DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

MONOGRAFIA

Análise Crítica de Possíveis Impactos da Pilha de Estéril no Recurso do Sistema Minas-Rio

Aluna: Bruna Oliveira Froes Canesso

Orientador: Prof. Pedro Campos

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe por abdicar de sua vida pela vida de suas filhas.

Ao meu pai por me proporcionar as condições para que eu chegasse até aqui.

À Nanda por toda inspiração e amizade.

À Ayana por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos amigos da Anglo American por tanto aprendizado e momentos especiais. Em especial ao José Caetano por me proporcionar a oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao pessoal da Nexa e Vazante por me acolherem tão bem e me mostrarem um outro lado tão incrível da Engenharia de Minas.

Aos amigos da melhor turma que eu poderia ter, 2013/1, pelos anos maravilhosos que tivemos e amizade que perdura muito além das salas de aula.

E por fim, à UFMG e aos professores por todos esses anos de aprendizado, em especial ao Pedro Campos pela orientação no presente trabalho.

RESUMO

Umas das atribuições essenciais do planejamento de mina a longo prazo é a definição da cava final ótima do empreendimento e sua vida útil. Aliado a isso, a quantificação de recurso e reserva é também responsabilidade do planejamento estratégico e do time de geologia. Na lavra a céu aberto, o recurso declarado do empreendimento abrange uma área maior que a reserva declarada, muitas vezes por falta de conhecimento confiável dessas regiões ao redor da cava ótima ou porque ao se aplicar os fatores modificadores não ocorre a conversão de recurso em reserva. Esses fatores são variáveis no decorrer do tempo e, muitas vezes, o recurso mineral é convertido em reserva lavrável a medida que o conhecimento e a mina avançam. Sendo assim, este trabalho analisa o possível impacto de uma pilha de estéril no recurso do Sistema Minas-Rio, da Anglo American, devido à sua localização ser numa região onde há recurso declarado do empreendimento. Essa localização foi definida para que a pilha seja próxima da cava final ótima de reserva, com o objetivo de aumentar a produtividade. Para análise desse possível impacto no decorrer do tempo, foram criados modelos de blocos no software Studio OP da Datamine nos sólidos das pilhas de estéril sequenciadas e esses modelos foram unidos ao modelo de recurso para que sejam realizadas várias otimizações de cavas finais de recurso no software NPV Scheduler, com o preço do minério de ferro taxado para recurso e, posteriormente, uma análise de sensibilidade. Outra análise é do intervalo de preços do minério de ferro onde há possível imobilização do recurso e, consequentemente, valores os quais é viável lavrar a pilha de estéril para que se alcance o mesmo minério que se alcançaria sem a presença da pilha de estéril nesse local, ou seja, sem alteração da cava final. Os resultados obtidos demonstram que a pilha de estéril não imobiliza parte desse recurso mineral sendo, portanto, viável assumir o risco de manter a pilha de estéril no local atual.

Palavras-chave: Planejamento longo prazo, recurso, reserva, Sistema Minas-Rio, modelo de blocos, pilha de estéril, otimização.

ABSTRACT

One of the essential tasks of long-term mine planning is the definition of the ultimate pit limits and its life of mine. In addition, mineral resource and ore reserve quantification is also the responsibility of the strategic planning and geology team. In open pit mine, the declared mineral resources covers an area larger than the declared ore reserves, often due to a lack of reliable knowledge of these regions around the optimum pit or because applying modifying factors does not convert mineral resource into ore reserve. These factors vary over time and often the mineral resource is converted into a mineable reserve as the mine progresses. Thus, this work analyzes the potential impact of a waste dump on Anglo American's Minas-Rio System resource, because its location is in a region where there is a declared mineral resource. This location has been set so that the waste dump were close to the ore reserves ultimate pit limits in order to increase productivity. In order to analyze this potential impact over time, block models were created in Datamine's Studio OP software on sequenced waste dump solids, and these models were joined to the mineral resource model so that multiple resource optimizations were performed in the software NPV Scheduler, with the iron ore price taxed for mineral resource and then a sensitivity analysis. Another analysis is the price range of iron ore where there is possible immobilization of the resource and, consequently, values which it is feasible to mine the waste dump to reach the same ore that would be reached without the presence of the waste dump at that location, it means without alteration of the ultimate pit limits. The results show that the waste dump does not immobilize part of this mineral resource and it is therefore feasible to assume the risk of keeping the waste dump at its current location.

Key-words: Long-term mine planning, mineral resource, ore reserve, Minas-Rio system, block models, waste dump, optimization.

Lista de Figuras

Figura 1: Classificação JORC Recurso e Reserva	10
Figura 2: Modelo de Blocos por teores.	12
Figura 3: Região Retangular no Espaço.	13
Figura 4: Posição do Bloco	13
Figura 5: Fluxograma Planejamento de Lavra	14
Figura 6: Relação Estéril Minério	17
Figura 7: Método da REM crescente.	18
Figura 8: Método da REM decrescente.	18
Figura 9: Resultado de otimização por Lerchs-Grossmann 3D	20
Figura 10: Localização Mina do Sapo	23
Figura 11: Mina do Sapo.	
Figura 12: Cava Recurso x Cava Reserva	25
Figura 13: Cava final de reserva x Pilhas de estéril.	26
Figura 14: Cava final de Recurso x Pilhas de estéril	27
Figura 15: Sólidos das PDE (05, 10, 15, 20, 25, 30 e 34)	
Figura 16: Modelo de Blocos criado na PDE e unido ao modelo de Recurso	29
Figura 17: Análise Recurso	
Figura 18: NPV Análise Recurso	33
Figura 19: Cava Final por modelo	35
Figura 20: Modelo 00	36
Figura 21: Cava final Análise de Sensibilidade (00)	37
Figura 22: Modelo 05	
Figura 23: Cava final Análise de Sesibilidade (05)	40
Figura 24: Modelo 10	41
Figura 25: Cava final Análise de sensibilidade (10)	
Figura 26: Modelo 15	43
Figura 27: Cava final Análise de sensibilidade (15)	44
Figura 28: Modelo 20	45
Figura 29: Cava final Análise de sensibilidade (20)	46
Figura 30: Modelo 25	47
Figura 31: Cava final Análise de Sensibilidade (25)	48
Figura 32: Modelo 30	49
Figura 33: Cava final Análise de Sensibilidade (30)	50
Figura 34: Modelo 00 x Modelo 34	
Figura 35: Cava final Análise de Sensibilidade (34)	53

Lista de Tabelas

Tabela 1: Volumes PDE	28
Tabela 2: Parâmetros Análise de Sensibilidade	31
Tabela 3: Porcentagem da PDE movimentada	34
Tabela 4: Movimentação de minério por modelo	53

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	7
2.	OBJETIVO E RELEVÂNCIA	8
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
	3.1 Código JORC	9
	3.1.1 Recurso	10
	3.1.2 Reserva	11
	3.2 Modelo de Blocos	11
	3.3 Planejamento Estratégico	13
	3.3.1 Pilha de Estéril	15
	3.3.2 Relação estéril/minério (REM)	16
	3.3.3 Definição de Valor Econômico de um bloco	19
	3.3.4 Otimização	19
	3.3.5 Sequenciamento	21
	3.4 Análise de Sensibilidade	22
4.	DESENVOLVIMENTO	23
	4.1 Anglo American	23
	4.2 Cava de Recurso x Cava de Reserva	25
	4.3 Visão Geral do Problema	26
	4.4 Manipulação dos Modelos de Blocos	27
	4.5 Otimização	29
	4.6 Análise de Sensibilidade	31
5.	RESULTADOS	32
	5.1 Análise Recurso	32
	5.2 Análise de Sensibilidade	35
	5.2.1 Modelo 00	35
	5.2.2 Modelo 05	38
	5.2.3 Modelo 10	41
	5.2.4 Modelo 15	43
	5.2.5 Modelo 20	45
	5.2.6 Modelo 25	47
	5.2.7 Modelo 30	49
	5.2.8 Modelo 34	51
б.	CONCLUSÃO	55
SI	JGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	56
R	FFFRÊNCIA RIRI IOGRÁFICA	57

1. INTRODUÇÃO

O planejamento de mina, dividido em planejamento estratégico (longo prazo), planejamento tático (médio prazo) e planejamento operacional (curto prazo), é responsável pelos parâmetros e avanços de lavra em diferentes horizontes de tempo. O Planejamento Estratégico se insere nesse contexto tendo a função de definir a cava final ótima, o sequenciamento, o planejamento da mina até o fim da vida útil do empreendimento e o cálculo de reserva. Estes, são realizados tendo um modelo de blocos como base para as suas estimativas e definição de estratégias.

A reserva lavrável é assegurada e definida por uma Pessoa Competente, termo que será explicado no decorrer do trabalho. Esta, será responsável pela elaboração de relatório anual contendo teores e tonelagem dessa reserva, além das informações a respeito do recurso mineral. Tal relatório segue as normas definidas pelo Código JORC e garante a confiabilidade do empreendimento para investidores.

Uma outra responsabilidade do planejamento estratégico é o estudo locacional de pilhas de estéril. Em operações de lavra a céu aberto, o material considerado estéril precisa ser retirado para que o minério se encontre exposto. Quando não é possível esse material retornar à cava de origem, até o fim da vida útil da mina, é necessário que haja um destino para ele durante a operação. Com isso, é necessário que se determinem locais para o depósito desse material, as chamadas pilhas de estéril. Muitas vezes, com a necessidade de se reduzir custos de operação e distancias médias de transporte e aumentar a produtividade, as pilhas ficam localizadas próximas ao limite da cava de reserva. Porém, em alguns casos, surge o risco dessa localização imobilizar recurso.

O presente trabalho irá avaliar a localização da pilha de estéril da Mina do Sapo, da Anglo American, que excede o limite da cava ótima de recurso, e o possível impacto dessa localização no recurso atual do empreendimento no decorrer do tempo.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O objetivo do presente estudo é analisar um possível impacto no recurso do sistema Minas-Rio no cenário do preço do ferro atual, com foco na inserção da pilha de estéril norte como restrição física à cava final de recurso no decorrer do tempo. Para isso, serão criados modelos de bloco na pilha de estéril, e esta será inserida ao modelo de blocos de recurso do empreendimento.

A relevância do trabalho está nas análises realizadas para concluir se há ou não perda de recurso nos cenários atuais, assim como na análise de sensibilidade para determinar preços do ferro que podem imobilizar ou não o recurso.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Código JORC

Também conhecido como NORMAS JORC, o Código JORC determina requisitos e diretrizes fundamentais para a elaboração de Relatórios de Recursos Minerais e Reservas de Minério, além de sugerir recomendações para seu desenvolvimento. Esses relatórios são de caráter público e objetivam levar informação confiável aos investidores. De acordo com o próprio Código JORC, ele teve sua primeira publicação em 1989 e foram adotadas pelo Instituto Australasiano de Mineração e Metalurgia e pelo Instituto Australiano de Geocientistas.

O Código exige o mínimo necessário aos Relatórios Públicos e entre seus requisitos fundamentais está a estimativa de recursos minerais e a estimativa das reservas, que devem ser publicadas anualmente pelas empresas. Essas estimativas se resumem em teor e tonelagem. Tanto a estimativa de recurso como a de reserva, é realizada por uma equipe de geólogos e engenheiros de minas, tendo responsáveis principais, denominados de Pessoa(s) Competente(s). Estes, devem ser associados a uma das instituições citadas anteriormente e possuir um mínimo de 5 anos de considerável experiência no tipo de depósito que está declarando informações e na atividade que está inserido, podendo ser na estimativa de recurso ou reserva. (JORC, 1999).

Os três princípios que visam direcionar a aplicação do Código JORC são: transparência, materialidade e competência.

- Transparência: Significa que, ao ler o relatório da empresa, o leitor terá a garantia de que a Pessoa Competente não ocultou informações, ou seja, elas são claras e objetivas de forma a fazer com que o documento seja inteligível.
- Materialidade: O relatório público deve conter informações relevantes aos investidores de forma a deixá-los fazer seus julgamentos sobre reservas e explorações minerais de forma justa. Quando informações relevantes não forem fornecidas no documento, o motivo dessa exclusão deve ser fornecido.

• Competência: O relatório deve ser responsabilidade de profissionais adequadamente qualificados e experientes.

Baseado nisso, o Código JORC estabelece as principais classificações para recurso e reserva que podem ser vistas na Figura 1.

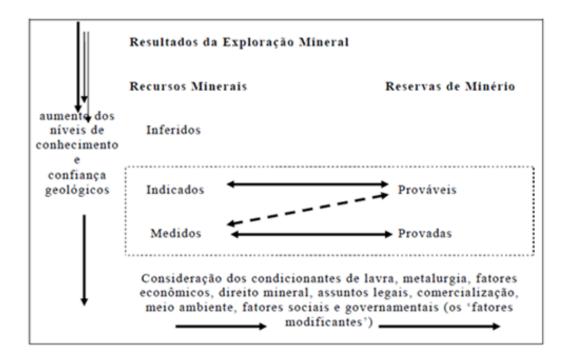


Figura 1: Classificação JORC Recurso e Reserva. (JORC, 1999).

É possível analisar a relação entre essas classificações. Por exemplo, recursos minerais medidos podem ser convertidos em reservas de minério prováveis ou reservas de minério provadas. No entanto, recursos minerais inferidos não podem ser convertidos em reservas de minério lavráveis. As definições de recurso e reserva serão discutidas nas próximas seções.

3.1.1 Recurso

Para definição de recurso mineral, é necessária a realização de pesquisa e amostragem. O material de interesse é definido como recurso mineral quando a sua concentração ou ocorrência na crosta da Terra ocorrem de maneira a justificar relevantes perspectivas para uma possível extração econômica. Algumas características e informações a respeito do

corpo mineralizado são possíveis de serem estimadas e interpretadas, como: localização, teor, quantidade e características geológicas.

O recurso mineral, seguindo as determinações do Código JORC, são subdivididos em Inferido, Indicado e Medido. O que difere tais grupos é o grau de confiabilidade, sendo o primeiro menos confiável e conhecido do que o último citado. Isso quer dizer que o Recurso Medido já pode ser estimado com maior grau de precisão o qual possui análises mais detalhadas e confiáveis em relação ao recurso indicado e inferido. Dessa forma, de acordo com esse nível de confiança, a Pessoa Competente irá classificar seu recurso.

3.1.2 Reserva

A parte economicamente lavrável de um Recurso Medido ou Indicado é definido como Reserva de Minério. Nessa fase, as avaliações definidas por estudos de viabilidade já foram realizadas e a lavra é justificada. Sendo assim, tem-se viabilidade técnica, econômica, ambiental, entre outros, para produção e adequado nível de confiabilidade. A reserva lavrável irá se dividir em duas classificações, são elas: Reserva provável e provada, a qual possui maior nível de confiança. Algumas influências ou modificações são causadas por alguns fatores, conhecidos como fatores modificadores, e o resultado disso irá definir se o recurso mineral é de fato reserva de minério ou não. Dentro desses fatores modificadores, tem-se: consideração dos condicionantes de lavra, metalurgia, comercialização, direito mineral, fatores econômicos, assuntos legais, meio ambiente e fatores sociais e governamentais. Ou seja, os fatores modificadores são levados em consideração na conversão de recurso em reserva.

3.2 Modelo de Blocos

Uma forma comumente utilizada para representar uma mina seria por meio da discretização de um corpo mineralizado em blocos. Segundo Poniewierski (2019), um modelo de bloco é uma representação simplificada de um corpo de minério e seu entorno, que pode ser entendido como uma pilha de "tijolos" gerados compreendendo toda a área de interesse, com o auxílio de softwares específicos e tendo como base os resultados de

descrições e análises de furos de sondagem, geoposicionados conforme um padrão de amostragem. Em cada bloco, há a estimativa de diversas informações, como teor, tonelagem, densidade, litologia, entre outras. Um exemplo pode ser visto na Figura 2.

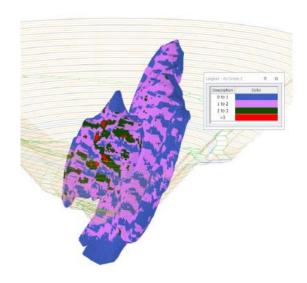


Figura 2: Modelo de Blocos por teores. (PONIEWIERSKI, 2019).

Segundo Thorley (2012), cada depósito e suas peculiaridades irão influenciar na dimensão de cada bloco, por exemplo, um depósito com uma alta seletividade e muito heterogêneo provavelmente terá blocos com menores dimensões. Sua altura, na maioria das vezes, vai depender da altura da bancada e suas três dimensões podem ter ou não o mesmo valor, ou seja, podem ser blocos de seção retangular ou quadrada (CARMO, 2001).

Cada modelo de bloco possui uma região retangular do espaço definida dentro do qual as células do modelo estão localizadas. Essa região requer uma origem, distância para cada eixo e ângulo de rotação. Dentro dela, os blocos são individuais, todos com um comprimento designado (incremento X), largura (incremento Y) e altura (Incremento Z). A posição do bloco pode ser definida por um centróide (Xc, Yc, Zc) ou uma origem de bloco (Xmin, Ymin, Zmin) (PONIEWIERSKI 2019). A região no espaço e a posição do bloco podem ser vistas na Figura 3 e Figura 4.

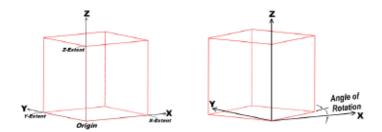


Figura 3: Região Retangular no Espaço. (PONIEWIERSKI, 2019).

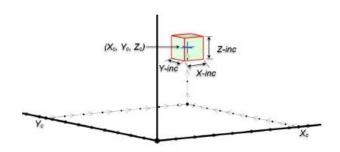


Figura 4: Posição do Bloco. (PONIEWIERSKI, 2019).

Um processo importante para a realização do modelo de blocos da mina é a estimativa dos teores e de outros atributos dos blocos das regiões onde não foi realizada a perfuração e consequentemente não foi possível obter análises de sondagem. (ROSSI; DEUTSCH, 2014). Para lidar com esse fato, existem alguns métodos convencionais que podem ser utilizados para estimar tais atributos, como polígonos, vizinho mais próximo, inverso do quadrado da distância (IQD) e outros métodos geoestatísticos.

3.3 Planejamento Estratégico

Diferentemente de outras indústrias, a indústria da mineração visa ao aproveitamento de recursos minerais que não são renováveis e que são de bem de capital exaurível. O que a assemelha das demais indústrias é o objetivo econômico da maximização de sua riqueza futura. Essa maximização irá acontecer em um determinado período de tempo prédeterminado, que seria durante a existência do bem que lhe deu origem. (PERONI 2008). Segundo Curi (2014), as alternativas de aproveitamento desse bem mineral seriam a lavra

da totalidade da jazida (lavra integral), lavra somente das porções ricas (lavra ambiciosa) ou a lavra de partes cuidadosamente selecionadas (criteriosa). Ele ainda comenta que dentro do planejamento de lavra, algumas condicionantes são de extrema importância para o aproveitamento de um bem mineral, como a escala de produção, o investimento inicial ali empregado, os custos de produção, o valor do produto no mercado, o qual pode sofrer flutuações ao longo do tempo, a economia mineral, a localização da jazida, a infraestrutura e fatores como energia, água e mão de obra.

Para Whittle (2011), o planejamento de mina pode ser definido como um processo de tomada de decisão, uma vez que se tem o modelo de blocos em mãos. Ele está envolvido na determinação de certos caminhos a se orientar e seguir. Isso quer dizer que ele irá decidir se determinado bloco do modelo será lavrado ou não, se sim, quando será minerado e, uma vez minerado, quando esse bloco será encaminhado ao processo.

Esse Planejamento de Lavra na mina a céu aberto é comumente dividido em três diferentes seguimentos que vão se diferenciar em relação ao seu horizonte de tempo. São eles: Planejamento Estratégico (Longo Prazo), Planejamento Tático (Médio Prazo) e Planejamento Operacional (Curto Prazo). (FLORES 2018). Tal divisão pode ser observada na Figura 5, baseado no fluxograma definido por Curi (2008):



Figura 5: Fluxograma Planejamento de Lavra. (Modificado de CURI, 2018).

Dentro do fluxograma do Planejamento de Mina se encontra o Planejamento Estratégico. Ele serve de base para os demais setores do fluxograma e seu principal objetivo é determinar o valor agregado ao investimento. Além disso, ele é responsável pelo plano de produção da vida da mina, com informações até então disponíveis da jazida e projeta transformações que podem vir a ocorrer na mina no decorrer do tempo. O Planejamento Estratégico é também responsável pelo plano de exaustão da mina ao mesmo tempo que define a reserva tecnicamente lavrável. Ele irá determinar o estéril a ser removido, a relação estéril/minério e os limites da cava final, como forma de impedir futuras instalações permanentes nessas regiões. A realização do Plano de Longo Prazo é primordial para a elaboração dos planos tático e operacional. (CURI, 2008).

3.3.1 Pilha de Estéril

O material extraído na lavra pode ter três destinos diferentes. Ele pode ser encaminhado diretamente para a usina, pode ser direcionado para a pilha de estoque para futuras utilizações ou, por fim, pode ser direcionado para a pilha de estéril.

Durante toda a vida útil da mina é necessário que se tenha uma região de destino do material considerado estéril, pois na geometria da cava a céu aberto fica inviável que se tenha a explotação somente do material de interesse, ou seja, é necessária a retirada do estéril para a exposição do minério e sua disposição posteriormente, na maioria das vezes, nos arredores da mina.

A análise e definição do local apropriado para dispor esse material, assim como sua configuração e capacidade, são definidos pelo Planejamento a Longo Prazo. Segundo Peroni (2008), na fase dessas definições alguns aspectos devem ser considerados para garantirem a melhor disposição desse material. São eles:

- Definição das necessidades do sistema
- Estudo de impacto ambiental
- Estudos geológico-geotécnicos
- Fundação
- Estudos hidrológicos-hidráulicos
- Cheia máxima provável e vazões típicas locais
- Dimensionamento da drenagem superficial

- Projeto da pilha
- Projeto geométrico
- Acessos de construção e manutenção
- Análise de percolação/Projeto da drenagem interna
- Análises de estabilidade dos taludes
- Projeto de drenagem superficial
- Proteção dos taludes
- Projeto de instrumentação
- Tipos/ locação dos instrumentos
- Plano de inspeção/ carta de risco

Peroni ainda afirma que a quantidade de estéril potencial irá influenciar diretamente no estudo locacional da pilha. Além disso, a localização dessas pilhas, em muitos casos, gera um conflito entre a necessidade de se reduzir custos operacionais e a imobilização de recursos minerais. Esses custos operacionais estão diretamente ligados às distâncias médias de transporte (DMT's), pois quanto mais próxima a pilha estiver da cava de reserva, menores serão as DMT's e, consequentemente, um menor custos de transporte estará ali associado e maior será a produtividade. Por outro lado, a medida que se aumentam os estudos e a confiabilidade nas sondagens das regiões classificadas como recurso mineral, ou até mesmo devido as flutuações do mercado, tem-se a possibilidade desse recurso mineral ser classificado como reserva e num determinado momento, a longo prazo, esse possível avanço de cava poderia ser dificultado com a presença de uma pilha de estéril, caso sua localização fosse definida como a mais próxima possível da cava de reserva.

3.3.2 Relação estéril/minério (REM)

A quantidade de material considerada estéril que será removida tem uma relação com a quantidade de minério que será exposta devido a remoção desse estéril. Essa relação gera um parâmetro utilizado universalmente, conhecido como Relação estéril/minério (REM) e pode ser observada na Figura 6. Ou seja, para cada unidade de minério lavrada, uma quantidade de estéril será também retirada.

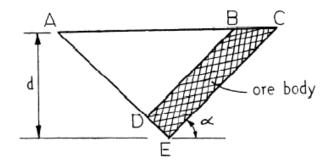


Figura 6: Relação Estéril Minério. (PERONI, 2008).

Considerando que, na imagem acima, o material em branco seja estéril e o rachurado seja minério, tem-se:

$$REM = \frac{\text{volume de estéril removido até a profundida de d}}{\text{volume de minério lavrado até a profundida de d}} = \frac{ABD}{BCED}$$

De acordo com Peroni (2008), a relação estéril/minério pode ser um parâmetro utilizado abrangendo toda a vida útil da mina, mas também é um parâmetro importante que auxilia na definição de um avanço de lavra e de certos níveis da lavra. De um ponto de vista global do empreendimento, a variação da REM pode acontecer tendo como base três métodos distintos, são eles: Método da REM crescente, Método da REM decrescente e Método da REM constante.

No Método da REM crescente, a retirada do estéril acontece somente ao redor do minério. A cava avança somente até que seja possível o minério ser lavrado. A vantagem desse método é a máxima lucratividade nos anos iniciais do empreendimento, porém uma desvantagem é a operacionalidade de um grande número de bancadas estreitas, que irá refletir em um pouco espaço para manobras e para a operação. O método da REM crescente pode ser observado na Figura 7.

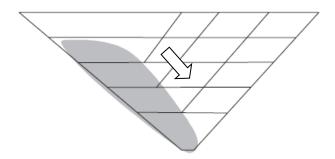


Figura 7: Método da REM crescente. (WHITTLE, 2011).

Já no Método da REM decrescente, a retirada do estéril acontece de cima para baixo, de nível em nível, seguindo a direção do corpo mineralizado até que se atinja o fundo da cava. As vantagens desse método são o espaço operacional disponível, a facilidade em acessar o minério e a concentração dos equipamentos operacionais no mesmo nível de lavra, o que impede a contaminação do minério de interesse pelo material estéril proveniente de outro nível, como observado na Figura 8. Por outro lado, tem-se um maior custo operacional nos primeiros anos do empreendimento.

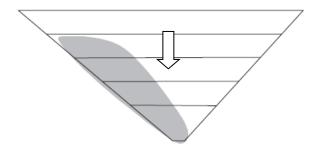


Figura 8: Método da REM decrescente. (WHITTLE, 2011).

Por fim, no método da REM constante a REM a cada nível é aproximadamente igual a REM global do empreedimento. A estratégia utilizada é a variação do ângulo de face de bancada, o qual inicia suave e se torna mais agressivo no desenvolver dos níveis. Nesse método, hà uma boa lucratividade nos estágios iniciais da mina e a frota e mão de obra reduzem nos estágios finais das atividades no local.

3.3.3 Definição de Valor Econômico de um bloco

De acordo com Carmo (2001), é necessário definir um valor econômico para os blocos, pois eles irão fornecer o máximo retorno de valor possível do empreendimento, respeitando as restrições geométricas, de estabilidade e de lavra na otimização da cava. Peroni (2008) afirma que cada um desses blocos vai ser caracterizado pelos seguintes parâmetros:

- Recuperação global da planta (R)
- Teor do bloco (T)
- Preço de venda do bem mineral (P)
- Custo de lavra (Cl)
- Custo de processo (Cp)
- Custos gerais e administrativos (CG&A)

Esses parâmetros irão ser base para o cálculo da função benefício, que seria o desconto dos custos envolvidos na explotação e processo do minério do benefício que esse bloco geraria. Quando a função benefício é zero, tem-se o cálculo do teor de corte no equilíbrio, ou seja, para valores abaixo desse teor começa a se ter um retorno negativo. A função Benefício é dada por:

$$F_{Beneficio} = Lucro_{bloco} - Custos_{bloco}$$

$$F_{\textit{Beneficio}} = R*T*P - (C_l + C_p + C_{\textit{G\&A}})$$

3.3.4 Otimização

O modelo de blocos, assim como o modelo econômico dos blocos, servirá como base para a determinação dos limites da cava final do empreendimento que é um dos maiores desafios de qualquer projeto de mineração, segundo Carmo (2006). O planejamento estratégico é o responsável pela definição dessa cava ótima, definida no início do projeto e rotineiramente atualizada, até o fim da vida útil da mina.

Atualmente, há modelos matemáticos que realizam a otimização que irá resultar na chamada cava ótima. Essa cava ótima irá definir os limites os quais a lavra irá respeitar. Segundo Peroni (2008), o ótimo seria definido como o modelo e uma configuração resultante de um algoritmo que levasse em consideração:

- i. máxima lucratividade possível;
- ii. maior valor presente líquido (VPL) possível;
- iii. maior aproveitamento dos seus recursos minerais.

Dentro desses modelos matemáticos analíticos desenvolvidos para otimização de cava, o mais aceito e utilizado atualmente é o Algoritmo de Lerchs-Grossmann. (NETO, 2017). Lerchs and Grossmann desenvolveram dois métodos matemáticos: "Um algoritmo simples de programação dinâmica voltado para cavas em duas dimensões (ou uma simples seção vertical de um depósito) e um algoritmo gráfico mais elaborado para o caso geral de cavas em três dimensões". (PERONI, 2008) Esse modelo matemático permite: "projetar o contorno de uma explotação a céu aberto de tal forma que se maximize a diferença entre o valor total do minério explotado e o custo total da extração do minério e do estéril". (LERCHS; GROSSMANN, 1965, p. 47).

O algoritmo gráfico mais elaborado (*Lerchs-Grossmann 3D*) é baseado na teoria dos grafos e seu resultado é o aproveitamento dos blocos considerados economicamente viáveis dentro de um limite então determinado, como pode ser visto na Figura 9.

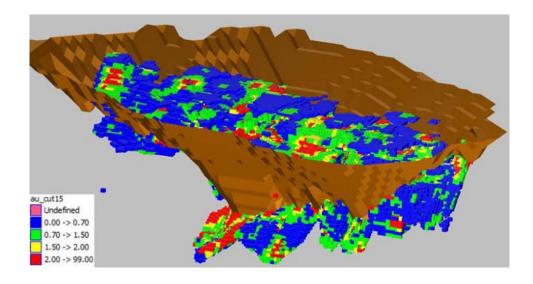


Figura 9: Resultado de otimização por Lerchs-Grossmann 3D. (WHITTLE, 2011).

Alguns fatores são incorporados ao software no momento de realizar a otimização e devem ser levados em consideração para que se tenha o limite da cava final o mais próximo da realidade possível e com o maior aproveitamento dos recursos minerais. São eles:

- Fatores Geológicos
- Fatores Geotécnicos
- Fatores Operacionais
- Fatores Mercadológicos
- Fatores Econômicos
- Fatores Ambientais

Tais fatores podem variar no decorrer dos anos e influenciar numa nova definição da cava final ótima. Como exemplo tem-se o desenvolvimento de tecnologias, flutuação de preços de commodities e flexibilização ou intensificação de leis ambientais.

3.3.5 Sequenciamento

O objetivo do sequenciamento é definir para onde a mina vai avançar e as regiões da mina a serem lavradas, desde o seu início até seu esgotamento. É possível definir estratégias, como exemplo a lavra do material mais rico em teor antes da lavra do material mais pobre. O sequenciamento, hoje realizado por softwares específicos, busca maximizar o NPV, maximizar o teor do metal, minimizar a relação estéril/minério e minimizar distâncias médias de transporte. Alguns parâmetros são levados em consideração, como as possíveis regiões de destino do material lavrado e suas capacidades que irão garantir a qualidade do produto final por toda a vida útil do empreendimento.

Leva-se em consideração no sequenciamento possíveis diferentes áreas explotadas que podem ter diferentes tipos de material, com teores variados, além de diversas regiões de destino desses materiais, podendo ser: pilhas de estéril, pilhas de estoque e usina. O resultado da mina sequenciada irá priorizar, como já mencionado, a maximização do NPV e uma operação flexível por toda a vida útil da mina. (ANGLO AMERICAN, 2018).

3.4 Análise de Sensibilidade

Os projetos de mineração são projetos que envolvem grande riscos associados. Segundo Flores (2008), para todo projeto que envolva projeções e dependência de preços e parâmetros mercadológicos haverá um risco ali presente. Dentro desse contexto, a análise de risco é uma estratégia utilizada para que se possa ter conhecimento de futuras perdas ou ganhos acarretados por uma possível variação de certo valor.

A Análise de Sensibilidade "consiste em verificar o que ocorre com o retorno do projeto, quando um elemento do Fluxo de Caixa assume valores diferentes em torno de sua melhor estimativa. (SOUZA, P. 1994). Ela auxilia na tomada de decisão e fornece informações que permitem definir os parâmetros que podem causar maior impacto ou perturbação no projeto em análise.

As principais ferramentas gráficas da Análise de sensibilidade são: Diagrama de Tornado e Diagrama de Radar ou *Spiderplot*. O primeiro determina quais variáveis tem maior impacto potencial no projeto e o segundo compara os efeitos de vários *inputs* nos resultados. (MACIEL; MASSA, 2012).

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 Anglo American

O grupo Anglo American é um conglomerado fundado na África do Sul em 1917 por Sir Ernest Oppenheimer, com sede em Londres, no Reino Unido, que atua no ramo de mineração e está presente em mais de 30 países. No Brasil, ela está presente em Goiás, com a operação de Níquel, e em Minas Gerais, com a operação de minério de ferro, mina a céu aberto chamada Mina do Sapo. Esse empreendimento é conhecido como Sistema Minas-Rio, devido a implementação de um mineroduto que transporta o produto da usina, em Minas Gerais, até o porto para ser embarcado no Rio de Janeiro, totalizando 529 km de extensão.

A mina do Sapo está localizada em Conceição do Mato Dentro, no estado de Minas Gerais, à 167 km de Belo Horizonte, como pode ser visto na Figura 10.



Figura 10: Localização Mina do Sapo. (ANGLO AMERICAN, 2018).

A localização de suas instalações está ilustrada na Figura 11.



Figura 11: Mina do Sapo. (Contribuição do autor).

O Método de Lavra utilizado na Mina do Sapo é o método por bancadas. As operações unitárias do método são: perfuração, desmonte, carregamento e transporte. Nesse método, utiliza-se desmonte de rochas em bancadas para capeamento e retirada do material. Posteriormente, o material é levado para o britador primário e segue para a usina. Segundo Pinto (2008), dentre as vantagens desse método, tem-se: alta produtividade, baixo custo de lavra comparativamente com outros métodos, alta razão de produção, possibilidade de produção de minério com pouco desenvolvimento, boa recuperação na lavra, baixa diluição e boas condições de salubridade e segurança.

A lavra no empreendimento acontece em duas fases: a fase I é composta pela lavra do minério friável e de maior teor, sendo realizada até meados de 2030. A fase II se inicia a partir daí, com a lavra do minério itabirito de menor teor até a exaustão da mina no ano de 2065, aproximadamente, com valores de REM crescentes mas dentro dos padrões ambientais aceitáveis. O principal produto é Minério de Ferro - Pellet Feed Premium teor

médio 67% de Ferro. A produção anual, quando operando em capacidade máxima é de 30.0 Mt úmido, a REM atual é de 0,2 e a vida útil da mina é de 48 anos.

4.2 Cava de Recurso x Cava de Reserva

À medida que informações geológicas vão surgindo e o próprio mercado vai se alterando, os recursos minerais podem ser convertidos em reservas lavráveis. Como citado anteriormente, a quantificação de recurso e reserva enviado para a Bolsa de Valores é realizado anualmente. Para isso, uma política adotada pela Anglo American é a realização de otimização da cava ótima para reserva mineral, considerando o modelo de blocos regularizado, e, além disso, é realizada uma otimização e definição de uma cava final de recurso, tendo como base o modelo de blocos subblocado, para que não se tenha perda de recurso no processo de regularização. Esse padrão é adotado para que se tenha uma perspectiva econômica razoável de aproveitamento do recurso e naturalmente essa cava definida como cava de recurso abrange um limite maior do que a cava de reserva, como pode ser observado na Figura 12. O recurso que fica fora desse limite, é declarado como sendo um potencial recurso, porém, as áreas de interesse para sondagens e investimentos são focadas, naturalmente, na região de dentro dessa cava de recurso.

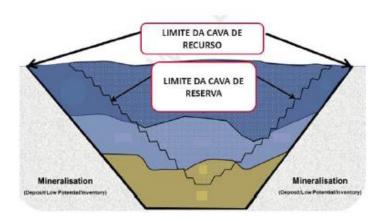


Figura 12: Cava Recurso x Cava Reserva. (Modificado de ANGLO AMERICN, 2019).

4.3 Visão Geral do Problema

Os teores do minério da Mina do Sapo variam muito no decorrer dos anos, e uma estratégia adotada é a lavra de minério de maior teor primeiro. A lavra, hoje, se concentra na região norte da cava final da mina e no decorrer dos anos essa lavra avança para o sul da mina. Como os teores vão se tornando cava vez menores, a quantidade de estéril aumenta cada vez mais. Com isso, o estudo locacional da pilha de estéril é um desafio encarado pela empresa. Nas circunstâncias atuais, depois de vários estudos locacionais para as pilhas de estéril do empreendimento, as pilhas estão localizadas e são sequenciadas nas posições vistas na Figura 13, ao lado da cava ótima de reserva. Essas posições são justificadas devido à necessidade de estarem próximas a cava de reserva para reduções de DMT's e maior produtividade.

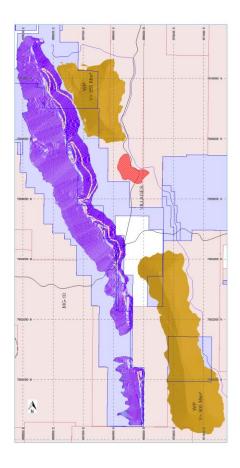


Figura 13: Cava final de reserva x Pilhas de estéril (ANGLO AMERICAN, 2018).

Por outro lado, ao se analisar a região limite da cava de recurso, na Figura 14, pode-se notar que uma das pilhas de estéril, a mais ao norte, ultrapassa esse limite, o que poderia impactar de alguma forma o recurso do empreendimento e imobilizá-lo.

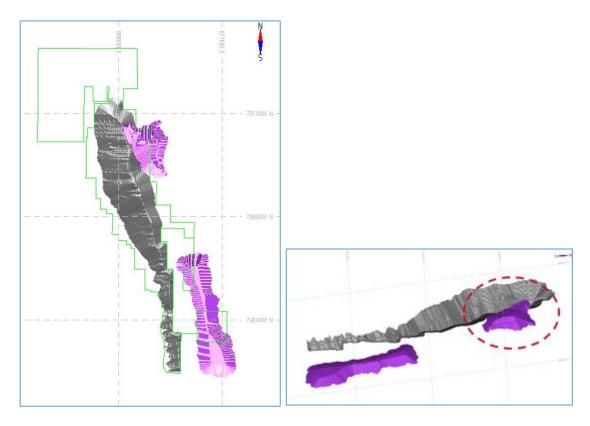


Figura 14: Cava final de Recurso x Pilhas de estéril. (Contribuição do autor).

Dessa forma, a metodologia proposta visa analisar o impacto dessa pilha de estéril norte na cava de recurso do Sistema Minas-Rio.

4.4 Manipulação dos Modelos de Blocos

Para isso, o desenvolvimento do presente trabalho baseia-se na simulação de cenários de otimização da cava de recurso com a criação de modelo de blocos nos sólidos das pilhas de estéril sequenciadas para analisar as alterações e impactos que podem ocorrer, no decorrer dos anos, nos limites dessa cava final e demais *outputs* com a presença da pilha ultrapassando os limites da cava definida nos cenários atuais.

Os sólidos das pilhas de estéril norte foram agrupados de 5 em 5 anos, de forma acumulada, até atingirem a sua capacidade máxima: 05, 10, 15, 20, 25, 30 e 34 anos, como pode ser visto na Figura 15.

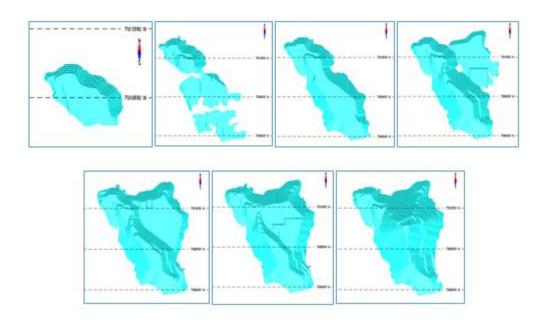


Figura 15: Sólidos das PDE (05, 10, 15, 20, 25, 30 e 34). (Contribuição do autor).

A capacidade máxima da PDE norte é de 357,772,703m³ e os demais volumes podem ser vistos na Tabela 1:

Tabela 1: Volumes PDE

Modelo	Volume PDE (m ³) Acumulado
5	24,824,460
10	59,666,678
15	149,971,858
20	198,711,036
25	246,904,874
30	286,650,774
34	357,772,703

Uma vez tendo esses sólidos divididos e acumulados, foi possível criar modelos de blocos neles, considerando o mesmo protótipo do modelo de Recurso, com um campo criado chamado de "PDE" e densidade igual ao do estéril, que foram, em seguida, unidos ao modelo de recurso formando um modelo só (modelo da pilha + modelo de recurso). Isso quer dizer que o modelo de blocos da pilha acumulada, a cada 5 anos, foi incorporado ao modelo de blocos de recurso no *software Datamine*. Essa união de modelos pode ser vista na Figura 16, que é um exemplo da união do sólido da PDE 34, onde os blocos de azul representam os blocos criados na PDE norte, e os blocos em vermelho representam os blocos do recurso. Posteriormente, eles foram enviados para o software *NPV Scheduler* para Otimização e para cada um desses modelos tem-se um cenário diferente e, consequentemente, resultados diferentes que irão auxiliar na análise do impacto da pilha de estéril na cava de recurso no decorrer do tempo.

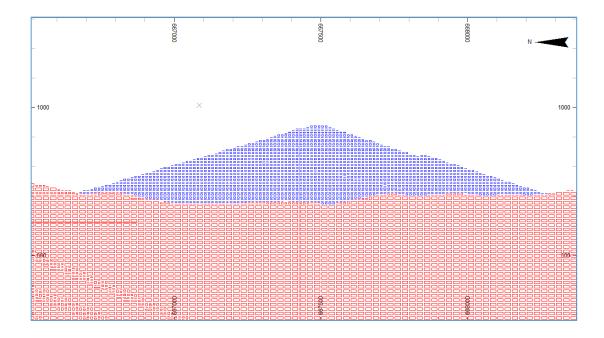


Figura 16: Modelo de Blocos criado na PDE e unido ao modelo de Recurso. (Contribuição do autor).

4.5 Otimização

Considerando que cada modelo de blocos foi criado tendo como base a pilha sequenciada de 5 em 5 anos, os modelos criados que serão importados no Otimizador são denominados: MODELO 05, MODELO 10, MODELO 15, MODELO 20, MODELO

25, MODELO 30 E MODELO 34. Além disso, o cenário base, o qual servirá como referência das análises, é chamado de **MODELO 00**. Nesse modelo, não há a presença da pilha de estéril, somente do modelo de recurso.

Na otimização, algumas premissas são adotadas, são elas:

- Preço do Ferro
- Custo de Venda
- Custo de Mina
- Custo de Beneficiamento
- Ângulo Geral de Talude
- Limite dos Direitos Minerários

Na otimização de todos os cenários não houveram alterações de nenhuma premissa, exceto do preço de venda do ferro nas análises de sensibilidade. Sendo assim, todos os modelos foram otimizados levando-se em consideração as mesmas premissas e variando somente o modelo de blocos importado.

No ano de 2018, o preço de venda do ferro que o setor financeiro da Anglo American determinou para o planejamento Longo Prazo utilizar em suas estratégias foi de 78,60 USD/metal. Uma política Global da empresa é adotar na otimização do recurso um valor 40% maior que o preço taxado para reserva. Isso é explicado pois, para recurso, considera-se o histórico da variação do preço da commodity no decorrer do tempo. Já para Reserva considera-se o valor da commodity no presente ano. Sendo assim, o preço do Ferro para otimização do recurso foi de 110,04 USD/metal.

Por fim, os resultados gerados na otimização e base para a análise do trabalho são:

- Cava final
- NPV
- Movimentação de estéril
- Movimentação de minério
- Relação estéril/minério

4.6 Análise de Sensibilidade

A análise de Sensibilidade auxilia na compreensão de quais preços do minérios de ferro são mais sensíveis à presença da PDE e em que momento ela pode começar a imobilizar recurso. É possível determinar em qual intervalo de preço a PDE impacta o recurso consideravelmente e se realmente irá ou não correr o risco de impactar.

O valor referência para a análise de sensibilidade foi o Preço de Venda do Ferro para Reserva. Como citado anteriormente, esse preço para recurso é 40% a mais do valor da reserva. A variação realizada na análise de sensibilidade foi com a redução do preço de reserva de 5 em 5%, até chegar aos -30%. E a adição do valor foi de 10 em 10% até chegar aos 40%, preço esse para recurso. Os parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros Análise de Sensibilidade

Variação (%)	Preço (USD/metal)			
-5	74.67			
-10	70.74			
-15	66.81			
-20	62.88			
-25	58.95			
-30	55.2			

Variação (%)	Preço (USD/metal)				
+10	86.46				
+20	94.32 102.18 110.04				
+30					
+40 (Preço para Recurso)					
Definição interna					

5. RESULTADOS

5.1 Análise Recurso

Como foco do trabalho, tem-se a análise da cava final de recurso considerando o preço de venda do ferro otimista, 40% a mais do preço de ferro de reserva. Com isso, a medida que o volume da pilha de estéril aumenta no decorrer dos anos, é possível analisar se há impacto desse volume na cava final de recurso.

Realizando a otimização de todos os modelos, desde o 00 ao 34, tem-se os seguintes resultados na Figura 17.



Figura 17: Análise Recurso

Algumas análises podem ser realizadas a partir do gráfico acima. É possível perceber um aumento considerável na relação estéril/minério. A movimentação de estéril é muito maior no decorrer dos modelos, o que já era de se esperar, devido ao aumento da pilha de

estéril no decorrer dos anos e, consequentemente, no decorrer dos modelos. A linha vermelha, a qual representa o minério, teve uma variação máxima de -0,12%. Essa variação relativamente baixa é explicada devido ao fato do preço considerado para venda do ferro ser muito alto, o que consequentemente paga a retirada desse acréscimo de estéril no local em questão.

Sendo assim, a localização da pilha de estéril norte atual do empreendimento, levando-se em consideração o preço de ferro de recurso, não impacta consideravelmente em uma menor tonelagem de minério no limite da cava final de recurso, mesmo no modelo 34, onde há máximo volume da PDE.

Em se tratando do valor do NPV, pode-se analisar na Figura 18 que para os diferentes cenários tem-se uma redução desse valor no decorrer dos anos. Mesmo não ocorrendo uma queda considerável de minério, o valor do NPV se reduz à medida que aumenta a movimentação de estéril ou se mantem estável, como no modelo 20 e 25. Pode-se observar um NPV máximo no modelo 00 de \$10.480.909.309, 100% no gráfico, e um NPV mínimo no Modelo 34, aproximadamente 99,2% se comparado ao modelo 00. Essa variação máxima de valor representa uma variação negativa somente de 0,8%. Ou seja, os modelos tiveram seus valores reduzidos a menos que 1% se comparados ao modelo base de análise, o modelo sem a presença da pilha de estéril (00).

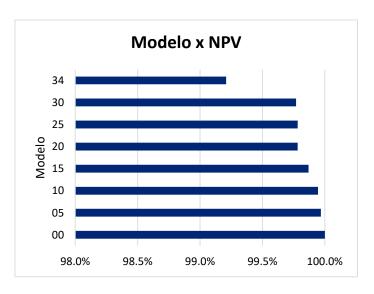


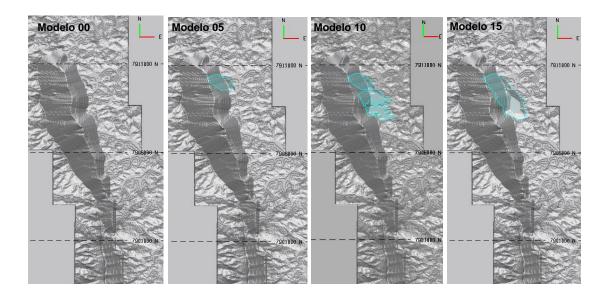
Figura 18: NPV Análise Recurso

Para cada modelo, foi gerada uma cava final e foi possível obter a porcentagem da pilha que foi retirada quando realizou-se a otimização (Tabela 3). Em nenhum cenário o estéril depositado na pilha foi inalterado. Isso significa que ele teve uma porcentagem da pilha movimentada como resultado da otimização. Ao se comparar a cava do Modelo 00 com as outras, o recuo que ocorre com as demais cavas é muito pequeno, como observado na Figura 19. Fato que, mais uma vez, é explicado devido ao alto valor de venda do ferro considerado para recurso que paga a movimentação para movimentar o estéril acrescentado e alcançar o minério.

Tabela 3: Porcentagem da PDE movimentada

MODELO	5	10	15	20	25	30	34
% da PDE movimentada	85%	58%	45%	41%	33%	30%	36%

Os resultados das cavas finais dos recursos para os diferentes modelos podem ser vistos na Figura 19.



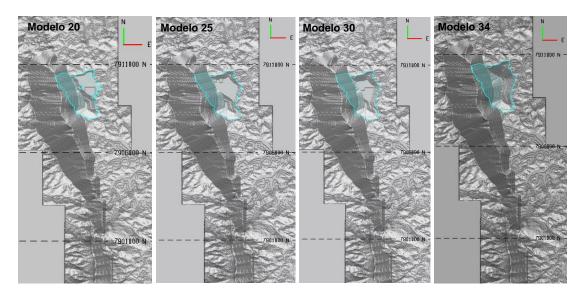


Figura 19: Cava Final por modelo

5.2 Análise de Sensibilidade

Inicialmente, foi realizada análise de sensibilidade no modelo 00, que será base para comparações de resultados. Posteriormente, será visto que cada tópico diz respeito ao resultado separado por modelo: 05, 10, 15, 20, 25, 30 e 34. Para todos foi gerado um gráfico contendo informações como NPV, movimentação de estéril e movimentação de minério, além do desenho da cava final para os preços considerados na análise de sensibilidade. O modelo 34 será apresentado de maneira mais detalhada por ser o modelo que contem o máximo volume da PDE, ou seja, irá gerar os resultados mais extremos para comparações e conclusões.

5.2.1 Modelo 00

O resultado da análise de sensibilidade para movimentação de minério e estéril e NPV total do modelo 00 podem ser vistos na Figura 20.

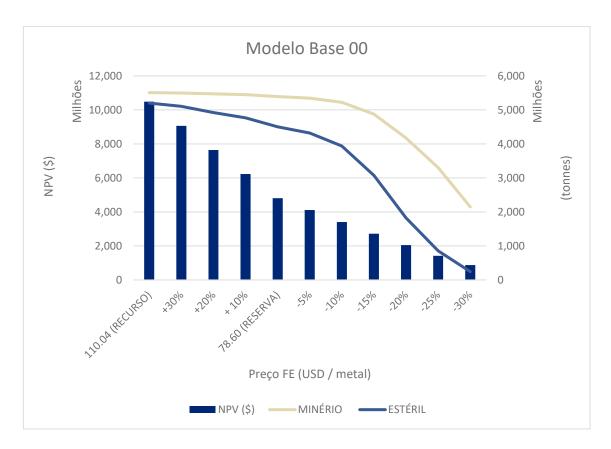
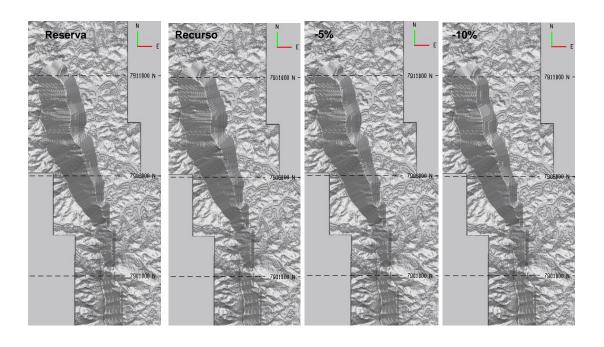


Figura 20: Modelo 00

As cavas finais geradas como resultados da análise de sensibilidade do modelo 00 podem ser observadas na Figura 21.



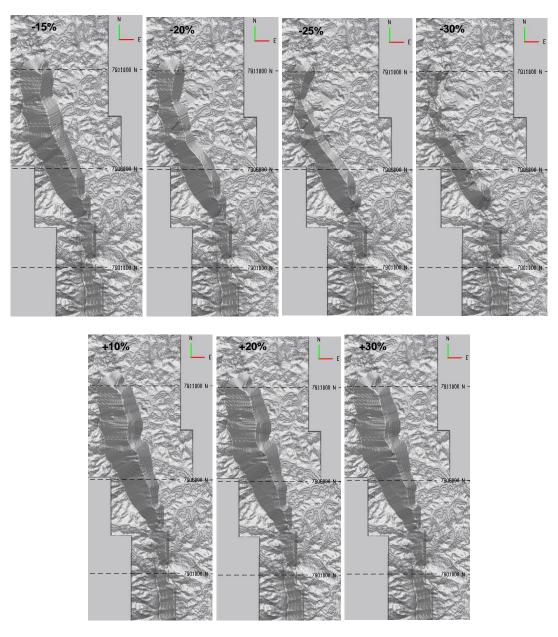


Figura 21: Cava final Análise de Sensibilidade (00)

5.2.2 Modelo 05

O resultado da análise de sensibilidade para movimentação de minério e estéril e NPV total do modelo 05 podem ser vistos na Figura 22.

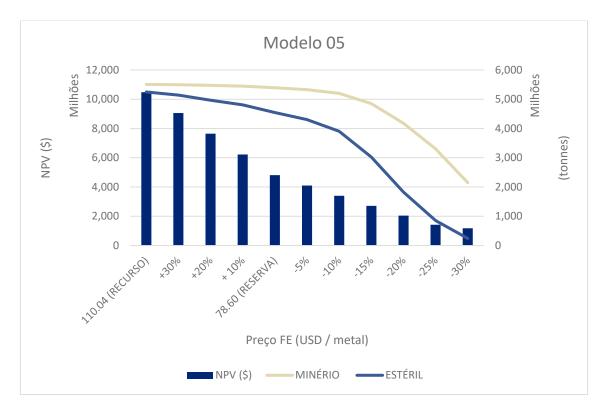
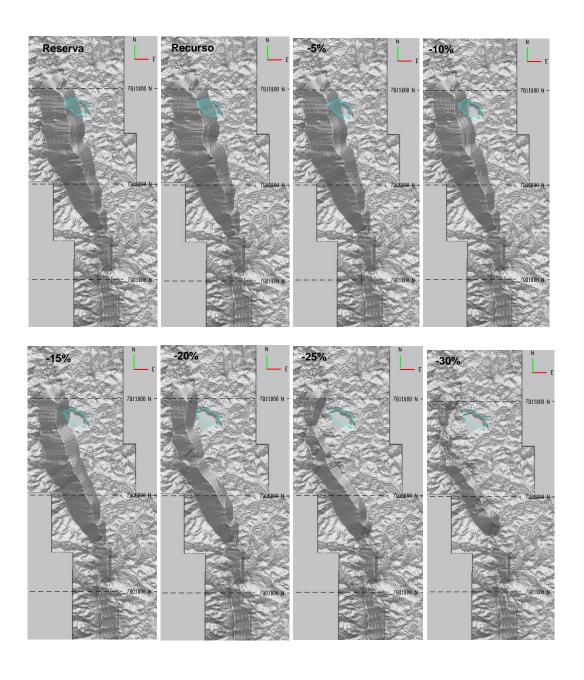


Figura 22: Modelo 05

As cavas finais geradas como resultados da análise de sensibilidade do modelo 30 podem ser observadas na Figura 23.



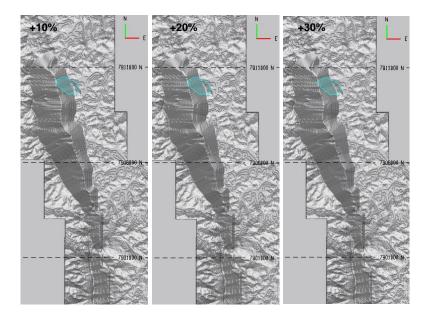


Figura 23: Cava final Análise de Sesibilidade (05)

5.2.3 Modelo 10

O resultado da análise de sensibilidade para movimentação de minério e estéril e NPV total do modelo 10 podem ser vistos na Figura 24.

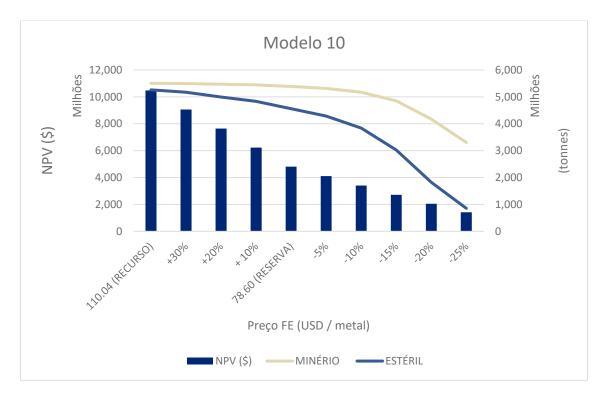
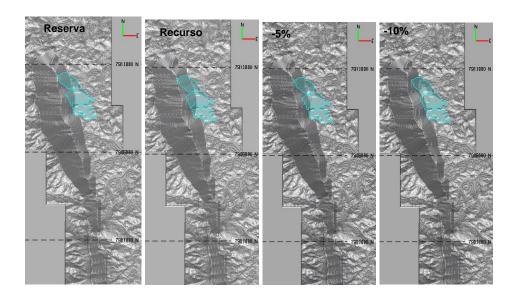


Figura 24: Modelo 10

As cavas finais geradas como resultados da análise de sensibilidade do modelo 10 podem ser observadas na Figura 25.



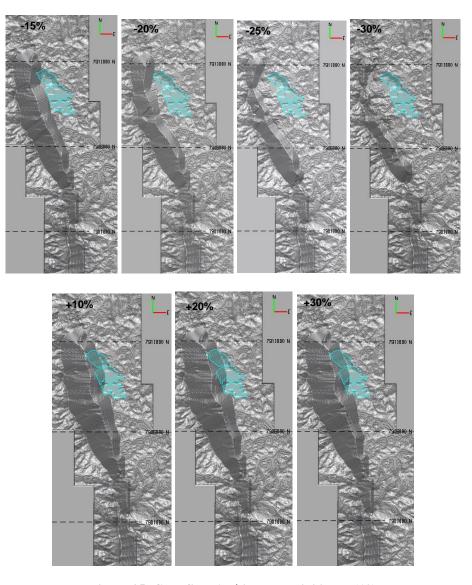


Figura 25: Cava final Análise de sensibilidade (10)

5.2.4 Modelo 15

O resultado da análise de sensibilidade para movimentação de minério e estéril e NPV total do modelo 15 podem ser vistos na Figura 26.

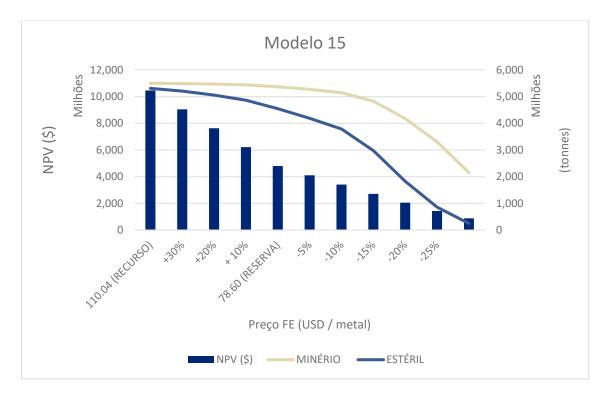
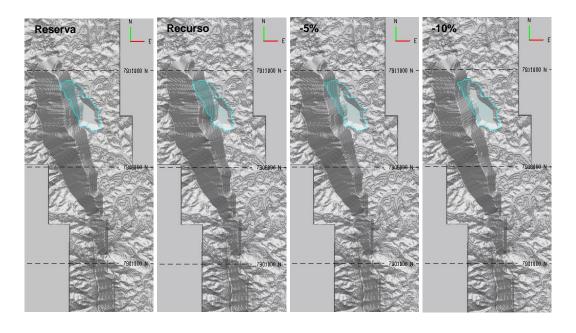


Figura 26: Modelo 15

As cavas finais geradas como resultados da análise de sensibilidade do modelo 15 podem ser observadas na Figura 27.



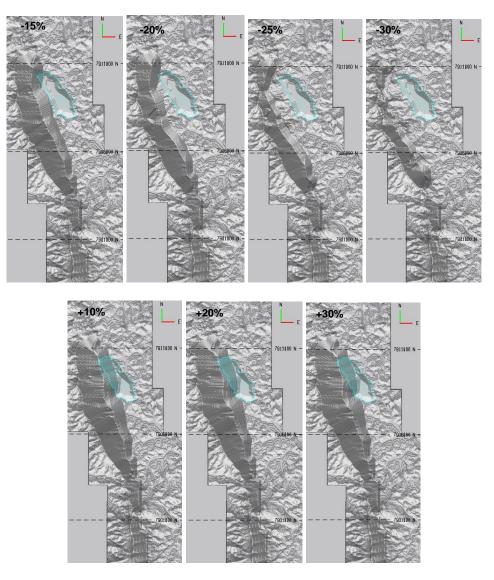


Figura 27: Cava final Análise de sensibilidade (15)

5.2.5 Modelo 20

O resultado da análise de sensibilidade para movimentação de minério e estéril e NPV total do modelo 20 podem ser vistos na Figura 28.

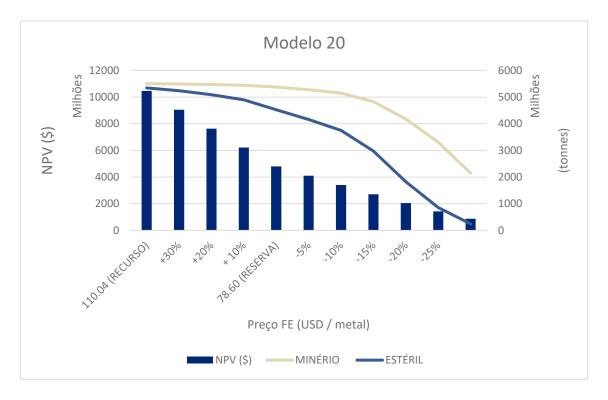
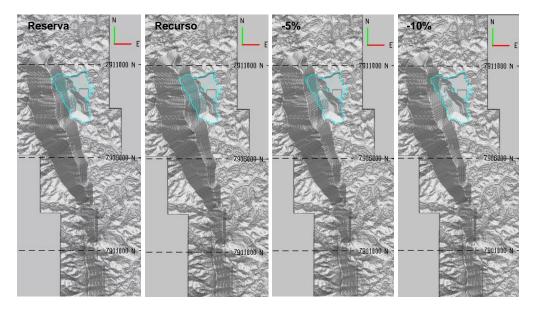


Figura 28: Modelo 20

As cavas finais geradas como resultados da análise de sensibilidade do modelo 20 podem ser observadas na Figura 29.



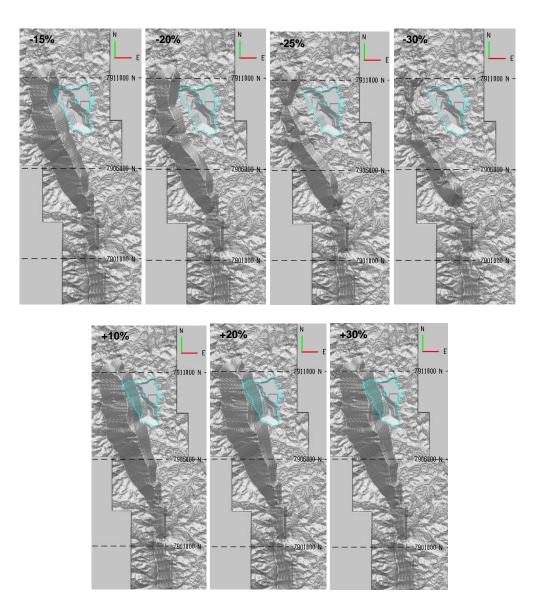


Figura 29: Cava final Análise de sensibilidade (20)

5.2.6 Modelo 25

O resultado da análise de sensibilidade para movimentação de minério e estéril e NPV total do modelo 25 podem ser vistos na Figura 30.

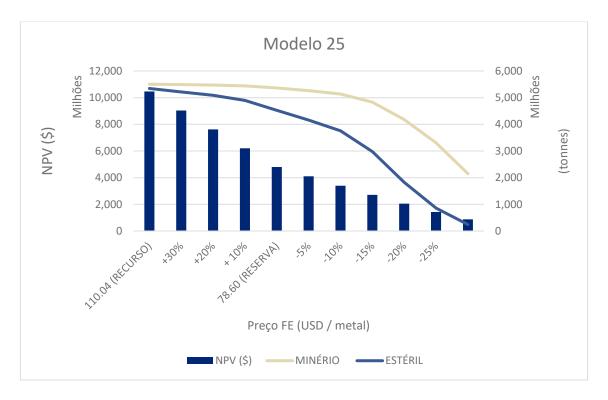
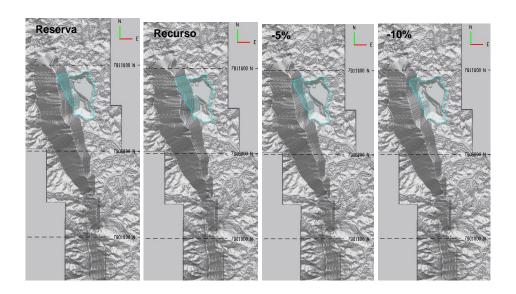


Figura 30: Modelo 25

As cavas finais geradas como resultados da análise de sensibilidade do modelo 25 podem ser observadas na Figura 31.



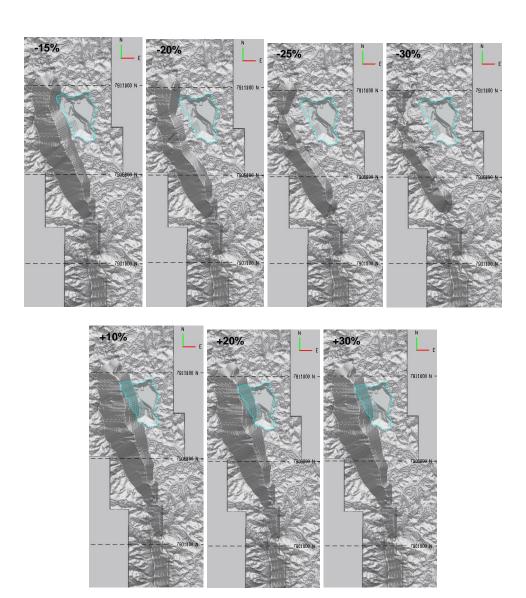


Figura 31: Cava final Análise de Sensibilidade (25)

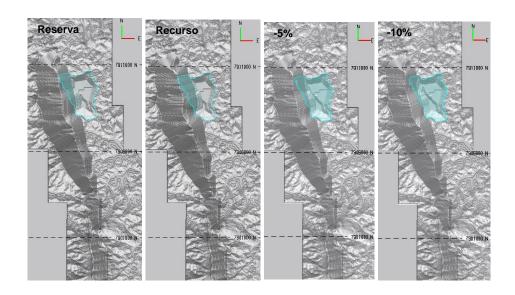
5.2.7 Modelo 30

O resultado da análise de sensibilidade para movimentação de minério e estéril e NPV total do modelo 30 podem ser vistos na Figura 32.



Figura 32: Modelo 30

As cavas finais geradas como resultados da análise de sensibilidade do modelo 30 podem ser observadas na Figura 33.



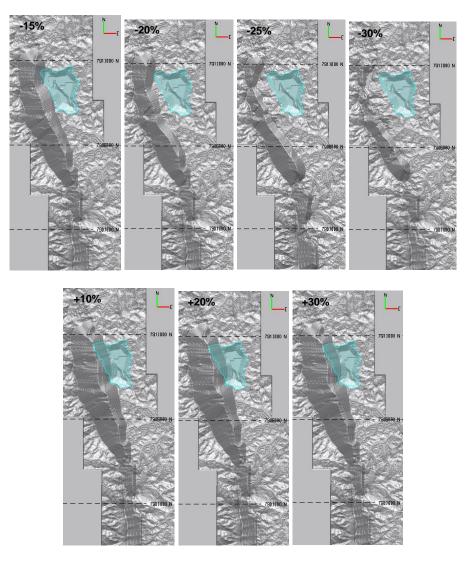


Figura 33: Cava final Análise de Sensibilidade (30)

5.2.8 Modelo 34

A análise do modelo 34 foi um pouco mais profunda, por se tratar do cenário mais extremo, ou seja, aquele que possui a pilha de estéril em sua capacidade máxima. Sendo assim, a Figura 34 foi construída levando-se em consideração os resultados do modelo base, para facilitar algumas comparações e análises.

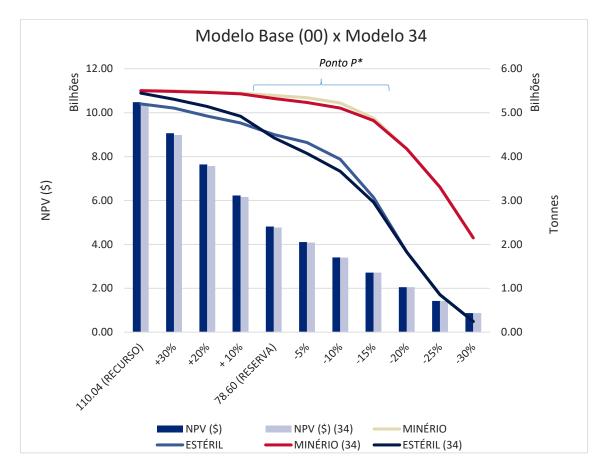
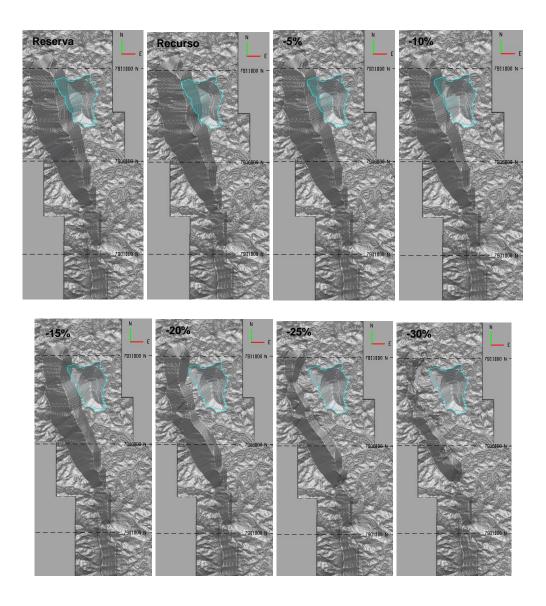


Figura 34: Modelo 00 x Modelo 34

O comportamento das linhas e colunas é semelhante para os dois modelos. A variação de NPV entre o modelo 00 e 34 é muito pequena, sendo praticamente nula a partir da redução de -5% até -30%. Os menores NPV's do modelo 34 na região do gráfico acima dos +10% são justificados devido à maior movimentação de estéril paga pra se retirar a mesma quantidade de minério.

O ponto denominado como *Ponto P* no gráfico é a região de atenção para análise. Observa-se que somente nessa região há uma menor movimentação de estéril no modelo 34 se comparado ao modelo 00, mesmo sendo uma movimentação decrescente para ambos a medida que o preço do ferro diminui. Nessa região, o volume da pilha de estéril acrescido ao modelo base imobiliza uma parte do recurso, sendo a diferença entre a linha vermelha e bege do gráfico. Ou seja, parte da movimentação de estéril que antes era paga no modelo 00 para acessar o minério do fundo de cava não é mais pago considerando o modelo 34, o que leva a um pequeno recuo da cava final.

As cavas finais geradas como resultados da análise de sensibilidade do modelo 30 podem ser observadas na Figura 35.



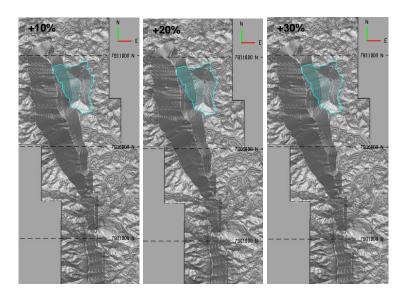


Figura 35: Cava final Análise de Sensibilidade (34)

No geral, levando-se em consideração todos os modelos e análises, à medida que o valor do preço de ferro aumenta, vai ser tornando cada vez mais viável avançar a cava para retirar minério que se encontra em seu fundo. Sendo assim, a medida que a variação do preço aumenta, a movimentação do minério aumenta, até que a movimentação de minério é estabilizada, independente da presença ou não da pilha de estéril. Por outro lado, a medida que o valor do preço diminui, a cava vai se tornando cada vez menor e foi possível perceber que a movimentação de minério se manteve estável a partir da variação negativa de 25%, como pode ser observado na Tabela 4. Ou seja, o comportamento da cava foi igual para todos os cenários de -25% e -30%, independente da presença da pilha de estéril e do modelo considerado. Para esses casos (-25% e -30%) a pilha de estéril não excedeu o limite da cava final, tanto para o modelo 00 quanto para o modelo 34, se tratando de preços do ferro extremamente pessimistas no mercado.

Tabela 4: Movimentação de minério por modelo

Variação %	Minério (kton)							
	Modelo 00	Modelo 05	Modelo 10	Modelo 15	Modelo 20	Modelo 25	Modelo 30	Modelo 34
-5	5,343,144	5,325,896	5,315,356	5,275,484	5,263,811	5,263,811	5,263,811	5,231,799
-10	5,220,392	5,201,858	5,172,828	5,148,795	5,135,746	5,136,280	5,135,746	5,104,615
-15	4,874,184	4,848,473	4,848,069	4,827,145	4,827,145	4,827,145	4,827,145	4,819,186
-20	4,175,417	4,177,509	4,175,417	4,173,429	4,175,059	4,174,775	4,172,746	4,175,417
-25	3,303,954	3,303,954	3,303,954	3,303,954	3,303,954	3,303,954	3,303,954	3,303,954
-30	2,148,008	2,148,008	2,148,008	2,148,008	2,148,008	2,148,008	2,148,008	2,148,008

Logo, é possível perceber que uma parte do recurso é imobilizada se no decorrer do tempo o preço do ferro cair muito, chegando a valores entre 65.88 e 86.46 USD/metal. Como esse valor é muito baixo, hoje, se torna viável assumir o risco de manter a pilha de estéril localizada onde ela já está sendo sequenciada, ou seja, o mais próximo possível da cava final de reserva. Por fim, estes resultados contribuem para, se futuramente o preço do ferro começar a cair ou se a empresa decidir em não manter a pilha de estéril avançando o limite da cava final de recurso, é possível que em 10 ou 15 anos, aproximadamente, decida-se por um ano estratégico para avançar a pilha de estéril para mais ao leste da mina.

6. CONCLUSÃO

Em conclusão, nos cenários atuais, a localização da pilha de estéril não imobiliza o recurso mineral do Sistema Minas-Rio, devido ao alto valor considerado para o preço do minério de ferro na otimização da cava de recurso. Foi possível perceber que considerando o preço atual para recurso, a movimentação do estéril da pilha é paga para que se alcance o minério do fundo da cava. Ou seja, não há perda de avanço de cava no cenário atual para o recurso declarado.

Como resultado da Análise de Sensibilidade, o intervalo entre 62.88 e 86.46 USD/metal é mais sensível à presença da PDE e para variações de preço acima de 10% do preço de Reserva (86.46 USD/metal), a movimentação maior de estéril é paga, de acordo com Lersh and Grossman.

O presente estudo ajuda a mostrar oportunidades no estudo de possíveis destinos para a PDE e contribui para uma possível análise de ano estratégico para deslocar parte da pilha para leste, podendo ser daqui, aproximadamente, 10 à 15 anos segundo os resultados do presente trabalho.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

 Análise crítica de possíveis impactos de pilha de estéril no recurso de um empreendimento variando a localização da pilha. (Com a utilização da mesma metodologia).

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANGLO AMERICAN. Relatório Apresentação Anglo American. Brasil, 2015.

ANGLO AMERICAN. Relatório interno Anglo American. Brasil, 2018.

AMARAL, M. Modelos Matemáticos e Heurísticos para o Auxílio ao Planejamento de Lavra em Minas à Céu Aberto. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CARMO, F. A. R. Metodologias para o Planejamento de Cavas Finais de Minas a Céu Aberto Otimizadas. 2001. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

CARMO, F. A. R; CURI, A.; TRIGUEIREDO S.; W., 2006. Otimização econômica de explotações a céu aberto. Esc. Minas, Ouro Preto, 2006.

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

Comitê Conjunto de Reservas Minerais (JORC), Normas da Australásia para Preparação de Relatórios de Recursos Minerais e de Reservas de Minério (As NORMAS JORC). Austrália, 1999.

DATAMINE. **TUTORIAL NPV SCHEDULER**. 2002. 10° Workshop DATAMINE do Brasil & 2° Conferencia Latino Americana de Usuarios DATAMINE.

FERREIRA, M. S. **Modelagem tridimensional de depósitos minerais**. 2006, 111 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro preto, 2006.

FLORES, B. A. Planejamento de Lavra Estratégico e Tático de Morro da Mina - Conselheiro Lafaiete/MG. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

LERCHS, H.; GROSSMANN, I. F. **Optimum Design of Open-Pit Mines.** Transactions, Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, Montreal, v. 58, n. 633, p. 47-54, jan. 1965.

MACIEL, P.; MASSA, R. **Análise de Sensibilidade.** Centro de Informática UFPE. 2012.

NETO, J. A. S. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS LIMITES DA CAVA FINAL ÓTIMA COM BASE NA VARIAÇÃO DO PREÇO DE MERCADO DO FOSFATO. 2017. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Araxá, 2017.

PERONI, R. L. **Apostila Planejamento de Lavra a Céu Aberto**. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

PETAIN A. S., **Métodos de Avaliação Econômica de Projetos de Explotação Mineral**, Dissertação de Mestrado, Unicamp, 1994.

PINTO, C. L. L.; DUTRA, J. I. G., 2008, II Etapa – Operações e Métodos de Lavra a Céu Aberto, Departamento de Engenharia de Minas – EEUFMG, Belo Horizonte, 2008.

PONIEWIERSKI, J. BLOCK MODEL KNOWLEDGE FOR MINING ENGINEERS

– AN INTRODUCTION Senior. 2019. Mining Consultant, Deswik

ROSSI, M. R.; DEUTSCH, C. V. **Mineral Resource Estimation**. Dordrecht: Springer, 2014. 332 p.

THORLEY, U. Open pit mine planning: Analysis and system modeling of conventional and oil sands application. 2012. Ph. D. (Mining Engineer) – Departament of Mining, Queen's University, Canadá, 2012.

WHITTLE, D. Open-Pit Planning and Design. In: DARLING, P. **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 2011. p. 877-902.