



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM

AVALIAÇÃO DO MATERIAL ESTÉRIL DE FORMAÇÃO FERRÍFERA EM MINERAÇÃO PARA DISPOSIÇÃO SELETIVA E REAPROVEITAMENTO FUTURO

Autor: ANTÔNIO CARLOS PEREIRA DA ROCHA

Orientador: Prof. Dr. ADILSON CURI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração:

Lavra de mina

Ouro Preto/MG

Outubro de 2015

R672a Rocha, Antonio Carlos Pereira da.
Avaliação do material estéril de formação ferrífera em mineração para disposição seletiva e reaproveitamento futuro [manuscrito] / Antonio Carlos Pereira da Rocha. - 2015.
52f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Adilson Curi.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.
Área de Concentração: Lavra de Mina.

1. Lavra de minas. 2. Resíduos. 3. Floculação seletiva (Beneficiamento de minério). I. Curi, Adilson. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.341:628.4.038

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

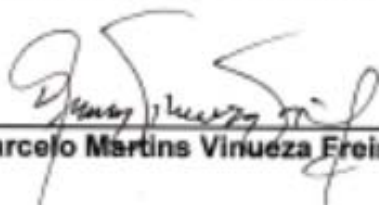
**"AVALIAÇÃO DO MATERIAL ESTÉRIL DE FORMAÇÃO
FERRÍFERA EM MINERAÇÃO PARA DISPOSIÇÃO SELETIVA E
REAPROVEITAMENTO FUTURO"**

AUTOR: ANTÔNIO CARLOS PEREIRA DA ROCHA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 02 de outubro de 2015, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Adilson Curi (Orientador) – UFOP



Dr. Germán Marcelo Martins Vinuesa Freire (Membro) – ITV - VALE



Prof. Dr. Milene Sabino Lana (Membro) – UFOP

Aos meus pais Antonio e Aparecida, pelo exemplo deixado.

À minha esposa Larissa, pelo apoio.

À Julia e Helena.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas Charles Faria, Ricardo Amaral, Ailton Gonçalves, Flávio Costa, Virgílio Tormin, José Geraldo Alfenas, pelo apoio e companheirismo, e por compartilharem com paciência seu amplo conhecimento.

Ao orientador Prof. Dr. Adilson Curi, pela parceria e confiança, muito antes do mestrado.

Aos professores e funcionários do PPGEM, pelo apoio aos alunos que exercem atividade profissional.

Resumo

Os recursos minerais disponíveis em nosso planeta são finitos, ainda que seu potencial não seja totalmente conhecido. A concepção de um projeto de mineração, desde a atividade de exploração para conhecimento de um depósito, passando pela lavra e encerramento de uma mina, podem influenciar na extensão da vida útil de um empreendimento mineiro.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o material estéril de formação ferrífera em mineração para disposição seletiva e reaproveitamento futuro, destacando seu potencial de aproveitamento e os impactos na extensão da vida útil em uma mina de minério de ferro, no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Foram avaliados os recursos e reservas, as cavas finais e intermediárias, o sequenciamento e a disposição do material. A metodologia utilizada foi aplicada a um estudo de caso de uma mina em operação. Pretende-se demonstrar a importância da avaliação dos materiais estéreis com vistas à amplificação da vida útil da mina.

Palavras chave: estéril, lavra, disposição seletiva, sequenciamento, otimização de cava.

Abstract

The available mineral resources on our planet are finite, although its potential is not fully known. The design of a mining project, from the exploration activity to determine the characteristics for a deposit, through its mining and closure, can influence the life extension of the life of mining operation.

This study aims to evaluate the waste material generated by mining of iron formation for selective disposal and future reuse, highlighting its use and potential impacts on life extension of an iron ore mine in the Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brasil. An extensive evaluation of resources and reserves were evaluated, final and intermediate pits, mine sequencing and waste disposal has been carried out. This methodology was applied to a case study of an operating mine. It is intended to demonstrate the importance of evaluating the waste materials in order to extend de life of mine.

Key words: waste, mining, selective disposal, sequencing, pit optimization.

Sumário

Resumo	7
Abstract	8
1. INTRODUÇÃO	1
1.2. Objetivo geral.....	3
1.3. Objetivo específico.....	3
1.4. Justificativa	4
1.5. Estrutura do trabalho.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Panorama da indústria do minério de ferro no Brasil.....	5
2.2. Fundamentos do planejamento de mina	10
2.3. Conceito de Recursos e Reservas Minerais.....	11
2.4. Tratamento de minério	13
2.5. Cava final matemática.....	14
2.6. Operacionalização de cava.....	23
2.7. Sequenciamento de lavra.....	24
2.8. Disposição de estéril	25
3. METODOLOGIA	28
3.1. Operação escolhida	28
3.2. Geologia	29
3.2.1. Geologia regional	29
3.2.2. Unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero.....	31
3.2.3. Grupo Itabira	32
3.2.4. Geologia local	33
3.3. Rotas de processo.....	37
3.4. Parâmetros geotécnicos.....	39
4. RESULTADOS.....	40
4.1. Parametrização	40
4.2. Otimização de pit	42
4.3. Avaliação de reservas.....	44
4.4. Sequenciamento de lavra.....	46
4.5. Disposição de estéril	48

5.	CONCLUSÃO	50
----	-----------------	----

Lista de figuras

Figura 1: Distribuição das exportações por produto (1º semestre/2014). Fonte: DNPM (2014).	5
Figura 2: Maiores consumidores do minério de ferro brasileiro. Fonte: DNPM (2014).	6
Figura 3: Distribuição do estoque de mão de obra da mineração. Fonte: DNPM (2014).	7
Figura 4: Participação das principais substâncias na arrecadação da CFEM. Fonte: DNPM (2014).	8
Figura 5: Distribuição da CFEM por estado. Fonte: DNPM (2014).	8
Figura 6: Distribuição da CFEM por município. Fonte: DNPM (2014).	9
Figura 7: Fluxograma de conversão de recursos em reservas. Fonte: adaptado do The Jorc Code (2012).	12
Figura 8: Bloco-diagrama exemplo para processamento de hematitas. Fonte: Vale (2011).	14
Figura 9: Representação de um modelo geológico de blocos. Fonte: Gomide (2001).	15
Figura 10: Operações consideradas em uma função benefício. Fonte: Carvalho (2009).	17
Figura 11: Classificação dos blocos na função benefício.	19
Figura 12: Representação do ângulo geral do talude. Fonte: Vale (2011).	20
Figura 13: Múltiplas regiões para definição de diferentes ângulos de taludes. Fonte: Maptek (2001).	20
Figura 14: Transição entre diferentes ângulos de taludes. Fonte: Maptek (2001).	21
Figura 15: Geração de arcos na otimização de cava. Fonte: Maptek (2001).	22
Figura 16: Contorno de uma cava final. Fonte: Maptek (2001).	22
Figura 17: Gráfico de NPV e REM por fase da otimização. Fonte: Vale (2011).	23
Figura 18: Fluxograma da metodologia geral do planejamento de lavra. Adaptado de Carvalho (2009).	25
Figura 19: Croqui da fase de lançamento do método ascendente de disposição de estéril. Fonte: Vale (2000).	27
Figura 20: Mina de ferro de classe mundial selecionada	28
Figura 21: Mapa geológico regional do Craton São Francisco. Fonte: Alkmim e Marshak (1998).	30
Figura 22: Unidades do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Alkmim e Marshak (1998)	31
Figura 23: Coluna estratigráfica esquemática do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Vale (2011).	32
Figura 24: Mapa geológico do depósito. Fonte: Vale (2011).	34
Figura 25: Seção geológica vertical. Fonte: Vale (2011).	35
Figura 26: Bloco-diagrama com as rotas de processo para hematita e itabirito. Fonte: Vale (2011).	38
Figura 27: Setorização geotécnica	39
Figura 28: REM acumulada e incremental por fase	43
Figura 29: Avaliação das reservas entre 1980, plano 2014 e cava final	45
Figura 30: Evolução da formação e retomada do estoque	48
Figura 31: Disposição de estéril	49

Lista de tabelas

Tabela 1: Litologias do modelo geológico.....	36
Tabela 2: Reservas de minério de ferro por mina (Fonte: FORM20F).....	37
Tabela 3: Parametrização dos itabiritos	40
Tabela 4: Definição de tipos geotécnicos.....	400
Tabela 5: Ângulos gerais aplicados na otimização	401
Tabela 6: Diferenças entre as fases	44
Tabela 7: Reservas por tipo.....	455
Tabela 8: Resultados do sequenciamento anual.....	477

Lista de Siglas e Abreviaturas

CFEM - Compensação Financeira pela Exploração de recursos Minerais

DMT - Distância Média de Transporte

PDE - Pilha de Disposição de Estéril

ROM - Run of Mine

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

VEB - valor econômico do bloco

PV - valor de venda do produto

VM - número de unidades de peso de minério contido no bloco

R - recuperação no processo

CFL - custos fixos da lavra de minério por unidade de peso

CFB - custos fixos do beneficiamento de minério por unidade de peso

CFE - custos fixos da lavra de estéril por unidade de peso

CMP - custos de movimentação entre o beneficiamento e faturamento do produto

CVM - custos variáveis de lavra de minério por unidade de peso

CVE - custos variáveis de lavra de estéril por unidade de peso

VE - número de unidades de peso de estéril contido no bloco

L&G – Algoritmo de otimização de cavas Lerchs & Grossmann

NPV – Net Present Value

REM – Relação estéril-minério

PAG - Potentially Acid Generating

FEGL – ferro global

1. INTRODUÇÃO

É inegável o papel da mineração na sociedade moderna. Praticamente tudo que nos cerca e sustenta nosso modo de vida é produto ou sub-produto da indústria mineral. Apenas para citar alguns exemplos: sal, cimento, areia, ouro, cobre, gesso, alumínio, granitos, mármore, gemas preciosas. Outros materiais, cuja aplicação direta pode não ser evidente aos olhos de um leigo, são os fertilizantes da qual depende a produção agrícola, minério de ferro que é base da indústria de aço com todas as suas aplicações em medicina, eletrônica, mecânica, aviação, marítima, vidro, plásticos, cerâmica, tintas, entre outros. É impossível imaginar um modo de vida, por mais simples, que não se beneficie da mineração.

Como qualquer outro empreendimento capitalista, a indústria extrativa mineral tem como objetivo econômico básico maximizar a riqueza e garantir o retorno de seus acionistas (Curi, 2014). A diferença para as demais indústrias é que o aproveitamento de recursos naturais exauríveis e não renováveis exige que essa maximização se dê durante a vida útil da mina.

A crescente demanda por produtos minerais exige aumento da pesquisa por novos depósitos, aumento de produção e taxas de produtividade, produtos com qualidade cada vez mais específicas. As consequências são escavações cada vez mais maiores e mais profundas desses depósitos, aumento de custos, equipamentos cada vez maiores. Também espera-se o aumento da geração de resíduos sólidos e líquidos, naturais de qualquer processo de produção industrial.

Paradoxalmente, a mesma sociedade que consome os produtos minerais exerce enorme pressão sobre as empresas mineradoras por operações sustentáveis e pelo retorno para a sociedade de parte da riqueza extraída (Chausson, 2011).

As minas produzem basicamente dois tipos de material, minério e estéril. O minério é aquele de interesse econômico, normalmente enviado para uma planta de tratamento para adequar suas características ao mercado consumidor.

Para o acesso ao minério é geralmente necessário o decapeamento da camada inicial de solo e a remoção do material conhecido como estéril. A relação entre a quantidade de material estéril necessária para acessar cada tonelada de minério é conhecida como relação estéril-minério, ou REM, por sua sigla. Este deve ser descartado criteriosamente, geralmente empilhado em local apropriado (Curi, 2014).

Os estéreis são geralmente aqueles materiais que:

- não existe possibilidade de aproveitamento econômico (estéril-franco ou estéril-nato);
- não possuem valor econômico ou seu valor não é momentaneamente significativo (minério marginal);
- não possuem rota de processo industrial conhecida (minério não-processável);
- não atendem às especificações de qualidade da rota de processo implantada (minério contaminado).

Neste contexto, existe a possibilidade de que parte do material considerado estéril em uma operação possa ser tratado como minério no futuro, quando houver rotas de processo que permitam seu aproveitamento e quando houver em quantidade e qualidade suficiente para geração de riqueza.

Entretanto, para o seu aproveitamento, é necessária a separação dos estéreis natos, que é o material estéril sem possibilidade de aproveitamento econômico, comumente chamado estéril-franco. A disposição seletiva na mesma pilha de estéril pode ser inviável, a menos que se tenha uma operação de mina e controle de frota muito alinhados com a geologia e planejamento de mina, de modo a garantir que o material correto seja disposto no local próprio. Uma eventual mistura dos materiais, aliada às escalas de produção, pode inviabilizar a separação, sendo difícil distinguir no futuro os materiais e de onde retomá-los.

Na perspectiva da atividade mineira, é de se esperar que a lavra e disposição seletiva tenham impactos na operação. A disposição seletiva exigirá o licenciamento ambiental de pilhas adicionais, com o consequente aumento de custo, de modo que cada tipo de

estéril tenha sua pilha individual como destino. Seria uma operação mais simplificada, e facilitaria a retomada do material para processamento no futuro.

Caso o transporte do material seja executado por caminhões, e havendo pilhas distintas, teremos provavelmente o aumento das distâncias médias de transporte, e consequentemente da frota de carga e transporte. Quanto maior o tempo de ciclo, ou o tempo que o caminhão toma para ser carregado, percorrer o trajeto, descarregar e voltar, tanto maior será a quantidade de caminhões necessária para manter a mesma escala de produção.

Os benefícios esperados, no longo prazo, são o aumento da vida útil da operação, bem como os benefícios diretos e indiretos para as comunidades no entorno, seja na forma de empregos, impostos, serviços, etc.

Para este trabalho, estudaremos, sob a ótica do planejamento de mina, a utilização do material estéril de formação ferrífera em um depósito de minério de ferro para aproveitamento futuro. Esta pode representar uma oportunidade de ganhos econômicos, ambientais e sociais, desde que devidamente estudada e planejada.

1.2. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a possibilidade de aproveitamento do estéril de formação ferrífera em um depósito de minério de ferro.

1.3. Objetivo específico

Este trabalho tem como objetivo específico aplicar as técnicas de parametrização, lavra, sequenciamento e disposição seletiva do estéril de formação ferrífera em um depósito de minério de ferro, com vistas ao seu aproveitamento futuro.

1.4. Justificativa

A mineração passa, atualmente, por um momento delicado, em função da redução do consumo de minérios e queda dos preços de commodities. Por outro lado, sofre pressão constante da sociedade devido aos impactos ao meio ambiente, e dos governos pela manutenção das operações, empregos e geração de impostos, mesmo em condições econômicas desfavoráveis. Planejamento é fator-chave para atender àqueles que direta ou indiretamente estão envolvidos em uma operação mineira, ao mesmo tempo que pode garantir uma operação mais eficiente, com vida útil maior, e que permita ao mesmo tempo remunerar seus acionistas por mais tempo.

1.5. Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. Este capítulo aborda a visão geral e o problema, os objetivos e a justificativa com a sua relevância do estudo de caso.

O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica onde são abordados os conceitos de planejamento de mina, fundamentais ao desenvolvimento do estudo.

O capítulo 3 descreve o estudo de caso de uma mina do Quadrilátero Ferrífero e os resultados da parametrização, lavra, sequenciamento e disposição seletiva.

No capítulo 4 estão as considerações finais e recomendações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os principais conceitos abordados neste trabalho serão apresentados a seguir.

2.1. Panorama da indústria do minério de ferro no Brasil

Para demonstrar a importância da indústria mineral, consultou-se o Informe Mineral 1º/2014 do DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. A indústria extrativa mineral no Brasil correspondeu, somente no segundo semestre de 2014, a 16% das exportações nacionais. Destes, somente o minério de ferro é responsável por 12% das exportações brasileiras (DNPM, 2014).

A figura 1 apresenta que, na composição das exportações da indústria extrativa mineral, a participação do minério de ferro é de 77%.

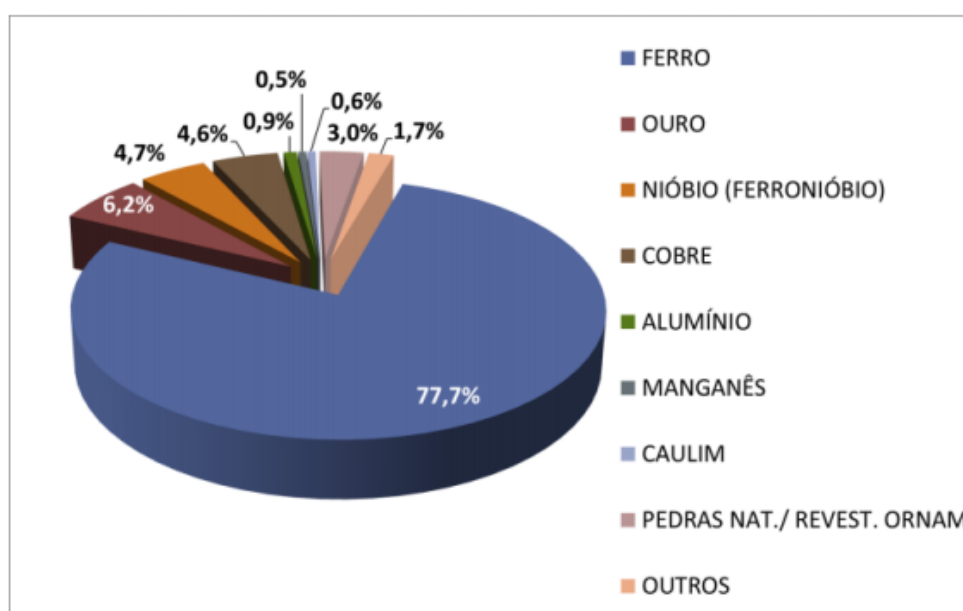


Figura 1: Distribuição das exportações por produto (1º semestre/2014). Fonte: DNPM (2014).

Entre os países consumidores de minério brasileiro, podemos destacar China (33%), Estados Unidos (10%) e Japão (7%), totalizando mais de 50% das exportações, conforme figura 2.

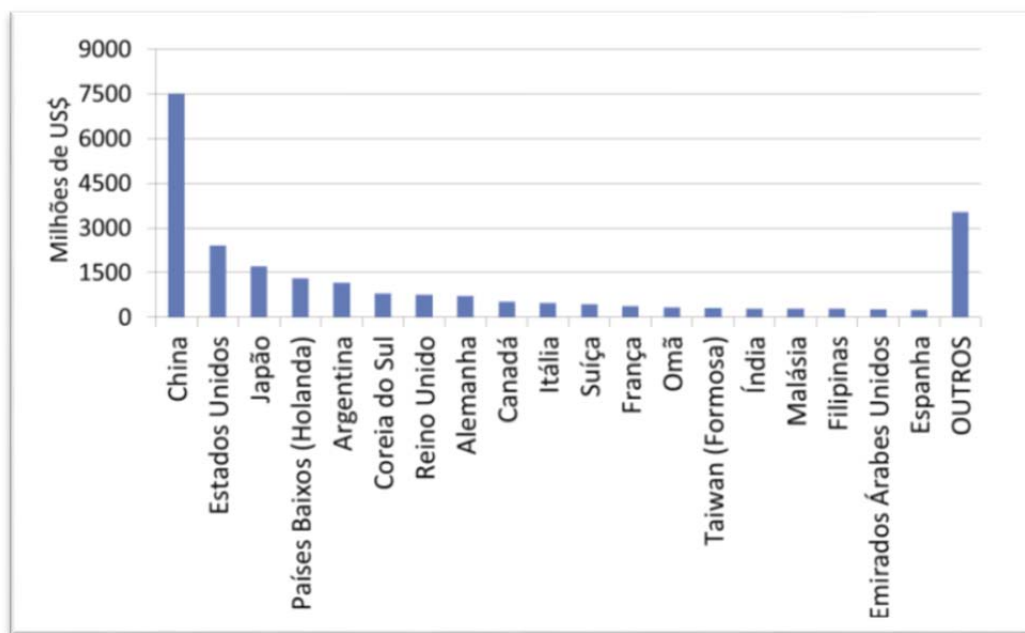


Figura 2: Maiores consumidores do minério de ferro brasileiro. Fonte: DNPM (2014).

A figura 3 representa a distribuição do estoque de mão de obra da mineração por estado brasileiro. O estado de Minas Gerais (34%) e Pará (9%) concentram metade de seus empregados na extração do minério de ferro.

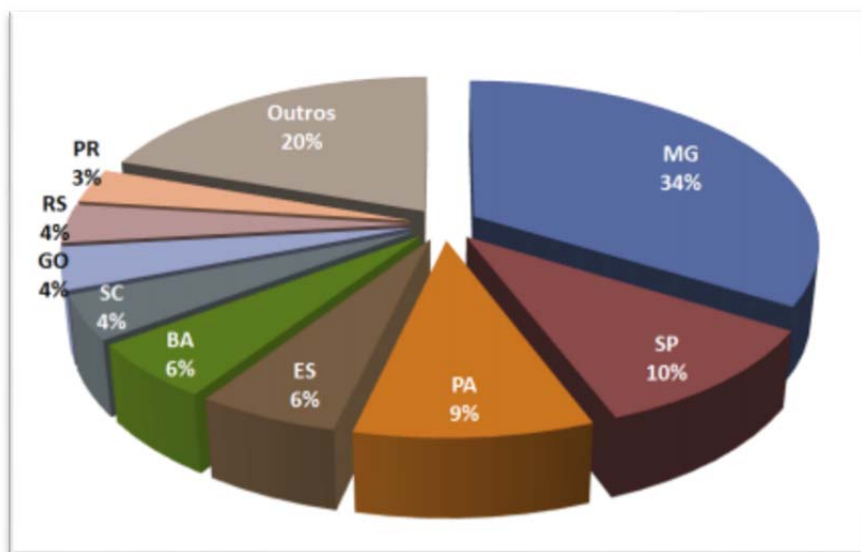


Figura 3: Distribuição do estoque de mão de obra da mineração. Fonte: DNPM (2014).

Apesar da importância expressiva da mineração na ocupação dos postos de trabalho, o ritmo de criação de novos postos no setor está desacelerando em relação aos últimos anos, sendo no primeiro semestre de 2014 5,5% menor quando comparado ao primeiro semestre de 2013, e 67,4% menor que o primeiro semestre de 2012.

A Compensação Financeira por Exploração de Recursos Minerais (CFEM), como é chamado o *royalty* do setor mineral, totalizou no primeiro semestre de 2014 R\$ 912 milhões, sendo o minério de ferro responsável por 67% da receita da CFEM, conforme figura 4. A CFEM é calculada sobre o faturamento líquido das mineradoras, cuja concessão de mina e de lavra esteja ativa, e o valor é dividido entre União (12%), estados (23%) e municípios produtores (65%).

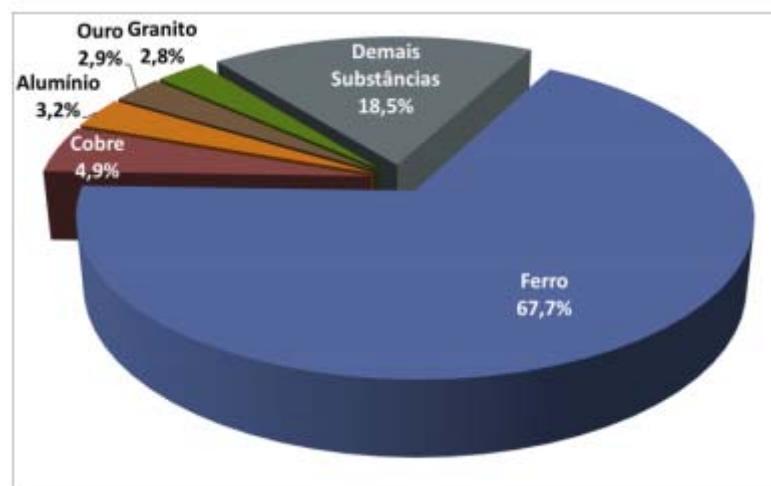


Figura 4: Participação das principais substâncias na arrecadação da CFEM. Fonte: DNPM (2014).

Os estados com as maiores arrecadações foram Minas Gerais (48%) e Pará (31%), grandes produtores de minério de ferro. No ranking dos dez municípios que mais geraram receitas de CFEM, nove municípios são produtores de minério de ferro, sendo 8 pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, conforme figuras 5 e 6. Juntos, estes municípios arrecadam mais de 65% de toda a CFEM nacional.

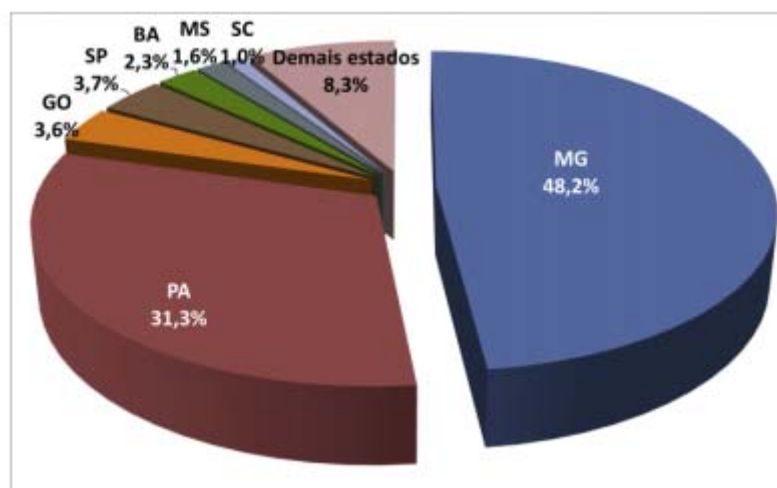


Figura 5: Distribuição da CFEM por estado. Fonte: DNPM (2014).

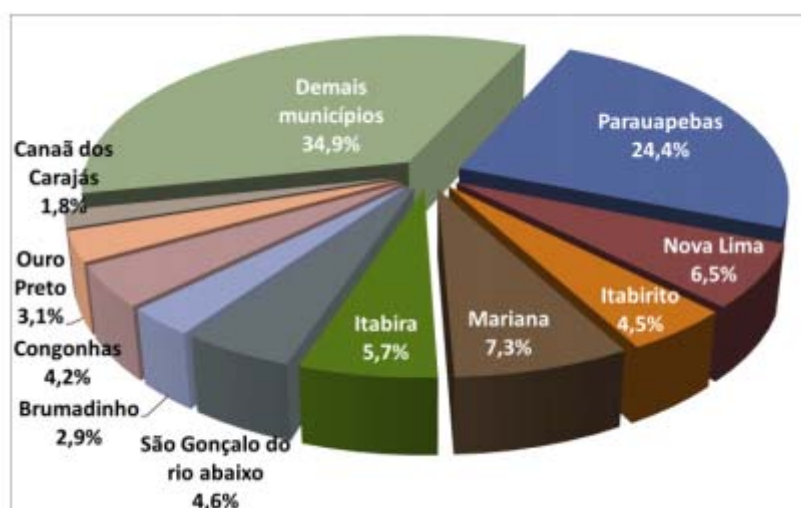


Figura 6: Distribuição da CFEM por município. Fonte: DNPM (2014).

O cenário atual é de queda dos preços de minério de ferro. Enquanto no primeiro semestre de 2013 o preço médio calculado das exportações dessa substância atingiu US\$ 103,5/tonelada (produto com 62% Fe), no mesmo semestre de 2014 o preço médio caiu para US\$ 89,5/tonelada, e no final de 2014 atingiu US\$ 69/tonelada.

Apesar do momento, analistas de mercado apontam que as operações correntes e projetos em implantação atenderão à demanda por minério de ferro até 2019, sendo necessária a implantação de projetos de expansão e novos projetos para atendimento da demanda mundial. (Omachi, 2015).

A continuidade deste cenário dependerá fortemente do desempenho da economia mundial e da adaptação da economia brasileira, bem como do crescimento do mercado chinês e da continuidade deste país como principal mercado da indústria mineral brasileira, principalmente do minério de ferro, e das expectativas dos investidores quanto ao novo marco regulatório da mineração brasileira.

2.2. Fundamentos do planejamento de mina

Segundo Curi (2014), citando Hartman e Mutmanský (2002), a mineração em sua forma mais simples surgiu há mais de 450 mil anos, na era Paleolítica. Os dados arqueológicos mostram que, desde a Antiguidade, o homem se interessou pelos materiais geológicos, vendo nestes qualidades estéticas ou procurando neles propriedades físico-mecânicas.

Apesar de que os primeiros registros documentados da atividade de mineração puderam ser encontrados no Antigo Egito há mais de 3400 anos, foi a partir da Idade Média que a mineralogia começou a desenvolver-se como ciência. No período da Renascença surgiram as obras *De natura fossilium* (1546) e *De re Metallica* (1556) do alemão Georgius Agricola (1494-1555). Este último dá uma descrição detalhada de uma centena de corpos minerais, além de ser o primeiro a distinguir minerais de rochas e examinar corretamente os processos de lavra e mineração, além de aspectos geológicos.

A mineração moderna demanda altos níveis de investimento em um cenário de riscos e incertezas, mas potencialmente também altos ganhos aos seus acionistas e para a sociedade.

Para que atinja seu objetivo, um projeto de mina requer um conjunto de estudos necessários que abrangem uma ampla variedade de conhecimentos técnicos e diferentes especialidades da engenharia, tais como geologia, geotecnia, geomatemática, geofísica, geoquímica, economia mineral, matemática financeira, estatística, engenharias de minas, civil, mecânica, elétrica, computacional, ambiental, agrimensura, entre outras, segundo Curi.

Tanto estudo, e obviamente dinheiro investido, tem objetivo de reduzir os riscos. Para Silva (2008), o planejamento estratégico corresponde ao processo para determinar o melhor projeto e sequenciamento de lavra, segundo uma estratégia previamente estabelecida. Tem como finalidade reduzir riscos e incertezas associados ao empreendimento mineral, principalmente:

- riscos geológicos: relacionados à contabilização de teores e tonelagens, estimados em inventários e relatórios de reservas lavráveis ou remanescentes;

- riscos financeiros: relacionados às projeções de preços dos produtos e custos fixos e variáveis durante a vida útil do empreendimento;
- riscos metalúrgicos: relacionados à representatividade dos modelos projetados para a recuperação do minério na usina de beneficiamento;
- riscos geomecânicos: relacionados aos controles do maciço durante a lavra, podendo gerar condições inseguras, retrabalho, rupturas, diluição, menor recuperação de lavra, atrasos na produção;
- riscos de engenharia: relacionados às falhas e ineficiências na concepção e implementação de sistemas, que podem afetar as metas projetadas;
- riscos ambientais: relacionados ao cumprimento de metas e premissas acordadas com órgãos de fiscalização ambiental competentes;
- riscos sócio-políticos: relacionados a contextos locais específicos, onde podem ocorrer restrições à lavra, em diversos níveis e períodos, por motivos culturais, sociais e políticos;
- riscos administrativos e gerenciais: relacionados à perda de controle, monitoramento e referência, que conduzem ao não cumprimento de normas e objetivos pré-estabelecidos.

2.3. Conceito de Recursos e Reservas Minerais

De acordo com Curi (2014), para evitar fraudes como o famoso caso BRE-X, de 1994, quando uma empresa sediada no Canadá anunciou a descoberta de um imenso depósito aurífero em Bornéu, captou recursos em bolsa de valores, até que em 1997 uma nova avaliação concluiu que as quantidades reportadas eram insignificantes e gerando prejuízos enormes aos acionistas, os países mineradores adotam códigos de mineração e padrões para classificação de recursos e reservas aceitos internacionalmente.

Ainda segundo Curi (2014), recurso mineral é a ocorrência mineral identificada, in situ, capaz de ceder minerais de interesse econômico, mas que não foi submetida a uma avaliação econômica.

O recurso medido é aquele para o qual podem ser estimados com alto nível de confiança a tonelagem, densidade, forma, características, teor, baseado em amostragens, testes, sondagens, galerias e técnicas apropriadas. Similarmente, para o recurso indicado as informações podem ser estimadas com razoável nível de confiança, e para o recurso inferido podem ser estimadas com baixo nível de confiança.

Já as reservas minerais são parte dos recursos com viabilidade técnica e econômica. A reserva provada é a parte economicamente lavrável de um recurso medido, após a aplicação de estudos de viabilidade, fatores de lavra, econômicos, metalúrgicos, de mercado, legais, ambientais, sociais, governamentais. Da mesma forma, a reserva provável é a parte economicamente lavrável de um recurso indicado.

A conversão de recursos em reservas é representada na figura 7.

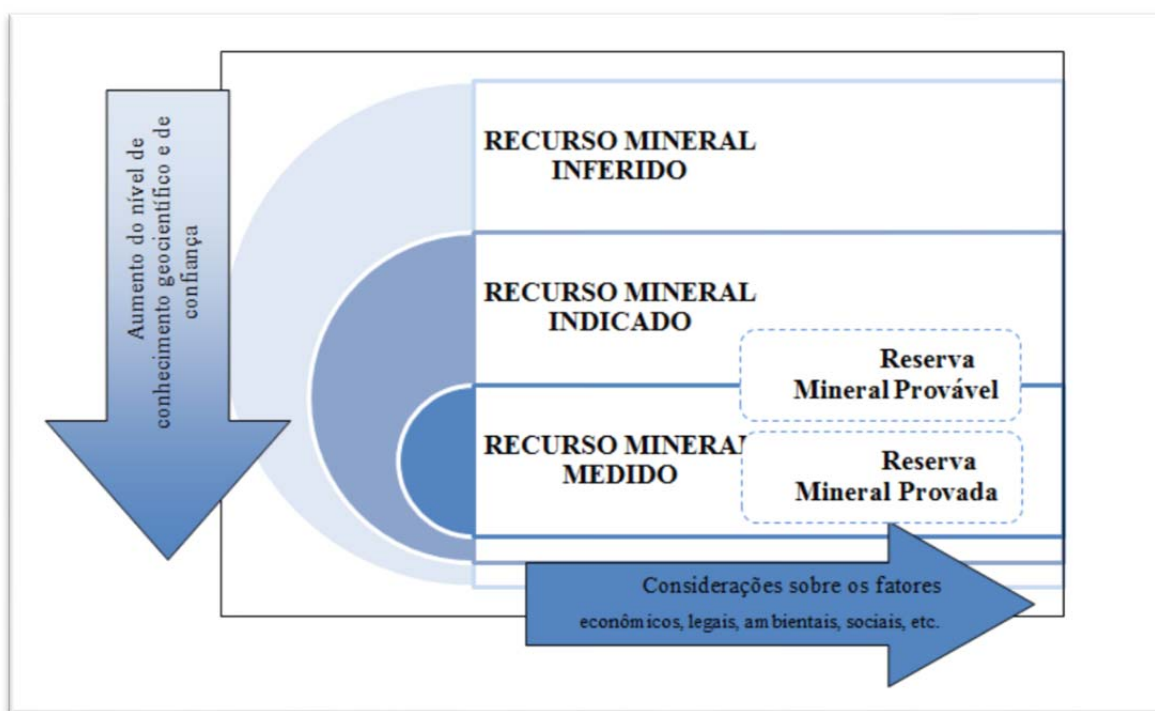


Figura 7: Fluxograma de conversão de recursos em reservas. Fonte: adaptado do The Jorc Code (2012).

2.4. Tratamento de minério

O teor de um minério é uma relação de massas entre a massa de metal (ou mineral de interesse) e a massa total da amostra. O teor de corte define o limite entre o que pode ser aproveitado do que pode ser rejeitado, e corresponde à quantidade e/ou qualidade mínima necessária para seu aproveitamento e processamento. Uma massa cujo teor é equivalente ao teor de corte garante que um minério possa ser lavrado, transportado e beneficiado, sem entretanto auferir lucro.

O tratamento ou beneficiamento de minério é uma sequência de operações para a adequação do minério de modo que ele atenda às especificações de qualidade das indústrias que o utilizam. Entre as operações podemos destacar a britagem, peneiramento e classificação física, de acordo com o tamanho, geralmente empregado nos materiais de teores mais altos. Minérios de teores mais baixos, além das operações citadas anteriormente, passam ainda pelos estágios de moagem e concentração, sendo esta última geradora de dois produtos, o concentrado (de interesse econômico) e o rejeito desprovido de interesse econômico.

O fluxograma para uma operação típica de minério de ferro de hematita é representado na figura 8.

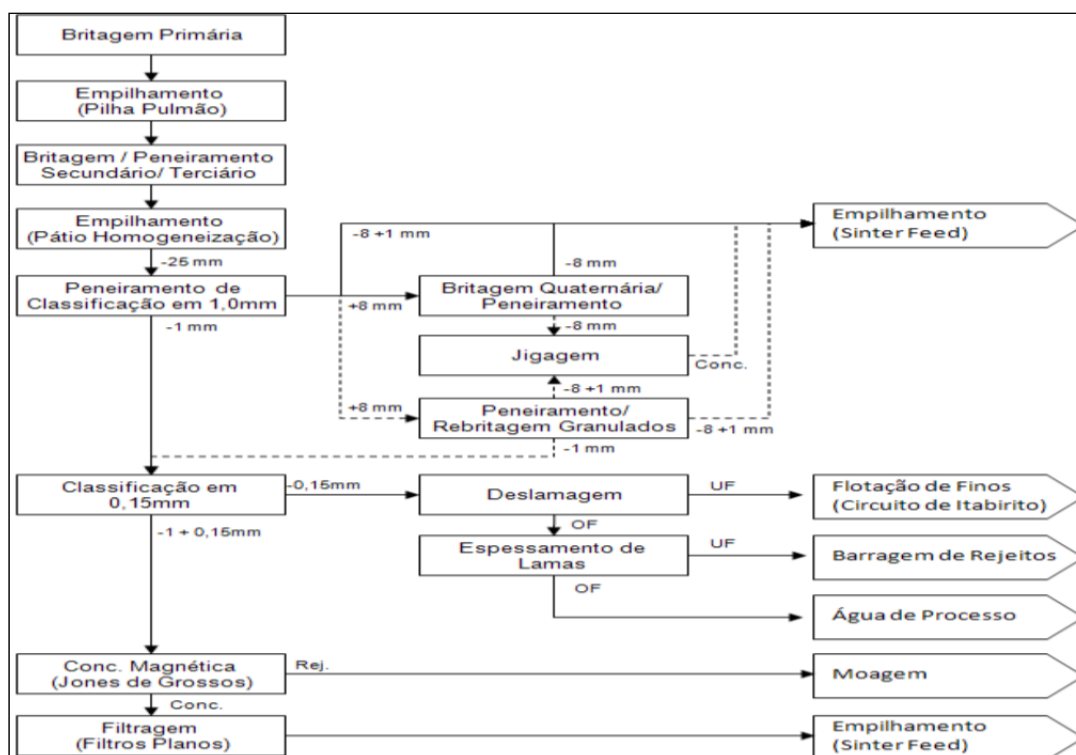


Figura 8: Bloco-diagrama exemplo para processamento de hematitas. Fonte: Vale (2011).

2.5. Cava final matemática

À escavação para extração de um bem mineral em uma mineração, tipicamente composta de bancadas, damos o nome de cava. A cava final é aquela que resulta no lucro máximo caso todo o material pudesse ser extraído de uma só vez (Carvalho, 2009). Os limites físicos e a forma da cava são definidos através de algoritmos matemáticos que trabalham com conceito de modelo de blocos.

O modelo de blocos é a representação matemática do modelo geológico, gerado a partir de furos de sondagem e seções verticais e horizontais que são interpretadas pelos geólogos, entre outras informações, representado na figura 9. O modelo de blocos contém ainda dados relevantes para a operação, como teores das substâncias que constituem o bem mineral, tipos de rocha, tipos de recurso, parâmetros de lavra como ângulos de talude, altura de bancada e largura de berma, parâmetros operacionais como distâncias de transporte até o destino final de cada bloco, parâmetros de processamento

como rotas de processo, recuperação, quantidade de produto gerado, qualidade, parâmetros econômicos como receita, custos, lucro, segundo Chausson et al (2001).

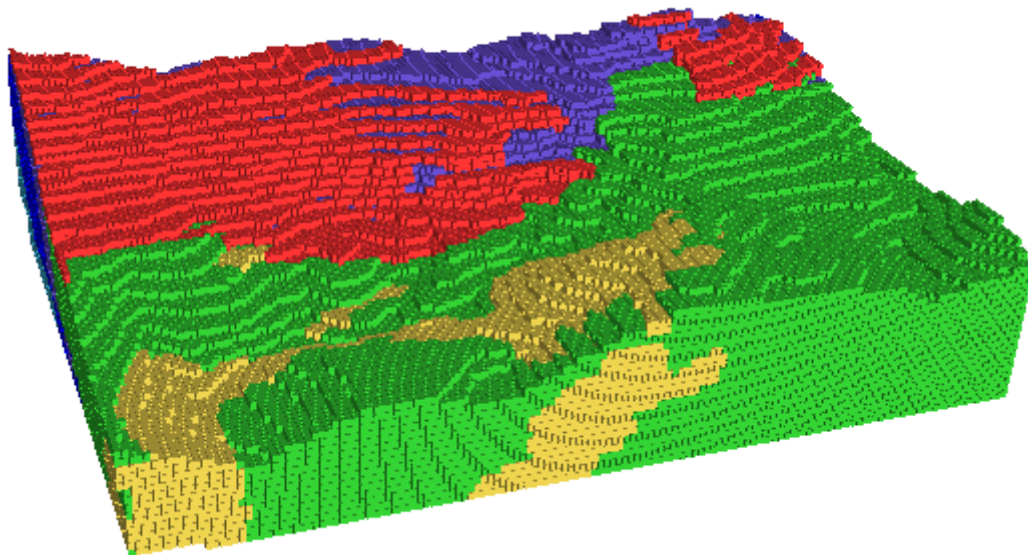


Figura 9: Representação de um modelo geológico de blocos. Fonte: Gomide (2001).

Segundo Gomide (2001), em geral os blocos apresentam as mesmas dimensões nos eixos X e Y e a dimensão vertical representa a altura do banco planejado. Kim (1978), apresenta os vários tipos de modelos existentes, citando que, dentre eles, o mais usado é o modelo regular. Este foi o primeiro modelo a ser estudado e discutido, sendo o mais apropriado para utilização nos métodos automáticos de otimização.

Quanto ao tamanho dos blocos, este, em geral, se baseia no conceito de bloco de decisão de lavra. Este conceito representa o menor bloco que permitiria sua segregação dentro dos procedimentos operacionais. Para a adoção deste conceito, deverá ser levada em consideração a malha amostral existente, ou seja, a quantidade de amostras coletadas em campo. Para uma densidade de amostra muito grande, é possível proceder com a estimativa das características físicas, químicas e metalúrgicas para blocos de pequenas dimensões, contanto que os resultados não sejam irreais. Deste modo, é inviável a criação de modelos de blocos milimétricos ou centimétricos. A aplicação de

técnicas geoestatísticas poderá ajudar a determinar o melhor tamanho dos blocos que represente as atuais condições de conhecimento do depósito.

Entre os algoritmos para determinação de cava final, destacamos o Algoritmo de Lerchs & Grossman. Segundo Guimarães (2007), Lerchs e Grossmann (1965), utilizando a técnica de programação dinâmica, desenvolveram, juntamente com um algoritmo de otimização bidimensional de cavas, um tratamento algébrico para a discretização da jazida em blocos tecnológicos. Um algoritmo derivado da teoria dos Grafos trata o problema por meio da procura do fecho máximo em um grafo associado.

Este algoritmo trabalha com o conceito de VEB, Valor Econômico do Bloco, uma equação matemática conhecida como Função Benefício que simula o bloco in situ na mina até o seu destino final, seja minério ou não, com o consequente resultado econômico da operação, que pode ser positivo ou negativo, conforme figura 10 (Ferreira e De Tomi, 2001). As operações incluídas na Função Benefício podem ser observadas na figura 10.

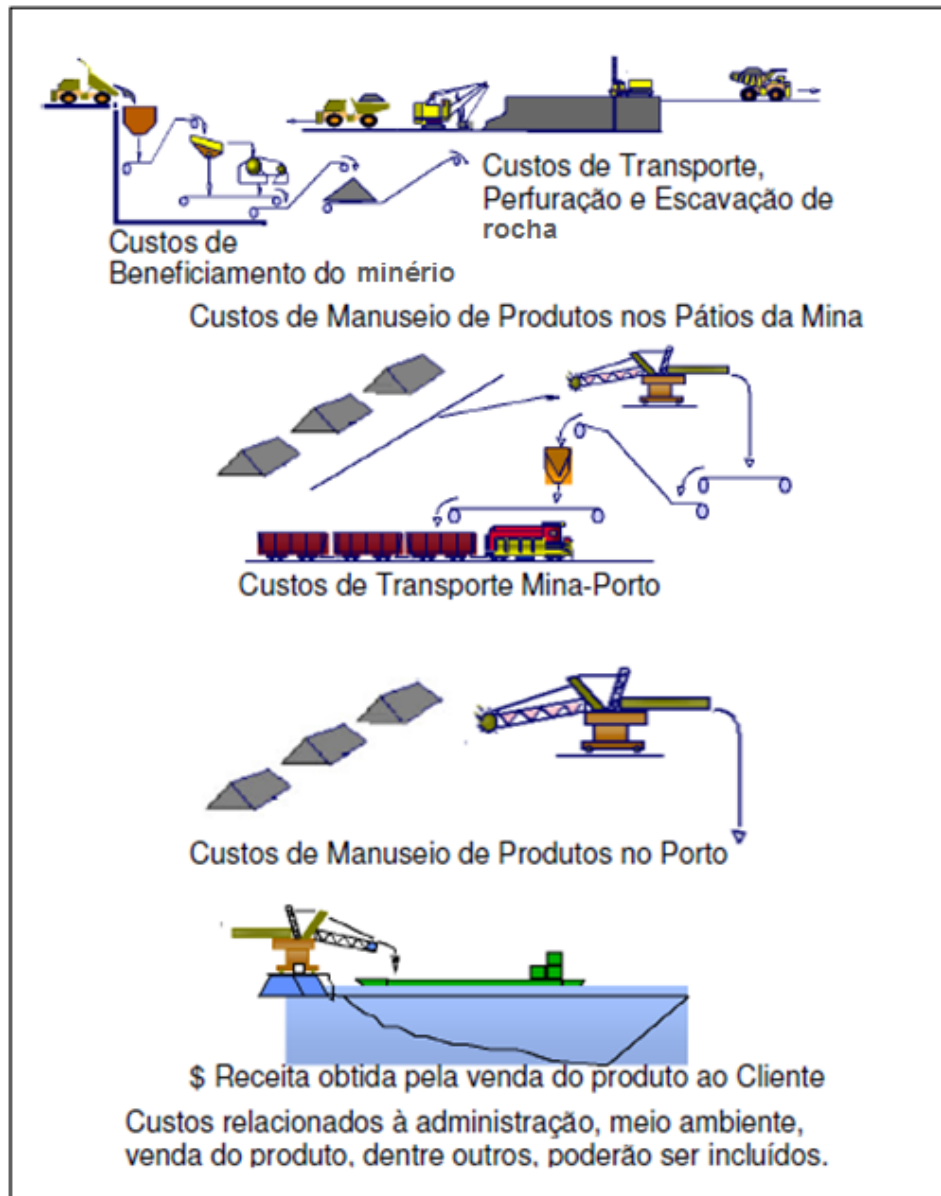


Figura 10: Operações consideradas em uma função benefício. Fonte: Carvalho (2009).

Ainda segundo Guimarães (2007), a partir do benefício associado de lavra de um bloco, o benefício global pode ser otimizado com a busca da combinatória de blocos que maximizem a somatória do benefício, respeitando as restrições pertinentes ao estudo.

Segundo Gomide (2001), cada custo e receita serão compostos através do detalhamento de cada fase do processo produtivo.

A formulação básica para um bloco contendo minério e estéril será:

$$VEB = PV \cdot VM \cdot R - ((CFL \cdot VM + CFB \cdot VM + CFE \cdot VE) - (CMP \cdot VP) - (CVM \cdot VM) - (CVE \cdot VE))$$

onde: VEB é o valor econômico do bloco;

PV é o valor de venda do produto por unidade de peso (\$/t);

VM é o número de unidades de peso de minério contido no bloco (t);

R é a recuperação no processo (%)

CFL são os custos fixos da lavra de minério por unidade de peso (\$/t);

CFB são os custos fixos do beneficiamento de minério por unidade de peso (\$/t);

CFE são os custos fixos da lavra de estéril por unidade de peso (\$/t);

CMP são os custos de movimentação entre o beneficiamento e faturamento do produto (\$/t);

CVM são os custos variáveis de lavra de minério por unidade de peso (\$/t);

CVE são os custos variáveis de lavra de estéril por unidade de peso (\$/t);

VE é o número de unidades de peso de estéril contido no bloco (t);

Curi (2014), citando Hustrulid e Kuchta (2006), relaciona o teor dos blocos e seu impacto na cava ótima ou econômica. Se um bloco não atende às especificações de qualidade de alimentação de planta de processamento, será considerado como estéril e terá valor econômico negativo. Os blocos de ar são aqueles acima da topografia. A classificação dos blocos na função benefício pode ser observada na figura 11.

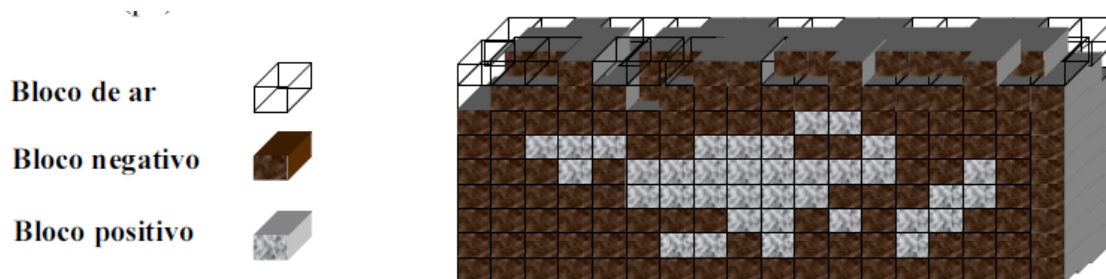


Figura 11: Classificação dos blocos na função benefício.

Como parâmetro da otimização de cava, também é necessário definir o modelo geotécnico, que determina quais serão os ângulos gerais que o sistema ou software buscará ao definir os taludes da cava final. O ângulo geral, calculado de pé a crista, pode ser observado na figura 12. Além de representar a continuidade das operações durante toda a vida da mina, garantindo a segurança de pessoas e equipamentos, será determinante na viabilização do projeto.

Para a avaliação dos possíveis ângulos de talude da cava, tanto final quanto operacional, deverão ser realizados estudos geomecânicos detalhados dos diferentes tipos de materiais existentes. Tais estudos compreendem, entre outros, a determinação das principais estruturas geológicas, conhecimento hidrogeológico da região e ensaios geotécnicos. Partindo destas informações o modelo poderá ser criado, indicando os ângulos de talude médios diferentes, conforme as características geotécnicas de cada setor da mina. Múltiplas regiões são definidas para representar as diferentes zonas geotécnicas da mina, cada uma com ângulo geral de talude próprio, conforme a figura 13.

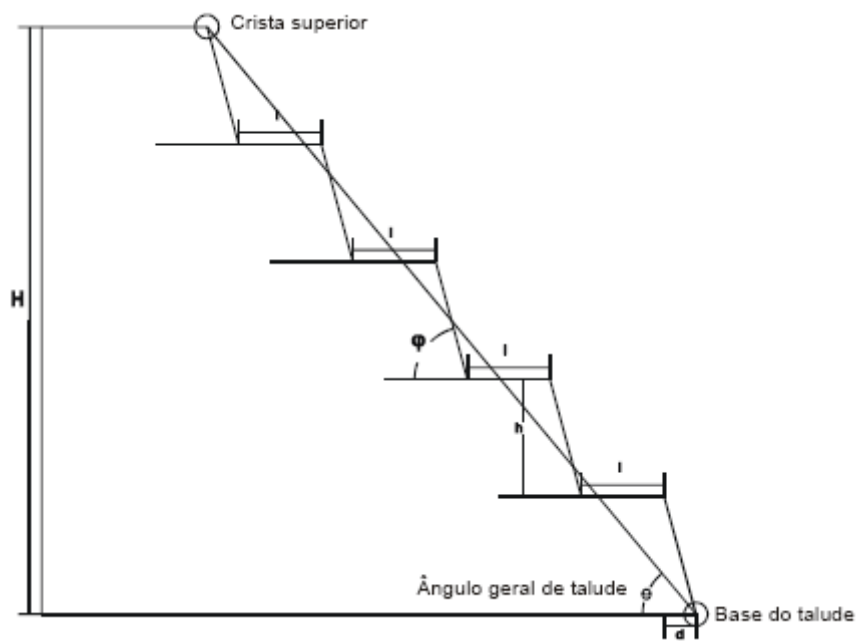


Figura 12: Representação do ângulo geral do talude. Fonte: Vale (2011).

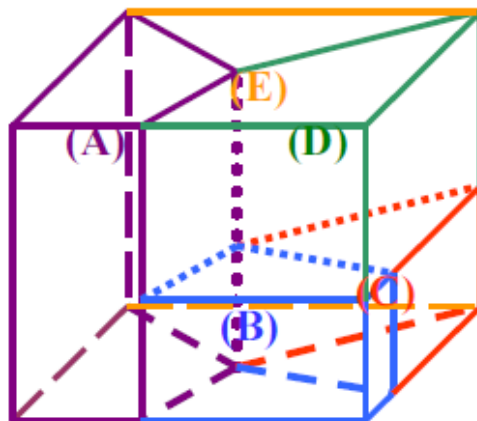


Figura 13: Múltiplas regiões para definição de diferentes ângulos de taludes. Fonte: Maptek (2001).

A mudança de ângulos entre um setor e outro pode ser suavizada dependendo do software utilizado, de modo que o contato entre um setor e outro não tenha uma mudança de ângulos brusca, dificultando a operacionalização. A transição entre diferentes ângulos de talude pode ser observada na figura 14.

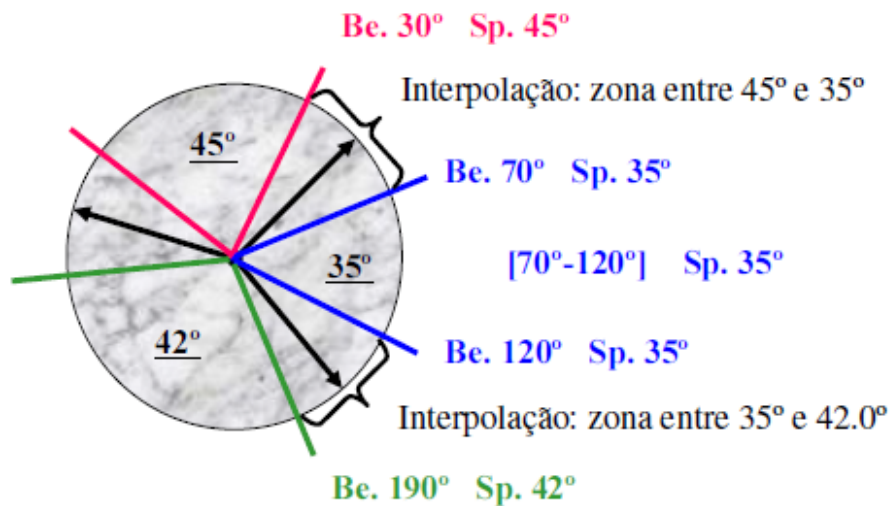


Figura 14: Transição entre diferentes ângulos de taludes. Fonte: Maptek (2001).

O algoritmo analisa cada bloco do modelo e todos os blocos acima deste que devem ser extraídos, na forma de arco tridimensional, apresentado na figura 15. Quando o somatório dos valores econômicos dos blocos dentro do arco for positivo, esse bloco entra na cava final. Sendo negativo, o bloco não entra na cava final. O resultado da otimização define um contorno de cava com lucro máximo que inclui todos os blocos de minério e estéril que devem ser lavrados (Whittle, 1989).

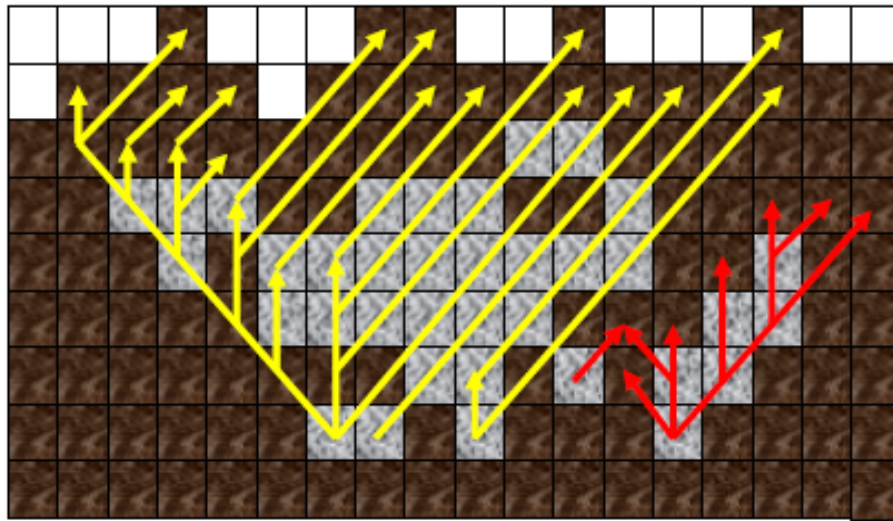


Figura 15: Geração de arcos na otimização de cava. Fonte: Maptek (2001).

Nas práticas modernas de mineração, a evolução dos computadores e softwares específicos para mineração permitiram aos engenheiros de minas analisar simultaneamente um grande número de parâmetros com uma análise de sensibilidade confiável (Hustrulid e Kuchta, 2006). Um exemplo de cava final tridimensional pode ser observado na figura 16.

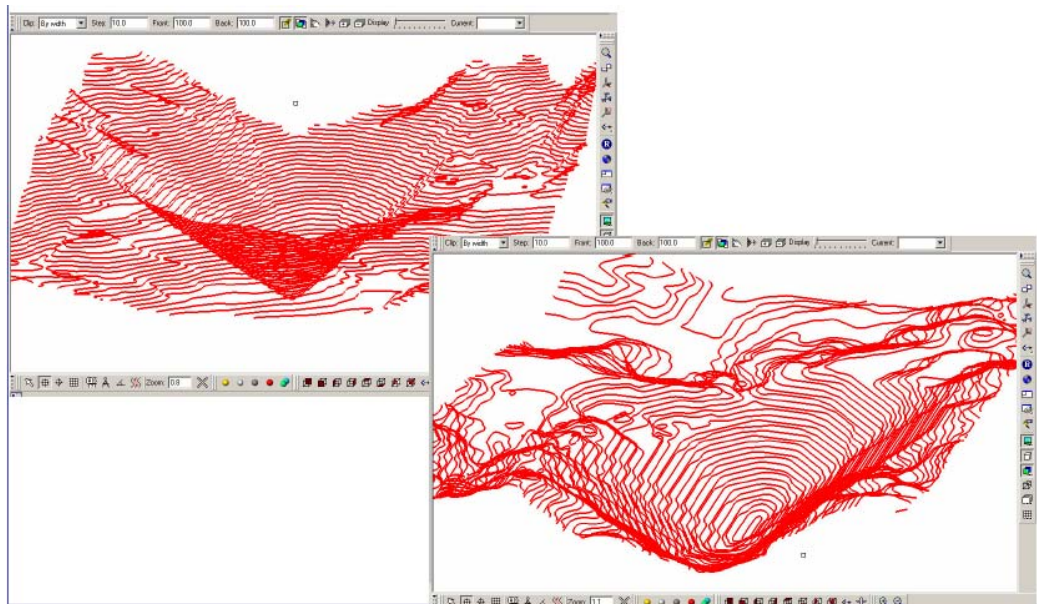


Figura 16: Contorno de uma cava final. Fonte: Maptek (2001).

O processo de otimização pode gerar várias cavas intermediárias utilizando-se um desconto em porcentagem aplicado ao preço dos produtos ou custos. Comumente, são geradas até 100 cavas intermediárias.

A cava final matemática nem sempre é a cava máxima. Isso porque nas fases finais, nota-se uma estabilização do NPV, ou Valor Presente Líquido por sua sigla em inglês, e aumento brusco da relação estéril-minério. A figura 17 representa o gráfico de NPV e REM por fase da otimização. A cava máxima é a de maior NPV e REM. Entretanto, é possível selecionar uma cava intermediária que represente uma perda pequena em relação ao NPV, mas uma economia muito grande em relação ao estéril, e os consequentes custos de lavra e disposição. Portanto, a seleção da cava final é fundamental para um melhor resultado operacional.

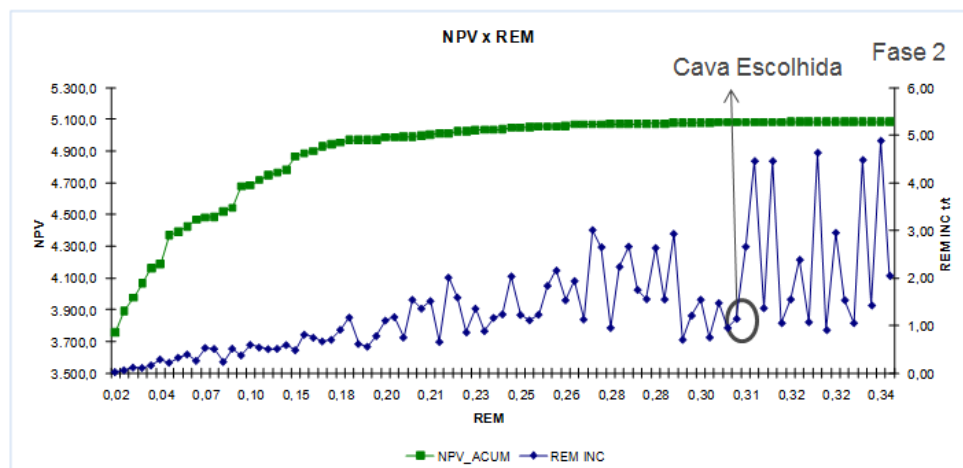


Figura 17: Gráfico de NPV e REM por fase da otimização. Fonte: Vale (2011).

2.6. Operacionalização de cava

A cava final ou matemática é composta de linhas de contorno que passam pelos centros dos blocos que entraram na otimização. Portanto, não possui definição de pés, cristas, rampas, e acessos. A operacionalização de cava é o trabalho de desenho desses elementos, tendo como base a cava final. Durante o desenho, os parâmetros operacionais de largura de berma, largura mínima de praça, altura de banco, ângulos de

taludes e largura de rampa, necessários ao projeto, fazem com que a cava operacional se distancie da cava final. Geralmente são aceitos pela indústria desvios de até 5% para minério e 10% para estéril, em relação à massa da cava final não operacional.

2.7. Sequenciamento de lavra

O sequenciamento de lavra é etapa que define a sequência de extração dos blocos para garantir uma produção constante em termos de movimentação total, alimentação da planta, teores, massa de estéril (Prati, 1995). Os planos sequenciados podem ser semanais, mensais, trimestrais, anuais, quinquenais, dependendo do horizonte de trabalho das equipes de engenheiros.

Dentre as técnicas de sequenciamento mais comuns, destacam-se aquelas que maximizam o lucro ou metal contido, ou a disponibilização de determinado material em quantidade e qualidade constantes na planta.

De acordo com Carvalho (2009), Lerchs e Grossman introduziram em 1965 o conceito de análise paramétrica onde a modificação gradual de um ou mais parâmetros-chaves produz uma sequência de extração que também maximiza o fluxo de caixa. O resultado final é uma série de cavas endentadas/aninhadas, conhecido como algoritmo endentado de Lerchs-Grossmann.

Prati (1995) cita o objetivo do sequenciamento de lavra, que é estabelecer uma estratégia para garantir o número ideal de frentes de exploração para atingir a produção, constância de teor, litologias e massas de minério e estéril.

A metodologia geral do planejamento de lavra é apresentada na figura 18. As etapas não são definitivas, e são constantemente avaliadas com base em novos parâmetros.

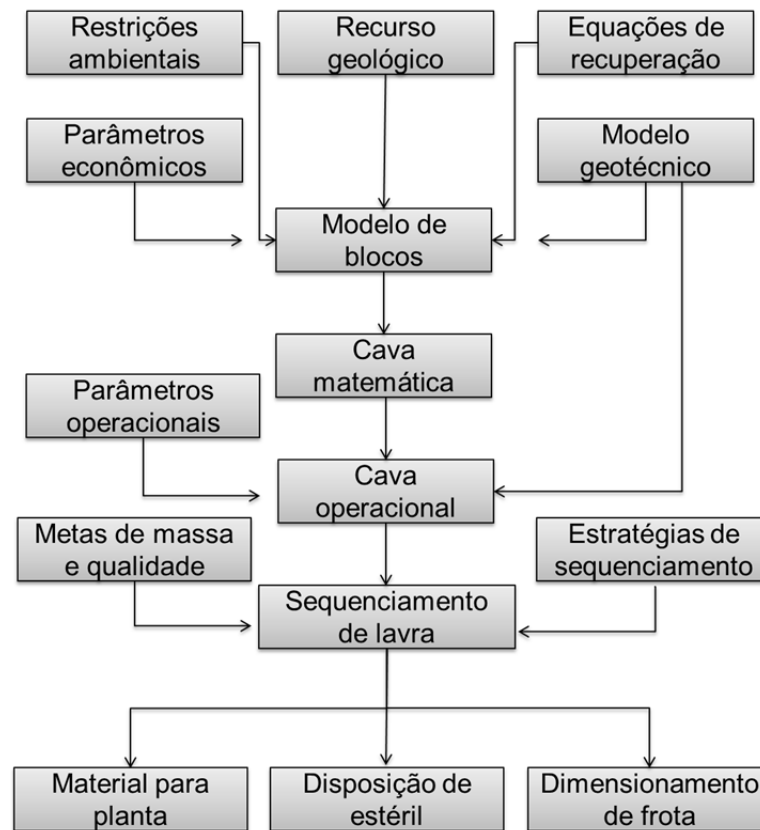


Figura 18: Fluxograma da metodologia geral do planejamento de lavra. Adaptado de Carvalho (2009).

2.8. Disposição de estéril

A disposição de estéril em uma mina e as operações de reabilitação compreendem uma série de ações para a preparação da área, a disposição em si, e a reabilitação para uso futuro da terra. No Brasil, as normas NBR 13029 revisada em 2006 e NBR 13030 de 1999 da ABNT devem ser seguidas para cumprir as condições de segurança, higiene, operação, economia e mitigação dos impactos no meio ambiente, de acordo com padrões legais.

De acordo com Kennedy (1990) o objetivo do planejamento da disposição de estéril é projetar uma série de fases de disposição que minimizem as distâncias vertical e horizontal entre a mina e a área de disposição. Como o manuseio de materiais

representa o maior componente no custo de lavra, depósitos bem planejados desempenham papel importante, afetando o custo total da operação.

O projeto de uma pilha de estéril tem vários desafios técnicos. A qualidade das rochas são variáveis, sendo mais de 50%, em geral, compostas por materiais com alta tendência para degradação mecânica e saturação. O estéril pode ainda conter materiais sulfetados, potencial geradores de drenagem ácida (PAG, por sua sigla em inglês). Outros itens que afetam o projeto são a fundação da pilha, a sua locação em terreno adequado e preferencialmente perto da mina, as condições climáticas e de precipitação da área, a estabilidade da disposição de modo a se evitar uma ruptura ou deslizamento dos taludes da pilha. A esses itens, ainda se somam questões práticas de planejamento de mina, como controle de disposição do estéril, caracterização, rotas de transporte para cada tipo de estéril, sequenciamento da pilha com o plano da mina, controle de qualidade e restrições ambientais (Hawley et al., 2003).

Segundo Carvalho (2009), o método ascendente, apresentado na figura 19, é o mais recomendado pela norma técnica NBR 13029 (2006). Os bancos são formados a partir do fundo de um vale em direção à cabeceira, a partir do basculamento do estéril pelos caminhões, com posterior operação de espalhamento por tratores de esteira. O próprio tráfego dos equipamentos provoca a compactação do material, preconizado como suficiente para a estabilização da pilha.

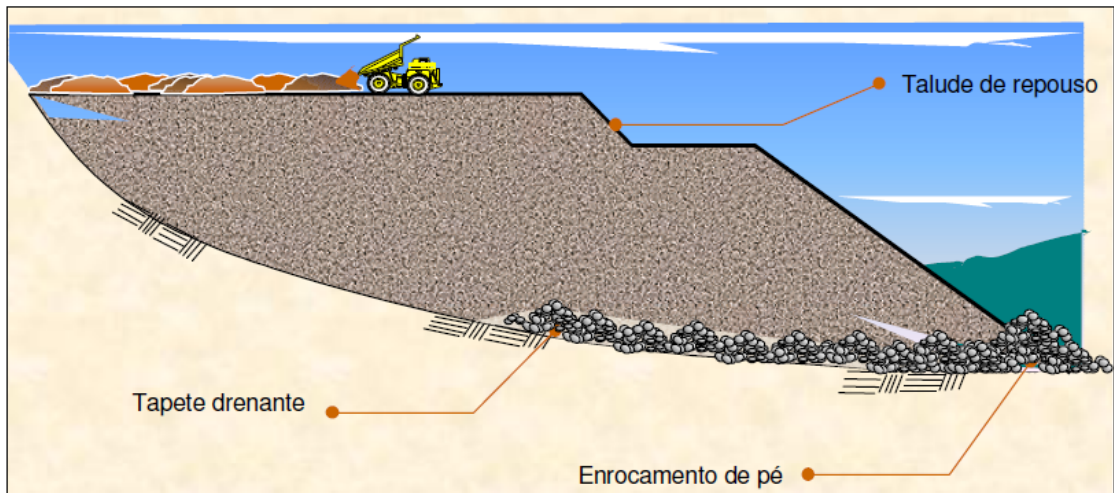


Figura 19: Croqui da fase de lançamento do método ascendente de disposição de estéril. Fonte: Vale (2000).

Ainda segundo Carvalho (2009), a disposição de estéril também pode ser realizada “*in pit*” ou dentro da cava, sempre que o contexto operacional o permita, ou seja, quando for possível exaurir as reservas de certas áreas ou cavas de modo mais rápido e sem prejudicar a alimentação da planta, permitindo assim a utilização das áreas exauridas para disposição de estéril. A disposição dentro da cava reduz o impacto das áreas degradadas, e diminui distâncias de transporte e o tamanho da frota.

A pilha de estéril de formação ferrífera deve seguir todas as regras de uma pilha convencional, ainda que tenha o propósito de ser retomada no futuro

3. METODOLOGIA

Esse trabalho terá a seguinte metodologia:

- 3.1. Operação escolhida;
- 3.2. Geologia regional e local;
- 3.3. Descrição das rotas de processo;
- 3.4. Parâmetros geotécnicos.

3.1 Operação escolhida

A mina sobre a qual se desenvolve esse trabalho é uma operação de minério de ferro de classe mundial localizada no Quadrilátero Ferrífero, localizada a aproximadamente a 100 km de Belo Horizonte, capital do Estado de Minas Gerais, apresentada na figura 20.



Figura 20: Mina de ferro de classe mundial selecionada

A operação selecionada consiste da operação conjunta de duas minas com produção aproximada de 50 Mt de sinter feed e pellet feed, a partir do processamento das reservas de hematita e itabiritos.

3.2. Geologia

3.2.1. Geologia regional

A geologia regional do depósito foi descrita por Dorr (1969), Alkmim e Marshak (1998) e Heineck et al. (1999).

O Quadrilátero Ferrífero é uma área ampla e muito bem explorada na porção sudeste do Craton São Francisco, localizada nos arredores de Belo Horizonte. É caracterizada pela presença de depósitos de classe mundial de formações bandadas de ferro (*banded iron formation*, BIF), com bases formadas por granitos e gnaisses, conforme figura 21.

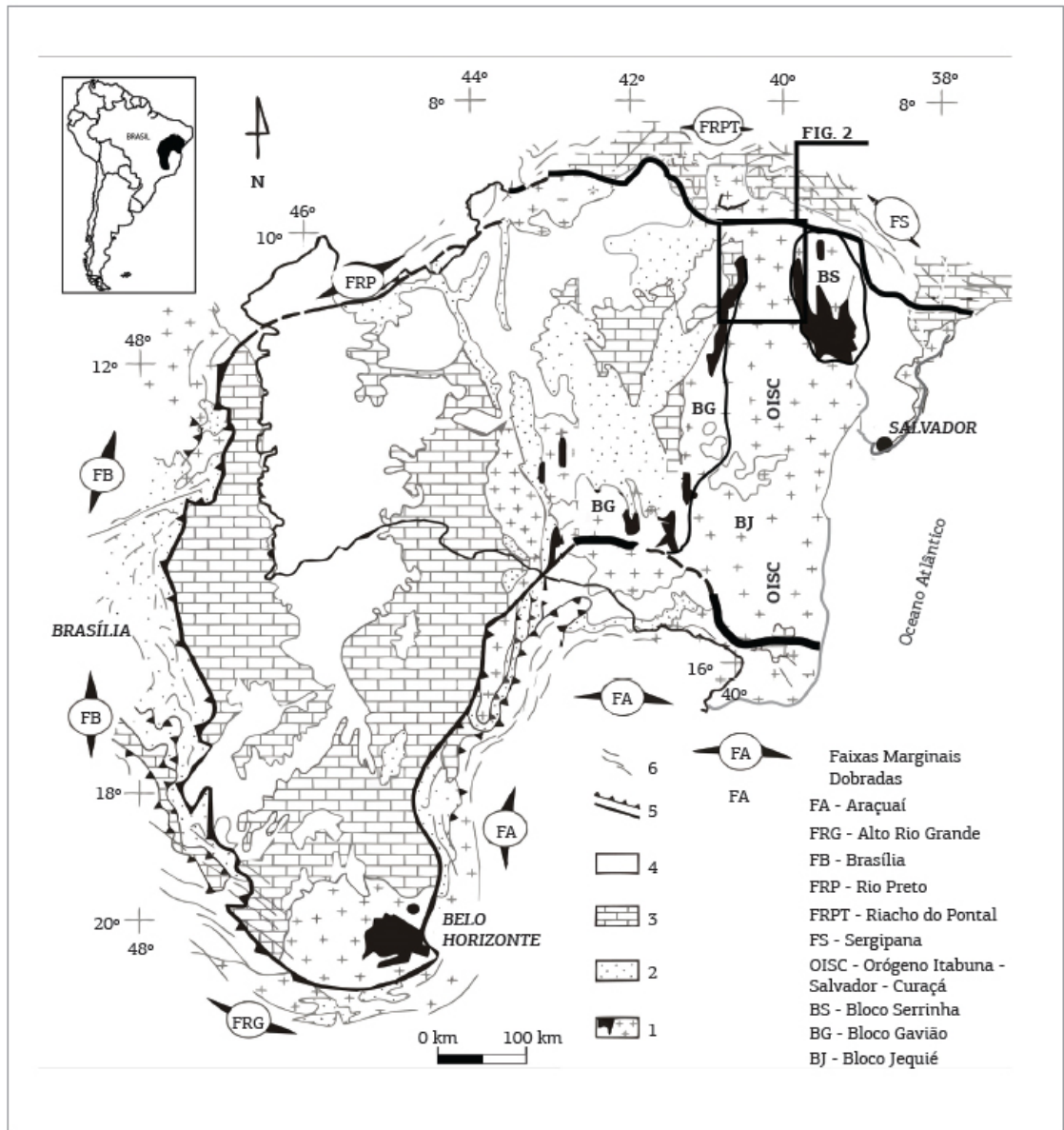


Figura 21: Mapa geológico regional do Craton São Francisco. Fonte: Alkmim e Marshak (1998).

3.2.2. Unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero

Cinco unidades maiores são presentes no Quadrilátero Ferrífero: embasamento arqueano, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas, intrusivas pós-Minas e Grupo Itacolomi, de acordo com Alkmim e Marshak (1998).

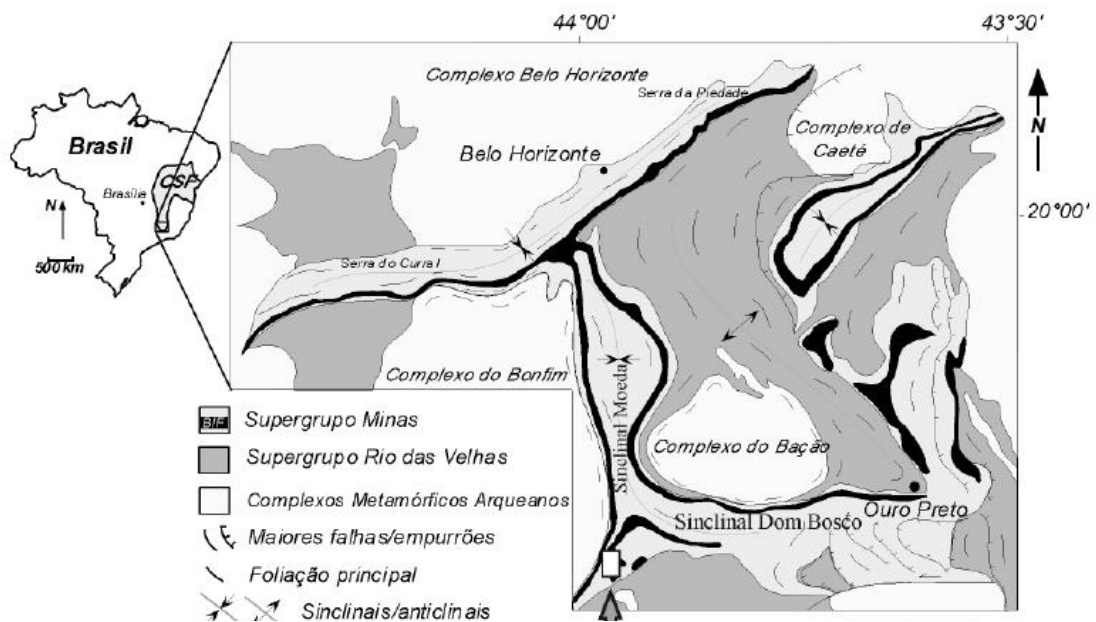


Figura 22: Unidades do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Alkmim e Marshak (1998)

O Supergrupo Minas, de origem paleoproterozóica e meta-sedimentar tem em sua base conglomerados aluvionais e arenitos, BIF (*banded iron formation*) e sequencias carbonáticas, conforme figura 23.

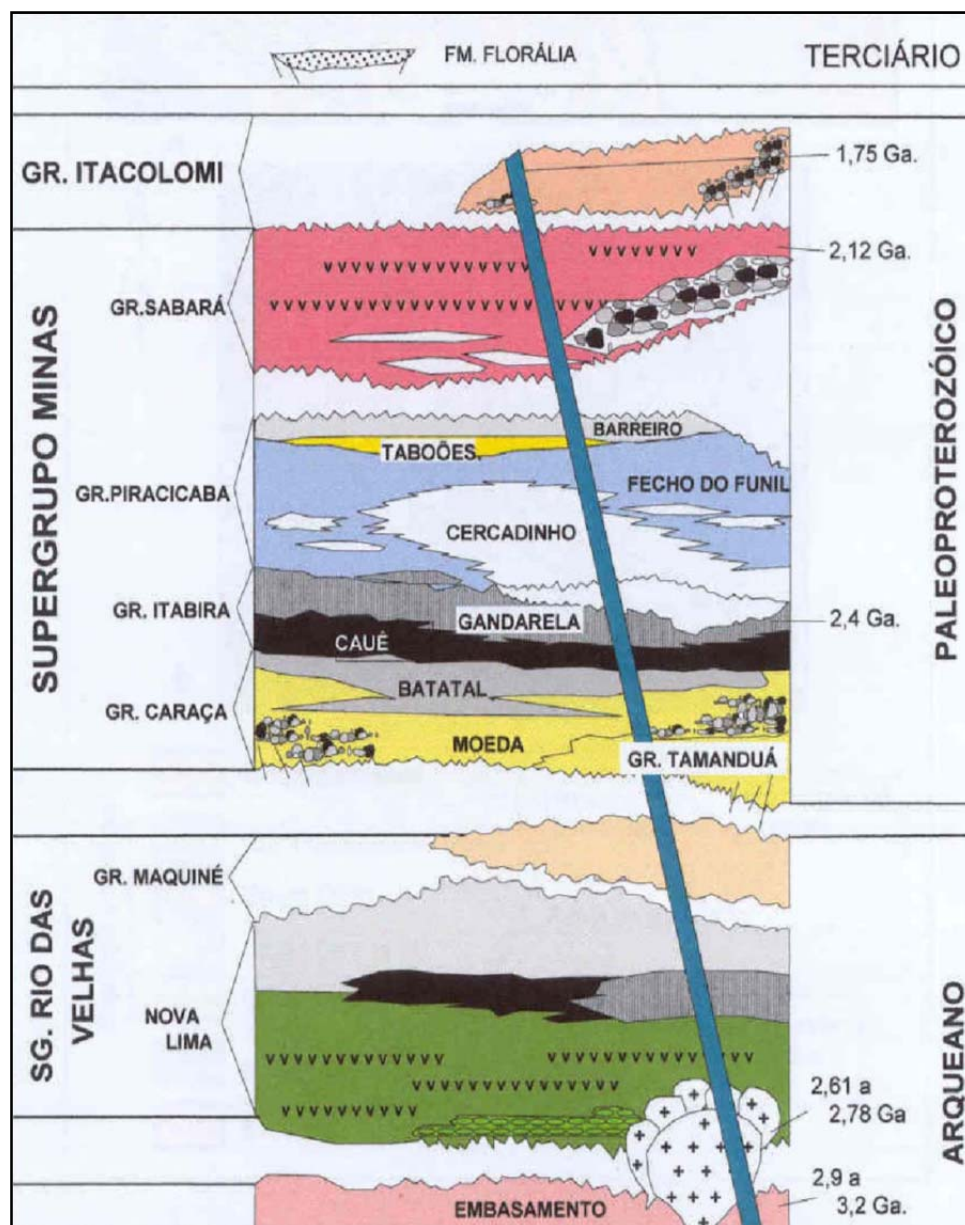


Figura 23: Coluna estratigráfica esquemática do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Vale (2011).

3.2.3. Grupo Itabira

O termo itabirito é usado para denotar o BIF metamorizado composto de óxidos de ferro (hematita, magnetita e martita), quartzo abundante, raramente mica e outros minerais. Itabiritos podem ser xistosos ou compactos. O maior depósito de itabirito do

Quadrilátero Ferrífero, a formação Cauê, foi desenvolvido dentro do Grupo Itabira do Supergrupo Minas. Esse grupo compreende uma mistura de itabiritos e itabiritos dolomíticos, com filitos e dolomitos.

A mineralização Itabira é representada por dois principais tipos litológicos: itabiritos e hematitas. Itabiritos são rochas bandadas com camadas de hematitas ricas intercaladas por camadas ricas em quartzo, sujeitas a intensos processos de intemperização que favoreceram a concentração superficial de óxidos de ferro e os transformaram em materiais friáveis. Já as hematitas são naturalmente ricas em ferro.

3.2.4. Geologia local

O depósito da mina selecionada tem direção NE-SW e mergulho subvertical no flanco noroeste a moderado no flanco sudeste.

O depósito é uma estrutura complexa e multi-dobrada de hematitas, itabiritos friáveis próximos à superfície e itabiritos semi-compactos e compactos em níveis mais profundos, conforme mapa geológico da figura 24.

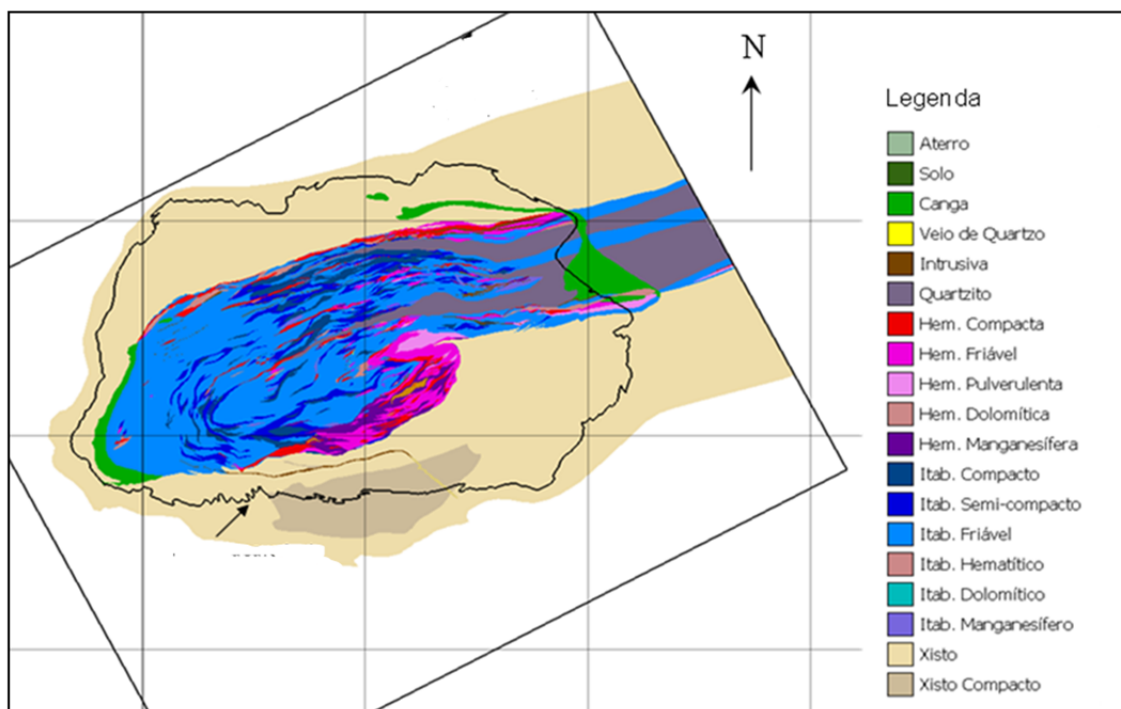


Figura 24: Mapa geológico do depósito. Fonte: Vale (2011).

O depósito se estende por aproximadamente 2.600 m de comprimento (SW a NE) e 900 m de profundidade. A seção da figura 25 mostra um corte vertical do depósito. Fica evidente na seção a predominância de itabiritos pobres e compactos na porção mais profunda do depósito, enquanto os itabiritos friáveis e hematitas predominam da superfície à profundidades médias.

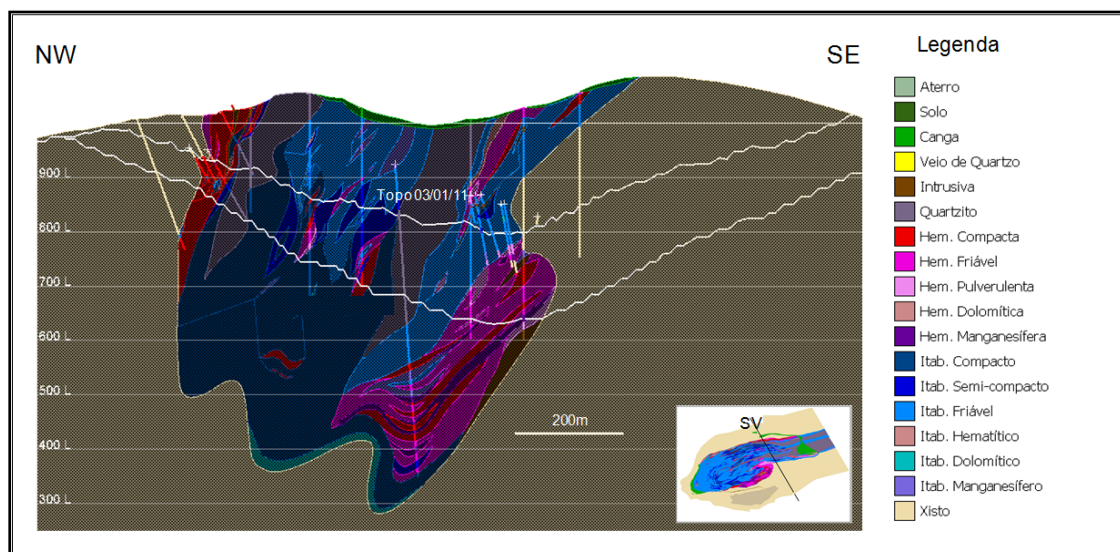


Figura 25: Seção geológica vertical. Fonte: Vale (2011).

O modelo geológico utilizado nesse trabalho foi gerado em 2011 e possui as litologias e densidades apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Litologias do modelo geológico

Rocha	Densidade (t/m3)	Descrição
HC	4.67	hematita compacta
HF	3.79	hematita friável
HDO	3.84	hematita dolomítica
HP	3.58	hematita pulverulenta
HMN	3.31	hematita manganésífera
IC	3.29	itabirito compacto
IF	2.8	itabirito friável
IS	2.97	itabirito semi-compacto
IDO	3.38	itabirito dolomítico
IH	3.71	itabirito+hematita
IMN	2.53	itabirito manganésífero
CG	3.17	Canga
SO	1.79	Solo
IN	2.02	Intrusiva
QT	2.1	Quartzito
VQ	2.25	veio de quartzo
XI	2.11	Xisto
SO	1.79	Solo

O modelo de blocos possui as seguintes características:

- Rotação: 62 graus
- Maior dimensão em X e Y: 50m
- Maior dimensão em Z: 15m
- Menor dimensão em X e Y: 12.5m
- Menor dimensão em Z: 15m
- Número de blocos: 839.369

As reservas são apresentadas na tabela 2. São calculadas com base na topografia de final de 2012 e publicadas no Relatório Anual 2013 da Vale para a Comissão de Valores Imobiliários dos Estados Unidos, através do formulário FORM20F. Temos 482 milhões de toneladas de reserva provada, e 102 milhões de toneladas de reserva provável, num total de 584 milhões de toneladas com teor médio de 46,1% de ferro.

Tabela 2: Reservas de minério de ferro por mina. Fonte: Vale (2013).

	Reservas de minério de ferro por mina no Sistema Sudeste(1)							
	Provas - 2013		Prováveis - 2013		Total - 2013		Total - 2012	
	Tonelagem	Teor	Tonelage m	Teor	Tonelagem	Teor	Tonelage m	Teor
<i>Instalação de Itabira</i>								
Conceição	482,4	45,8	102,4	47,7	584,8	46,1	607,5	46,3
Minas do Meio.....	202,7	51,5	69,8	48,8	272,6	50,8	295,7	50,8
<i>Instalação de Minas Centrais</i>								
Água Limpa(2)	20,3	42,0	6,7	42,7	27,0	42,2	33,0	42,2
Brucutu	210,1	50,4	260,3	48,3	470,3	49,3	501,4	49,5
Apolo	292,4	57,4	339,7	55,1	632,1	56,1	632,1	56,1
<i>Instalação de Mariana</i>								
Alegria	213,3	46,3	143,5	44,0	356,8	45,4	157,8	48,3
Fábrica Nova	379,2	43,6	779,1	40,9	1.158,3	41,8	770,9	44,7
Fazendão.....	311,6	45,7	307,6	40,7	619,2	43,2	319,8	49,9
Capanema			610,7	47,1	610,7	47,1		
Conta História	-	-	515,9	45,4	515,9	45,4	-	-
Total do Sistema Sul	2.112,0	48,0	3.135,7	45,5	5.247,7	46,5	3.318,3	49,1

(1) A tonelagem está expressa em milhões de toneladas métricas de ROM úmido, considerando as unidades a seguir: Instalação de Itabira 1,5%; instalação de Minas Centrais 6,8%; instalação de Mariana 3,9%. O teor é em porcentagem de Fe. O espaçamento aproximado dos poços perfurados para classificar as reservas foi: 100m x 100m para reservas provadas e 200m x 200m para reservas prováveis.

(2) A participação da Vale em Água Limpa é de 50% e os números da reserva não foram ajustados para refletir nossa participação.

3.3. Rotas de processo

A mina selecionada está em operação desde 1950. Possuiu até 2014 duas rotas de processo separadas, para hematita e itabiritos ricos, gerando como produto sinter feed e pellet feed. A rota de processo é apresentada na figura 26. Em 2014 entrou em operação uma nova planta, para processo dos itabiritos pobres e compactos.

A hematita possui teores acima de 60% de ferro. Sendo assim, seu processo não exige definição de teor de corte.

Já a alimentação dos itabiritos exigia, antes da implantação da nova planta, um teor mínimo de 48% de ferro. Todo o material de formação ferrífera abaixo do teor de corte

tem potencial para ser classificado e reservado para o futuro, quando então poderia ser aproveitado na planta de itabiritos pobres e compactos.

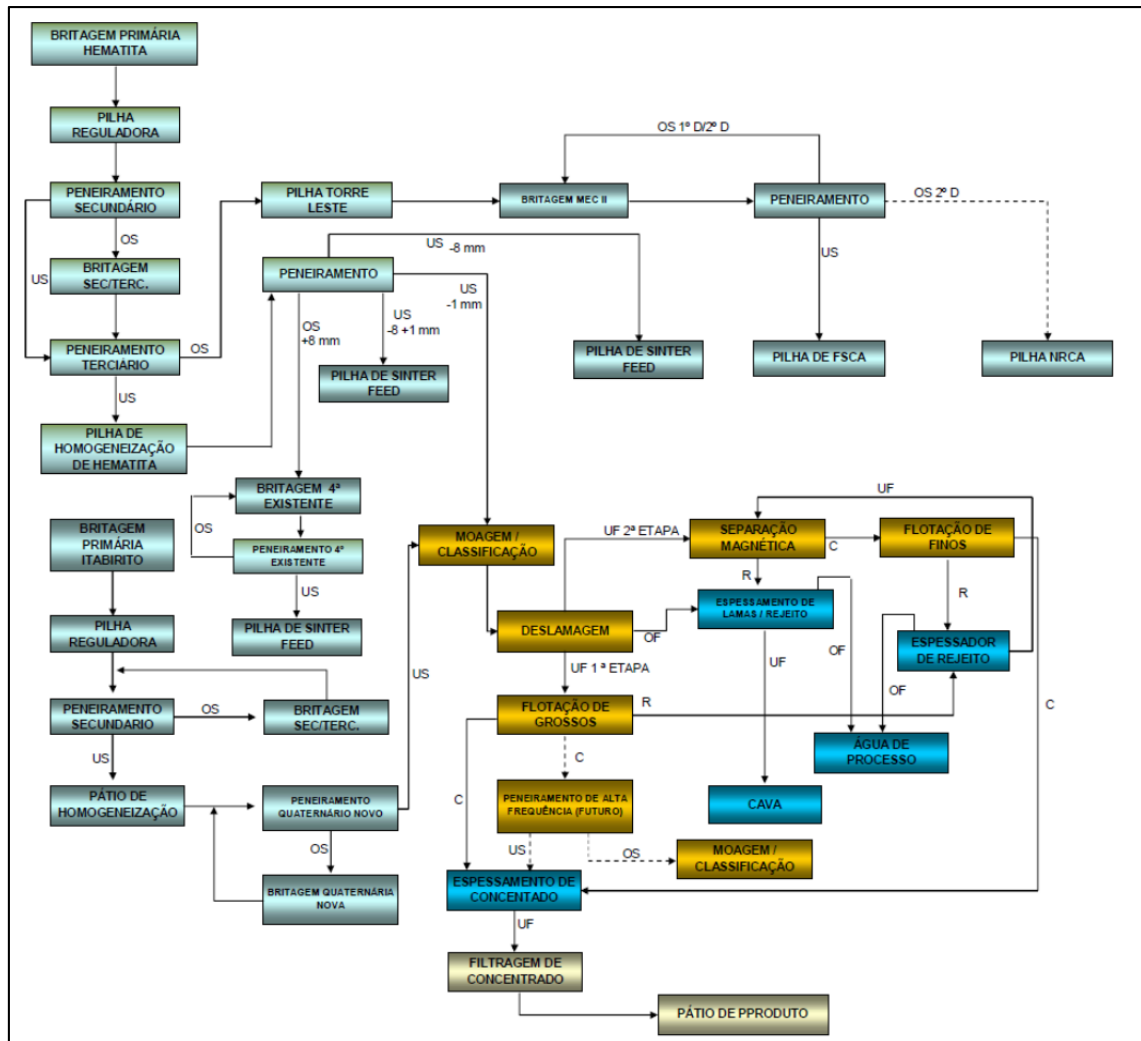


Figura 26: Bloco-diagrama com as rotas de processo para hematita e itabirito. Fonte: Vale (2011).

Através da função benefício, equações matemáticas calculam a massa de produto de cada bloco. Após esta etapa, os fatores de custo são calculados no software NPVScheduler®. Os custos de lavra são calculados para todos os blocos, enquanto os custos de processo são aplicados somente aos blocos de hematita, itabirito e itabiritos compactos que geram produtos. A receita de cada bloco é calculada baseada no preço médio dos produtos nos últimos três anos no mercado externo.

3.4 Parâmetros geotécnicos

Parâmetros de ângulos gerais foram utilizados de acordo com o modelo geotécnico da mina.

A mina foi dividida em setores, apresentados na figura 27.

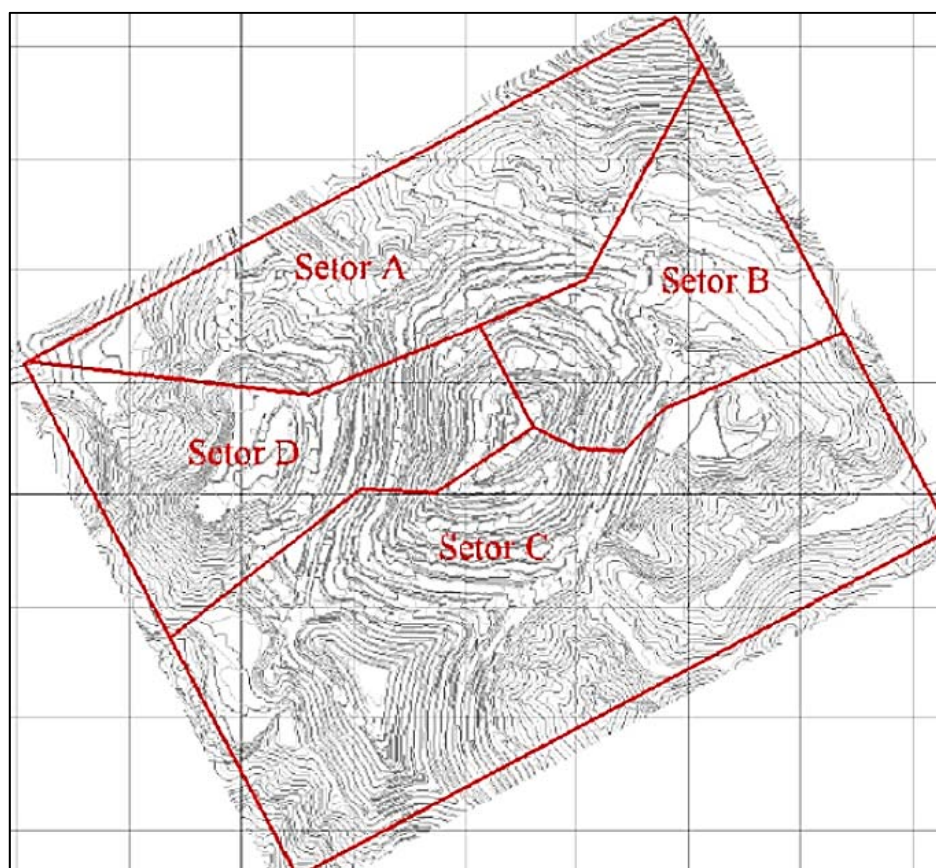


Figura 27: Setorização geotécnica

As litologias foram agrupadas em tipos geotécnicos, de acordo com a tabela 3.

Tabela 3: Definição de tipos geotécnicos

Litologias	Tipos geotécnicos
IF, HF, HP, IMN, HMN, FM	ff friável
IS, IH	ff semi-compacta
IC, HC, CG	ff compacta
IDO, HDO	ff dolomítica
IN, VQ, SO, AT, GN, FM, XI	nl intemperizada
QT	qz piracicaba

Os ângulos gerais aplicados em cada setor de acordo com o tipo geotécnico são apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Ângulos gerais aplicados na otimização

Ângulo/setor	Setor A	Setor B	Setor C	Setor D
ff friável	34	34	34	34
ff semi-compacta	40	34	34	42
ff compacta	40	34	40	42
ff dolomítica	40	34	40	42
nl intemperizada	26	34	27	26
qz piracicaba	34	34	34	34

4. RESULTADOS

4.1. Parametrização

Para a parametrização, foram agrupadas as litologias para definição dos teores de corte, da seguinte forma:

Hematitas (he): composto das litologias hc, hf, hp, hmn

Itabiritos (it): composto das litologias ic, if, is, ih, imn, cg

Os teores de cortes foram obtidos pela técnica de parametrização de recursos medidos, indicados e inferidos, abaixo da topografia de referência (base 1980), sem restrições físicas superficiais e sem limitação de cavas. Para as hematitas o teor de corte é geológico, ou seja, são todas com teor de ferro superior a 60%.

A tabela 5 apresenta a parametrização do ferro global dos itabiritos e mostra que um teor de corte do ferro em 42.5% resultará em um teor no ROM de aproximadamente 48.8%, que é o teor esperado atual de alimentação para os itabiritos.

Por outro lado, na coluna de dados incrementais temos 650 Mt de itabiritos abaixo do teor de corte, com teor médio de 39% de Fegl, potencial para serem aproveitados no futuro.

Tabela 5: Parametrização dos itabiritos

Cutoff	Acumulado		Incremental			
	Fegl (%)	Massa (Mt)	faixa	Fegl (%)	Massa (Mt)	
27.5	44.96	1,630	27.5 - 30.0	-	-	
30.0	44.96	1,630	30.0 - 32.5	31.88	1	
32.5	44.97	1,628	32.5 - 35.0	33.99	39	
35.0	45.24	1,590	35.0 - 37.5	36.44	113	
37.5	45.91	1,476	37.5 - 40.0	38.84	228	
40.0	47.2	1,248	40.0 - 42.5	41.22	269	
42.5	48.84	980	42.5 - 45.0	43.82	293	
45.0	50.99	687	45.0 - 47.5	46.18	224	
47.5	53.31	463	47.5 - 50.0	48.72	182	
50.0	56.28	281	50.0 - 52.5	51.03	107	
52.5	59.52	174	52.5 - 55.0	53.59	44	
55.0	61.51	130	55.0 - 57.5	56.24	24	
57.5	62.7	106	57.5 - 60.0	58.84	22	
60.0	63.71	84	60.0 - 62.5	61.19	21	
62.5	64.55	63	62.5 - 65.0	63.99	46	
65.0	66.04	17	65.0 - 67.5	66.04	17	
67.5	-	-	67.5 - 70.0	-	-	
70.0	-	-	70.0 - -	-	-	

Finalmente, definem-se os tipos em função do teor de corte, da seguinte forma:

Hematitas (he): litologias hc, hf, hp e hmn, de recursos medidos, indicados e inferidos

Itabiritos (it): litologias if, ih, cg, de recursos medidos, indicados e inferidos, acima de 42.5% Fegl

Itabiritos pobres e compactos (ic): litologias ic, is, imn, de recursos medidos, indicados e inferidos, abaixo de 42.5% fegl e acima de 27.5% Fegl.

Estéril de formação ferrífera estimados (ff): litologias ido e hdo, de recursos medidos, indicados e inferidos.

Estéril de formação ferrífera não-estimados (ffne): litologias de itabirito e hematita não estimados.

Estéril franco (estf): todos os blocos que não pertencem à formação ferrífera, incluindo litologias xisto, intrusiva, quartzitos, solo e veio de quartzo.

4.2 Otimização de pit

O software NPVScheduler, baseado no algoritmo de Lerchs e Grossmann, foi utilizado para otimização da cava final e sequenciamento de lavra. A maximização do valor presente líquido (NPV) foi o critério adotado. O resultado desta operação é o pit de máximo NPV e pits intermediários com 1% de desconto nos preços dos produtos. As variáveis de entrada no software são:

MCAF: fator de custo de mina por tonelada (minério e estéril)

PCAF: fator de custo de processo por tonelada de produto

SF, GR e PF: variáveis que contém a massa de produto contida em cada bloco

DENSITY: densidade do bloco

TIPO: classificação do bloco por tipo de material

A partir dos resultados da otimização de pit são gerados gráficos que auxiliam na seleção da cava final. As fases matemáticas geradas pelo NPVScheduler® são analisadas com o objetivo de eliminar as fases que apresentam altas relações estéril-minério incrementais. Essas fases acrescentam pouco minério e muito estéril à cava final. O estéril é usualmente localizado nas bordas do pit enquanto o minério é concentrado no fundo, onde incertezas geológicas, geotécnicas e econômicas são maiores. Esse procedimento reduz incertezas e riscos associados à definição da cava final.

O gráfico da REM acumulada x REM incremental mostra um salto brusco próximo da cava final, conforme figura 28, que são analisados com mais detalhe.

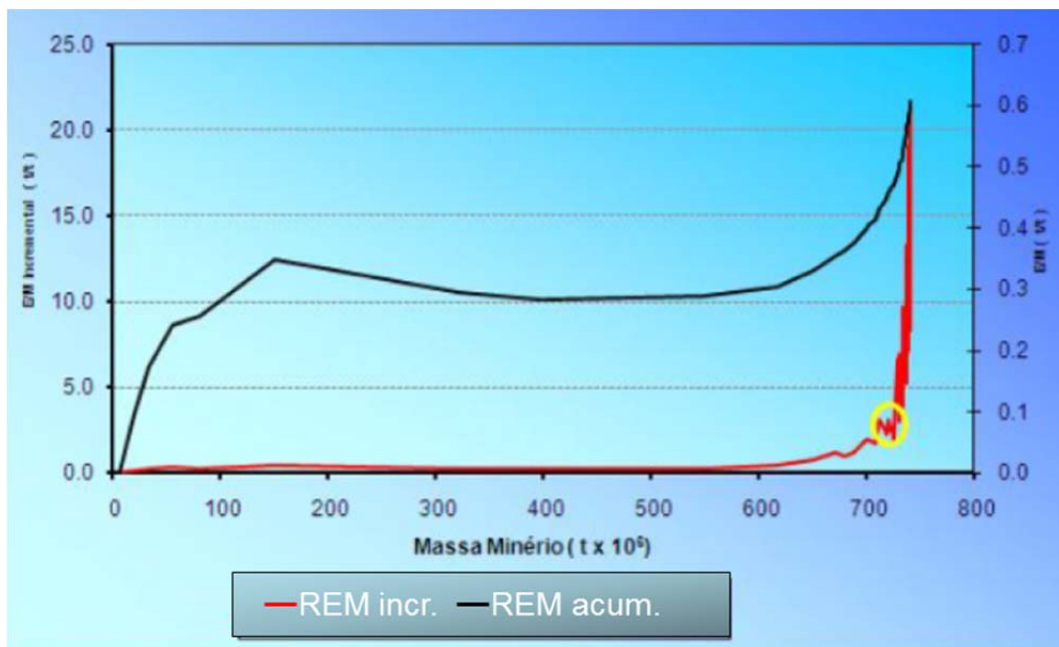


Figura 28: REM acumulada e incremental por fase

Ao aproximar o gráfico no ponto de inflexão, os pontos marcados são as fases notáveis, e na sequência são analisadas as diferenças para avançar para a próxima fase notável. São analisadas as diferenças em lucro, NPV, movimentação total, minério, estéril e REM, conforme tabela 6.

Analisando as diferenças conforme tabela 5, optou-se pela seleção da fase 36. A partir da cava 36, há pouco ganho em lucro e NPV, porém muito ganho em estéril.

Tabela 6: Diferenças entre as fases

Fase	Lucro (US\$$\times 10^6$)	NPV (US\$$\times 10^6$)	Rocha ($\text{tx}10^6$)	Minério ($\text{tx}10^6$)	Estéril ($\text{tx}10^6$)	REM (t/t)
33-29	21.32	4.45	5.60	0.98	4.62	4.71
36-29	58.78	12.25	17.29	3.21	14.08	4.39
36-33	37.46	7.80	11.69	2.23	9.46	4.25
47-36	93.76	19.36	44.74	4.80	39.95	8.33

4.3 Avaliação de reservas

A avaliação de reservas foi feita com base na topografia de 1980, uma cava intermediária e a cava final previamente gerada.

Como exposto, a cava final é aquela que resulta no lucro máximo caso todo o material pudesse ser extraído de uma só vez. Porém, em 1980 não havia a expectativa de aproveitamento dos itabiritos compactos, pois naquela época não havia tecnologia para seu processamento. Portanto, em uma definição de cava final para a época, o itabirito compacto deveria, neste caso, ser valorado e classificado como estéril comum na função benefício, gerando apenas custos, até o momento a partir do qual houvesse a expectativa de seu aproveitamento. Esta operação visa selecionar uma cava econômica que minimize a geração de estéril de itabirito compacto.

Em 2014, foi construída uma planta para processamento de itabirito compacto. A partir deste momento, o estéril de formação ferrífera pode ser valorado como minério. Efetivamente, alguns anos antes da definição da construção da planta, o estéril de

formação ferrífera já poderia ser disposto seletivamente, o que realmente ocorreu. A nova cava final deve englobar a fase anterior.

Portanto, avaliaremos as reservas em dois momentos: entre a topografia inicial disponível (1980) e o plano 2014, e entre o plano 2014 e a cava final, conforme figura 29.

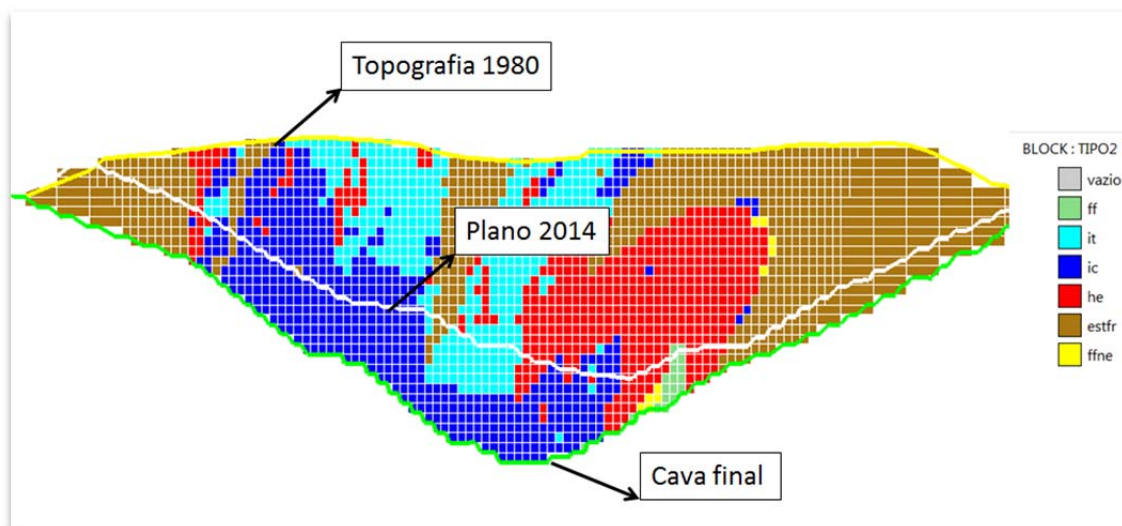


Figura 29: Avaliação das reservas entre 1980, plano 2014 e cava final

Os resultados mostram que há aproximadamente 180 milhões de toneladas de material pobre e compacto entre a topografia de 1980 e o plano 2014, conforme na tabela 7. Essa é a massa compulsória que deveria ser lavrada e disposta seletivamente.

Tabela 7: Reservas por tipo

Tipo	1980 a 2014		2014 a cava final		Total	
	Massa (Mt)	Fe (%)	Massa (Mt)	Fe (%)	Massa (Mt)	Fe (%)
he	210.5	67.5	84.1	67.3	294.6	67.4
it	345.6	48.3	53.8	47.8	399.3	48.2
ic	179.2	42.1	445.2	41.3	624.4	41.5
ff	0.6	44.8	54.2	43.7	54.8	43.8
ffne	2.8	-	0.9	-	3.6	-
estfr	264.3	-	192.1	-	456.5	-
Grand Total	1,002.9	38.4	830.4	34.9	1,833.3	36.8

4.4. Sequenciamento de lavra

O sequenciamento de lavra foi realizado com as premissas descritas a seguir.

Entre 1980 e 2014:

- Lavra de 10 Mt/ano de itabirito;
- Lavra de 8 Mt/ano de hematita;
- Formação de estoque com Itabirito compacto (“ic”).

Entre 2014 e cava final:

- Entrada em operação de uma planta nova e adequação da planta atual, de modo que as duas plantas estão aptas a processar itabirito pobre e compacto;
- Atender à meta de produção de 48 Mt/ano de itabirito total (“it” e “ic”);
- Atender à meta de produção de 8 Mt/ano de hematita.

Após a cava final:

- Retomar estoque ao ritmo de 48 Mt/ano.

A tabela 8 contém os resultados do sequenciamento de 1980 até a exaustão do estoque formado.

A massa de “ic” lavrada entre 1980 e 2014 foi de 208 Mt. A diferença entre este valor e o apresentado na tabela 8 é devido à abertura das fases finais da otimização para encontrar soluções, já que próximo da superfície final o balanceamento entre as massas torna-se mais difícil. Essa massa foi utilizada para a formação de um estoque. Após 2014, as plantas estão adequadas para o processo do “ic”, e portanto não é mais necessária a formação de estoque. A exaustão da cava ocorre em 2025. Após essa data o estoque pode ser retomado, o que estenderia a vida útil da mina por 5 anos.

Tabela 8: Resultados do sequenciamento anual

Ano	IC	HE	IT	Estoque formado	Estoque retomado	Estéril	ROM	REM	Estéril + estoque formado
1980		3,3	10,0	0,4		9,0	13,3	0,7	9,4
1981		2,2	10,1	0,1		9,0	12,3	0,7	9,1
1982		4,8	10,0	0,2		10,0	14,8	0,7	10,2
1983		5,1	10,0	0,4		11,0	15,1	0,8	11,4
1984		6,8	10,0	0,6		12,0	16,8	0,8	12,6
1985		2,2	10,0	0,8		11,0	12,2	1,0	11,8
1986		10,1	10,0	1,0		15,0	20,1	0,8	16,0
1987		8,7	10,0	1,4		16,0	18,7	0,9	17,4
1988		5,8	10,0	1,8		11,0	15,8	0,8	12,8
1989		3,1	10,0	1,3		11,0	13,1	0,9	12,3
1990		3,4	10,0	1,7		10,0	13,4	0,9	11,7
1991		3,4	10,0	1,9		11,0	13,4	1,0	12,9
1992		2,8	10,0	3,7		12,0	12,8	1,2	15,7
1993		5,4	9,9	3,1		11,1	15,3	0,9	14,2
1994		3,5	10,1	3,7		10,0	13,6	1,0	13,7
1995		2,5	9,9	2,8		10,0	12,4	1,0	12,8
1996		5,6	10,0	4,1		11,5	15,6	1,0	15,6
1997		5,6	10,0	11,6		10,2	15,6	1,4	21,8
1998		5,2	10,0	3,1		12,1	15,2	1,0	15,2
1999		2,3	10,0	5,8		11,2	12,3	1,4	17,0
2000		7,6	10,0	7,9		11,1	17,6	1,1	19,0
2001		5,7	10,0	7,4		12,8	15,7	1,3	20,2
2002		4,3	10,0	13,6		7,0	14,3	1,4	20,6
2003		9,4	10,0	6,7		13,0	19,4	1,0	19,7
2004		9,1	10,0	3,7		16,0	19,1	1,0	19,7
2005		10,0	10,0	5,3		17,0	20,0	1,1	22,3
2006		9,3	10,0	24,2		1,0	19,3	1,3	25,2
2007		9,0	10,0	10,2		18,0	19,0	1,5	28,2
2008		8,9	10,1	11,7		16,2	19,0	1,5	27,9
2009		8,3	10,0	8,1		17,0	18,3	1,4	25,1
2010		7,5	10,0	5,7		20,0	17,5	1,5	25,7
2011		7,5	9,9	7,6		19,9	17,4	1,6	27,5
2012		8,9	10,0	4,8		23,0	18,9	1,5	27,8
2013		8,7	10,0	11,6		15,0	18,7	1,4	26,6
2014		8,0	10,0	25,6		1,0	18,0	1,5	26,6
2015	6,0	8,2	3,9	4,6		22,0	18,1	1,5	26,6
2016	33,2	9,4	14,8			25,0	57,4	0,4	25,0
2017	43,5	7,7	4,5			25,0	55,7	0,4	25,0
2018	40,9	7,8	7,2			25,0	55,9	0,4	25,0
2019	43,5	7,3	4,4			25,0	55,2	0,5	25,0
2020	44,1	7,0	4,1			25,0	55,2	0,5	25,0
2021	46,8	7,0	1,2			16,9	55,0	0,3	16,9
2022	46,9	6,7	1,1			22,5	54,7	0,4	22,5
2023	46,5	6,5	1,1			25,0	54,1	0,5	25,0
2024	43,3	6,1	1,6			25,0	51,0	0,5	25,0
2025	20,4	6,5	4,7			25,0	31,6	0,8	25,0
2026			1,8		48,0		49,8	-	-
2027					48,0		48,0	-	-
2028					48,0		48,0	-	-
2029					48,0		48,0	-	-
2030					16,0		16,0	-	-
Total	415,1	294,2	400,4	208,2	208,0	693,5	1.317,7	0,5	901,7

Apresentando o sequenciamento na forma de gráfico, conforme figura 30, é possível observar a formação anual do estoque ao longo do tempo (linha azul), e sua retomada após a exaustão da cava (linha marrom).

A relação estéril-minério foi calculada incluindo o material utilizado para formar o estoque. Ela apresenta comportamento crescente até 2014, em seguida cai para o patamar de 0,5 t/t, até o momento da retomada do estoque.

O sequenciamento demonstra que a retomada do estoque prolonga a vida útil do empreendimento em 5 anos.

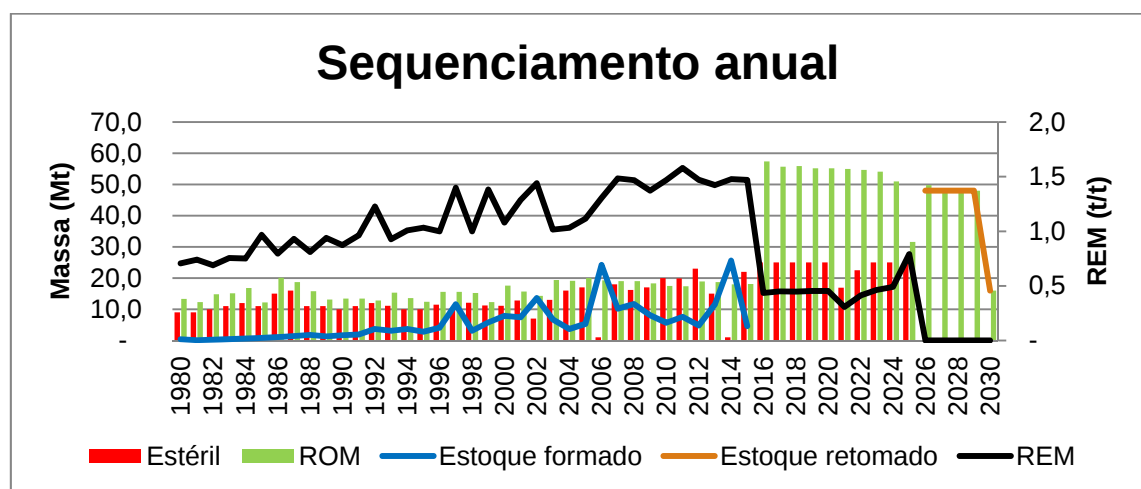


Figura 30: Evolução da formação e retomada do estoque

4.5 Disposição de estéril

O sequenciamento aponta para a necessidade de estoque de aproximadamente 208 milhões de toneladas. A seleção de uma área apropriada é fundamental para que sua retomada se torne viável, assim como a necessidade de uma disposição em separado do material que não possui formação ferrífera.

A figura abaixo é o arranjo atual da mina. As duas áreas em vermelho são as áreas das plantas, sendo à direita a planta atual, e à esquerda a localização da planta de itabirito compacto, com entrada em operação em 2014.

Idealmente, a disposição de estéril de formação ferrífera para formação do estoque deve ser em uma área tal que seja fácil sua retomada para alimentação das plantas, quando for requerido. A figura 31 representa em amarelo o local selecionado para o armazenamento do itabirito compacto.

Ressalta-se que nesse local foi construída recentemente uma pilha de itabiritos pobres e compactos, com aproximadamente 100 milhões de toneladas. Esta pilha tem disposição ascendente em bancadas de 10 metros de altura, berma de 8 metros.



Figura 31: Disposição de estéril

Devido a dificuldades ambientais, a formação ferrífera estimada e não estimada abaixo de 34% Fe não é estocada para futuros empreendimentos.

O estéril franco deve ser disposto em pilhas separadas, de acordo com a disponibilidade de áreas e estratégia da empresa quanto ao licenciamento.

5. CONCLUSÃO

Pelo exposto nos resultados encontrados, a lavra e disposição seletiva podem trazer benefícios para todos os envolvidos direta e indiretamente em um empreendimento mineiro.

Financeiramente, ao invés de descartar o material sem possibilidade de auferir receita, a disposição seletiva permitirá, no futuro, uma geração de caixa para a empresa por mais 5 anos.

Ambientalmente, a disposição seletiva exigirá, num primeiro momento, o licenciamento de uma pilha a mais para a disposição do estéril de formação ferrífera, com todas as normas e requisitos de disposição previamente expostos. Porém, esta pilha será totalmente consumida quando da retomada do estoque, restituindo a topografia.

Para o poder público (municípios, estados e federação), a extensão da vida útil do empreendimento significa manutenção da cadeia de geração de impostos, sustentação da administração pública e investimentos nos municípios e na população. Os municípios com vocação mineira são fortemente dependentes desta atividade. O encerramento da uma mina pode afetar drasticamente esta cadeia.

Para a população, não há dúvida que a atividade econômica garante nível de emprego, qualidade de vida, desenvolvimento, progresso da comunidade.

A metodologia pode ser estendida para outros bens minerais, desde que aplicada com devido critério e de acordo com a realidade das operações mineiras. Especificamente em relação ao minério de ferro, pode-se aplicar o mesmo exercício ainda ao estéril de formação ferrífera estimado e não estimado.

Recomenda-se às mineradoras a utilização da técnica. Uma vez misturado o estéril de formação ferrífera com materiais não-ferruginosos, é praticamente inviável sua utilização no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F.F.; MARSHAK, S. **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero**, 1998, 90 p, Precambrian Research, 1998.

CARVALHO, M. G. A. **Estratégia ambiental pró-ativa: sequenciamento de lavra concomitantemente com a disposição de estéril dentro da mina**, 2009, 113 p, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CHAUSSEON, D. S.; DE TOMI, G.; AZEVEDO, R.C. **Otimização do Sequenciamento de Lavra**. Brasil Mineral, São Paulo: v. 190, 2001, p. 30-33.

CURI, A. **Minas a Céu Aberto: planejamento de lavra**, 2014, 223 p, Oficina de Textos, São Paulo, 2014.

Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. **Informe Mineral do DNPM, 1º/2014**, Brasília, 2014.

DORR, J.V.N. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, 1969, 110 p, USGS, Washington, 1969.

FERREIRA, M. F.; DE TOMI G. **Optimizing ultimate open pit limits with quality constraints**. Proceedings of APCOM'2001, Beijing, China, April 25-27, 2001.

GUIMARÃES, O. R. A. **Aplicação de algoritmos genéticos na determinação de cava final e sequenciamento de lavra em minas a céu aberto**, 2007, 169 p, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

GOMIDE, M. **Comparação entre métodos de determinação de cava final**, 2001, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

HEINECK, C.A.; DOS SANTOS, R.A.; AND DELGADO, I.M., 1999. **Geology and Mineral Resources of Brazil – East and South-East Regions**. In: Gurmendi, A.C., Barboza, F.L.M. and Thornman, C.H. (eds.), The Mineral Economy of Brazil. U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS-53, United States Department of the Interior U.S. Geological Survey and Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, pp. 85-152.

HAWLEY, P. M.; OCHOA, X.; SHARON, R. **Design of the Pierina waste dump**, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum , 2003.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M. **Open pit mine planning & design; Fundamentals**. Colorado School of Mines,. vol. I, II, Colorado, Estados Unidos, 2006.

KENNEDY, B. A. Surface Mining, 2nd Edition. Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Littleton, CO, USA, 1990. P. 770-776.

KIM, Y. C. **Ultimate Pit Limit Design Methodologies Using Computer Models – The State of the Art**, In: SME Mining Engineering, October, 1978.

LERCHS, H.; GROSSMANN, L. **Optimum Design of Open-Pit Mines**, In: C.I.M., Vol. LXVIII, 1965.

MAPTEK. **Manual interno de planejamento do software Vulcan®**, 2001.

OMACHI, G. Y. Proposta de Dissertação de Mestrado, Estudos para o aumento da vida útil das minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

PAIVA, G.; BATISTON, E.; CARVALHO, M.; AMARAL, R.; CHAUSSON, D. **Green Sequencing in iron ore mining**, 2nd. International Seminar on Mine Planning, Antofagasta, Chile, 2011.

PRATI, F. J. **Geometria de minas a céu aberto: fator crítico de sucesso da indústria mineral**. 1995. 44 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SILVA, N. C. S. **Metodologia de Planejamento Estratégico de Lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais**, 2008, Dissertação (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

VALE. Relatório interno de avaliação de recursos e reservas, 2011.

VALE. **RELATÓRIO ANUAL 2013**. Disponível em <http://www.vale.com/brasil/PT/investors/Annual-reports/20F/Paginas/default.aspx>. Acessado em 14 de setembro de 2014.

WHITTLE, J. **The facts and fallacies of Open-Pit Design**, Whittle Programming Pty Ltd, 1989.