

# ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS LIMITES DA CAVA FINAL ÓTIMA COM BASE NA VARIÇÃO DO PREÇO DE MERCADO DA ROCHA FOSFÁTICA

João Antônio da Silva Neto,  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG  
[joaoantonio.neto@outlook.com](mailto:joaoantonio.neto@outlook.com)

Marcélio Prado Fontes, Prof. Dr.,  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG  
[marcelio@cefetmg.br](mailto:marcelio@cefetmg.br)

## RESUMO

A determinação dos limites da cava final ótima é um dos grandes desafios do planejamento de lavra. Diversos fatores podem influenciar significativamente estes limites, sendo o preço do bem mineral o mais importante deles. Este estudo teve por objetivo realizar uma análise de sensibilidade dos limites da cava final ótima com base na variação do preço do fosfato. Um *range* de variação de 50% foi escolhido e dois cenários foram avaliados: um considerando restrições físicas de área e fundo de cava e outro sem quaisquer limitações. Os resultados mostraram que aumentos no preço provocaram aumentos na quantidade de minério e no VPL da cava. Análises como esta permitem a criação de planos de lavra mais flexíveis e capazes de se adaptar a cenários futuros de flutuações no preço.

**Palavras-chave:** planejamento de lavra; cava final; análise de sensibilidade; preço da rocha fosfática

## ABSTRACT

Finding the optimal final pit limits is one of the great challenges of the open pit mine planning process. A myriad of factors may significantly influence these limits, with commodity price being the most relevant of them. This paper aimed to perform a sensitivity analysis of the optimal final pit limits based on phosphate rock price variation. A range of 50% was chosen and two distinct scenarios were evaluated: one with physical constraints regarding area and the bottom of the pit, and another without any restrictions whatsoever. The results showed that increases in price resulted in a higher volume of ore moved and yielded a higher NPV. Analysis such as the one performed in this paper allow for the creation of more flexible mining plans, able to adapt to future scenarios of price fluctuations.

**Keywords:** open pit mine planning; final pit; sensitivity analysis; phosphate rock market price

## INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade fundamental para o progresso da sociedade moderna, fornecendo matérias-primas para diversos setores da indústria, contribuindo com a geração de riquezas e desenvolvimento socioeconômico de diversas regiões, no Brasil e no mundo. Empreendimentos de mineração, todavia, são complexos e demandam constante avaliação de riscos. Isto se dá uma vez que o valor do projeto é diretamente influenciado por inúmeras incertezas econômicas, geológicas e físicas, tais como preço da *commodity*, custos, taxa de produção, teor, dureza e restrições ambientais. [1] [2] [3].

Sendo assim, o sucesso de um empreendimento de mineração está diretamente atrelado à execução de um planejamento adequado, que maximiza o retorno financeiro através da extração do minério, reduzindo-se os custos e garantindo a lucratividade do empreendimento durante sua vida útil. Um dos desafios do planejamento de uma mina a céu aberto, conforme comenta [4], é a definição dos limites da cava final ótima. Estes contornos definem a geometria correspondente ao volume de minério e estéril que, ao serem extraídos, maximizam o lucro do empreendimento mineral.

Para que se possa obter os contornos da cava final ótima, no entanto, é preciso que o depósito mineral esteja discretizado em um modelo de blocos tridimensionais. De acordo com [5], este modelo é a base para a utilização de ferramentas computacionais para cálculos de estimativa de reservas, planejamento e sequenciamento de lavra. Cada bloco do modelo detém parâmetros técnicos do depósito como teor, densidade e litologia, obtidos a partir de dados de sondagem, e estendidos aos demais blocos do modelo por métodos de estimativa, tais como a krigagem ordinária.

A partir destas informações geológicas e litológicas, torna-se possível calcular o valor econômico para cada bloco, o qual representa o benefício, ou o lucro, que se espera obter com a extração e beneficiamento do conteúdo mineral presente no bloco. Com os valores de cada bloco conhecidos, obtém-se o modelo econômico do depósito. A partir deste modelo, diversos algoritmos de otimização podem ser utilizados para a obtenção dos limites da cava final ótima, sendo a metodologia desenvolvida por Lerchs e Grossmann [6] uma das mais comumente empregadas atualmente.

De posse do modelo econômico, pode-se aplicar um algoritmo de otimização repetidas vezes, variando-se o preço da *commodity*, obtendo-se assim um agrupamento de cavas ótimas “aninhadas” (*nested pits*). Os limites da cava final são aqueles obtidos com o valor de preço mais provável, obtido com base em valores históricos ou a partir de modelos

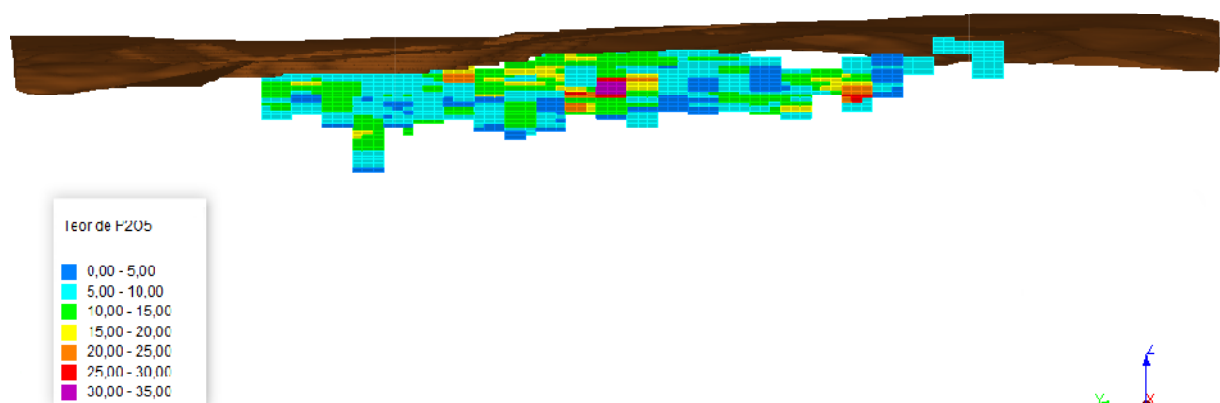
estocásticos. Para valores de preço menor, são geradas cavas menores, tendendo a migrar para as porções de maior teor e menor relação estéril/minério do depósito [7]. Esta metodologia permite que análises de sensibilidade sejam empregadas com o intuito de se avaliar os limites da lavra, enquanto se maximiza o valor presente líquido (VPL) do projeto.

## METODOLOGIA

### Estudo de caso

Os limites da cava final ótima estão condicionados às informações econômicas de benefício de cada bloco contido no modelo econômico gerado. Este por sua vez está diretamente ligado às características geológicas do depósito, tais como teor, litologia, densidade e dureza. Além destas, os limites da cava final são função de considerações geotécnicas acerca da qualidade do maciço, bem como restrições geométricas, físicas, ambientais e hidrogeológicas.

Para a realização do presente estudo, foi utilizado o modelo geológico de blocos de um depósito mineral de fosfato, localizado no estado de Minas Gerais, Brasil. Além das informações contidas no modelo de blocos, dados referentes à topografia e limites físicos de área do jazimento também foram utilizados. A Figura 1 mostra a superfície topográfica na orientação N-S (norte-sul) juntamente com o modelo de blocos do depósito, indicando apenas os blocos das litologias correspondentes ao minério. Na Figura 1 também é possível se observar a forma com a qual os teores de  $P_2O_5$  se distribuem no depósito.



**Figura 1** – Superfície topográfica e modelo de blocos do depósito de fosfato estudado.

## Histórico de Preços

O preço de mercado de um certo bem mineral é uma variável complexa, de difícil previsão, e que possui impacto significativo na lucratividade e longevidade de um empreendimento mineral. Segundo [8], o preço de uma *commodity* pode variar consideravelmente conforme mudanças na economia, condições de mercado, desequilíbrios na oferta e procura, ciclos de investimento e influência de especuladores no mercado financeiro. Isto faz com que estudos acerca dos efeitos e implicações que variações futuras no preço possam causar ao projeto sejam de grande valia para engenheiros e gestores.

Para este estudo foi escolhido um horizonte de tempo de cinco anos para avaliar flutuações no preço de mercado do fosfato. Esta escolha se deu pelo fato de que este período representa um intervalo de tempo capaz de permitir decisões de caráter estratégico por parte do planejamento de lavra, possibilitando que ajustes sejam realizados, resultando em planos mais flexíveis e capazes de se adaptar a mudanças futuras no preço de mercado. Isto é importante, uma vez que, mesmo que o preço venha sofrer variações significativas a curto prazo, mudanças nos limites da cava final, por exemplo, não podem ser realizadas em tão pouco tempo. Conforme afirma [9], este limite deve ser definido criteriosamente, considerando que expansões ou retrações são possíveis, mas sem que isso implique gastos suplementares que inviabilizem tais alterações.

A Tabela 1 representa a variação do preço de mercado do fosfato no horizonte de tempo de 2012 a 2017 (dados disponíveis até a data de realização deste estudo).

**Tabela 1** – Variação do preço de mercado do fosfato entre 2012 e 2017.

<b>Histórico de Preços do Fosfato (US\$/t) (2012-2017)</b>						
	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
<b>Janeiro</b>	195,00	182,50	97,50	119,50	122,60	96,88
<b>Fevereiro</b>	190,00	182,50	97,50	121,25	114,50	95,00
<b>Março</b>	160,00	160,00	106,60	123,00	114,50	97,50
<b>Abril</b>	185,00	111,50	111,50	114,13	114,13	95,63
<b>Maio</b>	195,00	157,50	112,63	110,50	110,50	92,50
<b>Junho</b>	193,13	125,63	111,40	118,90	110,50	
<b>Julho</b>	188,50	115,00	111,00	121,00	110,50	
<b>Agosto</b>	182,50	115,00	111,00	121,00	109,75	
<b>Setembro</b>	182,50	97,50	111,38	124,00	109,00	
<b>Outubro</b>	182,50	84,38	116,00	123,50	109,00	
<b>Novembro</b>	182,50	87,50	119,50	123,50	103,00	
<b>Dezembro</b>	182,50	96,88	119,50	123,50	97,50	

Fonte: [10] Adaptado de Global Economic Monitoring (GEM) Commodities, World Bank Group.

Como pode-se observar, o preço de mercado do fosfato variou significativamente, passando de US\$ 195,00/t em janeiro de 2012, para apenas US\$ 97,50/t em dezembro de 2016. Isto demonstra uma queda de exatos 50% no valor de venda do bem mineral, valor este que pode ser considerado significativo para a lucratividade do empreendimento de mineração.

### **Análise de Sensibilidade**

Análises de sensibilidade são uma ferramenta simples, porém eficaz quando se deseja estudar o efeito de uma variável em um certo parâmetro de interesse. Neste estudo, foi realizada uma análise de sensibilidade dos limites da cava final frente a variações no preço de mercado do fosfato.

De acordo com os valores históricos de variação do preço no período de 2012 a 2016, foi observada uma variação no valor do preço de mercado do fosfato de 50%. Sendo assim, por esta razão, optou-se neste estudo por se realizar uma análise de sensibilidade com *range* de variação de 50%. Conforme dados da Tabela 1, o valor médio do preço para o período correspondente (2012-2016) seria de US\$ 136,50/t, o qual seria o mais indicado para se realizar esta análise. Contudo, para fins de simplificação, optou-se por utilizar o valor de US\$ 100,00 a tonelada como valor base para a análise.

A análise de sensibilidade foi conduzida variando-se o valor do preço adotado como base por meio de incrementos percentuais de 10%, partindo-se do valor base, considerado como 100%. O preço foi então modificado até um máximo de 50%, para mais e para menos, contemplando cenários de ganhos e perdas, obtendo-se valores de 50% até 150%, correspondentes à cada cenário a ser estudado. Os dados referentes a todos os cenários de preço avaliados estão dispostos na Tabela 2.

**Tabela 2** – Diferentes cenários de preço avaliados por meio da análise de sensibilidade.

<b>Análise de Sensibilidade - Preço de mercado do Fosfato</b>		
<b>Cavas</b>	<b>Preço do Fosfato (US\$/t)</b>	<b>Δ (%)</b>
1	50,00	-50
2	60,00	-40
3	70,00	-30
4	80,00	-20
5	90,00	-10
6	100,00	0
7	110,00	+10
8	120,00	+20
9	130,00	+30
10	140,00	+40

---

## Valor Econômico dos Blocos

Para a construção do modelo econômico do depósito e a consequente obtenção dos valores econômicos de cada bloco, foram considerados os seguintes custos:

- ✚ Custo de lavra do minério;
- ✚ Custo de lavra do estéril;
- ✚ Custo de beneficiamento.

Ainda com relação à obtenção dos valores econômicos dos blocos, foram considerados, para as duas tipologias de minério presentes no modelo, as seguintes recuperações:

- ✚ Recuperação na lavra;
- ✚ Recuperação no beneficiamento.

Os valores dos custos e recuperações utilizados na formulação da função benefício são dados confidenciais e, portanto, não podem ser divulgados neste estudo.

## Parâmetros Geotécnicos

Para a definição dos limites da cava final ótima foi utilizado uma região global com ângulo de talude de 45°. A adoção do valor trata-se de uma simplificação em relação aos parâmetros utilizados na lavra, porém não tão distante dos que são utilizados na prática.

## Otimização da Cava

As etapas de preparação dos dados e obtenção dos limites da cava final para cada cenário descrito na metodologia foram realizadas com o auxílio dos *softwares* NPV Scheduler e Studio OP, ambos da empresa Datamine.

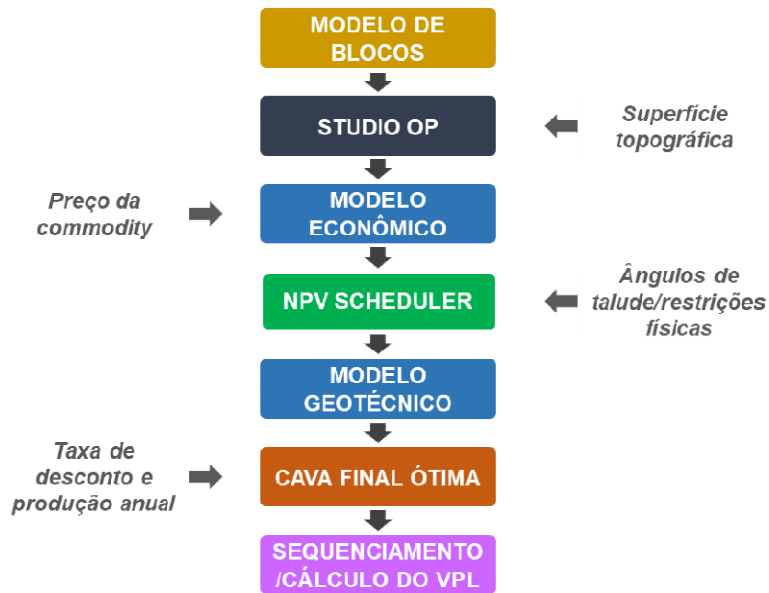
Inicialmente, o modelo tridimensional de blocos contendo parâmetros geológicos como litologia, teor e densidade foi inserido no software Studio OP para aplicação de uma função benefício previamente definida. Foi nesta etapa que as modificações no valor do preço de venda foram realizadas, dando origem aos cenários propostos. É importante ressaltar que para o estudo em questão, apenas o preço de mercado da *commodity* foi alterado na função benefício, sendo que todos os demais parâmetros permaneceram constantes. Em seguida o modelo econômico gerado no Studio OP foi inserido no NPV Scheduler para obtenção dos limites da cava final. Uma taxa de desconto anual de 12% foi utilizada para obtenção do valor presente líquido (VPL) de cada cava gerada. A fim de estimar a vida útil de cada

cenário gerado, foi definida uma produção média de 3,2 Mt de minério ao ano para todas as simulações realizadas, valor este que se aproxima dos valores de produção praticados pelo empreendimento.

### **Restrições Físicas**

O presente estudo foi realizado em duas situações distintas: Na primeira delas a metodologia descrita anteriormente foi empregada realizando-se uma análise de sensibilidade considerando limites de área, bem como um limite de cota para o fundo da cava. Este cenário contempla uma situação comum à realidade de muitos empreendimentos de mineração, os quais normalmente estão limitados a uma certa área concedida para a lavra. Devido à rigidez locacional inerente aos depósitos minerais, nem sempre é possível alterar estes limites com o intuito de ampliar o volume das reservas lavráveis. Em outros casos o empreendimento se encontra próximo a áreas urbanas, áreas de interesse da comunidade ou áreas de preservação ambiental. Nestas situações a expansão dos limites de propriedade dificilmente é possível.

A segunda situação refere-se a um cenário sem quaisquer limitações físicas de área e de cota para a obtenção dos contornos da cava final que levem à maximização do valor do empreendimento. Este cenário representa uma realidade possível, porém mais difícil de ser observada em empreendimentos de mineração. Exceções a este caso podem ser encontradas, por exemplo, em situações em que duas empresas de mineração possuem áreas adjacentes, permitindo que os limites de propriedade sejam alterados mediante acordo entre ambas as partes. Assim, foram geradas 11 cavas para cada cenário, totalizando 22 cavas finais ótimas. A Figura 2 ilustra um fluxograma da metodologia adotada neste estudo.



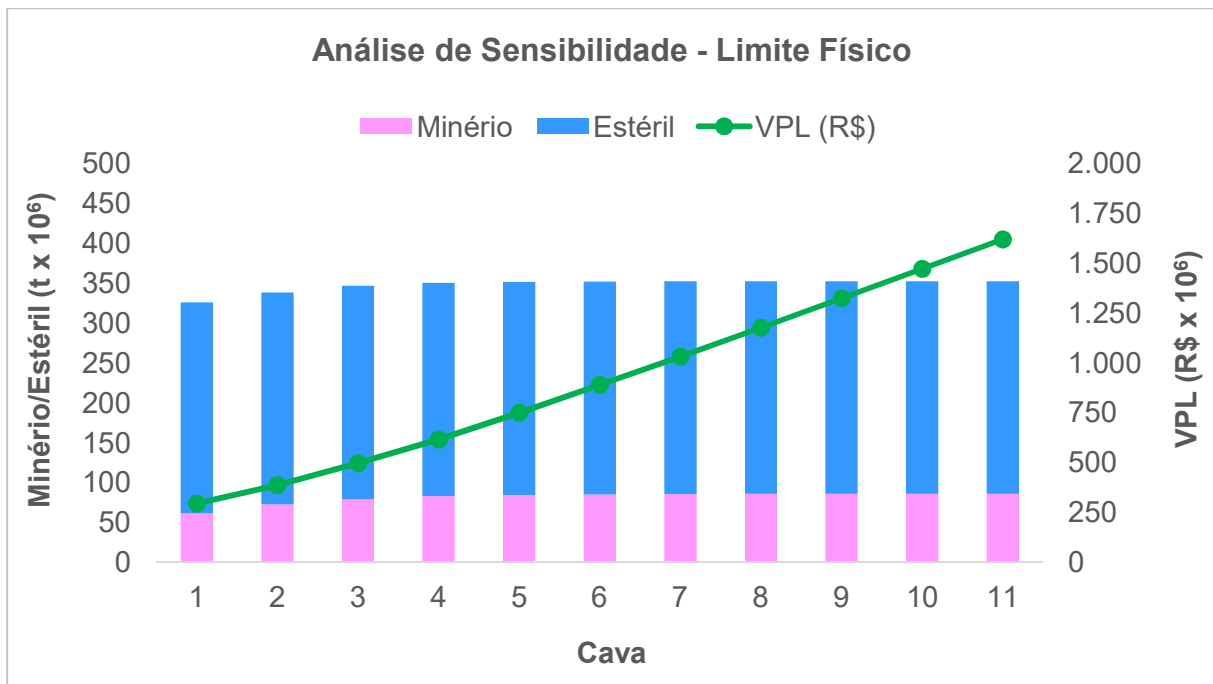
**Figura 2** – Fluxograma representativo das etapas da metodologia empregadas neste estudo

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise de Sensibilidade com Limite Físico

A partir dos cenários de preço apresentados na Tabela 2 e seguindo a metodologia apresentada na Figura 2, foram geradas as 11 cavas referentes à análise de sensibilidade considerando-se os limites físicos de área e de fundo de cava. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para cada cenário de preço, indicando os valores das massas de minério e estéril para cada cava, bem como o seu respectivo VPL. Os valores da massa de minério e estéril foram obtidos multiplicando-se o volume encontrado por um valor de densidade igual a 2 t/m<sup>3</sup>, adotado como padrão para ambos os materiais.





**Figura 3** – Análise de sensibilidade realizada para o cenário com limites físicos para a cava.

Analisando-se a Figura 3 pode-se observar que a cava 1, a qual corresponde ao valor de preço mais baixo, é a que apresenta menor quantidade de minério. Este comportamento era esperado uma vez que, para valores de preço menores, alguns blocos com teores mais baixos podem adquirir benefício negativo, mesmo estando acima do teor de corte. Isto faz com que estes blocos, que deveriam ser considerados como minério, passem a ser tidos como estéril, uma vez que não são mais economicamente viáveis. Isto resulta em uma diminuição das reservas lavráveis reduzindo, conseqüentemente, os limites da cava final e a quantidade de minério presente na mesma.

Ao contrário do que se esperava, ao aumentar o preço para além do valor base, não foi observado aumento significativo na quantidade de minério e estéril, indicando que os limites da cava final praticamente não se alteraram. Para efeito de comparação, a cava 11, gerada com o valor de preço mais alto apresentou um aumento de apenas 0,6% na massa de minério em relação à cava 6, gerada a partir do valor base do preço de mercado. Em contrapartida, ao se realizar esta mesma comparação, agora em relação à cava 1 (menor preço), houve uma redução de aproximadamente 27,8% na massa de minério.

A justificativa mais provável que explica este comportamento é que, para a cava gerada a partir do valor base (cava 6), os limites da cava final já estavam muito próximos dos limites impostos pelas restrições físicas de área e cota do fundo de cava. Sendo assim, mesmo aumentando o preço, os contornos finais da cava pouco mudaram. Pode-se perceber

também que, a partir da cava 8 não são observados aumentos, mesmo que pequenos, nas massas de minério e estéril, indicando que deste ponto em diante a cava final não pode mais sofrer expansões, estando restrita aos limites físicos impostos nas condições de contorno da análise realizada.

Os valores de massa de estéril também pouco se alteraram ao longo dos diferentes cenários avaliados. A possível explicação para este comportamento é semelhante àquela aplicada para a massa de minério, com a diferença de que mesmo para a menor cava (cava 1), a massa de estéril permaneceu relativamente constante. Isto indica que, apesar dos limites da cava terem se retraído, a quantidade de estéril aumentou praticamente na mesma proporção, devido a redução no preço de mercado, resultando em uma variação de aproximadamente 1% entre a cava 1 e a cava 6, correspondente ao valor de preço base.

No que diz respeito ao critério econômico, representado pelo VPL das cavas geradas, o comportamento observado na Figura 3 se mostrou dentro daquilo que era esperado. Para valores mais altos de preço, obteve-se um VPL maior sendo que, o maior valor de VPL encontrado coincidiu com o cenário de maior preço do fosfato. Isto demonstra que, independentemente dos contornos da cava, o preço possui grande influência na lucratividade do empreendimento. Comparando-se a cava 6 com a cava 1, foi observada uma diminuição no VPL da ordem de 66,9%. Em contrapartida, ao se comparar o VPL encontrado para o cenário da cava 11 com o valor base, observa-se um aumento de aproximadamente 82,1%.

A Tabela 3 apresenta os valores de teor médio de  $P_2O_5$ , relação estéril/minério (REM) e vida útil do empreendimento para os diferentes cenários de preço estudados.

**Tabela 3** – Teor médio de  $P_2O_5$ , REM e vida útil para as cavas geradas com limite físico.

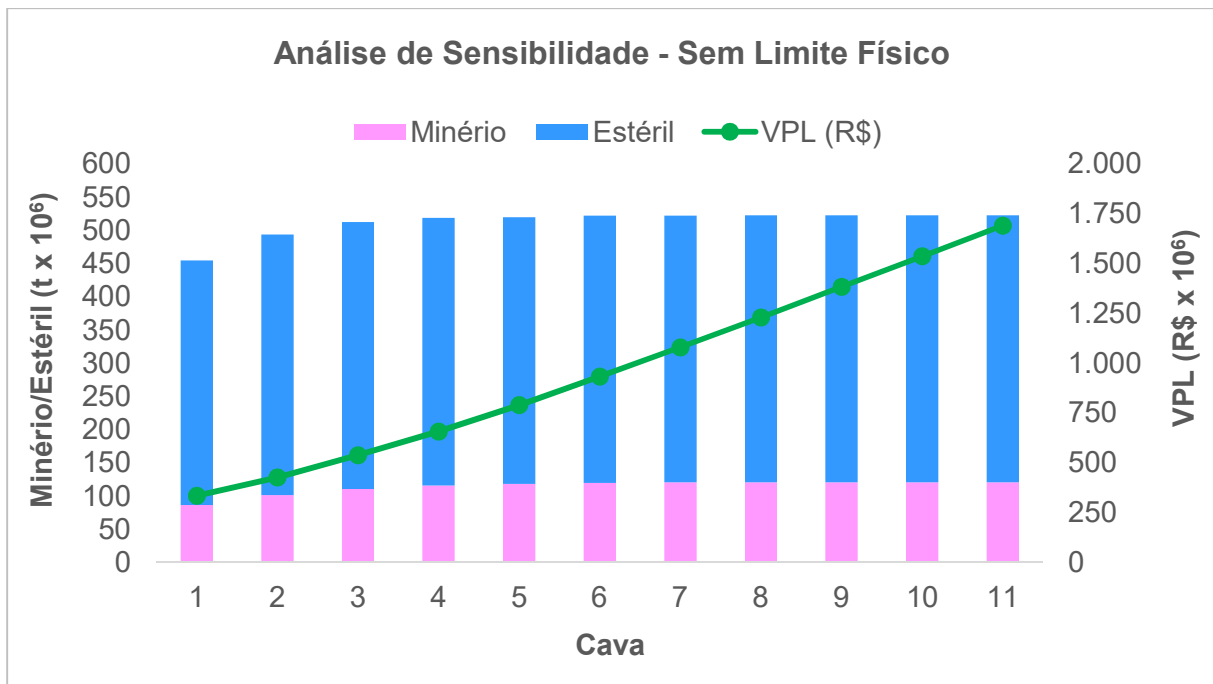
<b>Análise de Sensibilidade - Limite Físico</b>				
<b>Cava</b>	<b>Preço (US\$/t)</b>	<b><math>P_2O_5</math> (%)</b>	<b>REM (t/t)</b>	<b>Vida Útil (anos)</b>
1	50,00	13,09	4,30	19,20
2	60,00	12,43	3,66	22,71
3	70,00	12,03	3,38	24,72
4	80,00	11,80	3,24	25,87
5	90,00	11,70	3,17	26,34
6	100,00	11,64	3,14	26,58
7	110,00	11,61	3,12	26,71
8	120,00	11,60	3,12	26,75
9	130,00	11,60	3,12	26,75
10	140,00	11,60	3,12	26,75
11	150,00	11,60	3,12	26,75

Conforme mostra a Tabela 3, os valores de teor médio de  $P_2O_5$  são maiores para cenários onde o preço é menor. Isto se deve ao fato de que, para preços mais baixos, a lavra tende a migrar para regiões mais ricas do depósito. Neste caso, apenas blocos com teores mais elevados são economicamente viáveis, elevando assim o teor dos blocos de minério da cava final. Esta tendência também faz com que a quantidade de blocos de minério seja reduzida em comparação com os blocos de estéril, uma vez que apenas blocos com teores mais altos tem benefício positivo e, portanto, são considerados como minério. Como resultado, a REM torna-se maior.

Com relação à vida útil do empreendimento, sabe-se que para valores de preço mais baixos, a cava é conseqüentemente menor. No entanto, para preços mais altos os limites da cava se expandem, aumentando as reservas lavráveis. Assumindo uma taxa de produção constante ao longo dos anos, assim como foi feito neste trabalho, a vida útil do empreendimento tende a aumentar à medida que o preço aumenta, assim como mostra a Tabela 3.

### **Análise de Sensibilidade sem Limite Físico**

Assim como foi feito para o cenário no qual restrições físicas se faziam presente, foram geradas novamente 11 cavas, agora sem quaisquer restrições de área e cota para o fundo de cava. A Figura 4 ilustra os resultados obtidos para os diferentes cenários de preço, indicando os valores das massas de minério e estéril para cada cava, além do seu respectivo VPL.



**Figura 4** – Análise de sensibilidade realizada para o cenário sem limites físicos para a cava.

Analisando-se a Figura 4, pode-se observar que esta é bastante semelhante à Figura 3, correspondente ao cenário com restrições físicas. Contudo, é possível notar algumas diferenças entre ambas. A principal delas diz respeito aos valores de massa de estéril e minério, que são maiores se comparadas ao cenário onde restrições físicas haviam sido impostas. Como a ausência destas restrições, as cavas geradas são maiores e mais profundas, portanto, possuem quantidades maiores de material estéril e minério.

A tendência observada para os valores de massa de minério e estéril, no entanto, permaneceu mesmo. A única diferença neste caso é que os valores permaneceram constantes após a cava 8 provavelmente devido à exaustão das reservas lavráveis, e não devido às restrições físicas impostas. Comparando-se a cava 6 com a cava 1, foi observada uma redução de 28,1% na massa de minério. Por outro lado, ao se realizar a mesma comparação, agora para a cava 11, obteve-se um aumento de aproximadamente 0,7% apenas. Isto indica que as cavas geradas com valores de preço maiores que o valor base praticamente não sofreram alterações na quantidade de minério contido nas mesmas. O mesmo raciocínio também vale para os valores de massa de estéril, onde a variação entre o valor base e o maior valor de preço foi negligente, sendo da ordem de apenas 0,1%.

Do ponto de vista econômico, o VPL seguiu a mesma tendência observada no cenário com restrições físicas. O cenário sem restrições, no entanto, apresentou valores de VPL em média 6,3% maiores. Como não existiam impedimentos atribuídos nas condições de contorno, o algoritmo de otimização foi capaz de buscar os contornos que levariam a maior

lucratividade do empreendimento, explicando o motivo dos valores de VPL para este cenário terem sido maiores.

Por último, a Tabela 4 apresenta os valores de teor médio de  $P_2O_5$ , REM e vida útil do empreendimento para os cenários de preço estudados sem restrições físicas. Analisando-se a mesma pode-se perceber que os valores apresentados e o seu comportamento são semelhantes aos observados na Tabela 3, referente ao cenário onde existiam restrições físicas. Os valores de vida útil do empreendimento, no entanto, se mostraram maiores. A explicação mais provável para este comportamento está no fato de que neste cenário não foram impostas restrições, portanto as cavas geradas foram maiores, conseqüentemente aumentando a massa de minério. Assumindo uma taxa de produção constante, a vida útil tende a aumentar.

**Tabela 4** – Teor médio de  $P_2O_5$ , REM e vida útil para as cavas geradas sem limite físico.

<b>Análise de Sensibilidade - Sem Limite Físico</b>				
<b>Cava</b>	<b>Preço (US\$)</b>	<b>% <math>P_2O_5</math></b>	<b>REM (t/t)</b>	<b>Vida Útil (anos)</b>
1	50,00	13,38	4,29	26,84
2	60,00	12,65	3,89	31,57
3	70,00	12,22	3,65	34,39
4	80,00	11,96	3,48	36,12
5	90,00	11,84	3,40	36,88
6	100,00	11,77	3,37	37,32
7	110,00	11,74	3,35	37,52
8	120,00	11,73	3,34	37,57
9	130,00	11,73	3,34	37,57
10	140,00	11,73	3,34	37,57
11	150,00	11,73	3,34	37,57

## **CONCLUSÕES**

A definição dos limites da cava final é um dos grandes desafios do planejamento de uma mina a céu aberto. Vários fatores podem influenciar significativamente estes limites, sendo o preço de mercado do bem mineral talvez o mais relevante deles. Diante disto, análises de sensibilidade são uma ferramenta importante na tentativa de se antecipar os efeitos que variações no preço podem causar nos contornos da cava final ótima.

Para as cavas geradas considerando-se restrições físicas, foi observado um aumento do ganho econômico expresso pelo VPL, contudo, aumentos no preço para além do valor base

não resultaram em maiores expansões dos limites da cava. Tal fato ocorreu pois o contorno da cava final para o valor base se encontrava próximo das restrições físicas impostas.

Com relação ao cenário sem limitações físicas, observou-se que tanto o VPL quanto as quantidades de minério e estéril aumentaram, até atingir um valor máximo estabelecido pelas próprias condições do modelo geológico de blocos, caracterizado pela exaustão das reservas lavráveis. Desta forma, aumentos no preço para além deste ponto não resultaram em mudanças no volume de minério e estéril.

A realização da análise de sensibilidade sem restrições físicas também serviu para se conhecer os verdadeiros limites da cava final, uma vez que nenhuma limitação de área ou cota foi imposta na busca dos contornos ótimos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SAMIS, M. 2001. **Valuing a Multi-Zone Mine as a Real Asset Portfolio – A Modern Asset Pricing (Real Options) Approach**. In: Annual International Conference on Real Options – Theory Meets Practice, 5, 2001. Los Angeles, California, United States. Proceedings [...]. Los Angeles, 2001.

[2] DESSUREAULT, S; KAZAKIDIS, V.N.;MAYER, Z. Flexibility valuation in operating mine decisions using real options pricing. **Int. J. Risk Assessment and Management**, Vol. 7, No. 5, p. 656-674. 2007.

[3] DEGHANI, H.; ATAEE-POUR, M. **Determination of the effect of economic uncertainties on mining project evaluation using real option valuation**. International Journal of Mining and Mineral Engineering, Vol. 4, No. 4, p. 265-277, 2013.

[4] CACCETTA, L; HILL, S. P. **An Application of Branch and Cut to Open Pit Mine Scheduling**. Journal of Global Optimization, v. 27, n. 2, p. 349-365, Nov. 2003.

[5] CANDIDO, M. T. **Impacto de Diferentes Algoritmos e Geometria de Depósitos Minerais no Planejamento de Longo Prazo**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

[6] 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.

[7] HISTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. **Open Pit Mine Planning & Design**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. 1308 p.

[8] 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.

[9] BAZANTE, A. J. **A Interação Entre o Planejamento e Controle de Qualidade na Maximização da Função Benefício de um Empreendimento Mineral**. 2004. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

[10] **Global Economic Monitoring (GEM) Commodities**, World Bank Group. Disponível em: <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economicmonitorcommodities>. Acessado em: 05 de junho de 2017