

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DO RECURSO MINERAL DA PORÇÃO PROFUNDA DE UMA MINA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE PARACATU-MG

Rui Carlos Correntino Carboni¹
José Flávio Dias²
Leandro de Vilhena Costa³

334

Resumo: Estudos de engenharia voltados a avaliação técnico-econômica de recursos minerais devem ser realizados afim de atestar sua viabilidade econômica e garantir a obtenção de reservas recuperáveis calculando assim as quantidades, teores e qualidades do bem mineral a ser aproveitado. No caso de depósitos minerais novos, deve ser comprovada através de estudos, a viabilidade de se construir um novo empreendimento mineiro. Já no caso de minas em operação, os estudos são voltados afim de atestar a viabilidade de se promover sua expansão e o aumento de sua vida útil. Em ambos os casos, o dispêndio em investimento financeiro é expressivo e por isso, deve-se utilizar como critério para tomada de decisão acerca destes investimentos, os estudos técnico-econômicos que garantem de forma segura o potencial retorno financeiro destes projetos.

Palavras-chave: Viabilidade. Reserva. Lavra

Abstract: Engineering studies aimed at the technical-economic evaluation of these mineral resources must be carried out in order to attest their economic viability and guarantee the obtaining of recoverable reserves, thus calculating the quantities, contents and qualities of the mineral good to be used. In the case of new mineral deposits, the feasibility of building a new mining enterprise must be proven through studies. In the case of mines in operation, the studies are aimed to attesting the feasibility of promoting its expansion and increasing its useful life. In both cases, the expenditure on financial investment is significant and that is why, should be used as a criterion for making decisions about these investments, the technical-economic studies that guarantee in a safe way the potential financial return of these projects.

Keywords: Viability. Reserve. Mining.

¹ Engenheiro de minas graduado pela Faculdade FINOM.

² Prof. Especialista FINOM.

³ Doutor em Engenharia Mineral – UFOP- MG, Ouro Preto - email: minas.leandro@gmail.com

Recebido em 09/02/2020
Aprovado em 21/02/2020

1. INTRODUÇÃO

Para que seja aproveitado um determinado bem mineral, deve-se submetê-lo a análises criteriosas afim de se comprovar, de forma segura, sua viabilidade econômica. Através da realização da avaliação técnica e econômica de jazidas minerais, é possível se estabelecer critérios utilizados em tomadas de decisão quanto a investimentos em empreendimentos mineiros (SUSLICK 2001 apud YAMAMOTO, 2001). O artigo a seguir, corresponde ao estudo do potencial econômico de corpos mineralizados situados a grandes profundidades em uma mina subterrânea e as formas de se executar sua extração. Inicialmente, são descritos os objetivos do trabalho que se baseiam na tentativa de se aumentar vida útil do empreendimento, considerado de extrema importância para assegurar sua competitividade (CURI, 2014).

Trazem também em seu conteúdo, uma série de procedimentos realizados para a seleção dos blocos econômicos presentes no modelo geológico dos corpos mineralizados que por sua vez, deram origem ao desenho dos limites econômicos das câmaras de lavra além das galerias de acesso e desenvolvimento, submetidas posteriormente ao sequenciamento de lavra e produção, para a determinação do possível retorno financeiro e aumento da vida útil da mina.

Foi também descrito as formas de se garantir a diminuição das incertezas associadas ao modelo geológico (FERNANDES, 2009), garantindo assim o posicionamento correto de cada corpo em profundidade, bem como seus teores, quantidade e qualidade de seu material. Por fim, evidencia os resultados da avaliação técnico-econômica do bem mineral para a utilização na tomada de decisão quanto ao investimento necessário para desenvolvimento de galerias de pesquisa, sondagem subterrânea e rampas de acesso para os corpos mineralizados.

O trabalho tem como objetivo avaliar os corpos mineralizados da porção profunda da mina subterrânea com o intuito de promover a extensão de sua vida útil; analisar o modelo geológico bem como os dados e métodos utilizados para a sua concepção e classificação; avaliar a possível existência do potencial econômico do recurso mineral, para viabilizar o investimento em sondagem e desenvolvimento de galerias de pesquisa e estudar os métodos necessários para melhorar a classificação dos recursos potenciais diminuindo o nível de incerteza acerca dos corpos mineralizados.

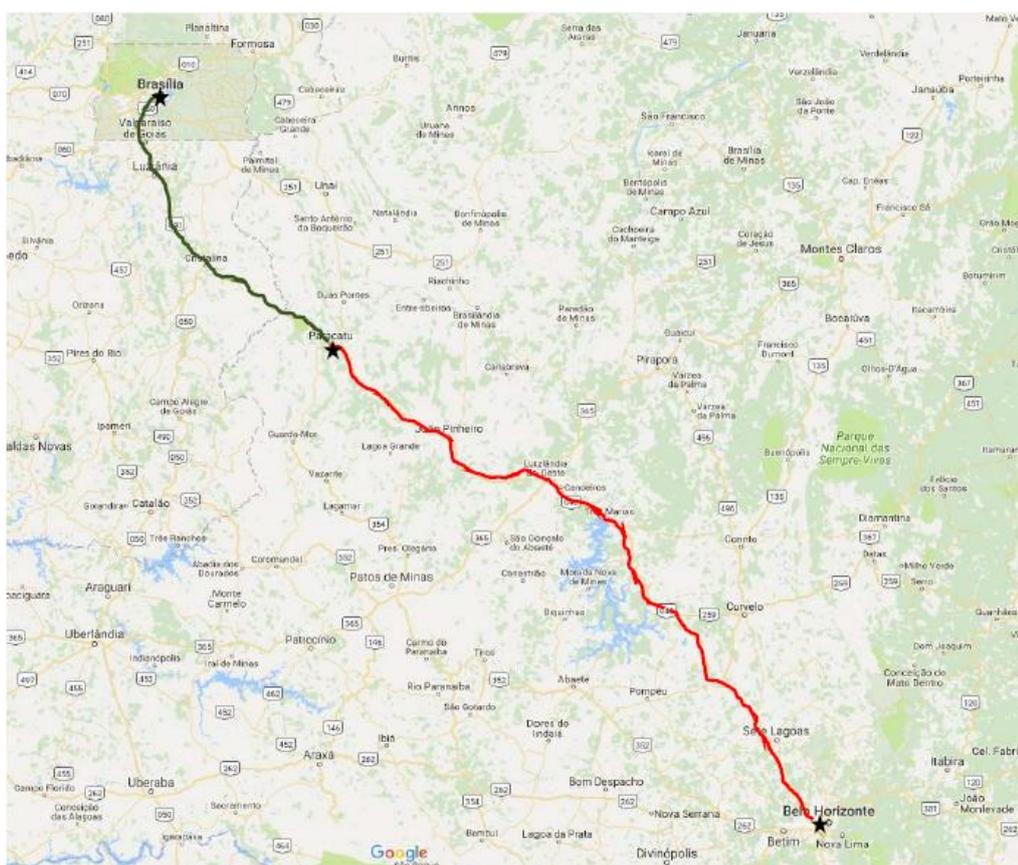
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A cidade de Paracatu-MG tem como principal via de acesso terrestre a rodovia BR-040 a 480 quilômetros da capital Belo Horizonte e 230 quilômetros do Distrito Federal como mostra a figura 1.

336

Figura 1 - Mapa de localização e acessos de Paracatu-MG



Fonte: Google Maps

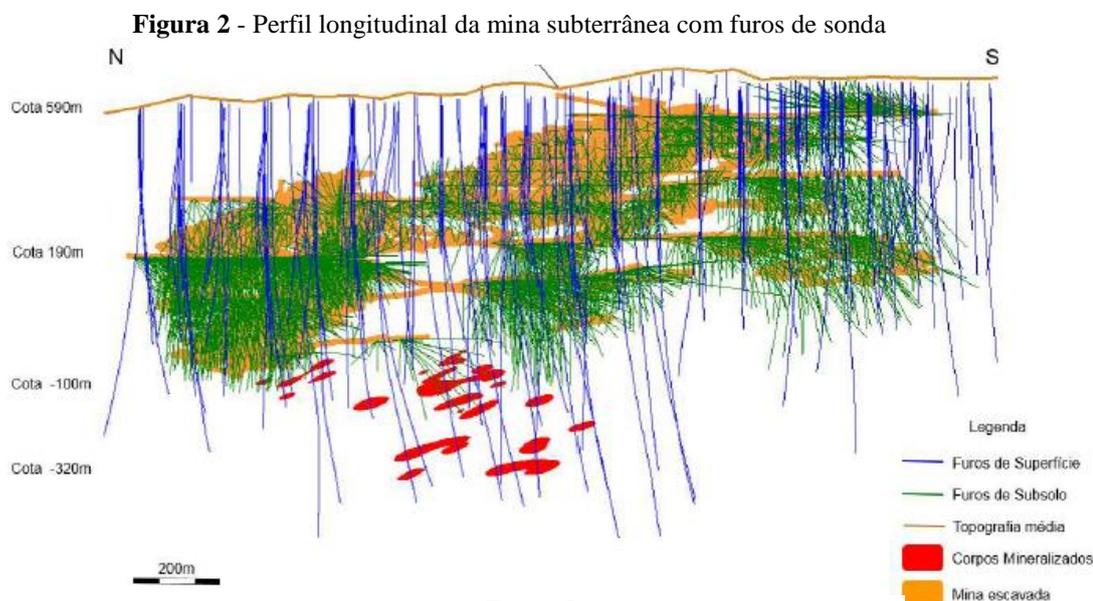
Para que se possa realizar a avaliação técnico-econômica dos corpos mineralizados, foram analisadas as informações acerca da concepção destes corpos, iniciando-se pela fonte das informações.

A análise e a interpretação dos dados disponíveis permitem determinar a forma, os limites e as dimensões de um depósito (YAMAMOTO, 2001, p. 39). As informações utilizadas

para o desenho e interpretação das características dos corpos mineralizados devem constar no inventário dos dados da pesquisa mineral, organizados em banco de dados de sondagem com estruturas específicas para pós-processamento e manipulação (YAMAMOTO, 2001). Os dados de sondagem foram adquiridos através de arquivos digitais de extensão CSV facilmente acessados através do software Microsoft Office Excel.

Para a realização das análises do banco de dados e do modelo de blocos que representa a mineralização foi utilizado o software de planejamento de lavra e modelagem geológica, Datamine Studio 3, que trabalha com nomenclatura das colunas da planilha de forma específica, sendo necessário realizar uma adequação do banco de dados de sondagem para a nomenclatura padrão do Studio 3, para que o software traduza o banco de dados para o seu sistema padrão. Após a adequação da nomenclatura das colunas, o banco de dados foi importado para o Studio 3 para que o software interprete os dados tabelados sob forma gráfica. Esta interpretação é chamada de arquivo de furos (drillhole file).

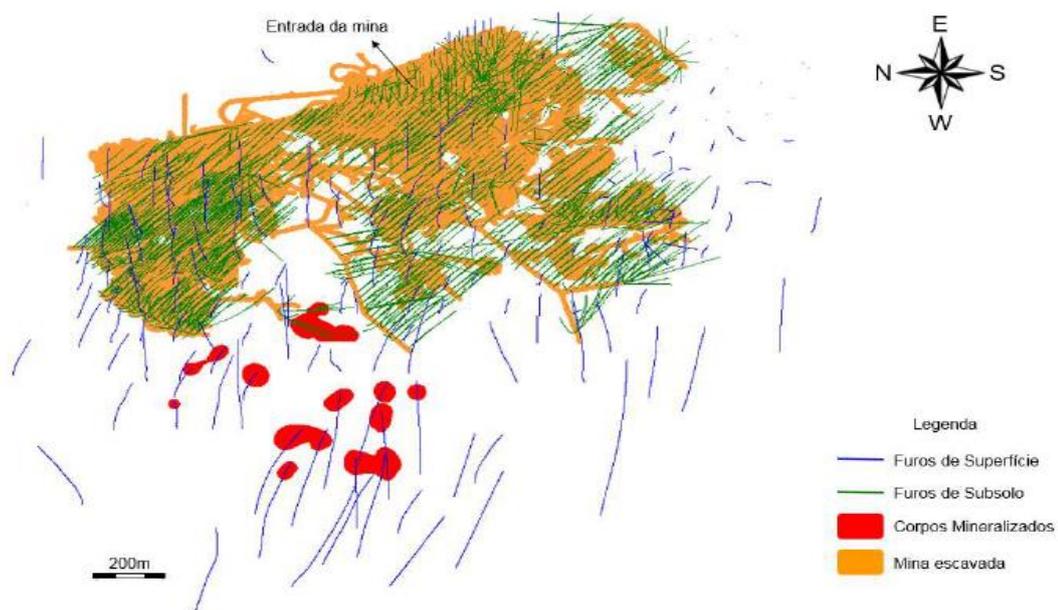
O arquivo de furos e o modelo de blocos dos corpos mineralizados em estudo foram dispostos em perfil longitudinal no Studio 3® para que se pudesse observar quais eram os furos de sonda utilizados para a concepção do modelo e como estes corpos estão posicionados em relação a profundidade conforme figura 2.



Fonte: Os autores

Os mesmos dados foram representados em planta para se observar quão distantes estão os furos entre si como demonstrado na figura 3. É importante se obter estas análises para se entender os critérios adotados para classificação destes corpos mineralizados.

Figura 3 - Vista em planta da mina com furos de sonda



Fonte: Os autores

Foram acrescentados aos mapas e visões em perspectiva, informações adicionais como dados relacionados a geologia estrutural, litologias contidas no banco de dados e teores das amostras.

Os limites primários de um depósito são estabelecidos pela litologia, acamamento, estruturas e variações bruscas no teor, enquanto os limites secundários estão relacionados com variações graduais nos teores, limites irregulares da mineralização ou contornos, cujos detalhes não podem ser seguidos na interpretação da lavra (YAMAMOTO, 2001, p. 39).

Além da análise visual, através de análise estatística, foram feitas comparações entre os teores das amostras de testemunho e teores estimados contidos no modelo de blocos. Esta análise é importante para que se possa verificar se o modelo de blocos representa de forma fiel a população amostral tomada para a estimativa dos teores já que existem métodos de

interpolação como a krigagem ordinária, que não apresenta viés e é considerado um interpolador preciso que reproduz os blocos estimados com os dados amostrais (Goovaerts, 1997 apud Santos, 2015).

Outro fator importante a ser comparado através dos mapas de localização e análise estatística é a densidade de informações tomadas para estimativa, uma vez que uma das propriedades deste interpolador é a suavização considerada inversamente proporcional à densidade de amostras disponíveis (Olea, 1999 apud Santos, 2015).

Para as análises foi utilizado o software Studio 3® que possui uma gama poderosa ferramentas de análise estatística e geoestatística.

Após analisado o modelo de blocos e entendido a sua concepção, o modelo foi importado para o software utilizado em planejamento de lavra Deswik®. Este software possui módulos que permitem a realização da avaliação técnico-econômica dos corpos mineralizados representados digitalmente pelo modelo de blocos como também proporciona de forma rápida e precisa, a elaboração de projetos de escavação, sequenciamento de lavra e planos detalhados de produção.

Com o intuito de se obter a função benefício, função que descreve a economicidade dos corpos minerais, foi adotado como base para a obtenção dos custos de lavra e beneficiamento, as informações declaradas pela empresa ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), através relatório anual de lavra de 2016 (RAL) e para que se mantenha preservado o sigilo das informações, foi aplicado a escala logarítmica com base não informada neste trabalho

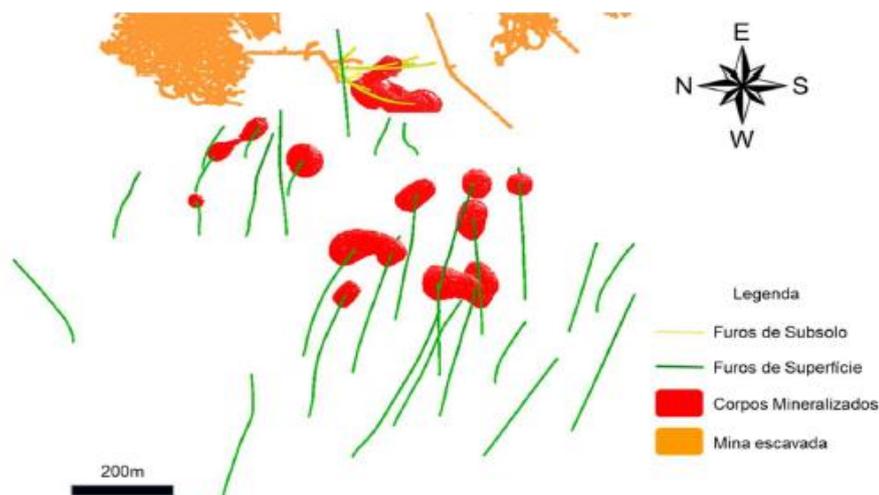
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados acerca do investimento em um empreendimento mineiro ou até de um projeto específico dentro de uma mina existente, como por exemplo a sua expansão, estão intimamente ligados a reserva mineral que será lavrada e processada, por isso, é de extrema importância a realização de análises e estudos dos dados que dão origem a reserva mineral, para que se possa garantir de forma segura sua existência e qualidade. Sendo assim, foram submetidos a análises, os dados e métodos utilizados para a concepção dos corpos mineralizados da porção profunda da mina que compõe o recurso mineral que deu origem a reserva.

Para que se possa recuperar o máximo possível de minério, mantendo segurança e estabilidade da câmara, os pilares devem ser dimensionados de forma otimizada, pois, o minério contido nestes pilares não é declarado como reserva mineral, já que precisam permanecer in-situ. O teto das câmaras, apesar de apresentarem características favoráveis a estabilidade devido a qualidade do maciço rochoso, recebe reforço geomecânico através de parafusos instalados com resina na rocha denominados tirantes (HUSTRULID; BULLOCK, 2001).

Os dados utilizados para a interpretação dos corpos e estimativa dos teores foram coletados através de sondagem diamantada realizada através da superfície atingindo profundidades variando de 670 a 950m. Os furos foram descritos e amostrados por geólogos da empresa e analisados quimicamente em laboratórios externos. A campanha de sondagem realizada na porção profunda da mina, contou com 20 furos de sonda, 1223 amostras de testemunho e 360 amostras de controle de qualidade QA/QC. Os corpos localizados no extremo leste do alvo foram desenhados através de furos feitos por galeria subterrânea através de três leques de perfuração que originaram 14 furos subterrâneos com profundidade na ordem de 195 m como mostra a figura 4.

Figura 4 - Vista em perspectiva do design da lavra da porção inferior da mina



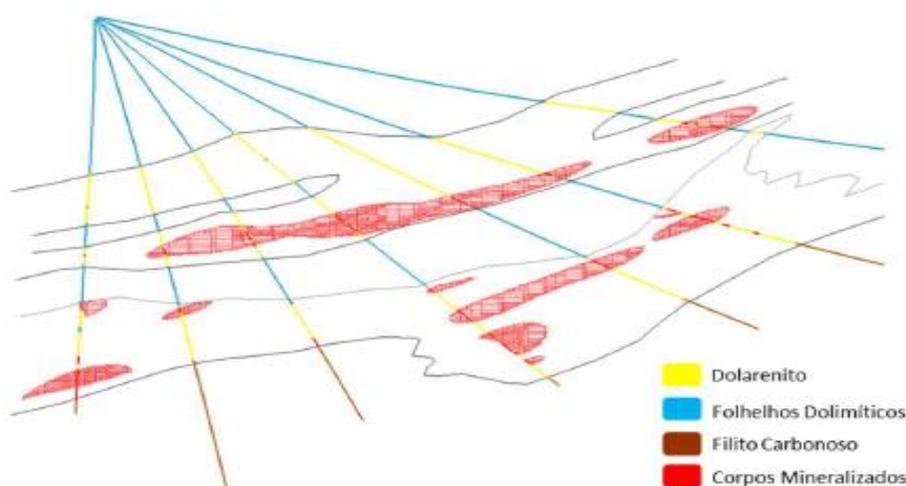
Fonte: Os autores

Através do histograma de frequência criado a partir das amostras de testemunho e do modelo de blocos, que a média amostral de zinco e chumbo apresentada pelo modelo estimado, representa a média das amostras pela análise da proximidade dos valores. Mostra também, através da geometria dos histogramas, que a distribuição de frequência, que neste caso é

lognormal devido a assimetria positiva, é refletida pelo modelo de blocos. É importante este tipo de representação pois ao se realizar cortes de teores no modelo de blocos por exemplo, é possível dizer que se está aplicando cortes na mesma faixa de teores apresentada pelas amostras. Outro ponto importante observado é a redução da medida de dispersão apresentada pelo desvio padrão, mostrando que o interpolador utilizado para estimar os teores, minimizou a variância dos dados os trazendo o mais próximo possível da média. Neste caso, foi utilizado a krigagem ordinária como estimador dos teores do recurso mineral. Além da redução da dispersão, foi reduzido também o valor máximo das variáveis mostrando que o estimador trouxe os valores extremos (outliers) para próximo da média amostral, minimizando o viés no cálculo da média. A análise estatística começa pelo estudo da distribuição de frequências, a qual descreve o modo como as unidades de uma população estão distribuídas sobre o intervalo amostrado. A distribuição lognormal é um tipo encontrado em muitos problemas de avaliação de reservas (principalmente em casos de metais raros), caracterizando-se por uma distribuição de frequência com assimetria positiva, em que ocorre grande quantidade de valores baixos e uns poucos valores altos (YAMAMOTO, 2001, p. 52).

Outra análise importante a ser feita afim de se validar o modelo geológico é a geometria dos corpos. Esta análise foi feita através da comparação das seções Histograma que representa a população amostral do chumbo nas amostras.

Figura 5 – Perfil contendo leque de sondagem e modelo de blocos



A sondagem utilizada para o desenho dos corpos mineralizados possui espaçamento médio em torno de 150 m para os furos de superfície e 26 m para os furos de subsolo, sendo assim, devido as amostras estarem distribuídas de forma espaçada, levando-se em consideração as restrições acerca da classificação dos recursos minerais, os corpos mineralizados foram classificados como recurso inferido e neste cenário, não é possível a conversão do recurso mineral em reserva mineral conforme estabelecido pelo código JORC (SOUZA, 2002).

O critério utilizado para avaliar qual é a distância média necessária para que se possa medir o corpo mineralizada, ou seja, convertê-lo à recurso medido, foi a avaliação do número de amostras utilizadas para estimar cada corpo e a distância da primeira estrutura do variograma expressa pela amplitude, calculado através das amostras de zinco, que representa a auréola de influência de cada bloco. A auréola de influência permite atribuir a classe de reserva provada, se ele for calculado com um número razoável de amostras em sua auréola de influência (YAMAMOTO, 2001, p. 27).

A classificação do recurso mineral foi feita de forma apropriada, levando-se em consideração o baixo número de amostras contidas em cada corpo mineral e o grande espaçamento entre as amostras, que, quando comparado a amplitude do variograma, deveria ser de aproximadamente 10m.

Para que se possa aumentar o nível de confiança acerca dos corpos mineralizados, deve-se realizar amostragem coletando material direto da rocha contida no subsolo e como é sabido, as técnicas de investigação subterrânea, como sondagem e abertura de poços de pesquisa, são onerosas e necessitam de grandes investimentos, porém, é a forma mais segura de se garantir a continuidade espacial dos corpos mineralizados, sua qualidade em termos de teor, massa, características geológicas e geomecânicas.

Para que se possa dimensionar o potencial financeiro apresentado pela porção profunda da mina e avaliar a possibilidade de se realizar investimentos em abertura de galerias de pesquisa e sondagem, o recurso mineral foi submetido a avaliação técnico-econômica para se realizar uma comparação entre os investimentos e o retorno financeiro gerado pela sua lavra. A realização da análise econômica se iniciou através do levantamento dos dados necessários para a obtenção da função benefício conforme mostra a tabela 1.

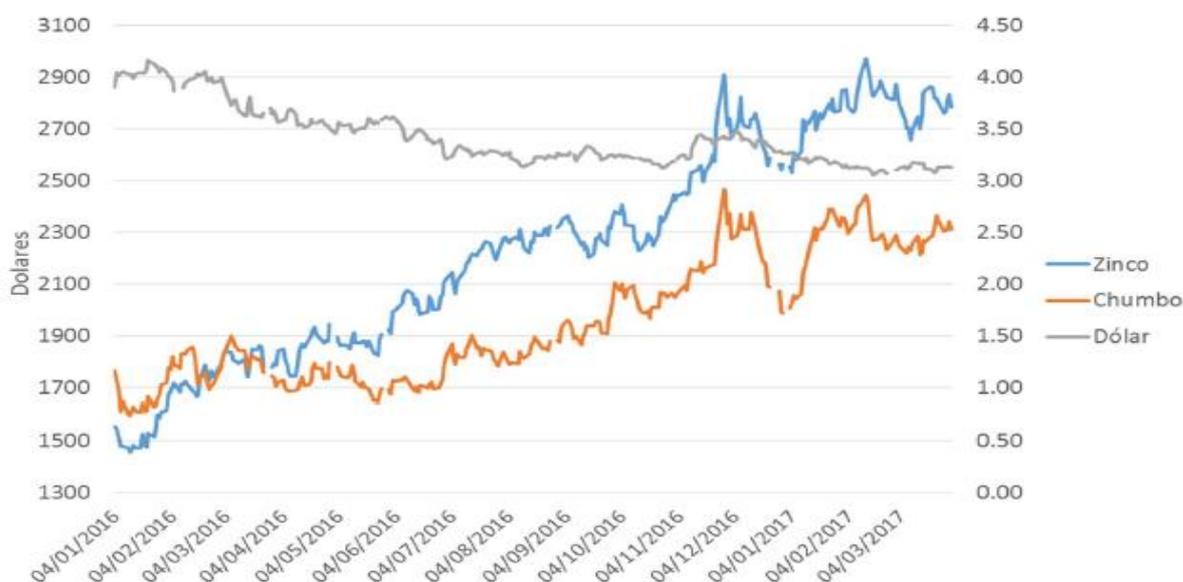
Tabela 1 - Função benefício

CONSTANTES	
Classificação das Constantes	Valor
Peso Específico do Material (g/cm ³)	3.00
Teor de Zinco no Bloco (%)	2.52
Teor de Chumbo no Bloco (%)	1.54
Teor do Concentrado de Zinco (%)	37.50
Teor do Concentrado de Chumbo (%)	55.00
Recuperação do Zinco (%)	91.30
Recuperação do Chumbo (%)	88.00
Recuperação do Chumbo (%)	2246.00
Valor do Zinco Contido (U\$)	1960.00
Valor do Chumbo Contido (U\$)	1960.00
Valor do Chumbo Contido (U\$)	3.20
CUSTOS DO CONCENTRADO DE CHUMBO	
Classificação dos Custos	R\$ / t (log)
Material Empregado Diretamente na Produção	3.28
Mão-de-Obra Utilizada Diretamente na Produção	3.63
Outras Despesas Diretas	3.68
Subtotal Direto:	4.17
Mão-de-Obra Indireta	2.51
Despesas de Administração e/ou Vendas	2.48
Outras Despesas Indiretas	2.64
Subtotal Indireto:	3.16
Custo Unitário (R\$)	4.25
FUNÇÃO BENEFÍCIO	
Variáveis	Valor
Toneladas por bloco (t/bloco)	3.00
Custo de lavra/ Beneficiamento (R\$/ bloco – log)	3.31

Concentrado de Zinco (t/bloco)	0.18
Concentrado de Chumbo (t/bloco)	0.07
Valor do mineral (R\$/bloco)	751.08
Valor do bloco (R\$/bloco)	373.71

Os preços referentes ao zinco e chumbo considerados no cálculo da função benefício, foram obtidos através da média dos preços dos metais estabelecidos pela London Metal

Figura 6 - Gráfico da variação dos preços dos metais zinco e chumbo Exchange (LME) coletados no período de janeiro de 2016 a março de 2017 como mostra a figura 6.

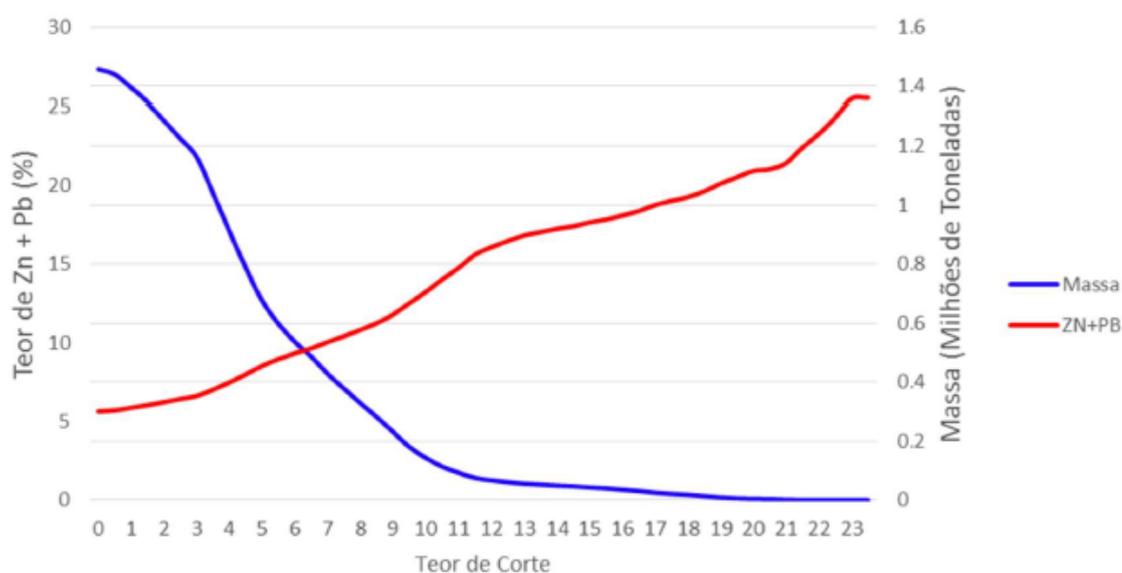


A função benefício, após estabelecida, foi inserida no software de planejamento Deswik® para a realização do cálculo do valor de cada bloco do modelo afim de se separar os blocos econômicos. Para que se possa definir um parâmetro de corte, foi considerado economicamente viável, os blocos do modelo de recurso que possuem valor igual ou superior a zero, o que significa que o mínimo de economicidade apresentado pelos blocos é aquele em que as receitas e despesas se anulam, ou seja, o bloco não auferir lucros nem causar prejuízos.

Foi realizada a cubagem do modelo de blocos para quantificação total do recurso mineral que resultou em uma massa de 1,8 milhões de toneladas com teor de zinco igual a 3,46 % e teor de chumbo igual a 1,69% e após a obtenção do modelo econômico, a massa dos blocos

econômicos resultou em 1,5 milhões de toneladas com teor de zinco igual a 3,63 % e teor de chumbo igual a 1,78 % mostrando uma taxa de conversão de 83%. A curva de parametrização do recurso mineral realizada no modelo de blocos econômico, mostra que existem quantidades suficientes em termos de massa de recurso quando considerado os teores de corte praticados na mina estudada que é a soma dos teores de chumbo e zinco resultando em 2,3%, como mostra a figura 7.

Figura 7 – Curva de parametrização do recurso mineral

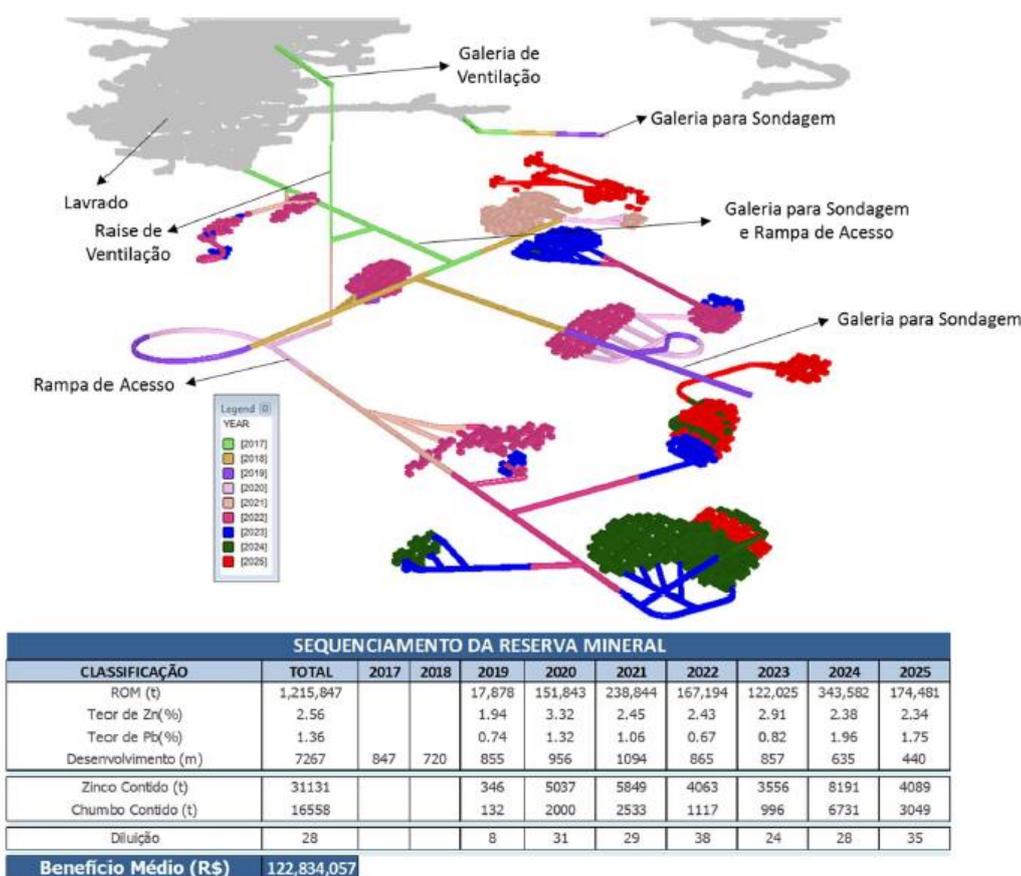


Fonte: Os autores.

Realizada a separação dos blocos econômicos, o próximo passo foi o desenho das câmaras de lavra e galerias de desenvolvimento afim de se obter o modelo econômico-operacional da porção profunda da mina. O desenho da geometria da lavra permite selecionar os realces econômicos já que neles, é considerado a diluição planejada e o desenvolvimento em estéril necessário para liberar a reserva mineral. Após concluído o desenho da lavra e a seleção dos realces econômicos, foi realizado o sequenciamento da produção para verificar qual é o aumento potencial da vida útil e o retorno financeiro que a lavra vai proporcionar. A figura 8, mostra que o aumento da vida útil da mina será de um ano e três meses, se for considerado a lavra somente da porção profunda e nove anos, considerando a lavra nos demais níveis da mina, com taxa alcançada de conversão de recurso para reserva de 80%, além de garantir retorno financeiro de aproximadamente 122,8 milhões de reais.

Com os projetos de desenvolvimento concebidos através dos desenhos do planejamento de lavra do recurso mineral, foi possível também, calcular a DMT do projeto que resultou em 8 quilômetros e quando comparado com a DMT atual da mina, 2 quilômetros, mostra um considerável aumento da distância a ser percorrida pelos equipamentos, porém, a empresa possui frota suficiente para executar o projeto da porção profunda da mina.

Figura 8 - Sequenciamento da porção profunda da mina



Fonte: Os autores.

Com os resultados obtidos através da avaliação técnico-econômica dos corpos mineralizados e os resultados acerca dos métodos necessários para garantir a obtenção da reserva provada, obteve-se o parâmetro necessário para tomar a decisão de realizar o investimento em pesquisa mineral, já que o potencial econômico dos corpos mineralizados é

expressivamente superior ao custo necessário para o detalhamento geológico e redução das incertezas associadas ao recurso mineral da porção profunda da mina.

4. CONCLUSÃO

Afim de se verificar se as técnicas utilizadas para a concepção e classificação do modelo de blocos que representa o recurso mineral existente na porção profunda da mina foram suficientes e utilizados de forma adequada, foi realizado o levantamento da quantidade de amostras utilizadas na interpretação geológica, suas posições geográficas e chegou-se à conclusão que, devido ao grande espaçamento entre as amostras e a pequena quantidade de amostras coletadas através da sondagem de superfície, a classificação dos corpos como recurso inferido foi feita corretamente seguindo os parâmetros estabelecidos pelo código JORC. A estimativa dos teores contidos no modelo de blocos foi submetida a análise estatística através da criação de histogramas de frequência e foi constatado que o modelo de blocos representa a população geoquímica adquirida através das amostras de testemunho.

Também foi comparado a geometria utilizada para a interpretação dos corpos com o modelo conceitual representante daquela jazida e com o resultado, foi concluído que as atitudes apresentadas pelos corpos (direção e mergulho) representam fielmente as formas dos corpos mineralizados lavrados em outros níveis da mina.

Para que se pudesse mensurar o potencial econômico contido no recurso mineral presente na porção profunda da mina, foi obtido a função benefício e aplicado aos blocos do modelo e verificou-se, através da realização de parametrização do recurso mineral, a existência de quantidades e teores suficientes para garantir sua viabilidade econômica e sua possível conversão em reserva mineral.

Foi realizado, afim de se calcular o dispêndio em investimentos necessários para aumentar o grau de confiança acerca dos corpos mineralizados e calcular o possível aumento da vida útil da mina (life of mine), o design do projeto referente ao aprofundamento da mina considerando o desenvolvimento com galerias de pesquisa e acesso, sistema de ventilação com a perfuração de raise e a realização de campanhas de sondagem e chegou-se à conclusão que o recurso mineral presente na porção profunda da mina, exibe potencial de retorno financeiro na ordem de 100 milhões de reais e extensão da vida útil de cerca de 9 anos considerando a lavra

nos demais níveis da mina e taxa média de lavra do projeto na ordem de 170mil toneladas por ano no sistema de ramp-up (crescimento gradativo).

REFERÊNCIAS

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

FERREIRA, G. E; ANDRADE, J.G. D. **Elaboração e Avaliação Econômica de Projetos de Mineração**. In: LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A; FRANÇA, S. C. A. (Comunicação Técnica Elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição). Rio de Janeiro: 2010. p. 899-932.

FERNANDES, J. A. B. Krigagem com Deriva Externa Aplicada à Avaliação de Recursos Minerais de Calcário e de Minério Laterítico. 2009. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.

FERREIRA, M. S. **Modelagem Tridimensional de Depósitos Minerais**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2006.

GOOGLE MAPS. Disponível em: < <https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 4 abr. 2017.

HUSTRULID, W. A; BULLOK, R. L. **Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies**. Estados Unidos: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2001. 718p.

SANTOS, A. S. **Krigagem de Teores de Ouro da Mina de Caiamar-Goiás**. 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015.

SOUZA, L. E. **Estimativa de Incertezas e Sua Aplicação na Classificação de Recursos Minerais**. 2002. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2002.

YAMAMOTO, J. K. **Avaliação e Classificação de Reservas Minerais**. São Paulo: Editora da universidade de São Paulo, 2001. 227p.

YAMAMOTO, J. K. **Comparação de Métodos Computacionais para a Avaliação de Reservas Minerais: Um Estudo de Caso na Jazida de Cobre de Chapada, GO**. 1991. 191 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1991.