m_{66} + m_{76} + m_{86}$ $M_{86} = 12 + 12 + 8 + 0 - 4 - 4 - 4 - 4 = 16$

Fonte: Lerchs e Grossmann, 1965.

O passo seguinte é a adição de uma linha de valores 0 (no topo), e a colocação dos respectivos valores cumulativos para cada bloco. A Figura 18 apresenta o resultado da acumulação dos valores para todas as colunas do modelo econômico e a linha de “zeros” adicionada ao topo do modelo.

Figura 18 - Soma cumulativa por colunas.

	Colunas																		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-4	-4	-4	-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
2	-8	-8	-8	-8	-8	-8	24	24	8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
3	-12	-12	-12	-12	-12	4	32	36	20	-8	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
4				-16	-16	0	32	48	32	0	-16	-16	-16	-16	-16	-16			
5					-20	-4	28	56	44	12	-16	-20	-20	-20	-20				
6						-8	24	56	56	24	-8	-24	-24	-24					
7							20	52	64	36	4	-24	-28						
8								48	64	48	16	-16	-32						
9									60	56	28	-4	-32						

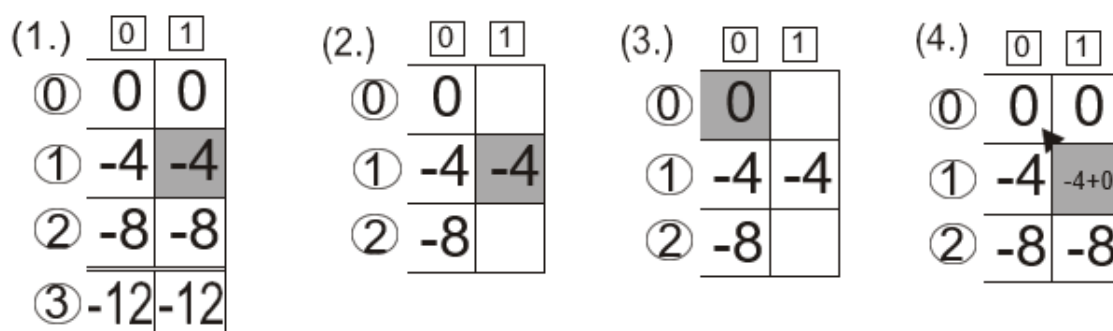
Fonte: Lerchs e Grossmann, 1965.

Deseja-se agora desenvolver uma soma cumulativa geral movendo-se lateralmente da esquerda para a direita ao longo da seção, iniciando do topo extremo esquerdo até encontrar o primeiro bloco real. Dessa maneira três blocos são examinados:

- i. um imediatamente acima à esquerda;
- ii. um imediatamente à esquerda;
- iii. um imediatamente abaixo à esquerda.

A Figura 19 representa a maneira como é desenvolvida a determinação da soma cumulativa e a direção de extração. (1.) Partindo do bloco 1,1 (o bloco mais positivo posicionado mais à esquerda e no topo da seção) os blocos vizinhos na linha acima (linha 0), a linha considerada (linha 1) e a linha abaixo (linha 2) da coluna à esquerda da coluna "0" são examinados. (2.) Desses três o valor mais positivo é selecionado. (3.) Nesse caso o bloco 0,0. (4.) A soma do bloco (1,1) e do bloco (0,0) é encontrada e substituída pelo valor original do bloco 1,1, nesse caso é $-4+0$ ou -4 . Uma seta é desenhada entre o bloco (1,1) e o bloco selecionado. Esse processo é desenvolvido movendo-se para baixo na coluna 1. Quando completada a coluna, a coluna seguinte (coluna 2) é iniciada movendo-se novamente do topo para a base até tratar todos os blocos. Alguns blocos não foram tratados pois eles não estão contidos nos limites da cava final, mas o procedimento se repetiria para esses blocos da mesma maneira.

Figura 19 - Procedimento para definir o máximo valor cumulativo e maximizar a direção.



Fonte: Lerchs e Grossmann, 1965.

A Figura 20, mostra a progressão do processo de soma até a coluna 7, onde o valor presente do bloco do qual parte a seta é somado ao valor presente do bloco contíguo mais positivo posicionado à esquerda dele.

Figura 20 - Progressão do processo de soma até a coluna 7.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
①	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
①		-4	-4	-4	-4	8	20	44	0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
②			-12	-12	-12	4	32	60	8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
③				-24	-24	-8	36	72	20	-8	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
④					-40	-24	24	84	32	0	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16
⑤						-44	4	80	44	12	-16	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
⑥							-20	60	56	24	-8	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
⑦								32	64	36	4	-24	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28
⑧									64	48	16	-16	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32
⑨										56	28	-4	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32

Fonte: Lerchs e Grossmann, 1965.

A Figura 21 mostra o processo de soma para todos os blocos da seção trabalhada. Na Figura 22 está apresentado o limite da cava final, o qual é definido movendo-se ao longo da primeira linha na Figura 21 da direita para a esquerda até encontrar-se o maior valor, as setas são então seguidas para dar o limite da cava final para essa seção.

Figura 21 - O processo de soma se estende para toda a seção.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
①	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
①		-4	-4	-4	-4	-4	8	20	44	60	76	92	96	104	108	104	104	100	96	92
②			-8	-12	-12	-12	-12	4	32	60	80	96	100	108	112	108	108	100	96	92
③				-12	-24	-24	-24	-8	36	72	104	108	116	120	116	116	104	96	88	88
④					-40	-40	-24	24	84	116	128	132	128	128	116	104	88	88	88	88
⑤						-60	-44	4	80	128	148	144	144	132	120	100	100	100	100	100
⑥							-68	-20	60	136	160	164	152	140	120	120	120	120	120	120
⑦								-48	32	124	172	176	164	144	120	120	120	120	120	120
⑧									0	96	172	188	172	144	120	120	120	120	120	120
⑨											60	152	200	188	160	140	120	120	120	120

Fonte: Lerchs e Grossmann, 1965.

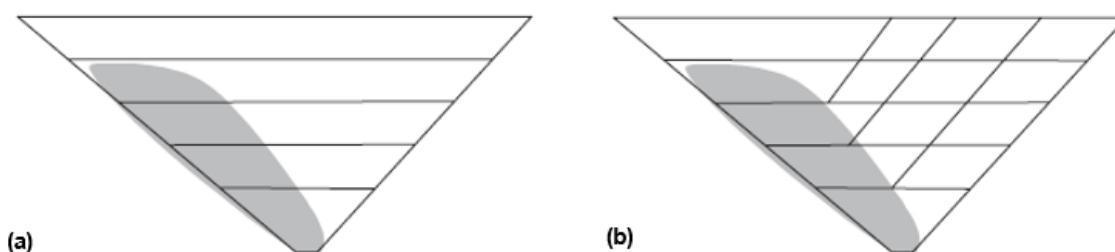
3.4.3. Sequenciamento de lavra

O sequenciamento de lavra é uma etapa do planejamento de mina que determina qual material será lavrado, a quantidade, e em qual período. Estas variáveis possuem um impacto relevante no fluxo de caixa da empresa e, conseqüentemente, podem conduzir um empreendimento ser atrativo ou não financeiramente (Souza, 2016).

A extração de uma mina a céu aberto é feita em uma série de fases, muitas vezes referidas como *pushbacks*. Do ponto de vista do planejamento, um *pushback* deve ter como objetivo maximizar o retorno financeiro de uma mina. Ao planejar um *pushback*, isso significa levar em consideração não apenas o teor de um material, mas também os custos de desenvolvimento, mineração, processamento e logística (Hall, 2009).

Whittle (2011) mostra duas sequências de minas que são ilustradas na Figura 24. A primeira é simples de conseguir, com excelente acesso de lavra e baixa complexidade. No entanto, a REM (relação estéril/minério) no início da vida da mina é muito alta e diminui com o tempo. Nesta sequência, grande parte do custo de decapagem ocorre no início da vida da mina e o acesso ao minério é atrasado. Essa sequência leva a um VPL ruim e, por esse motivo, costuma ser chamada de sequência de pior caso (pior para VPL).

Figura 24 - (a) Cenário com pior NPV; (b) Cenário com melhor NPV.

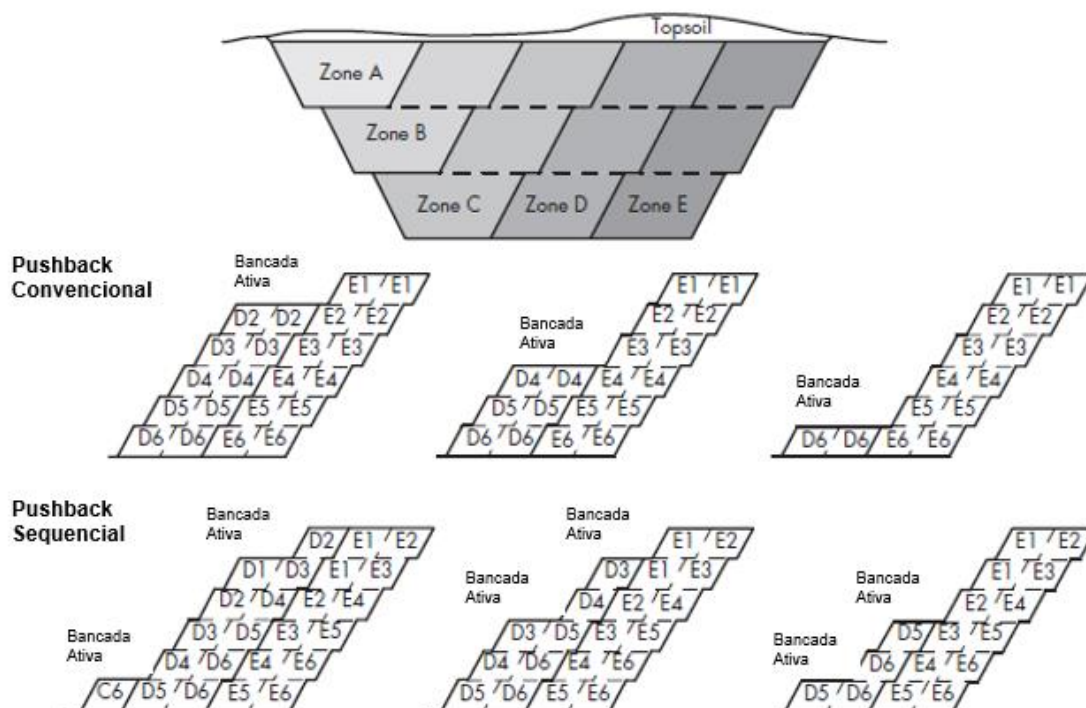


Fonte: Whittle, 2011.

Na Figura 24 (b), é mostrada uma sequência de mineração com quatro pushbacks. Ao minerar cada pushback por vez, o *pré-stripping* é adiado e o acesso ao minério é obtido mais cedo. A taxa de decapagem começa baixa e termina alta. Essa sequência é mais complicada que a primeira, mas produzirá um VPL mais alto.

A geometria exata de um *pushback* é muito específica do local do empreendimento e depende de uma série de fatores, incluindo geometria do corpo de minério, objetivos financeiros, considerações geotécnicas, equipamentos de lavra, metas de produção e planejamento de longo prazo. Os *pushbacks* podem ser convencionais ou sequenciais (McCarter, 1992). A Figura 25 ilustra as diferenças entre pushback sequencial e convencional. O layout geral do pit é mostrado na parte superior da figura, dividido em diferentes zonas de pushback (Zona A, Zona B etc.).

Figura 25 - Pushback convencional e sequencial.



Fonte: Wetherelt e Wielen, 2011.

Essencialmente, ambos os métodos lavram na mesma distância horizontalmente. No entanto, um *pushback* sequencial faz isso por meio de vários bancos ativos menores lavrados simultaneamente em vários níveis, enquanto um *pushback* convencional extrai toda a extensão horizontal de um nível de *pushback* antes de avançar para o próximo nível. Diferentes zonas de *pushbacks* sequenciais são divididas por acessos.

A parte inferior da figura ilustra como os dois métodos explorariam o mesmo *pushback* de maneira diferente. A letra nos blocos denota a zona e o número indica a sequência de mineração (ou seja, a mineração começa com o Bloco D1, depois D2 etc., até que o último bloco seja extraído).

O planejamento adequado da produção é absolutamente essencial para alcançar o maior retorno possível de uma operação de mineração (Caccetta e Hill, 1999). O planejamento da produção pode ser dividido em planejamento de longo prazo, médio prazo e planejamento de curto prazo.

O planejamento de longo prazo (ou estratégico) concentra-se na definição de uma meta e, como tal, é realizado em uma escala de tempo de vários anos até a vida útil da mina (Kear, 2006). O planejamento de curto prazo (ou operacional) e médio prazo (ou tático), por outro lado, é mais voltado para atingir uma meta e é feito em uma escala de tempo que vai desde o planejamento do dia a dia até os planos de produção de vários anos. Inerentemente, o planejamento de longo prazo está mais preocupado em fornecer estruturas para projeto e expansões de cava (por exemplo, *pushback*), cronogramas de produção, planos de reabilitação e seleção de equipamentos, enquanto o planejamento de curto prazo se concentra no uso de equipamentos, maximização da produtividade e, finalmente, atendimento metas de produção.

Nas operações modernas, os sistemas de despacho de equipamentos desempenham um papel importante no planejamento da produção de curto prazo. Os cronogramas de produção de curto prazo devem ter um certo grau de flexibilidade para responder a mudanças imprevistas no ambiente de produção. Essas mudanças variam de questões simples, como um defeito na estrada de transporte, a questões complicadas, como uma ruptura de talude. A avaliação e,

quando necessário, o ajuste dos cronogramas de produção de curto prazo como resultado dessas mudanças deve ser implementado em tempo hábil (Wetherelt e Wielen, 2011).

Os objetivos básicos ou metas do sequenciamento de mina foram bem definidos por Mathieson (1982):

- Lavrar o corpo de minério de tal forma que, a cada ano, o custo para produzir um quilograma de metal seja mínimo;
- Para manter a viabilidade da operação dentro do plano através da incorporação de operação de equipamentos adequados, acesso de transporte a cada bancada ativa etc.
- Ter minério liberado suficiente para combater a possibilidade de estimativa incorreta de tonelagens e teores de minério no modelo de reserva. Isso é particularmente verdadeiro nos primeiros anos, que são tão críticos para o sucesso econômico;
- Para adiar a remoção de estéril, tanto quanto possível;
- Desenvolver um cronograma de *start-up* lógico e facilmente alcançável com o devido reconhecimento ao treinamento de mão de obra, pioneirismo, implantação de equipamentos, infraestrutura e suporte logístico, minimizando assim o risco de atrasar o início do fluxo de caixa positivo do empreendimento;
- Maximizar os ângulos de talude da cava em resposta a investigações geotécnicas adequadas e, ainda, através de um planejamento cuidadoso, minimizar os impactos adversos de qualquer instabilidade do talude, caso ocorra.
- Examinar adequadamente os méritos econômicos de cenários alternativos de taxa de produção de minério e teor de corte.

O planejamento é obviamente uma atividade contínua ao longo da vida da mina.

3.5. Disposição de estéril

Os resíduos (estéril e rejeito) de mineração são gerados durante o processo de lavra, beneficiamento e processamento de minerais. A lavra é a primeira fase que consiste na retirada inicial do minério da cava. Isso normalmente é feito pelo processo de detonação, que resulta na geração de grande volume de resíduos (solo, estéril e outros materiais). Esse material não tem valor econômico e normalmente é armazenado em grandes pilhas dentro da área de influência da mina e, às vezes, em terras públicas. Quanto maior a escala da mina, maior é a quantidade de estéril gerado. As minas a céu aberto são, portanto, as que mais impactam, pois geram quantidades muito maiores de estéril em comparação com as minas subterrâneas. As minas a céu aberto produzem de 8 a 10 vezes mais resíduos do que as minas subterrâneas (Anon, 2006). A razão entre o estéril escavado e a quantidade de mineral removido é chamada de relação estéril/minério (REM) ou *stripping ratio*. Por exemplo, uma taxa de remoção de 4:1 significa que 4 toneladas de estéril são removidas para extrair uma tonelada de minério.

Wetherelt e Wielen (2011) argumentam que a remoção do estéril geralmente é necessária antes que a extração do minério possa começar. Em relação ao manuseio de materiais, existem três diferenças importantes entre minério e estéril:

1. O estéril não é beneficiado e geralmente não gera nenhuma receita.
2. As toneladas de estéril quase invariavelmente excedem as toneladas de minério em uma mina a céu aberto.
3. As características do maciço rochoso são muitas vezes diferentes das do minério.

Os dois primeiros pontos implicam que o manuseio de estéril e custos relacionados devem ser mantidos no mínimo. Para minimizar os custos relacionados ao manuseio do estéril, ele geralmente é detonado a uma fragmentação mais grosseira do que o minério e, em muitos casos, escavado e transportado por equipamentos de maior capacidade. Como resultado, em muitas operações, a remoção do estéril é terceirizada.

A disposição do estéril removido do depósito comumente ocorre em grandes pilhas controladas. A norma ABNT NBR 13029 fixa as condições exigíveis para elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril, em pilha, em mineração, gerado na lavra a céu aberto ou subterrânea, visando a atender as condições de segurança, higiene, operacionalidade, economicidade, abandono e minimização dos impactos ao meio ambiente, dentro dos padrões legais. O projeto de disposição deve apresentar as seguintes características da pilha:

- a) capacidade e tempo de vida útil;
- b) área de ocupação;
- c) dimensões finais e ângulo geral da pilha;
- d) método construtivo de formação;
- e) acessos de manutenção;
- f) sistemas de drenagem interna, superficial e periférica;
- g) sistemas de tratamento dos taludes e bermas;
- h) zoneamento da disposição dos tipos de estéril;
- i) parâmetros geométricos da bancada - altura e inclinação dos taludes, largura e declividades das bermas;
- j) sistemas de monitoramento previsto;
- k) aptidão e usos futuros.

A geometria do depósito de estéril depende muito do método de despejo, bem como da topografia do local. Os dois métodos de construção comuns para depósitos de estéril incluem método descendente e ascendente.

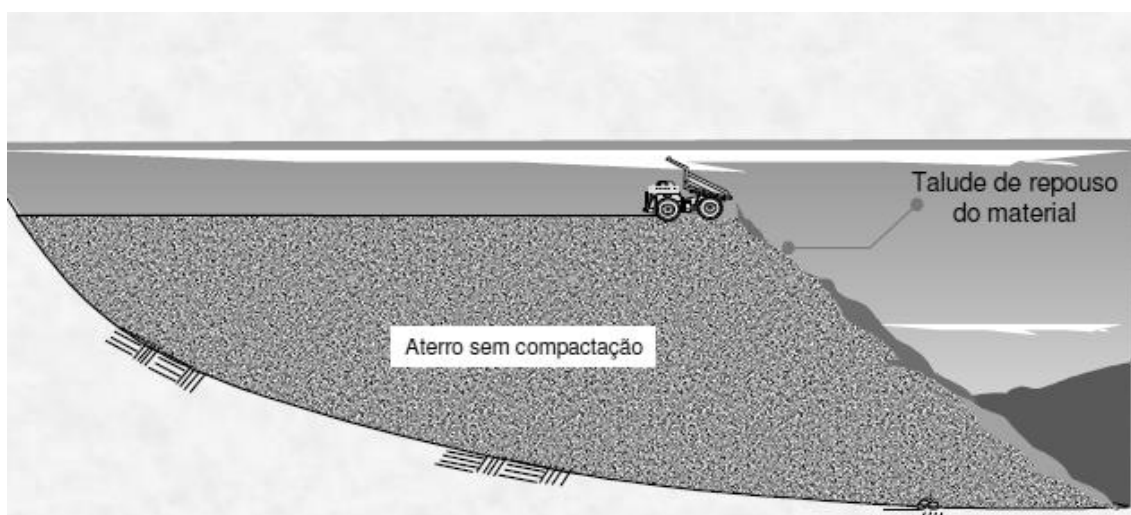
3.5.1. Método descendente

Se o material for basculado da crista da pilha de estéril, o material fluirá e ficará no ângulo de repouso ou próximo a ele, com as partículas maiores rolando até a base do depósito (Couzens, 1985). O ângulo de repouso para o estéril da mina geralmente fica na faixa de 35° a 40°, deixando os taludes íngremes. O fator de segurança para a inclinação de uma pilha de estéril é próximo de 1,0.

As encostas geralmente não são reconformadas ou compactadas até o fechamento da pilha de estéril.

Os depósitos estéreis construídos a partir desse método, representado pela Figura 26, são aparentemente os mais econômicos, porém são mais propensos a ter uma estrutura de partículas soltas e colapsáveis dentro do depósito do que aqueles construídos a partir do método ascendente. O colapso resultará em danos localizados, o que leva a pressões normais reduzidas e resistência ao cisalhamento (Vandre, 1980).

Figura 26 - Ilustração da fase de lançamento do método descendente.



Fonte: Carvalho, 2009.

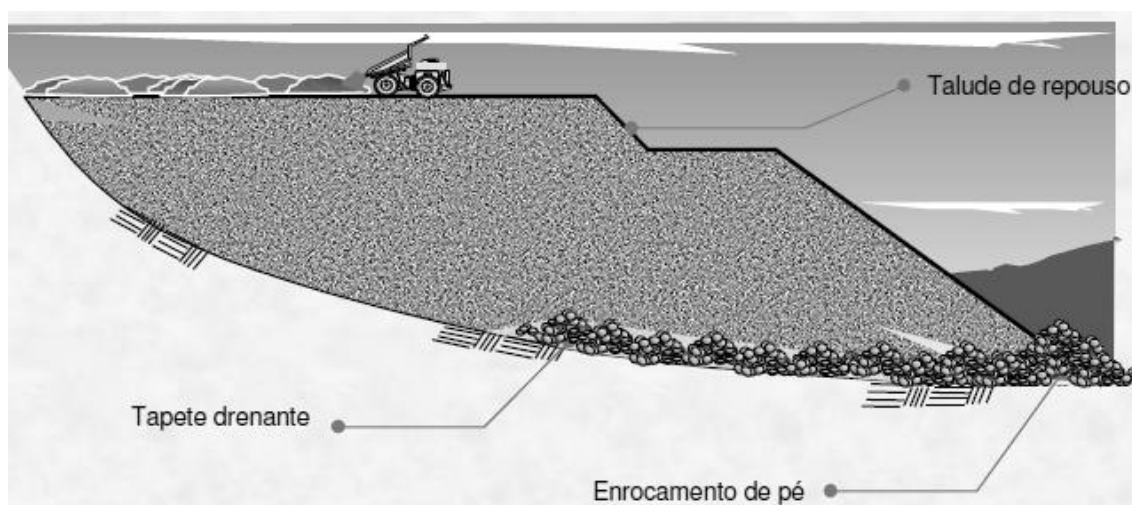
3.5.2. Método ascendente

O depósito de estéril realizados pelo método ascendente permitem manter um maior fator de segurança, porque são construídos de maneira mais controlada de baixo para cima. As camadas são compactadas para aumentar a densidade e resistência do material. No entanto, os depósitos de estéril em camadas nem sempre são viáveis, pois requerem uma topografia relativamente plana (Vandre, 1980).

De acordo com Carvalho (2009), este método é o mais recomendado pela norma técnica NBR 13029 em vigor, pois contempla todos os procedimentos para maior segurança e estabilidade.

A Figura 27 mostra o processo de conformação das camadas neste método. A autora descreve que os bancos deverão ser formados do fundo do vale em direção às cabeceiras, formados pelo basculamento dos caminhões, gerando pilhas individuais com altura de 2 e 3 metros. Após esta operação, o trator de esteiras deverá quebrar as pilhas, formando uma camada de estéril semi-compactada com a altura de 1 a 1.5 metros. O tráfego dos equipamentos provoca compactação no material, suficiente para estabilizar a pilha. As bancadas poderão variar entre 10 e 15 metros de altura. Normalmente as larguras das bermas devem ser superiores a 6 metros, largura mínima aceita pela norma padrão.

Figura 27 - Ilustração da fase de lançamento do método descendente.



Fonte: Carvalho, 2009.

3.5.3. Disposição de estéril em cava

O uso de cavas exauridas para fins de disposição de resíduos é uma prática que vem sendo utilizada em diversos países do mundo e inclui, além da acomodação de estéreis e rejeitos da mineração, refugos de outras atividades como resíduos de processos industriais e esgotos municipais, se mostrando uma solução versátil e eficaz (Kuyucak, 1999). Segundo Ritcey (1989), esse método de disposição acomoda o material dentro de uma cava já exaurida de uma mina e dispensa a construção de diques e drenos de fundo.

Lage (2001) cita algumas vantagens da disposição de rejeitos e estéreis dentro da cava como: controle de geração de drenagem ácida, prevenção de acidentes com barragens (que deixaram de ser construídas), estabilização das paredes da cava, redução na lixiviação de metais pesados e redução de custos com manutenção da estrutura de contenção do resíduo, pois a cava é mais estável do que uma barragem ou pilha. Porém, deve-se ter em mente que nem todas as cavas estarão aptas a receber resíduos, elas precisam ser analisadas caso a caso.

Faria (2016) apresenta que a disposição de resíduos em cavas, não só da mineração, mas de outros tipos, já é uma alternativa bastante usada no mundo. Ainda segundo a autora, a maioria dos casos de disposição acontecem após a vida útil da mina, porém, existem casos que essa disposição acontece ao mesmo tempo que as atividades de lavra.

Mend (1995) apud Kuyucak (1999) conduziu um estudo que localizou mais de 40 locais pelo mundo onde cavas eram ou ainda são utilizadas para dispor resíduos, como Canadá, Estados Unidos, Austrália e Alemanha. A Tabela 3 mostra alguns destes locais, especificando os tipos de minério, de resíduos, de cobertura e a necessidade posterior de monitoramento da área:

Tabela 3 - Casos de disposição de estéril/rejeitos em cava.

Mina	Local	Minério	Tipo de resíduos	Tipo de cobertura	Monitoramento
Rum Jungle	Austrália	Urânio	Rejeito, estéril e resíduos de cianeto	Úmida e seca	Águas subterrâneas e superficiais
Island Copper	Canadá	Cobre	Estéril	Úmida	Águas subterrâneas
Bell Mine	Canadá	Cobre	Estéril reativo	Úmida e seca	Águas superficiais
Iron Mountain	EUA	Ouro, prata, cobre e zinco	Rejeito piritoso e lama	Úmida	Águas subterrâneas e superficiais
Berkeley	EUA	Cobre	Drenagem ácida de mina	Úmida	Águas subterrâneas
Brenda Mine	Canadá	Cobre	Água de processo	Úmida	Águas superficiais
Mt. Morgans	Austrália	Ouro	Rejeito e estéril	Seca	
Lichtenberg	Alemanha	Urânio	Estéril	Úmida	Águas subterrâneas e superficiais

Fonte: Vasconcelos, 2008.

Ritcey (1989) aborda algumas características que podem ser observadas a respeito da disposição de estéreis e rejeitos em cava, como:

- Menos material em relação ao que foi removida poderá ser colocado. A diferença em volume é em torno de 25%;
- Esteticamente o método pode ser mais agradável;
- A lavra pode ser conduzida concomitante com a colocação do estéril. Usualmente uma pequena cava é usada no estágio inicial da operação;
- Os altos e profundos taludes da cava, por estarem cobertos pelo estéril, têm a área total superficial a ser revegetada minimizada;
- Parâmetros hidrogeológicos considerando migração de contaminantes e infiltração são pobremente entendidos.

Faria (2016) cita que a recuperação das áreas impactadas pela mineração é um tema novo no Brasil. Até os anos 80, toda a atenção era voltada para o aproveitamento dos recursos minerais. Só então a questão ambiental passou a ser uma variável a se considerar e tem entrado gradativamente nas discussões sobre o tema. O tema é tão importante que se deve ter em mente que a falta de preocupação com parâmetros ambientais deste a pesquisa mineral até o fechamento da mina tem poder de influenciar no sucesso ou não do empreendimento, devendo então ser incorporado em todo o planejamento do projeto.

O planejamento de lavra procura implementar um plano de exploração do minério que seja integrado com a disposição de resíduos em cava. Independentemente do momento em que essa disposição acontecer, seja no final das atividades de lavra ou concomitante a ela, deve-se ter o cuidado com a viabilidade econômica desse tipo de projeto. O estudo das características físicas e químicas do material que será disposto e a disposição na cava, procurando não esterilizar o minério remanescente no depósito, são premissas que devem ser sempre consideradas.

3.5.4. Planejamento de mina na disposição de rejeito em cava

No Brasil, algumas mineradoras já estão buscando soluções de disposição de resíduos em cava. Como é o caso da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), empresa que possui minas localizadas em várias regiões do país voltada para a extração de bauxita, matéria prima para a produção de alumínio.

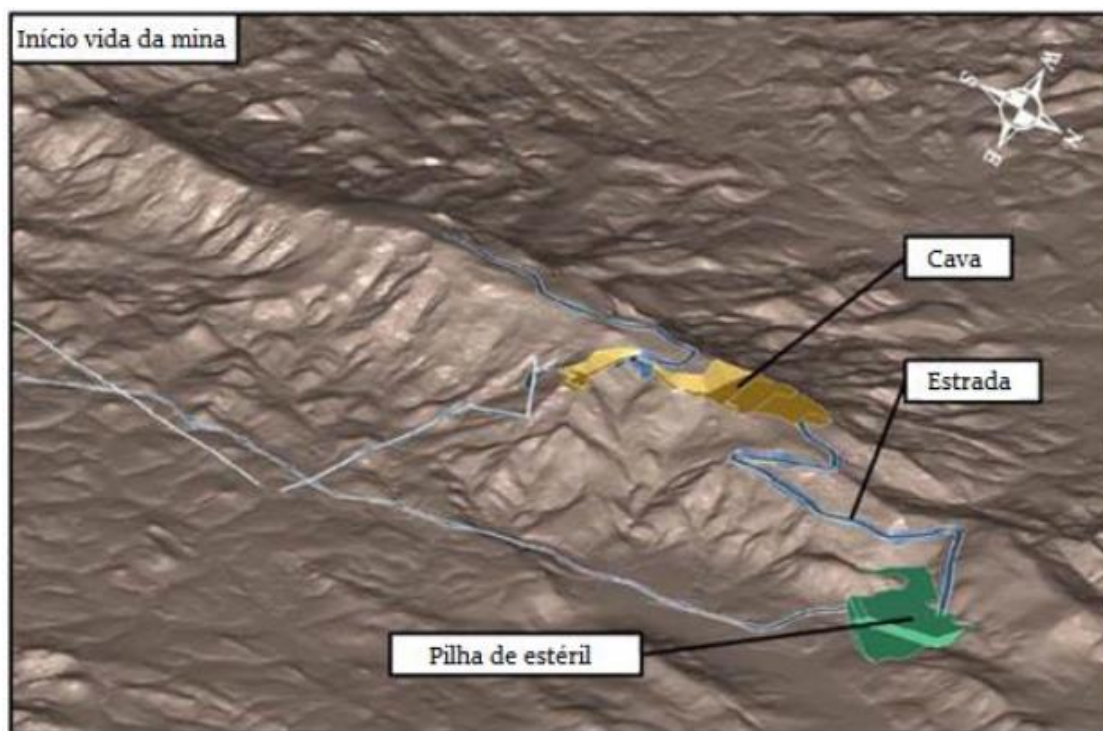
Os benefícios obtidos através do uso de técnicas inovadoras de aproveitamento sustentável desses materiais vão além dos ganhos à própria empresa. Eles permeiam toda cadeia produtiva e a região onde o empreendimento está localizado. O potencial de impacto positivo desse trabalho pode ajudar a solucionar um problema atual da empresa.

A expectativa da empresa é implementar esse projeto que encontre viabilidade técnica e econômica para dispor o estéril, proveniente da mina, nas cavas onde se teve a operação de lavra.

Exemplos de práticas fora do Brasil de disposição de resíduos em cava também estão sendo adotadas para reduzir o passivo ambiental causado por suas atividades produtivas. O projeto de minério de ferro da Rio Tinto em Simandou, Guiné (Figura 28 a Figura 30), procura dispor o estéril concomitantemente com as operações de lavra.

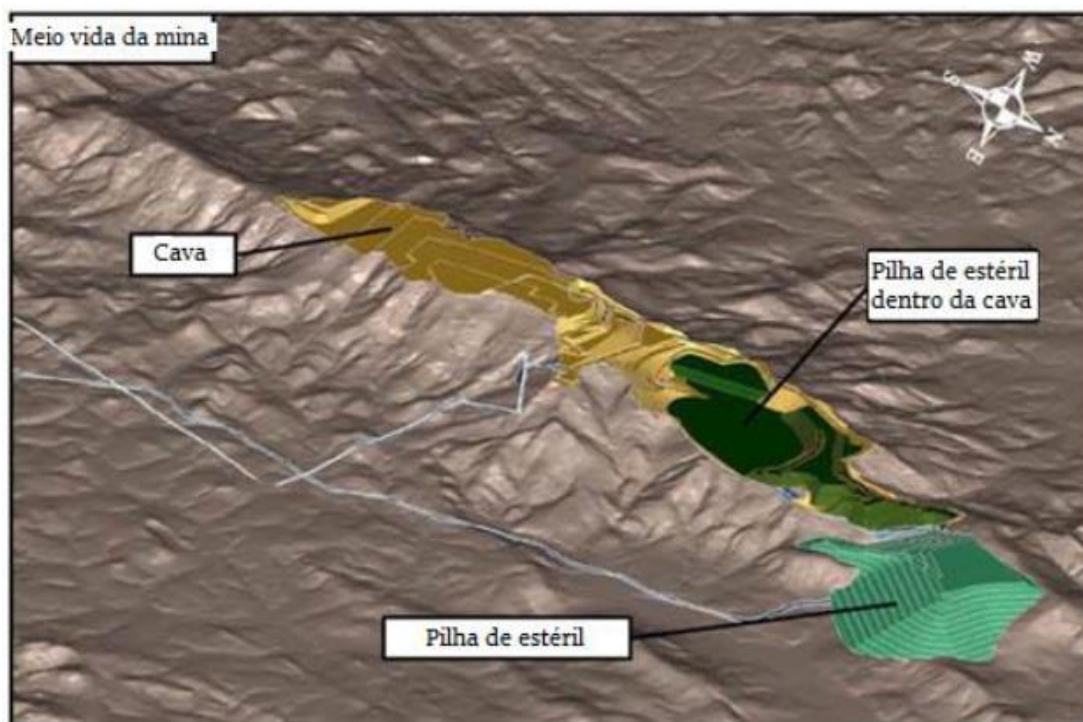
No início da lavra, uma pilha de estéril é formada próxima a cava. À medida que a lavra avança, o estéril é acomodado tanto na pilha como dentro da parte já lavrada da cava. As figuras mostram claramente que esta prática traz benefícios estéticos ao minimizar os impactos na topografia da região, e diminuir a área a ser revegetada (Lage, 2001), uma vez que o estéril cobre os taludes profundos.

Figura 28 - Sequência de lavra em Ouéléba, Simandou, ao início das atividades de lavra.



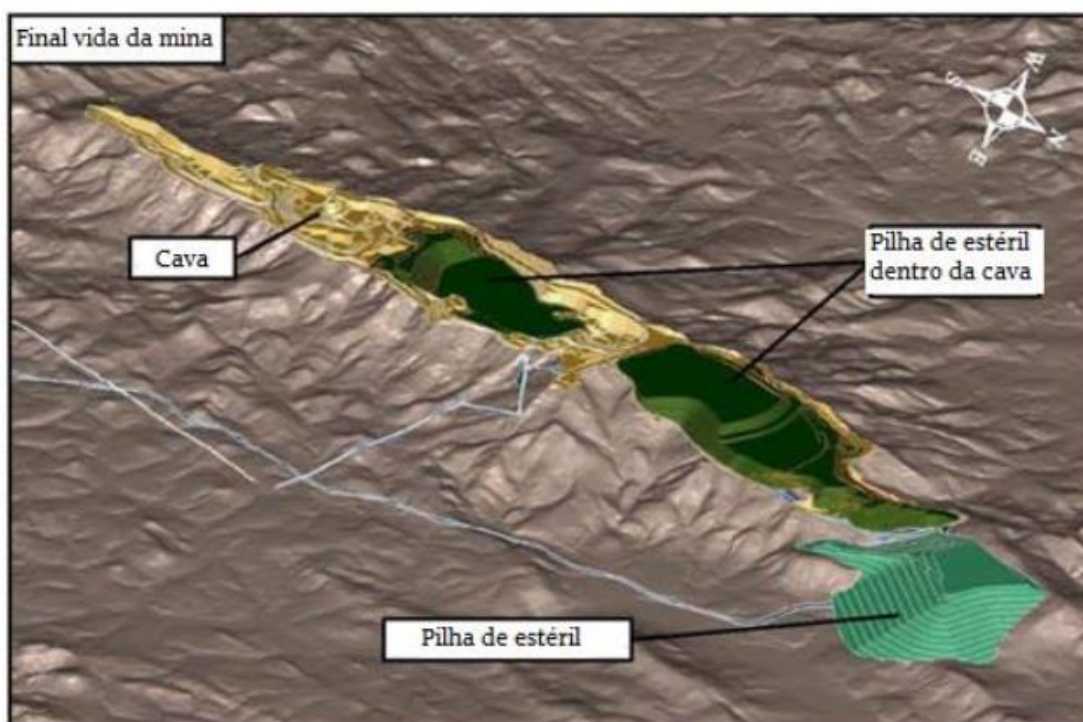
Fonte: Relatório interno Rio Tinto, SEIA, 2012.

Figura 29 - Sequência de lavra em Ouéléba, Simandou, no meio da vida da mina.



Fonte: Relatório interno Rio Tinto, SEIA, 2012.

Figura 30 - Sequência de lavra em Ouéléba, ao final das atividades de lavra.



Fonte: Relatório interno Rio Tinto, SEIA, 2012.

Em casos de disposição de estéril em cava cuja metodologia de lavra é o *open pit*, como no projeto da Rio Tinto (2012), deve ser considerado como premissa básica que seja feita uma análise adequada da malha de sondagem da reserva, assegurando que ela seja bem fechada e estudada para que a disposição do estéril não aconteça em potenciais áreas de minério (Carvalho, 2009).

O sequenciamento verde proporciona ganhos na redução dos passivos ambientais quando comparado ao sequenciamento convencional. Em adição, outros fatores, como sociais e econômicos, devem ser analisados na hora de se optar por esse tipo de metodologia.

3.6. Práticas ESG

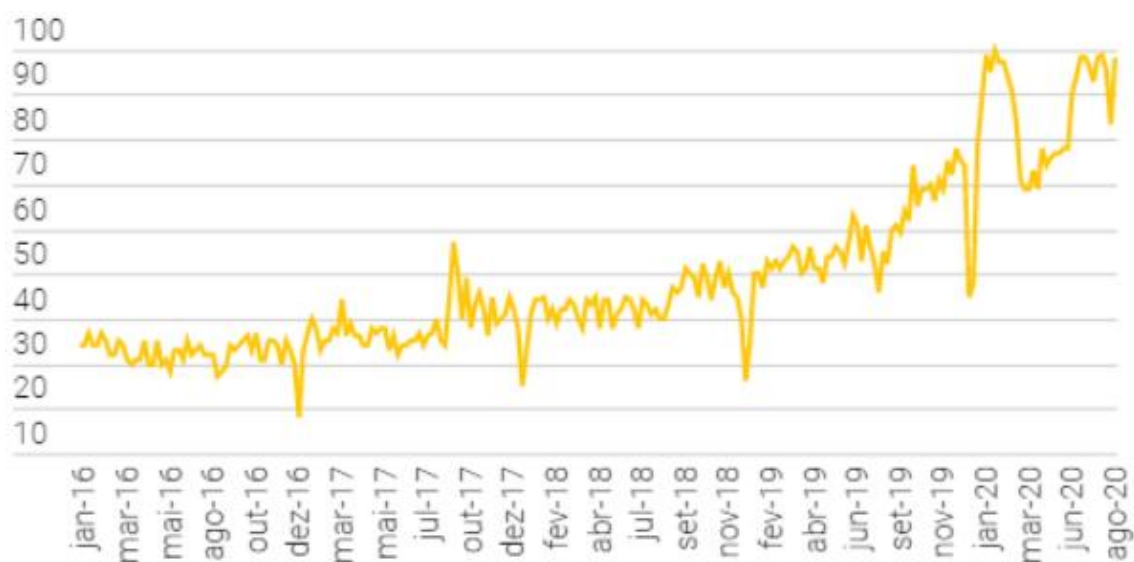
Segundo Queiroz (2022), a sigla ESG se refere a três palavras da língua inglesa: *environmental, social and governance*. Palavras que, em português, significam, respectivamente, meio-ambiente, social e governança. O termo se refere a práticas relacionadas a esses três fatores que são desempenhadas dentro de entidades, sejam empresas privadas, grandes bancos ou até mesmo através de órgãos regulatórios. A sigla ganhou maior visibilidade nos últimos anos, apesar de os tópicos que a compõem não serem necessariamente tão recentes quanto.

Conforme Costa e Ferezin (2021), os índices de sustentabilidade passaram a ter uma visibilidade de maior protagonismo dentro das grandes corporações e essa visão se replica da mesma forma quando analisamos outros meios como Bolsas de Valores mundiais. Isso tudo, ainda segundo Costa e Ferezin (2021), devido à forma como a sustentabilidade é vista atualmente: como um fator primordial nas decisões das organizações globalizadas. Assuntos que englobam sustentabilidade deixaram de ter um papel relevante para passarem a ter um papel essencial ao balizar as decisões das corporações.

O conceito deixou de ser uma pauta interna no mercado e se tornou um assunto muito explorado de maneira geral, inclusive pelo ponto de vista do

consumidor. Podemos ver na Figura 31 que indicam a evolução da procura no Google pelo termo ESG a nível mundial. O fato da sigla e do que ela envolve estar disseminada mostra que fatores sustentáveis como importantes na tomada decisão não passam apenas pela ponderação de investidores, mas também pelo crivo da esfera do consumo, sendo um ponto a ser considerado, inclusive, pelo consumidor final de qualquer produto ou serviço que esteja sendo oferecido no mercado (Queiroz, 2022).

Figura 31 - Google Trends: Busca pelo termo ESG no mundo.*



Fonte: Google Trends, XP Investimentos, 2020.

**Os números representam o interesse relativo ao ponto mais alto no gráfico. Um valor de 100 representa o pico de popularidade de um termo.*

Entendendo como tem sido o desempenho de empresas de mineração que adotam práticas ESG, como iniciativas de sequenciamento verde, poderemos entender se a adaptabilidade a um modo de processo produtivo mais sustentável se apresenta como uma oportunidade a ser aproveitada de modo a trazer maior produtividade nos processos de produção de riquezas.

4. VISÃO GERAL DO PROJETO

4.1. Companhia Brasileira de Alumínio

A CBA, empresa do grupo Votorantim, é uma produtora de alumínio totalmente integrada em sua cadeia produtiva, tudo de forma sustentável. É a segunda maior produtora de alumínio primário do Brasil, com capacidade instalada de produção de 430 mil toneladas por ano. Esse metal é aplicado nos mais diversos seguimentos da economia, como: transportes, construção civil, bens de consumo, embalagens (para a indústria alimentícia e farmacêutica), fios e cabos (para distribuição e transmissão de energia).

A fábrica de alumínio está localizada no município de Alumínio/SP e é considerada a maior brasileira a operar de forma verticalizada (desde a bauxita até a fabricação de produtos fundidos e transformados).

É autossuficiente na extração de bauxita, transformando o metal e oferecendo desde lingotes a produtos transformados como chapas e bobinas. Atua nos municípios de Poços de Caldas, Itamarati de Minas, Mirai e Barro Alto.

A Unidade Poços de Caldas tem capacidade instalada para beneficiar anualmente um milhão de toneladas de bauxita. Iniciou suas operações em 1955. Já a Unidade de Mirai tem capacidade instalada para produzir anualmente 2,4 milhões de toneladas de bauxita. Iniciou suas operações em 2008.

A companhia ainda tem direitos de lavra no município de Barro Alto em Goiás, onde também compra bauxita de terceiros.

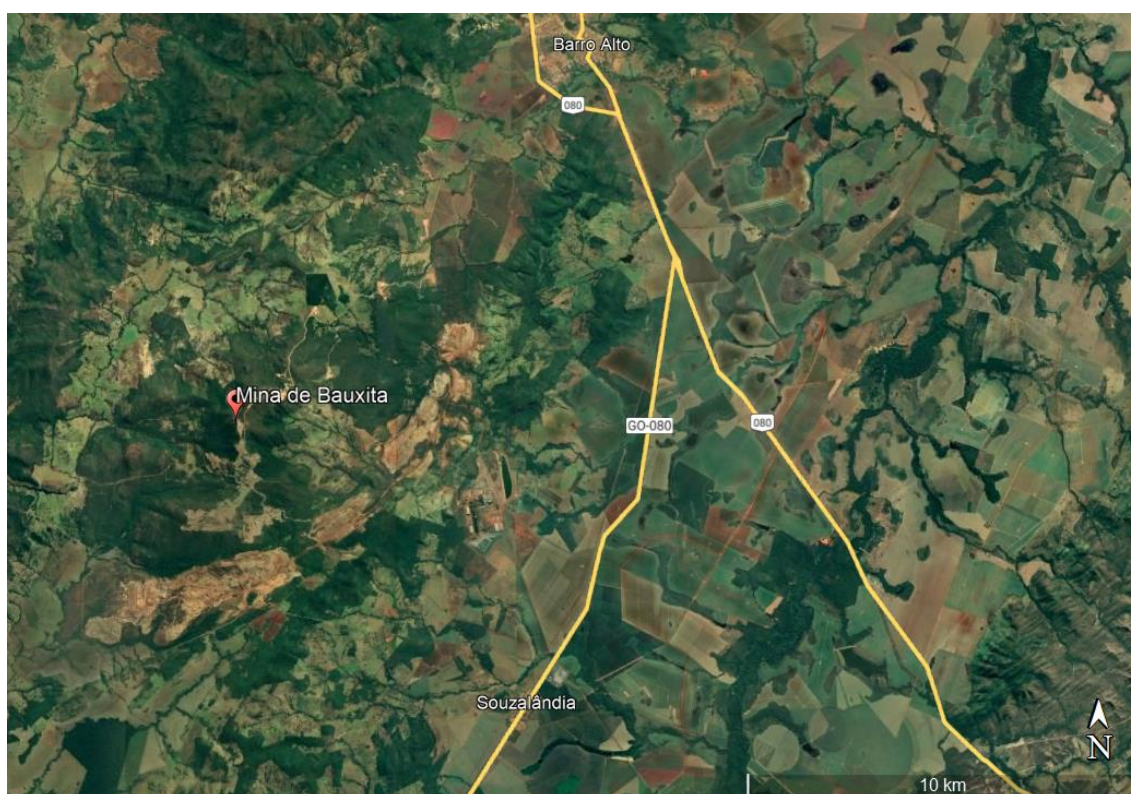
A CBA estimula boas práticas de responsabilidade social e suas operações são orientadas para o desenvolvimento local e constante diálogo. Com essa finalidade, realiza investimentos no desenvolvimento nas comunidades incluindo fomento às cadeias produtivas, qualificação de ONGs locais e apoio à gestão pública.

4.2. Localização do projeto

O depósito de bauxita Barro Alto está localizado nos municípios de Barro Alto e Santa Rita do Novo Destino (Figura 32), estado de Goiás, Brasil. Encontra-se a aproximadamente 240 km de Goiânia, capital do estado.

O acesso pode ser feito pelas rodovias federais BR - 414 e BR - 080 a partir da capital federal, Brasília. A cidade de Goianésia é a cidade com maior infraestrutura nas proximidades do projeto, a cerca de 54 km de distância.

Figura 32- Localização da mina de bauxita da CBA.



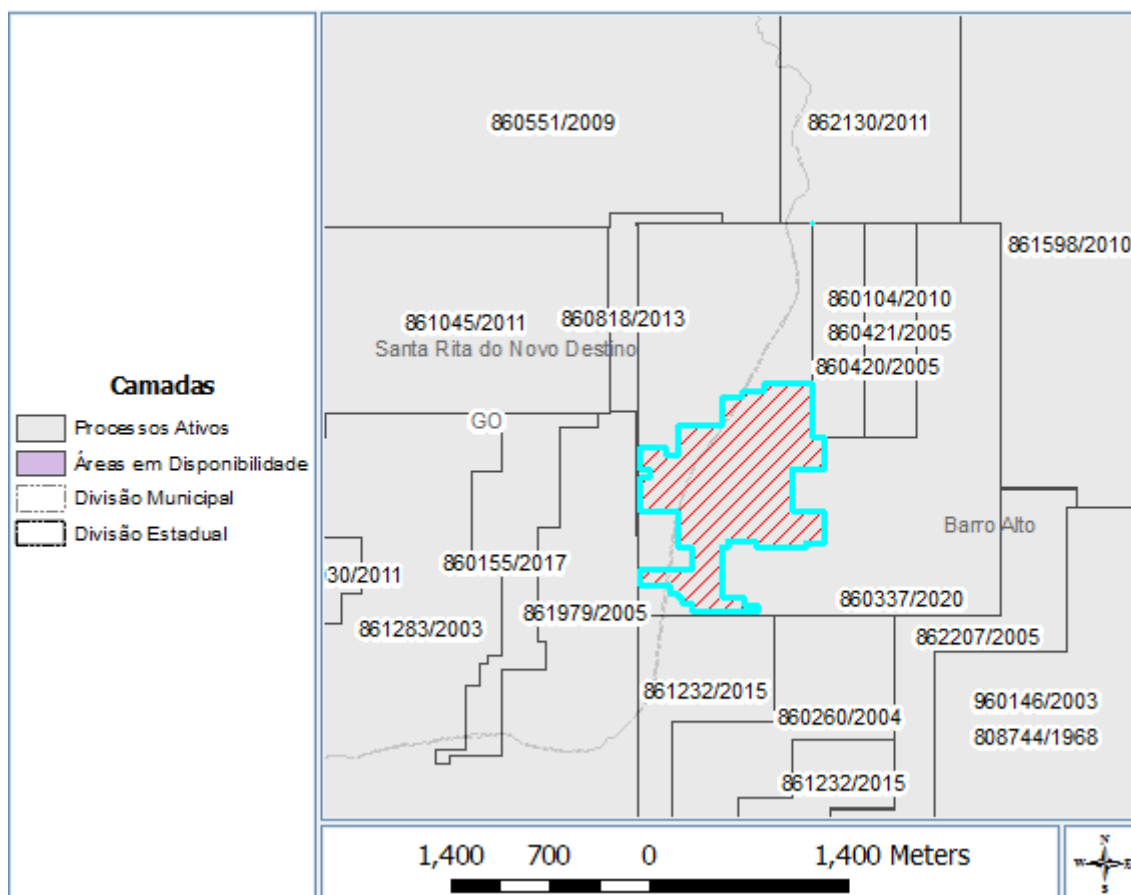
Fonte: Google Earth, 2023.

4.3. Direitos minerários

Os direitos minerários no Brasil são regidos pelo Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018, que regulamenta o Decreto 227, de 27 de fevereiro de 1967 e outras regras promulgadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Essa agência governamental, que controla as atividades de mineração em todo o Brasil, foi criada recentemente em substituição ao antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) é titular do Processo Minerário 861.979/2005. O processo minerário está em fase de Concessão de Lavra autorizada pela Portaria de Lavra, publicada no diário oficial da União de 28/03/2018, que autorizou a lavra da substância bauxita numa área de 574,67 hectares. A área que contém os recursos minerários de bauxita do Projeto Barro Alto corresponde a 120,5 hectares, conforme demonstrado na Figura 33.

Figura 33- Direito minerário do Depósito Barro Alto (861.979/2005).



Fonte: Site oficial da Agência Nacional de Mineração (ANM), 2022.

A CBA adquiriu em 2005 esse direito minerário situado na região de Barro Alto, estado de Goiás, com massa de 20 (vinte) milhões de toneladas de bauxita base seca (Mt bs).

4.4. Geologia regional

Os complexos Niquelândia, Cana Brava e Barro Alto fazem parte de uma extensa faixa descontínua de rochas de médio e alto grau metamórfico, onde são caracterizados a borda oriental do Maciço de Goiás (Fuck, 1994).

Geologicamente o depósito de bauxita de Barro Alto está inserido sobre o Complexo Máfico-Ultramáfico de Barro Alto (CBA), constituído por um terreno granulítico exposto no interior do Maciço de Goiás, Província Tocantins, com um comprimento no eixo mediano aproximado de 153 km, largura entre 8 e 25 km e área total de 2.860 km² (Costa, 2017).

4.5. Geologia local

O contexto litológico, a topografia (entre 900 e 1.500 metros de altitude) e a drenagem da área do depósito mineral foram extremamente favoráveis ao desenvolvimento dos perfis de intemperismo que geraram a bauxita (Costa, 2017).

O depósito de bauxita de Barro Alto é composto por quatro litologias facilmente reconhecidos em campo (Figura 33). Do topo para a base ocorre:

- Bauxita (BX) – com textura compacta ou porosa, de coloração amarelo-avermelhado, constituída predominantemente por gibbsita e caulinita, com porções ferruginosas disseminadas ou na forma de bandas milimétricas.
- Bauxita Argilosa (BA) - ocorre predominantemente na forma de bauxita compacta de coloração cinza a rosa, com porções significativas de argila de coloração branca a rosa. Apresenta mineralogia composta por caulinita, gibbsita e halloysita.

- Argila (AG) - ocorre na forma de bolsões dentro do horizonte da bauxita e tem coloração variando de branca a rósea.
- Anortosito (AN) - é a rocha geradora do perfil laterítico do depósito de Barro Alto. As rochas anortosíticas aflorantes apresentam cor cinza médio, textura granular e estrutura maciça.

4.6. Método de lavra

A bauxita de Barro Alto é considerada de alta qualidade e os teores da mineralização atendem aos teores especificados para o processo Bayer de produção de alumina.

O método de lavra selecionado para o projeto é em cava, que contempla a utilização de equipamentos convencionais de pequeno porte. As operações unitárias básicas incluem controle de lavra, carregamento, transporte, disposição dos materiais nos seus respectivos destinos e reabilitação com solo vegetal. O método de lavra não considera desmonte com explosivos, deixando o embasamento de anortosito *in-situ*. As áreas de lavra previstas passam previamente por uma operação de supressão da cobertura vegetal, retirada da camada de solo vegetal e empilhamento em estoques para sua posterior utilização no processo de reabilitação (SRK Consulting, 2021).

A operação de lavra é feita por empresa terceirizada que, além desse contrato, também presta serviços de beneficiamento da bauxita. A lavra dos materiais é realizada através de escavadeiras hidráulicas de 35 toneladas de peso operacional, atualmente distribuídas em 3 frentes, que operam em bancos operacionais de 2 ou 4 metros de altura finalizando em bancos de 6 metros. Os caminhões utilizados para transporte são de pequeno porte, e levam o material para seus destinos conforme sua classificação, minério ou estéril.

Figura 34 - Operações de lavra na mina de Barro Alto.



Fonte: Acervo pessoal do autor, 2022.

Como o depósito está localizado no terreno mais alto e íngreme da região, a operação de drenagem de mina é favorecida nas frentes de lavra. Todavia, o terreno íngreme prejudica a segurança das operações em épocas chuvosas, período em que as operações devem ser paralisadas para a retomada na estiagem.

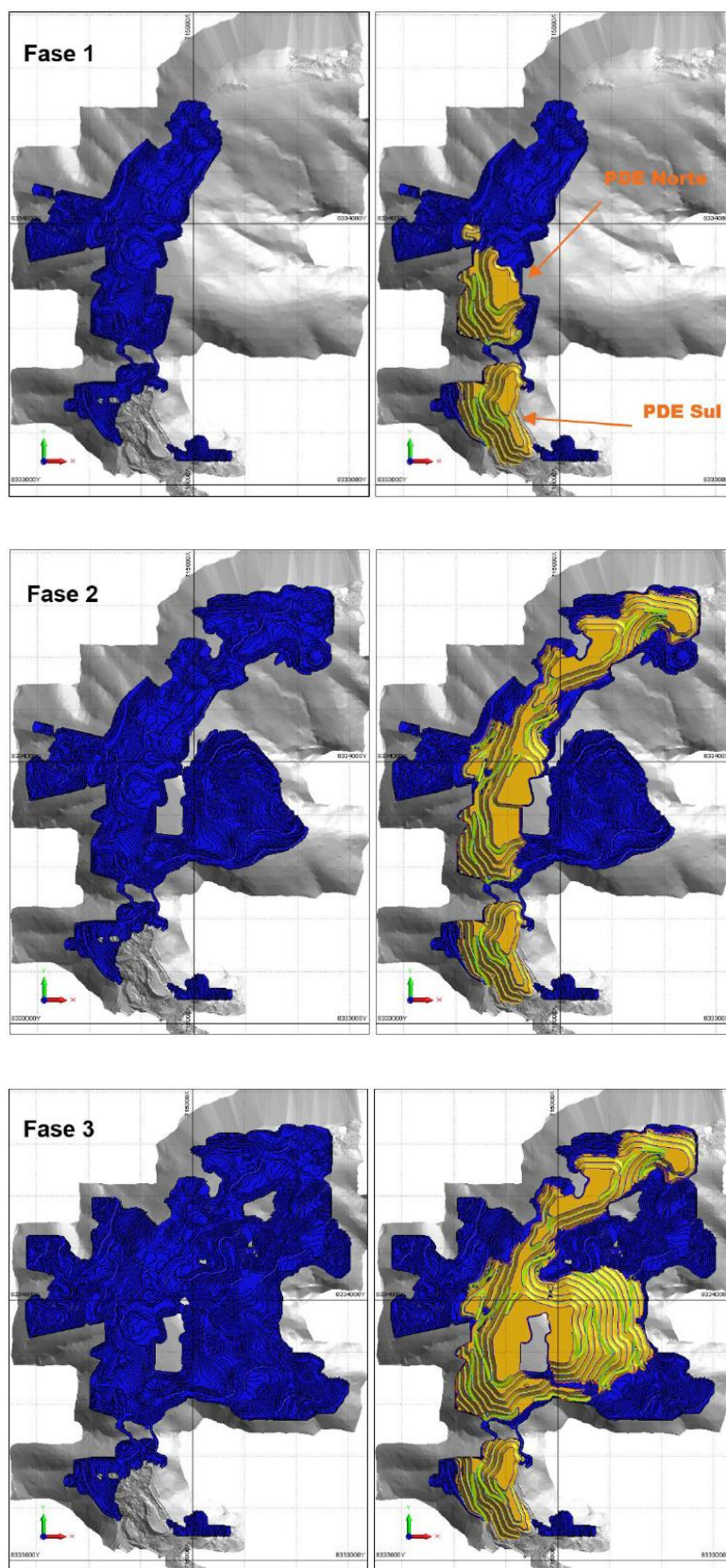
4.7. Pilha de estéril

Todo o estéril gerado na mina é disposto em pilhas dentro da própria cava exaurida, seguindo todas as orientações do projeto de pilha de estéril, elaborado pela SRK Consulting em 2021. No relatório encontram-se as premissas, critérios e dimensionamentos do projeto conceitual das pilhas, abrangendo a fundação, estabilidade dos taludes, drenagem superficial e interna e plano de monitoramento.

São previstas duas pilhas (Norte e Sul) para armazenar o estéril decorrente da exploração mineral. O plano de expansão da cava e das PDE 's está dividido em três etapas cronológicas, sendo que ao final da Fase 1 a PDE Sul já terá seu volume de disposição exaurido, ocorrendo nas fases posteriores, Fase 2 e Fase 3, a expansão da PDE Norte. A Figura 35 mostra o arranjo geral da disposição do estéril nas pilhas conforme o avanço de cada Fase. As pilhas serão construídas de forma ascendente, com carregamento e lançamento por caminhões basculantes, com posterior conformação por trator de esteira e compactação pela passagem de veículos e equipamentos. Posteriormente serão reconformadas para atingir sua geometria final e feita sua proteção vegetal para controle de erosões e fechamento (SRK Consulting, 2021).

O relatório expõe que a fundação das pilhas é, portanto, a própria cava, composta de material rochoso. Uma vez que a fundação será a superfície previamente escavada, composta por rocha sã ou alteração de rocha, considera-se que essa superfície já possui as características ideais para fundação das pilhas, não sendo necessário nenhum tipo de tratamento e/ ou preparo.

Figura 35 - Fases do projeto de disposição de estéril em cava.



Fonte: SRK Consulting, 2021.

Atualmente a disposição e execução da pilha se encontra na região Sul da cava, conforme foi planejado em projeto. Após conclusão da geometria final da pilha, será instalado indicadores de nível d'água (INA) e marcos superficiais (MS) para garantir a operação e segurança das pilhas. A Figura 36 mostra a situação atual da pilha de estéril na mina.

Figura 36 - Situação atual da pilha de estéril na região sul do direito minerário.



Fonte: Acervo pessoal do autor, 2023.

O fechamento e revestimento vegetal das pilhas irá ocorrer concomitantemente com o desenvolvimento da lavra, sendo realizados bancada a bancada, uma vez que essas deixem de ser ativas, encontrando-se em etapa final de fechamento.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de trabalho teve como premissa a utilização do projeto de lavra de mina e disposição de estéril em cava realizado pela empresa de consultoria SRK Consulting em 2021, onde essas informações se encontram no relatório JORC. Sendo assim, foi comparado o sequenciamento de lavra contido no relatório com o cenário de sequenciamento sem estar sujeito à restrição de disposição de estéril realizado no presente trabalho, objetivando uma avaliação econômica através do VPL. Como resultado, obteve-se o impacto econômico dessa restrição no projeto de mineração em Barro Alto.

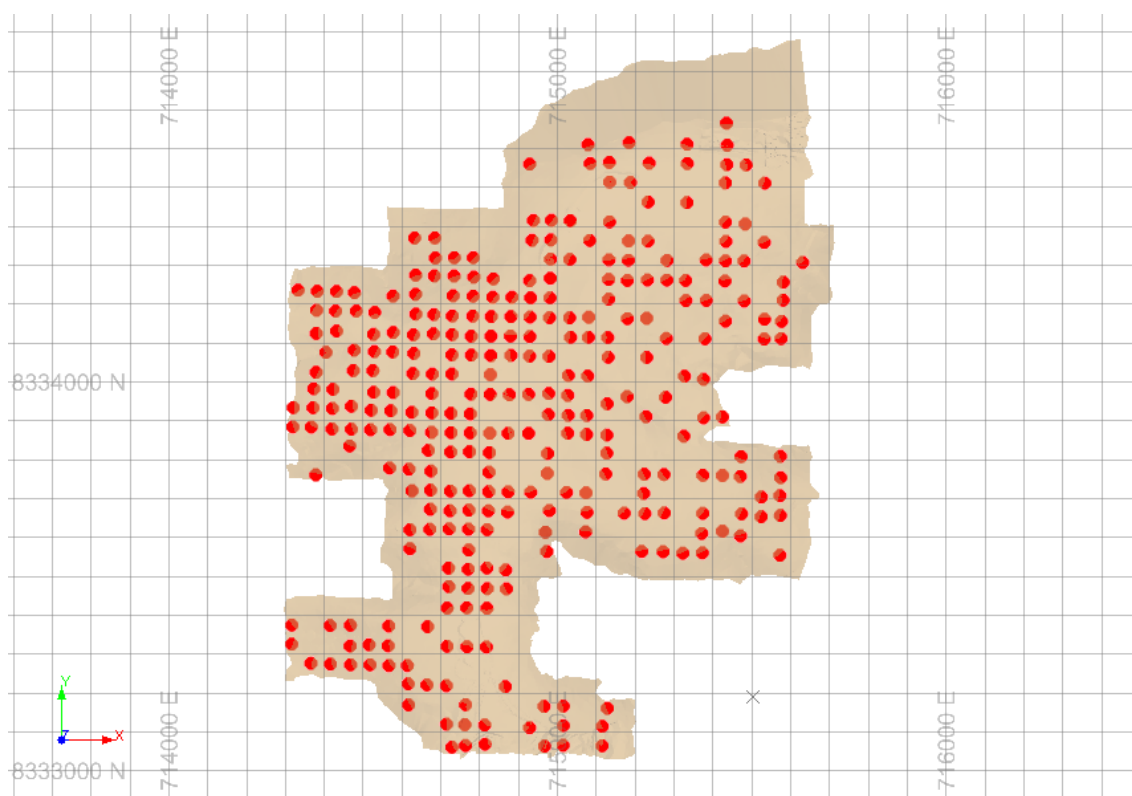
5.1. O banco de dados

O banco de dados foi construído com base em campanha de sondagem executada entre os anos de 2005 e 2008. A malha de sondagem é de aproximadamente 50 x 50 metros em toda a área do projeto.

A Figura 37 mostra, em vermelho, a localização desses furos de sondagem. O banco de dados inclui informações sobre os domínios Bauxita (BX), Bauxita Argilosa (BA), e Argila (AG) para as variáveis Alumina Aproveitável e Sílica Reativa.

A análise da malha de sondagem realizada é importante para verificar se a área de interesse do início da lavra está bem fechada, ou se existe um período para fechar essa malha até o início das operações da mina. Isso gera uma maior segurança nas operações de lavra e na disposição de estéril futura, minimizando o risco de dispor estéril em áreas potenciais de minério (Carvalho, 2009).

Figura 37 - Localização das amostras utilizadas na estimativa de recursos.



Fonte: Imagem extraída pelo autor no software Datamine Studio OP, 2023.

5.1.1. Classificação

Segundo o relatório técnico independente, os recursos minerais de Barro Alto foram classificados nas categorias medido, indicado e inferido, conforme definições do JORC Code 2012. Os seguintes parâmetros foram usados para a Classificação dos Recursos Minerais:

- Recursos Medidos: Blocos estimados com raio de busca de 50x50x10m e mínimo 3 furos de sonda;
- Recursos Indicados: Blocos estimados com raio de busca de 100x60x20m e mínimo 2 furos de sonda;
- Recursos Inferidos: Blocos estimados com raio de busca de 200x150x30m e mínimo 1 furos de sonda.

Os critérios de classificação de recursos levaram também em consideração outros fatores relevantes para a declaração de Recursos Minerais, tais como:

- I. qualidade dos dados amostrais e químicos (QAQC);
- II. continuidade geológica: o controle de mineralização é bem estabelecido, no nível de confiança necessário para a interpretação geológica e estimativa de Recursos Minerais;
- III. variabilidade dos teores: cada domínio geológico tem distribuições de teor bem definida e distinta;
- IV. as perspectivas razoáveis para uma eventual extração econômica do depósito.

Os recursos minerais foram reportados em conformidade com as diretrizes do Código JORC, edição de 2012. A Tabela 4 apresenta um resumo dos Recursos Minerais, reportados com data efetiva, da Declaração de Recursos Minerais, de 31 de dezembro de 2020.

Tabela 4 - Declaração de Recursos Minerais, de 31 de dezembro de 2020.

Classificação	Tonelagem (Mt)	Teor	
		Av_Al ₂ O ₃ %	Rx_SiO ₂ %
Medido	10,8	52,88	3,77
Indicado	18,1	54,10	3,65
Medido + Indicado	28,9	53,64	3,70
Inferido	2,6	53,76	3,79
Total	31,5	53,65	3,70

Fonte: Formulário de Referência da Companhia Brasileira de Alumínio, 2022.

(1) Recursos Minerais não são Reservas de Minério e não possuem viabilidade econômica demonstrada. Todos os números estão arredondados para refletir a precisão relativa das estimativas.

(2) Tonelagem in situ.

(3) A bauxita não é lavada e, portanto, a recuperação é 100%.

(4) Os teores de corte para declaração de Recursos Minerais foram Av_Al₂O₃ >= 40% e Rx_SiO₂ <= 10%, definidos com base nos limites atuais, utilizados pela CBA, de aceitação do processo de refino de produção de Alumina.

(5) Av_Al₂O₃: alumina disponível.

(6) Rx_SiO₂: sílica reativa.

(7) Os teores e tonelagens estão reportados em base seca.

5.2. Otimização de cava

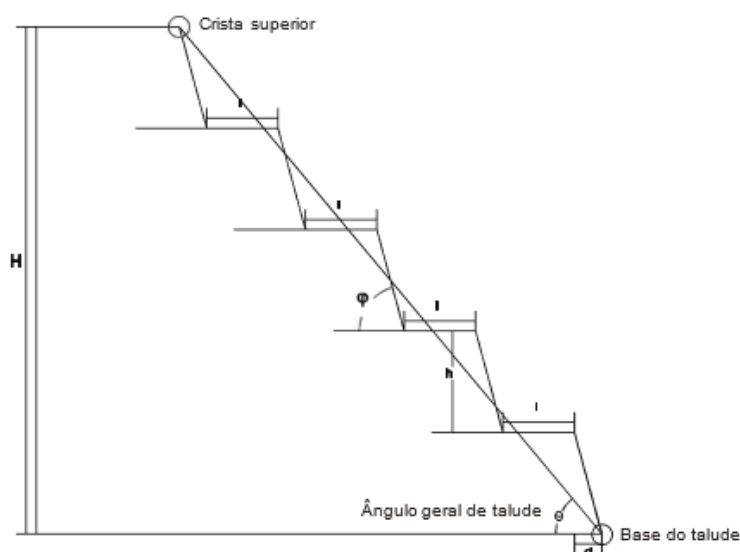
5.2.1. Premissas

A geração da cava final envolve a combinação dos resultados da valoração dos blocos, com o inventário mineral construído. Por definição, cava final é a cava que possui o maior fluxo de caixa descontado dentro dos parâmetros econômicos, com as restrições geométricas e geomecânicas que se apresentarem no depósito (Peroni, 2002).

No relatório JORC foi executada uma otimização de cava e obtida a cava final, considerando o modelo de Recursos Minerais desenvolvido pela SRK em agosto de 2021, base 31 de dezembro de 2020. O modelo apresenta Recursos Minerais classificados como Medido, Indicado e Inferido. Todavia, seguindo os critérios de classificação de recursos e reservas de minério, somente foram consideradas como minério para a geração da cava final os recursos Medidos e Indicados.

Em termos de estabilidade de taludes, o depósito tem um comportamento regular. A Figura 38 apresenta um esquema de múltiplas bancadas, onde o ângulo que se está fazendo referência corresponde ao ângulo θ , que representa o ângulo geral de talude.

Figura 38 - Representação do ângulo geral de talude.



Fonte: Peroni, 2002.

5.2.2. Construção da função benefício

No processo de avaliação de reservas de bauxita da CBA são considerados os custos operacionais da lavra, beneficiamento, logística e as etapas produtivas da produção de alumina.

Os valores obtidos referem-se aos custos do processo da bauxita na CBA, utilizados para a avaliação econômica do depósito. Os valores foram obtidos utilizando-se uma rotina desenvolvida em linguagem computacional, utilizando comandos do Datamine Studio OP, para automatizar a valoração dos blocos de mineração. A Figura 39 mostra a composição dos custos utilizado na função.

Figura 39 - Resumo do processo da bauxita na CBA.



Fonte: Ilustração elaborada pelo autor, 2023.

A definição do preço de venda foi estabelecida de forma que atendesse o contexto produtivo da CBA. Toda bauxita lavrada e beneficiada na mina de Barro Alto é consumida pela própria CBA em sua planta metalúrgica, localizada no município de Alumínio, São Paulo. Dessa maneira, a bauxita é transformada em alumina (óxido de alumínio) através do processo Bayer e, logo em seguida, transformada em alumínio primário. Como resultado, a função benefício utilizada pelo planejamento de lavra considerou a valoração da bauxita realizada sob a base óxido de alumínio.

O preço de venda hipotético do óxido, estipulado em reais por tonelada de óxido, é formado por:

- Custo operacional de produção do óxido de alumínio (lavra, beneficiamento, frete externo, vapor, soda cáustica, hidrato e óxido);
- Margem bruta de todo o processo de transformação da CBA:
 - (+) Faturamento;
 - (-) Custos Variáveis;
 - (-) Custos Fixos;
 - (-) Despesas operacionais;
 - (-) *Sustaining* (exceto das unidades de mineração).

5.2.3. Resultados da otimização

O estudo de mina consistiu na consolidação de uma função benefício, otimização e seleção de cava, sequenciamento de lavra e disposição de estéril e avaliação econômica a partir do modelo contendo a classificação de Recursos Minerais, superfícies topográficas e restrições físicas da mina. O resultado é uma cava contendo uma reserva de 19,3 Mt (base seca), com teores médios diluídos de 54,65% Av_{Al₂O₃} e 3,20% Rx_{SiO₂}. A quantidade de estéril dentro dos limites da cava é de 8,3 Mt (base seca). A vida útil da mina é estimada até 2042, considerando um aumento gradual da produção até atingir uma taxa de alimentação de 1,0 Mtpa (base seca) a partir de 2028 (Relatório de referência da Companhia Brasileira de Alumínio, 2022).

Sendo assim, a Tabela 5 apresenta um resumo das Reservas de Minério, reportados com data efetiva, da Declaração de Reservas de Minério, de 31 de dezembro de 2020.

Tabela 5 - Declaração de Reserva de Minério, de 31 de dezembro de 2020.

Classificação	ROM Mt bs	Av_Al2O3 %	Rx_SiO2 %	Óxido Mt
Provada	2,7	53,36	3,17	1,4
Provável	16,5	54,86	3,20	8,6
Total	19,3	54,65	3,20	10,0

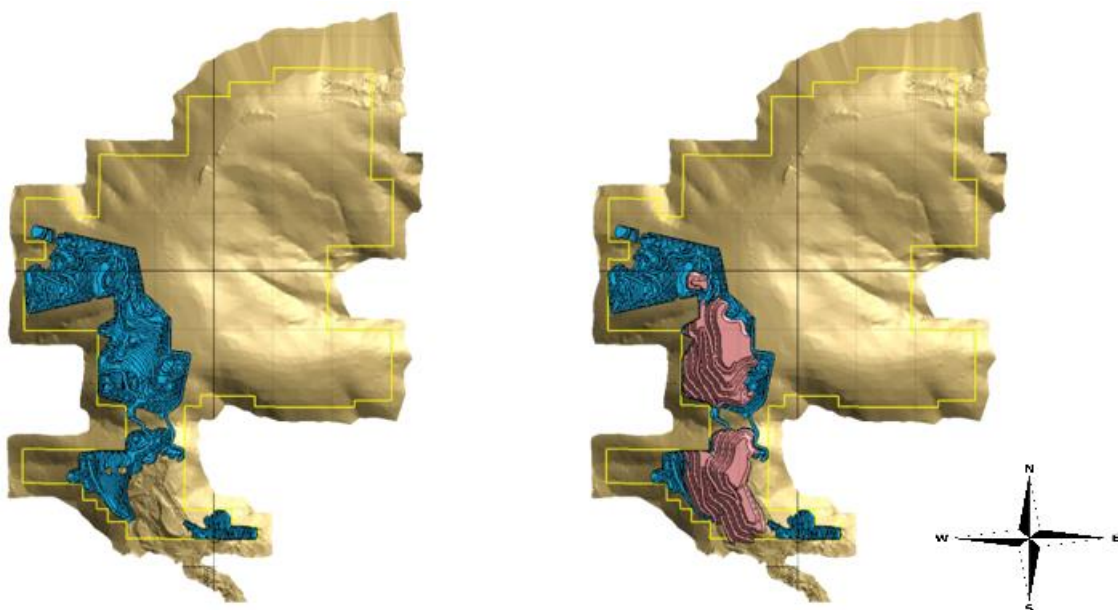
Fonte: Formulário de Referência da Companhia Brasileira de Alumínio, 2022.

5.3. Sequenciamento de lavra

O sequenciamento de mina foi definido de forma a atender o volume de produção de óxido determinado pela fábrica da companhia ao longo dos anos. A produção de bauxita integra o mix total das unidades de mineração da empresa, que além da mina de Barro Alto, conta também com as minas em Mirai e Poços de Caldas, sendo estas localizadas em Minas Gerais.

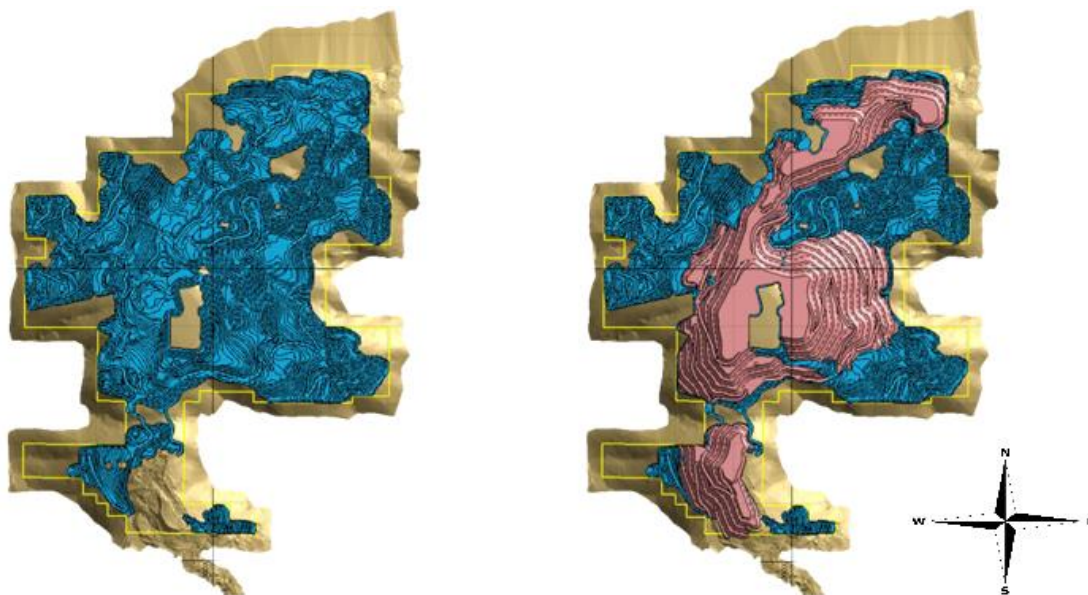
Uma das premissas principais foi permitir a disposição do estéril nas áreas previamente lavradas e exauridas. Outra premissa importante considerada no projeto foi a área da mina atualmente licenciada, sendo este setor o primeiro a chegar à exaustão de minério. As Figuras 40 e 41 mostram a cava e pilhas de estéril na área atualmente licenciada e na área de expansão futura.

Figura 40 - Cava de bauxita e disposição de estéril projetadas dentro da área licenciada.



Fonte: SRK Consulting, 2021.

Figura 41 - Cava de bauxita e disposição de estéril finais projetadas.

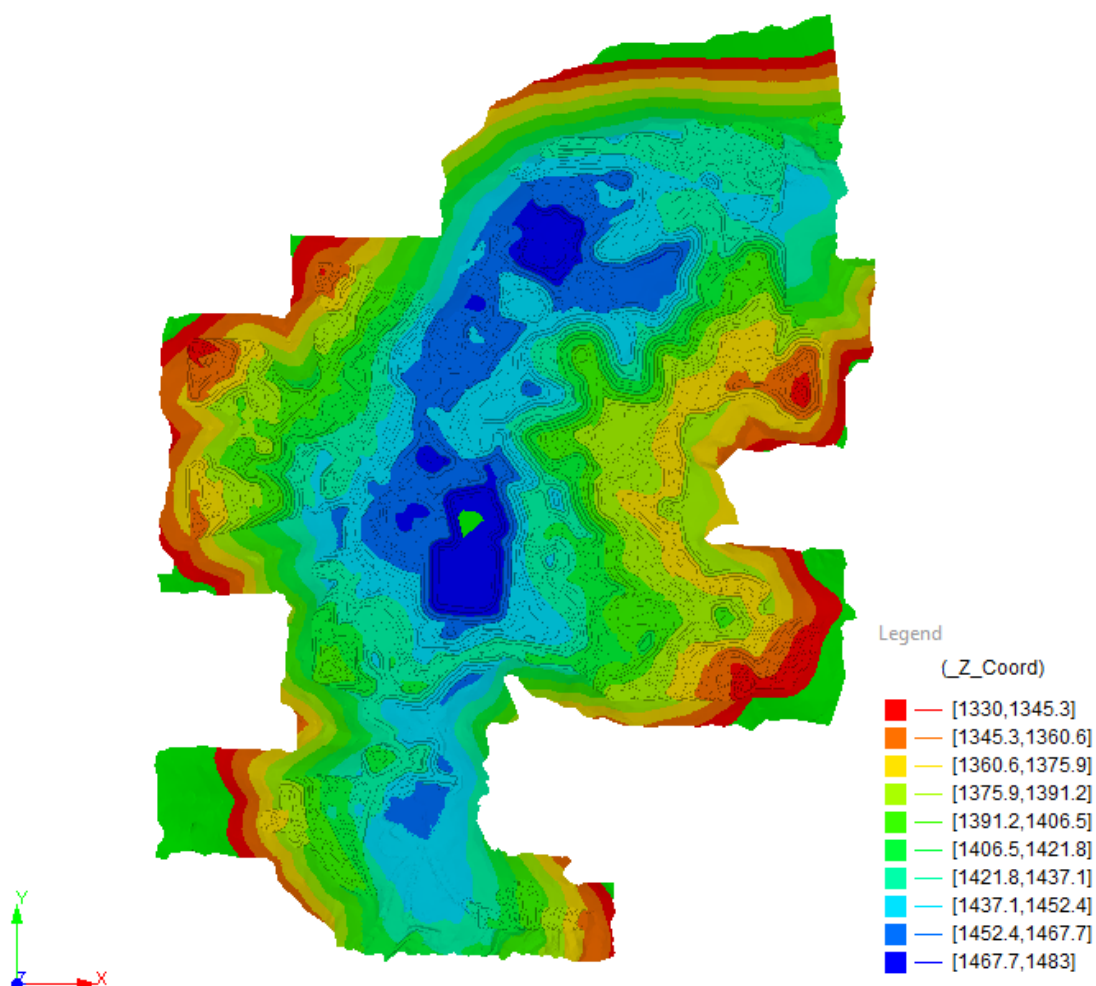


Fonte: SRK Consulting, 2021.

A base para o processo de sequenciamento com o NPV Scheduler é a utilização do modelo de blocos valorado economicamente e um conjunto de superfícies que definem os avanços operacionais.

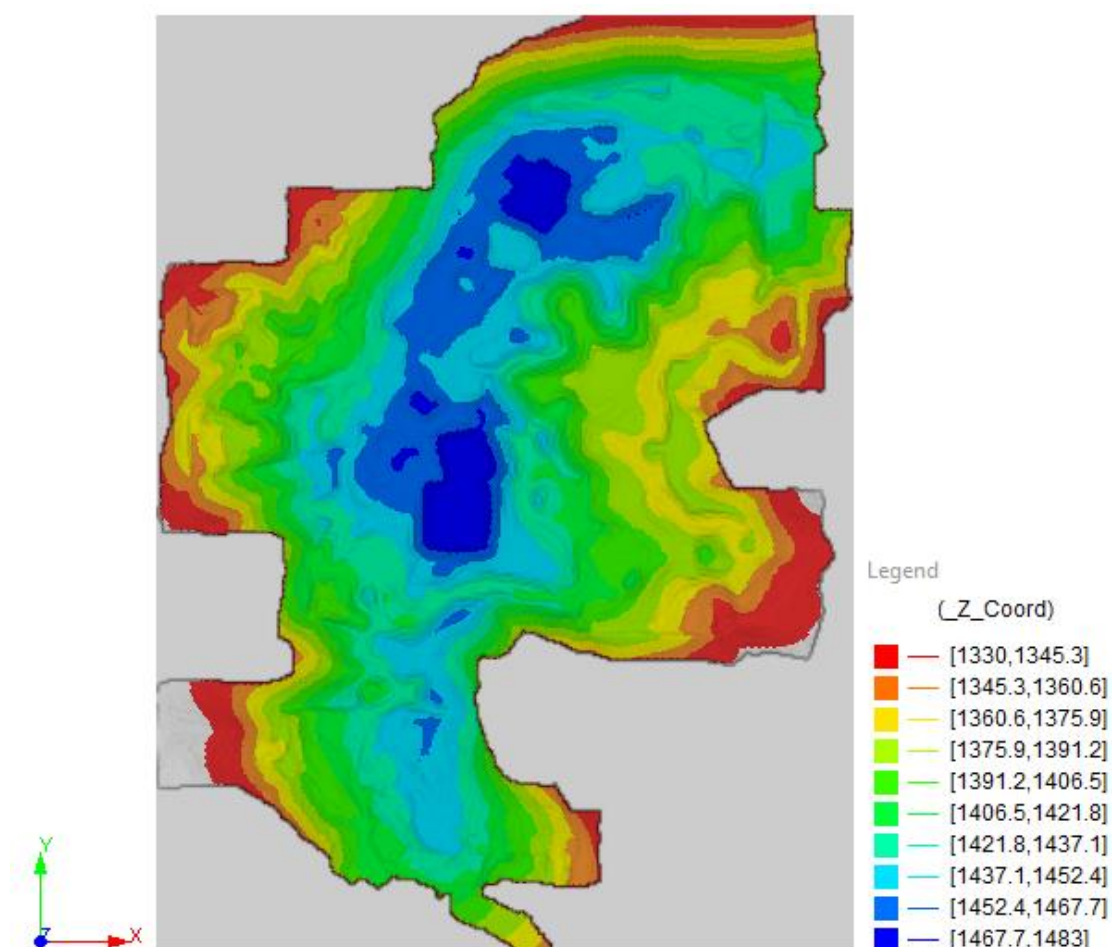
O cenário de sequenciamento realizado sem a restrição da disposição de estéril, para a comparação do VPL, teve como premissa utilizar a mesma cava final selecionada no relatório JORC. Dessa forma, os dois cenários foram analisados de uma mesma base de superfície final. No software *NPV Scheduler* é possível importar a superfície e realizar os processos de planejamento a partir dessa etapa. As Figuras 42 e 43 mostram a cava final importada e a importação dentro do software.

Figura 42 - Cava final divulgada no relatório JORC importada.



Fonte: Imagem extraída pelo autor no software Datamine Studio OP, 2023.

Figura 43 - Importação da cava final no software NPV Scheduler.



Fonte: Imagem extraída pelo autor no software NPV Scheduler, 2023.

A análise das duas superfícies acima é importante para checar o impacto da leve suavização da geometria da cava na importação do software NPV Scheduler. Geralmente isso não influencia na diferença de massa entre elas.

Uma funcionalidade importante que o software possui é a de realizar a checagem dos valores econômicos antes dos trabalhos de otimização do retorno financeiro, permitindo-se ter maior confiabilidade dos dados trabalhados. No exemplo mostrado na Figura 44, a checagem econômica é executada com um bloco do modelo de blocos.

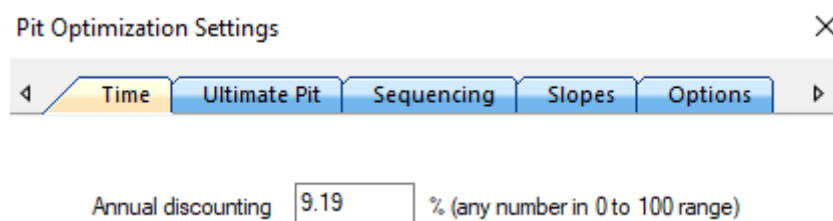
Figura 44 - Exemplo de checagem dos valores econômicos no NPV Scheduler.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1	Revenue and Cost Calculations																					
2	Revenue and Cost Calculations																					
3																						
4	Data	Input	Unit												Revenue	Processing	Mining	Revenue	Processing	Mining	Value	
5															\$/tonne	\$/tonne	\$/tonne	\$	\$	\$	\$	
6	Rock Type	Minério								Block mass	1	tonnes						1274.138571	566.4909423	19.6625	687.9851288	
7	av_a2di	53	Percent							Undefined waste		tonnes					0			0	-0	
8	rx_sidi	3	Percent							Parcel 1	1	tonnes	1274.138571	566.4909423	19.6625	1274.138571	566.4909423	19.6625	1274.138571	566.4909423	19.6625	687.9851288
9	lton	2	-/tonne																			
10	reserven	1	-/tonne																			
11	classn	1	-/tonne																			
12	Bench	1																				
13	PCAF	1																				
14	MCAF	1																				
15		Calculate																				

Fonte: Imagem extraída pelo autor no software NPV Scheduler, 2023.

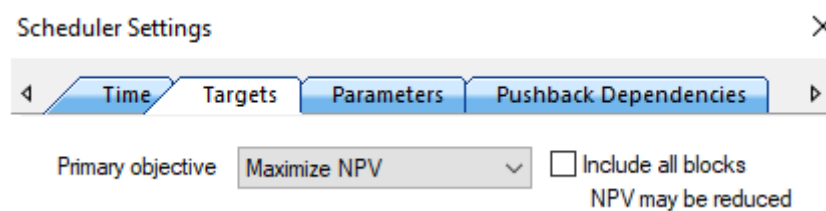
Foram então elaborados ensaios de planejamento de lavra com base na otimização do retorno financeiro ao longo da vida da mina, planejando a sequência de extração de minério de forma a maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) do empreendimento. Algumas rotinas do software permitem configurar a taxa de retorno e o objetivo primário do sequenciamento (maximização do VPL). Alvos como teor de alimentação, relação estéril / minério, podem ser definidos nessa etapa. Se a solução ótima não puder ser alcançada, o algoritmo vai seletivamente relaxar os alvos até encontrar um sequenciamento viável. Nas Figuras 45 e 46 pode-se observar como essas configurações são apresentadas no software.

Figura 45 - Definição da taxa de retorno no software NPV Scheduler.



Fonte: Imagem extraída pelo autor no software NPV Scheduler, 2023.

Figura 46 - Configuração do objetivo primário no software NPV Scheduler.



Fonte: Imagem extraída pelo autor no software NPV Scheduler, 2023.

Portanto, partindo-se da modelagem da jazida previamente desenvolvida, dos parâmetros econômicos da operação e da retirada da restrição de ordem de disposição de estéril, apresenta-se como resultado o sequenciamento da lavra a médio e longo prazo, de maneira a buscar o melhor retorno financeiro representado pelo VPL otimizado para as condições geológicas e econômicas propostas.

Realizado o sequenciamento, obteve-se os valores que foram tratados em Excel para melhor entendimento do impacto do VPL por se adotar técnicas de sequenciamento verde no empreendimento. Na próxima seção serão apresentados os resultados do sequenciamento sem a restrição de disposição de estéril em cava comparando com o cenário elaborado em 2021 restrito à disposição de estéril.

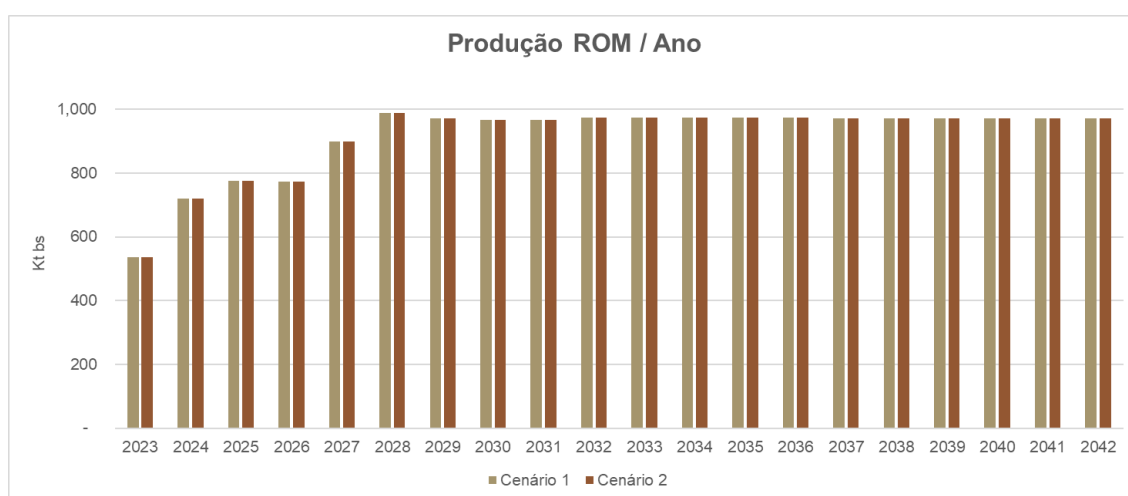
6. RESULTADOS

O Fluxograma de trabalho do software NPV Scheduler apresenta uma metodologia de construção do sequenciamento de mina capaz de criar cenários com maiores retornos econômicos. No cenário elaborado, algumas premissas foram adotadas com o intuito de tornar a comparação factível, sendo elas: valores de produção de minério anual iguais e exaustão da área licenciada precedendo a lavra na área de expansão. Nos gráficos dessa seção, as legendas foram definidas como:

- i. Cenário 1: Sequenciamento sujeito à restrição de disposição de estéril em cava;
- ii. Cenário 2: Sequenciamento sem restrição de disposição de estéril em cava.

Na Figura 47 observa-se que as produções se mantiveram iguais ao longo da vida útil da mina, conforme esperado e configurado no software. Apesar dessa premissa reduzir as chances de aumentar o VPL, ela permite que tenhamos um cenário ajustado com a capacidade de produção do empreendimento, que já se encontra instalado e em operação.

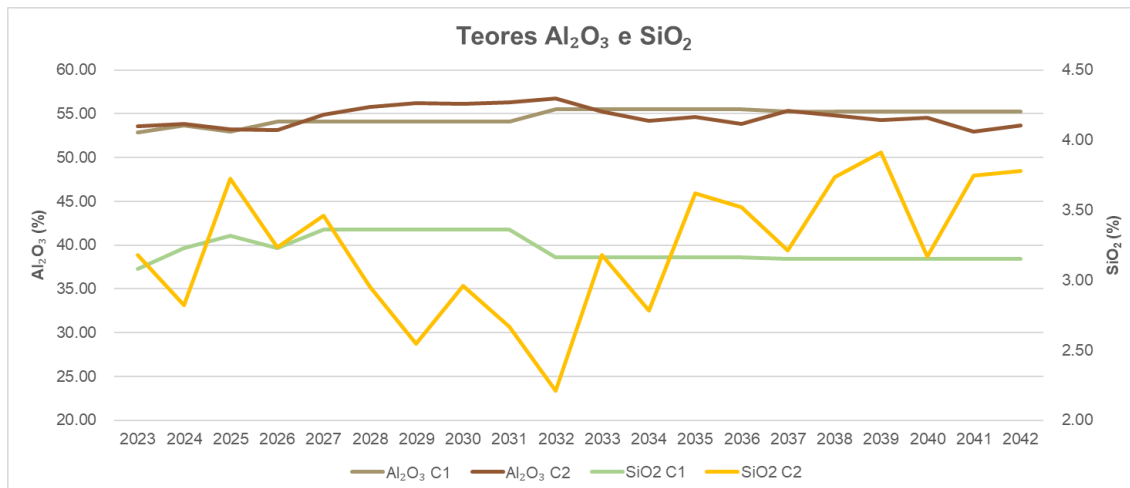
Figura 47 - Gráfico da taxa de produção anual de bauxita em cada cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A seleção dos maiores teores de alumina nos primeiros anos impacta positivamente no fluxo de caixa. A seletividade dos minérios mais ricos é um importante fator para impacto no fluxo de caixa, pois os blocos iniciais recebem menor fator de desconto. Esses blocos podem contribuir significativamente para o incremento do valor presente líquido. Na Figura 48, observa-se os teores de cada cenário e conclui que o Cenário 2, sem a restrição de disposição de estéril, procurou avançar nas frentes de melhores teores de alumina nos primeiros anos. É importante destacar que apenas no ano de 2026 o teor de alumina ficou menor que o Cenário 1 por conta da restrição da área licenciada. Esse ponto forçou o software a analisar o sequenciamento em duas fases e isso o levou a somente avançar para a área de expansão após a exaustão da área licenciada, considerando teores piores para 2026.

Figura 48 – Gráfico de teores de alumina aproveitável e sílica reativa nos dois cenários.



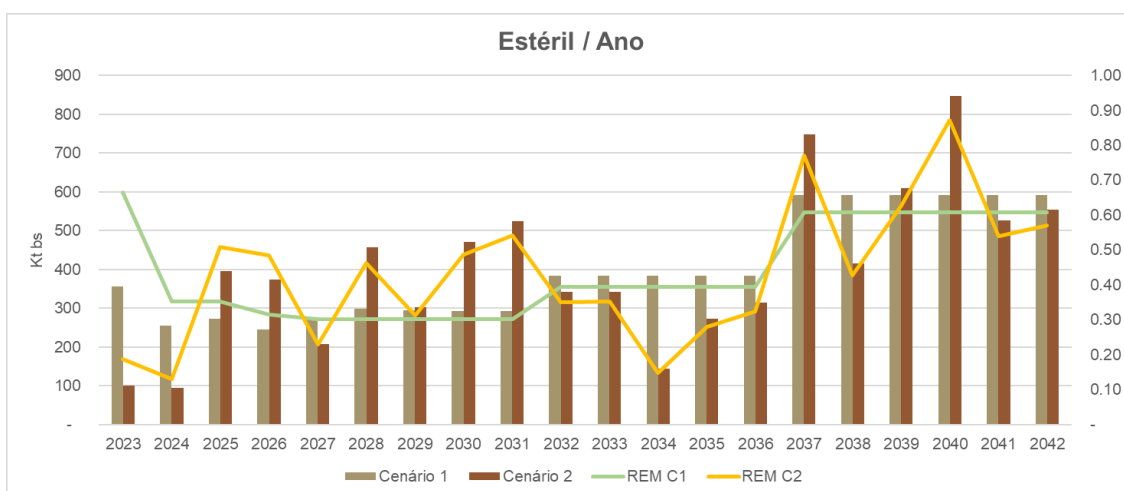
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Outro ponto que apresenta relevância no gráfico acima é a variabilidade dos teores de sílica. O sequenciamento matemático levou em conta a maximização do valor presente líquido (VPL), o que gerou grande variabilidade desses teores no decorrer dos anos. Esse aspecto poderia prejudicar os ajustes

com o consumo de soda cáustica na refinaria da companhia, que certamente deveria ser ajustado na combinação de produção das três unidades de mineração.

Na Figura 49 são apresentados a geração de estéril e a relação estéril/minério (REM) de cada cenário de sequenciamento. O Cenário 2 se mostrou com alta variabilidade da REM ao longo dos anos, o que pode ser considerado desfavorável para as operações de lavra, já que esse fator prejudica a gestão da frota e da equipe. A movimentação crescente e constante de estéril no Cenário 1 em alguns anos favorece a dinâmica de disposição de estéril em cava e é fundamental para a sua implementação.

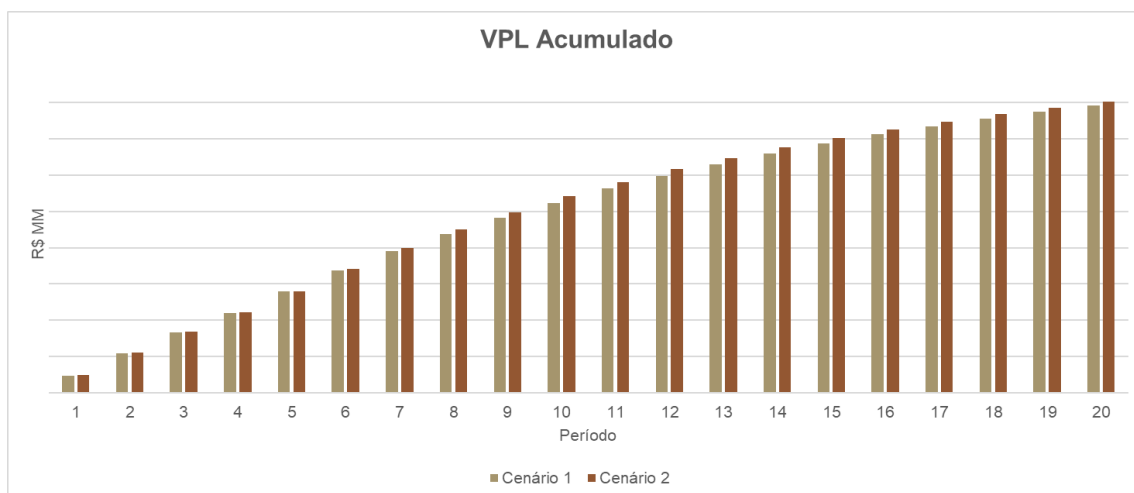
Figura 49 - Gráfico com a geração de estéril e relação estéril/minério anuais.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 50 mostra o VPL acumulado, que configura numa discreta diferença positiva para o Cenário 2. Devido à convergência dos valores de teor, pode ser concluído que o sistema cumpre com sucesso a meta de atingir teores necessários para incrementar o VPL, sendo capaz de adiantar o minério mais rico nos primeiros períodos.

Figura 50 - Gráfico do VPL acumulado em cada cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Tabela 6 apresenta o sequenciamento do Cenário 2, elaborado para a comparação proposta. O Cenário 2 teve um aumento de 1.3% no VPL em relação ao Cenário 1, que apesar de positiva pode ser considerada baixa para optar na escolha desse cenário em detrimento ao sequenciamento verde do empreendimento. No Anexo 1, pode-se observar a disposição anual dos avanços de lavra ao longo dos anos.

Tabela 6 - Plano de produção do Cenário 2.

Plano de Lavra e Produção	Valor Unitário	Unidade	Total	Ano 01	Ano 02	Ano 03	Ano 04	Ano 05	Ano 06	Ano 07	Ano 08	Ano 09	Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
				2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Minério																							
Massa (base seca)		kt bs	18,297	535	720	775	774	899	988	972	966	966	973	973	973	973	973	972	972	972	972	972	972
Massa (base úmida)		kt bu	20,330	594	800	861	860	999	1098	1080	1073	1073	1082	1082	1082	1082	1082	1080	1080	1080	1080	1080	1080
Av. Al2O3 Diluído		%	54.74	53.59	53.82	53.18	53.17	54.86	55.82	56.23	56.14	56.30	56.71	55.24	54.24	54.61	53.86	55.30	54.86	54.30	54.54	52.95	53.64
Rx. SiO2 Diluído		%	3.22	3.18	2.82	3.73	3.23	3.46	2.95	2.55	2.96	2.67	2.21	3.18	2.78	3.62	3.52	3.21	3.73	3.91	3.17	3.75	3.78
Estéril																							
Massa (base seca)		kt bs	8,050	101	94	396	375	207	458	304	471	524	343	343	145	274	315	748	415	610	847	526	555
Massa (base úmida)		kt bu	8,945	113	105	440	417	230	509	337	523	583	381	381	161	304	350	832	462	677	941	584	616
REM		t / t	0.44	0.19	0.13	0.51	0.48	0.23	0.46	0.31	0.49	0.54	0.35	0.35	0.15	0.28	0.32	0.77	0.43	0.63	0.87	0.54	0.57
Produção de Bauxita																							
Massa de Bauxita		kt bs	18,297	535	720	775	774	899	988	972	966	966	973	973	973	973	973	972	972	972	972	972	972
Massa de Bauxita		kt bu	20,330	594	800	861	860	999	1098	1080	1073	1073	1082	1082	1082	1082	1082	1080	1080	1080	1080	1080	1080
Produção de Óxido de Alumínio																							
Massa de Óxido de Alumínio		kt	9,456	271	366	389	389	466	521	516	512	514	521	508	499	502	495	508	504	499	501	486	492

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

7. CONCLUSÕES

O objetivo principal de um projeto de mineração é a maximização do VPL. No entanto, dentro de um sequenciamento de mina, muitos fatores são levados em consideração para a escolha de um plano de produção ideal. Nos últimos anos, empresas que adotam práticas ESG vêm agregando grande valor aos seus negócios.

No segundo cenário, como o objetivo primário do software foi de maximizar o NPV, não houve estacionarização das variáveis no decorrer do sequenciamento, principalmente da sílica e tonelada de estéril. Esses dois fatores podem influenciar na perda de eficiência produtiva e na dificuldade de gestão de contratos e equipes.

Com os resultados obtidos pode-se concluir ao analisar a pouca diferença entre o VPL dos dois cenários, que a adoção pelo sequenciamento verde a luz do critério econômico também é justificada. Pois pelos aspectos ligados à pauta ESG, tem-se uma característica muito apreciada ambientalmente, pois evita a necessidade de degradação de áreas para a disposição de estéril. Ocorre que, ao aderirem a essas políticas, o capital, naturalmente está se direcionando de maneira específica a entidades que estejam adequadas à nova dinâmica disposta pela preocupação com tópicos de sustentabilidade socioambiental.

Portanto, a escolha do cenário com a restrição de disposição de estéril em cava se mostra o mais favorável para a companhia. O sequenciamento verde apresenta ganhos tangíveis e intangíveis, como a reabilitação mais fácil da área da mina, não degradação de uma área virgem para a colocação de estéril, melhor relacionamento com os órgãos ambientais e pode ser considerada uma atividade de reabilitação da área degradada. Além dessa alternativa, outras formas de aproveitamento do estéril também podem ser consideradas como benéficas para o uso futuro dessas áreas.

Devido ao caráter conceitual desse estudo, somente as cavas matemáticas geradas pelo software foram utilizadas para comparação do retorno financeiro, não havendo necessidade, nesse momento, de comparações com as cavas operacionalizadas.

8. RECOMENDAÇÕES DE CONTINUIDADE DA PESQUISA

Durante o desenvolvimento do trabalho foi possível identificar oportunidades de estudos futuros que podem corroborar com o tema. Através de estudos geotécnicos e operacionais, pode-se buscar viabilidade da disposição de estéril em cava procurando priorizar o sequenciamento econômico, avançando primeiramente em áreas de maiores teores de alumina aproveitável e baixa sílica reativa.

Outra recomendação seria de analisar o custo de capital de aquisições de novas áreas para disposição de estéril e os custos operacionais dessa metodologia, avaliando o impacto econômico e socioambiental dessa escolha em detrimento ao sequenciamento verde.

Por fim, buscar alternativas para aproveitamento do estéril gerado na mina, objetivando a redução do impacto ambiental e o aumento na geração de valor da companhia.

REFERÊNCIAS

- ABAL, Associação Brasileira de Alumínio. **Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade**. São Paulo: Gráfica Mundo, 2017.
- ANON. **Dirty Metal, Mining Communities and Environment, Earthworks**. Oxfam America, Washington, 2006.
- APPLEYARD, B. **Non-Geological Reserve Considerations. Unpublished document provided to authors of the Resource to Reserve Inputs Seminar**. Melbourne, Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 1997.
- BARNES, R. J. **Optimizing the ultimate pit**. Colorado School of Mines, MSc. Thesis, 1982. 120p.
- BIONDI, J.C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.
- BLANK, L. e TARQUIM, A. **Engenharia Econômica**. 6ª Edição. Tradução: José Carlos Barbosa Santos; Revisão técnica: Daisy Aparecida Rebellatto. Porto Alegre: AMGH, 2008.
- CACETTA, L. e HILL, S. **Optimization techniques for open pit mine scheduling**. Presented at MODSIM 1999 International Congress on Modelling and Simulation. 1999.
- CARVALHO, M. G. A. **Estratégia ambiental pró-ativa: Sequenciamento de lavra concomitante com a disposição de estéril dentro da mina**. São Paulo: Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2009.
- CARVALHO, A. **As Bauxitas no Brasil: Síntese de um programa de pesquisa**. Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências. São Paulo, 1989.
- CBRR. **Guia da Comissão Brasileira de Recursos e Reservas para Declaração de Resultados de Exploração, Recursos e Reservas Minerais**. Brasília, Distrito Federal, 2016.

CBRR. **Guia para Declaração de Informações de Exploração, Recursos Minerais e Reservas Minerais**. Brasília, Distrito Federal, 2022.

COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Formulário de Referência**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://ri.cba.com.br/publicacoes-cvm/formulario-de-referencia/>

COSTA, D. H. **O Complexo Máfico-Ultramáfico de Barro Alto (CBA): Uma Importante Unidade Geológica/Metalogenética para a Economia Local De Barro Alto – GO**. Universidade Federal do Oeste da Bahia. 2017.

COSTA, Edwaldo; FERREZIN, Nataly; **ESG (Environmental, Social and Corporate Governance) e a comunicação: o tripé da sustentabilidade aplicado às organizações globalizadas**. São Paulo, SP, dez. 2021.

COUZENS, T. **Planning models: Operating and environmental impacts. In Design of Non-impounding Mine Waste Dumps**. Edited by M.K. McCarter. Nova Iorque: SME-AIME. 1985.

CRAWFORD, J.T. e DAVEY, R.K. 1979. **Case study in open pit limit analysis. In: Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry** (A.Weiss, editor). SME-AIME.

CURI, A. **Lavra de minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 113p.

DAVIES, M.P. **Impounded Mine Tailings: What are the failures telling us**. CIM Distinguished Lecturer Series, p.53-59, jul. 2001.

DAVID, M., P. DOWD e S. KOROBOV. **Forecasting departure from planning in open pit design and grade control**. APCOM, Golden, CO. 1974.

DE CARLI, C. **Análise de Projetos Limite: Lavra à Céu Aberto x Lavra Subterrânea**. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado em Tecnologia Mineral, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2013.

FARIA, L. R. **Disposição em cava: um estudo de caso**. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

FUCK, R. A. 1994. **A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins**. In: SIMP. GEOL. CENTRO-OESTE, 4 Brasília, 1994.

GAMA, C. D. **Metodologia de controle de lucro em mineração**. Publicação IPT 1661. São Paulo: IPT, 1986.

HALL, B.E. 2009. **Short-term gain for long-term pain: How focusing on tactical issues can destroy long-term value**. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 2009

HARTMAN, H.L. **Surface mining: Method comparison and summary**. In **Introductory Mining Engineering**. Nova Iorque, 1987.

HARTMAN, H.L. e MUTMANSKY, J.M. **Introductory Mining Engineering**, 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons. 2002.

HILL, K. e DYER, G. **SME Mining Engineering Handbook**, 3rd ed. Seeley W. Mudd Memorial Fund de AIME. Estados Unidos, 2011.

HUSTRULID W.; KUCHTA M.; MARTIN R. **Open pit mine planning & design volume 1 – fundamentals**. 3. ed. Florida: CRC Press, 2013.

JOINT ORE RESERVES COMMITTEE – JORC. **The JORC code – Australasian code for reporting of exploration results, mineral resources and ore reserves**. AusIMM – Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2012.

KEAR, R.M. **Strategic and tactical mine planning components**. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 2006.

Kim, Y. G. **Open Pit Limit Analysis. Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry**. SME-AIME., 1978.

KUYUCAK, N. **Acid Mine Drainage Prevention and Control Options**. Mine, Water and Environment. IMWA Congress, Sevilla, Espanha, 1999.

LAGE, E. R. **Utilização do método de corte e enchimento no fechamento de uma mina à céu aberto: proposta de metodologia para o caso da mina de Alegria 3, 4 e 5 da Samarco Mineração S/A**. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2001.

LERCHS, H. e I. F. GROSSMANN. **Optimum design of open pit mines**. CIM Bulletin, vol. 58: p. 47-54, 1965.

LEMIEUX, M. **Moving cone optimizing algorithm**. Computer methods for the 80s in the mining industry, SME. p. 329-345, 1979.

MATHIESON, G.A. **Open pit sequencing and scheduling**. Presented at the First International SME-AIME Fall Meeting, Honolulu, Hawaii, 1982.

MIRANDA, A. **Sequenciamento Diretos de Blocos em Modelos Estocásticos com Multiminas e Multidestinos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2018.

MEND, **Reclamation of Sulphide Tailings Using Municipal Solid Waste Compost**, 1995.

NBR 13029. **Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril, em pilha, em mineração**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993.

NICHOLS, H.L., Jr. **Modern Techniques of Excavation**. Princeton, NJ: Van Nostrand. 1956.

PANA, M. T. e T. R. CARLSON. **Description of a Computer Technique Used in Mine Planning of the Utah Mine of Kennecott Copper Corp**. 6th APCOM. 1966.

PERONI, R. L. **Análise da sensibilidade do sequenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico**. Porto Alegre: Dissertação de Doutorado – Programa de pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais. Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

QUEIROZ, G. **O conceito ESG, a reação causada em agentes econômicos e sua influência no fluxo de capital na economia contemporânea**. Porto Alegre: Trabalho de conclusão de curso em Ciências Econômicas. Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.

Relatório interno Rio Tinto – SEIA – **Social and Environmental Impact Assessment of the Simandou Project in the Republic of Guinea**. Volume I: Simandou Mine, 2012.

RITCEY, G. M. **Tailings Management, Problems and Solutions in the Mining Industry**, Elsevier Sc. Pub. B.V, NY USA. 1989. 970p.

SAMPAIO J. A. et al. Bauxita. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações**. 2ª ed. – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

SAYDAM, S. e YALCIN, E. **Reserve and Ultimate Pit Limit Design Analysis of Caldagi Nickel Deposit, Turkey**. 30th Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, Littleton, SME. pp. 121-131, 2002.

SMITH, L.D. **A critical examination of the methods and factors affecting the selection of an optimum production rate**. CIM Bull. 90(1007):48–54. 1997.

SOUZA, F. R. **Sequenciamento direto de blocos: impactos e benefícios para aderência ao planejamento de lavra**. Belo Horizonte: Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

SRK Consulting. **JORC 2012 – Relatório Técnico Independente Estimativa de Recursos Minerais e Reservas de Minério para o Depósito de Bauxita de Barro Alto**. Belo Horizonte, 2021.

TAMROCK. **Handbook of Surface Drilling and Blasting**. J.F. Olán Oy. 1978.

VAN DEURSEN, C. M. **Métodos de desaguamento e disposição de rejeito de bauxita: estudo de caso e avaliação econômica**. São Paulo: Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, 2016.

VANDRE, B. **Tentative Engineering Guide: Stability of Non Water Impounding Mine Waste Embankments**. Ogden, UT: U.S. Forest Service. 1980.

XP Investimentos. **ESG de A a Z: Tudo o que você precisa saber sobre o tema.** São Paulo, 2020. Disponível em: <https://conteudos.xpi.com.br/esg/esg-de-a-a-z-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-tema/>

WANG, Q. e H. SEVIM. **Alternative to parameterization in finding a series of maximum-metal pits for production planning.** Mining Engineering. pp. 178-182, 1995.

WALLS, M.R. e EGGERT, R.G. **Managerial risk taking: A study of mining CEO's.** Min. Eng. 48(3):61–66. 1996.

WYLLIE, D.C. e MAH, C.W. **Rock Slope Engineering.** New York, 2004.

WHITTLE, D. SME **Mining Engineering Handbook**, 3rd ed. Seeley W. Mudd Memorial Fund de AIME. Estados Unidos, 2011.

WHITTLE, G. **Enterprise optimization.** In: Mine Planning & Equipment Selection Conference, 20., 2010, Fremantle: AusIMM, 2010. p 105-117.

WHITTLE, J. **The next challenge in optimising mining operations.** In: Mine Planning & Equipment Selection Conference, 20. 2010, Fremantle: AusIMM, 2010. p 27-31.

ANEXOS

Anexo 1 - Sequenciamento anual de produção na mina de Barro Alto sem restrição de disposição de estéril em cava.