

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE LAVRA NA MINERAÇÃO DE GIPSITA EM PERNAMBUCO*

Suelen Silva Rocha¹
Júlio César de Souza²
Silas Leonardo Dias Vasconcelos³
Jorge Luiz de Valença Maris⁴

Resumo

No Brasil, de modo geral aplica-se o método *Open Pit Mining* por bancadas múltiplas para a lavra de gipsita, o qual se caracteriza por altos custos operacionais e significativos impactos ambientais. Pensando nisso, na Mina Ponta da Serra do Polo Gesseiro do Araripe, tal método foi substituído pelo *Terrace Mining* fim de otimizar as operações de exploração de gipsita. Neste contexto, o objetivo deste estudo é apresentar os benefícios operacionais e econômicos obtidos na mudança do método de lavra de gipsita. A metodologia consistiu em realizar levantamentos da prática operacional dos dois métodos com uma abordagem econômica e operacional. Os resultados demonstraram que houve uma melhoria nas operações da mina, redução dos custos com as operações unitárias e minimização dos impactos ambientais. Conclui-se, então, que a adoção de técnicas de mineração adequadas permite uma operação mais econômica, inserindo a mineração no contexto sustentável.

Palavras-chave: Polo Gesseiro do Araripe; Métodos de lavra; benefícios econômicos; Sustentabilidade.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MINING METHODS IN GYPSUM MINING

Abstract

In Brazil, in general, the Open Pit Mining method by multiple benches is applied for gypsum mining, which is characterized by high operational costs and significant environmental impacts. Thinking about it, in the Ponta da Serra Mine of Gypsum Pole of Araripe, this method was replaced by Terrace Mining with the objective of optimizing gypsum exploitation operations. In this context, the objective of this study is to present the operational and economic benefits obtained from the change of the gypsum mining method. The methodology consisted in carrying out surveys on the operational practice of the two methods with an economic approach. The results showed that there was an improvement in the operations of the mine, operational costs reduction and environmental impacts minimization. It is concluded that the adoption of adequate mining techniques allows a more economical operation, inserting mining in a sustainable context.

Keywords: Gypsum Pole of Araripe; Mining methods; Economic benefits; Sustainability.

¹ Engenheira de Minas, Mestre em Engenharia Mineral, Pesquisadora, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

² Engenheiro de Minas, Doutor em Engenharia, Docente, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

³ Engenheiro de Minas, Mestrando em Engenharia Mineral, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

⁴ Engenheiro de Minas, Mestrando em Engenharia Mineral, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a indústria da mineração está inserida num mercado global e competitivo, que força as empresas a melhorar suas práticas de modo a desenvolver-se conforme os princípios da sustentabilidade [1]. A definição de sustentabilidade para o contexto da atividade mineral indica que as práticas desta atividade devem ser conduzidas de modo a se conseguir promover o equilíbrio com relação a considerações econômicas, sociais e ambientais, as quais são referidas muitas vezes como pilares da mineração [2].

A mineração tem sido alvo de estudo na busca de otimização para melhoria de suas práticas, principalmente no que tange ao planejamento de mina, que envolve a definição de, entre outros fatores, o(s) método(s) de extração de minérios com o objetivo de implementar tecnologias mais limpas, e também do descomissionamento de mina, visando uma otimização da gestão ambiental [3].

A atividade de mineração desenvolve-se através de uma sequência de etapas contempladas na concepção do projeto do empreendimento mineral. Segundo Hartman e Mutmanský [4], tal sequência compreende as fases de Pré-Mineração (Prospecção e Exploração), Mineração (Desenvolvimento e Lavra), e Pós-Mineração (Recuperação e Reabilitação da Área). A fase de lavra compreende a retirada propriamente dita dos recursos naturais através de um conjunto de operações coordenadas que objetiva o aproveitamento industrial das jazidas para fins de beneficiamento, transformação e utilização, utilizando técnicas específicas denominadas métodos de lavra [5].

A seleção do método de lavra configura-se uma das atividades mais críticas e problemáticas da engenharia de minas, e esse processo, que envolve a interação de fatores técnicos, tecnológicos, econômicos, sociais, políticos, ambientais e históricos, bem como critérios subjetivos, tem por objetivo final encontrar um método que maximize o lucro da empresa e também a recuperação dos recursos minerais. A escolha do método de lavra é considerada uma etapa desafiadora do planejamento de mina devido às complexidades e incertezas inerentes aos parâmetros geológicos e geotécnicos envolvidos, devendo ser precisa, pois é um elemento potencial para análise de viabilidade econômica do empreendimento mineral. Selecionado o método, este deve ser seguro e produzir condições adequadas de trabalho, fomentar a redução dos impactos causados ao meio ambiente, permitir condições de estabilidade durante a vida útil da mina, ser flexível às condições geológicas e à infraestrutura disponível permitindo atingir uma produtividade máxima e reduzindo o custo unitário de produção [6].

São vários os métodos de lavra aplicáveis à lavra tipo céu aberto ou subterrânea que podem ser selecionados. A maioria das minas utiliza mais de um método de lavra em sua operação, pois um dado método pode ser mais apropriado para uma zona do depósito, todavia seu emprego pode não ser a melhor opção em outras zonas [7]. Há casos ainda em que se faz necessária a alteração do método aplicado a determinado depósito durante o processo de lavra por motivos operacionais, econômicos e/ou ambientais [8].

A atividade de mineração requer, para sua máxima produtividade, um planejamento de produção a curto, médio e longo prazo que leve em consideração as questões referentes ao desenvolvimento sustentável dado o fato que esta extrai recursos não-renováveis. Não obstante, nas minerações de pequeno e médio porte não é prática a realização desses estudos, implicando em riscos de perdas no processo produtivo, refletindo negativamente não apenas no desempenho técnico e operacional da mina

como também na economia. Somado a isso, existe uma crescente exigência por parte dos órgãos regulamentadores ambientais e também o surgimento de novas legislações que visam direcionar os empreendimentos a adotarem técnicas que valorizem os princípios da sustentabilidade e de técnicas de produção mais limpa. Assim, é fundamental avaliar metodologias que não comprometam a produtividade e proporcionem um melhor desempenho da atividade de mineração no que diz respeito à redução dos custos operacionais e o desenvolvimento de técnicas ambientalmente mais corretas [9].

No Brasil, o minério de gipsita, importante material industrial com diversas aplicações e principal matéria-prima para fabricação do gesso em sua forma calcinada, é explotado através das técnicas de lavra a céu aberto [10-11], a qual se caracteriza por uma escavação superficial para extração de minérios em depósitos estratificados, horizontalizados e maciços e também veios verticais a determinadas profundidades [12]. O Polo Gesseiro do Araripe, o arranjo produtivo local que se configura um *cluster* dinâmico de extrema importância para a economia do semiárido nordestino e que é responsável por cerca de 90% do gesso produzido no Brasil, utiliza em suas minas o método de lavra *Open Pit Mining* por bancadas múltiplas para lavra da gipsita. As características geométricas dos depósitos advindas da sua formação sedimentar, configurando depósitos tabulares, permitem a utilização deste método de lavra em quase todas as minas pertencentes ao complexo. Este método de lavra movimenta grandes volumes de material estéril para as pilhas de estéril, denominadas “bota-foras”, localizadas fora do *pit*, o que implica em altos custos operacionais devido às grandes distâncias de transporte, além de impactos ambientais significativos com a geração de volumosos depósitos de material estéril, implicando na necessidade de áreas para disposição de tais pilhas. Além disso, são formadas grandes crateras após a exploração que dificultam a reinserção da área da mina na paisagem natural da região e conseqüentemente a recuperação ambiental das áreas mineradas [13].

Em uma das minas do Polo Gesseiro, a Mina Ponta da Serra, de concessão da empresa Royal Gipso Ltda., a operação do método *Open Pit Mining* foi praticamente impossibilitada devido à indisponibilidade de áreas para deposição do material estéril na área de concessão de lavra da mineradora e em distâncias de transporte viáveis operacional e economicamente; além disso, o bota-fora já existente na mina estava com dimensões e volume em seu limite topográfico e de estabilidade natural. Neste cenário, buscando soluções de engenharia para a aplicação de técnicas de produção mais limpa, minimização dos impactos ambientais, e continuação das operações de lavra da gipsita, a empresa Royal Gipso Ltda., em sua Mina Ponta da Serra, substituiu o método *Open Pit* para o *Terrace Mining* [9].

O princípio de operação do *Terrace Mining* é semelhante ao do método *Strip Mining* no sentido de permitir a recuperação topográfica da cava minerada concomitantemente à lavra, diferenciando-se deste nas dimensões (forma terraços ao invés de tiras) e na forma de deposição do estéril (no *Strip* é por lançamento direto e no *Terrace* há transporte intermediário cíclico ou contínuo deste material); assim, o *Terrace* não exige áreas de bota-fora, pois o material estéril é depositado nos terraços anteriormente minerados formando bancadas de preenchimento, e constitui-se uma alternativa sustentável no que tange a aspectos econômicos, operacionais e ambientais, ressaltando a necessidade da realização das atividades do setor de mineração em consonância com o princípio básico da sustentabilidade [14-15].

O *Open Pit Mining*, apesar de permitir um adequado desempenho técnico e operacional, não atende a totalidade das exigências especialmente no que se refere à retirada da cobertura estéril na operação de decapeamento. Por outro lado, o *Terrace Mining* permite a utilização mais eficaz do material do capeamento da mina por meio da deposição imediata deste nas áreas já mineradas da cava, sendo a recuperação da área simultânea à lavra. Este fato garante que o processo de fechamento de mina, que engloba atividades de descomissionamento, reabilitação e recuperação da área lavrada, esteja incorporado ao planejamento da vida útil da mina, evitando custos adicionais quanto a esta etapa do projeto do empreendimento no encerramento do mesmo [16].

O novo método implantado solucionou ainda os problemas de falta de áreas para deposição do estéril próximas a cava e permitiu uma redução dos custos com transporte, uma vez que a distância de carregamento do material estéril até o aterro final foi reduzida. Neste contexto, este trabalho objetivou realizar uma análise comparativa dos benefícios econômicos, operacionais e ambientais obtidos com essa mudança de paradigmas.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A empresa Royal Gipso Ltda. atua na exploração do mineral industrial gipsita e na fabricação de gesso pré-moldado e sua sede está localizada no Sítio Lagoa de Dentro em Araripina/PE. A Mina Ponta da Serra, área objeto deste estudo, encontra-se na fazenda Ponta da Serra, no povoado Gergelim, município de Araripina, região do semi-árido brasileiro.

O depósito de gipsita da Mina Ponta da Serra caracteriza-se por sua forma tabular, com espessura que chega a atingir 30 metros de profundidade. Conforme os perfis litológicos da recuperação das campanhas de sondagem realizadas em 1993 e 2012, a camada de gipsita apresenta-se sob a forma lenticular com limites irregulares subdividida em horizontes com espessuras que variam de 9,5 até 14,8 metros. A cobertura estéril é constituída por argilas, margas e arenitos inconsolidados, recobertos por uma camada de solo, com espessuras que variam de 18,7 a 30,0 metros [9].

Os volumes estimados de minério e estéril do depósito são 1.800.944,20 m³ de material estéril *in situ* e 877.618,83 m³ (2.018.523,72 t) de reserva medida de gipsita. O método de lavra aplicado na Mina Ponta da Serra até o primeiro semestre do ano 2013 foi o *Open Pit Mining* com bancadas múltiplas de altura média de 11 metros. A camada de material estéril, com espessura média de 20,6 metros, era removida por operação conjunta de escavadeiras e caminhões, sendo o material estéril depositado em um bota-fora, que localizava-se a cerca de 750 m da frente de lavra. No ano de 2012 a operação através do método *Open Pit Mining* não permitiu sua continuidade devido à indisponibilidade de área próxima a cava para disposição da pilha de estéril (bota-fora).

Neste cenário, após um estudo de viabilidade realizado pela empresa em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco em 2013, o método de lavra *Open Pit Mining* foi substituído pelo *Terrace Mining*. Este método foi selecionado em função das características geométricas do depósito de gipsita e principalmente por sua operacionalização prever a disposição do material estéril dentro da cava já minerada (figura 1), reduzindo as distâncias médias de transporte e permitindo a continuidade das operações de exploração da gipsita na Mina Ponta da Serra.



Figura 1: Reabilitação da cava pelo método Terrace Mining em 2017

Com a mudança do método de lavra, as operações unitárias para exploração do minério não sofreram alteração, havendo mudanças apenas na operação de descobertura com relação ao local de disposição do estéril. As operações de lavra são mecanizadas e consistem em: decapeamento (desmonte mecânico com escavadeira hidráulica e transporte do material em caminhões), desmonte primário da gipsita (explosivos), fragmentação secundária (rompedores hidráulicos), carregamento (pás-carregadeiras e escavadeira hidráulica) e transporte (o minério é vendido para terceiros).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A comparação entre os métodos *Open Pit Mining* e *Terrace Mining* na lavra de gipsita da Mina Ponta da Serra foi realizada durante visitas técnicas à área de estudo em que foram realizados levantamentos de dados operacionais e econômicos dos dois métodos referentes à execução das operações unitárias e cronometragem do tempo de ciclo dos equipamentos utilizados na operação de descobertura. Posteriormente realizou-se um levantamento de custos de todas as operações unitárias do processo de extração da gipsita dos métodos *Open Pit Mining* e *Terrace Mining* e por fim foi desenvolvida uma análise comparativa entre os dois métodos aplicados na lavra de gipsita da Mina Ponta da Serra, abordando os benefícios obtidos com relação aos aspectos operacionais e econômicos no Laboratório de Planejamento de Lavra do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco (LAPLA/CTG/UFPE).

Os dados operacionais e econômicos referentes ao método *Open Pit* foram obtidos em relatórios técnicos cedidos pela empresa Royal Gipso Ltda. e também pesquisa de dados secundários dos quais a principal referência é a dissertação de mestrado intitulada “Aplicação da Terrace Mining como alternativa para lavra de gipsita na região do Araripe – Pernambuco” desenvolvida junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da UFPE por Bastos (2013), que avaliou a viabilidade econômica da aplicabilidade e implementação do método *Terrace Mining* na Mina Ponta da Serra.

Já os dados operacionais e econômicos do método *Terrace Mining* foram obtidos através de levantamentos de campo das operações de decapeamento, perfuração, desmonte e carregamento. Realizou-se o levantamento do tempo de ciclo dos equipamentos na operação de decapeamento para exposição da camada de minério. Com relação à perfuração, o equipamento utilizado é o mesmo para os dois métodos sendo uma perfuratriz pneumática Atlas CopcoWagondrill que opera juntamente a um compressor marca AtlasCopco modelo XATS 127.

O desmonte é realizado com explosivos, utilizando ANFO (*AmoniumNitrate and FuelOil*) granulado e emulsão encartuchada. O plano de fogo compreende a execução de furos com diâmetro de 2,5 polegadas e comprimento de 12 a 15 metros conforme a altura da bancada, espaçamento de 5,0 metros e afastamento de 2,5 metros. Além do desmonte com explosivos, é necessária a fragmentação secundária do minério por rompedores hidráulicos acoplados a escavadeiras.

Na operação de carregamento do minério utilizam-se duas pás-carregadeiras sobre rodas CASE modelo W20E-4 com caçamba de capacidade de 1,91 m³ e uma retroescavadeira hidráulica Hyundai modelo R210LC-7 com caçamba de capacidade 1,2 m³ tanto à época do método *Open Pit* quanto no método *Terrace Mining*.

Na operação de carregamento do minério na Mina Ponta da Serra é utilizada a retroescavadeira e apenas uma das pás-carregadeiras para carregamento dos caminhões, sendo a outra utilizada para espalhar o minério na praça da mina e selecionar os fragmentos com granulometria inadequada para a operação de fragmentação secundária.

Para a análise comparativa de custos entre os métodos *Open Pit* e *Terrace Mining*, realizou-se o levantamento dos custos de produção unitários de cada etapa do processo produtivo da gipsita. Para facilitar a análise dos dados, o custo operacional da mineração foi separado por setores de trabalho em setor de decapeamento (custos com descobertura), setor de extração do minério (custos de lavra), e setor de serviços administrativos e auxiliares de produção (custos indiretos).

A composição do custo por setor de trabalho foi definida conforme a seguir:

- Custos de descobertura: custo com locação da escavadeira hidráulica para carregamento do material e da pá-carregadeira para espalhamento do estéril disposto na cava minerada, custos com diesel determinado através do consumo médio de combustível de cada equipamento e custo com frete de caminhões para transporte do material da frente de trabalho até seu local de deposição.
- Custos de lavra do minério: custo com locação dos equipamentos: uma escavadeira hidráulica e duas pás-carregadeiras, uma escavadeira hidráulica com rompedor hidráulico acoplado, um compressor e uma perfuratriz; custos com diesel dos equipamentos utilizados; custo com explosivos e acessórios.
- Custos indiretos: custo com mão-de-obra.

O custo operacional de cada setor é isento das despesas relativas à depreciação dos equipamentos, amortização de capital, impostos e encargos financeiros. Estes custos por setor classificam-se em diretos e indiretos, sendo os custos diretos os dos setores de decapeamento e de exploração do minério, e os custos indiretos aqueles relativos ao setor de serviços administrativos.

Foram levantados os dados de produção mensal de gipsita, os custos e a receita bruta de vendas. Para o *Open Pit* foram utilizados os dados de produção e custos referentes ao período entre janeiro e julho de 2013 e os dados de produção e custos relativos ao *Terrace Mining* foram obtidos através de levantamentos de campo e relatórios de controle de produção cedidos pela empresa.

Com esses dados foi possível fazer um comparativo entre o percentual de participação dos custos referentes a cada setor de produção nos custos totais de produção dos métodos *Open Pit* e *Terrace Mining*, apontando os benefícios operacionais e econômicos conseguidos com a implementação deste último.

Para facilitar a análise comparativa foi utilizado o custo unitário de produção referente a cada operação componente do custo total de produção (Souza, 2008) e o índice de margem de lucro líquida (ML), que representa o lucro obtido com a comercialização da gipsita após o desconto dos custos operacionais (Silva, 2015).

Desse modo pode-se calcular este índice diretamente a partir do custo operacional, conforme equação a seguir (Equação 1):

$$ML = 1 - (\text{Custo Operacional}/\text{Faturamento}) \times 100 \quad (1)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados comparativamente os aspectos qualitativos e quantitativos dos benefícios resultantes da implementação do método *Terrace Mining* em substituição ao *Open Pit Mining* na mineração de gipsita a partir dos resultados obtidos na Mina Ponta da Serra em Araripina – PE.

As tabelas 1 e 2 apresentam os equipamentos distribuídos por setor, o custo de locação horário e o consumo médio de combustível estimado para cada equipamento para os dois métodos de lavra:

Tabela 1. Equipamentos utilizados na operacionalização do método *Open Pit Mining*

Equipamentos	Custo de locação horário	Consumo horário médio de combustível
Setor de Descobertura		
Escavadeira hidráulica Hyundai R320LC-7	R\$ 130,00	25 litros/hora
Pá-carregadeira CASE W20E-5	R\$ 70,00	13 litros/hora
Setor de Lavra do Minério		
Escavadeira hidráulica R210LC-7	R\$ 95,00	15 litros/hora
Pá-carregadeira CASE W20E-4	R\$ 70,00	13 litros/hora
Escavadeira hidráulica CASE CX220B com Rompedor hidráulico BM Britamaq acoplado	R\$ 100,00	16 litros/hora
Retroescavadeira Caterpillar 416E	R\$ 65,00	8,5 litros/hora
Compressor portátil Atlas Copco XATS 127	R\$ 60,00	9 litros/hora
Perfuratriz pneumática Atlas Copco Wagon Drill	R\$ 55,00	

Tabela 2. Equipamentos utilizados na operacionalização do método *Terrace Mining*

Equipamentos	Custo de locação horário	Consumo horário médio de combustível
Setor de Descobertura		
Escavadeira hidráulica Hyundai R320LC-7	R\$ 135,00	25 litros/hora
Pá-carregadeira CASE W20E-5	R\$ 75,00	13 litros/hora
Setor de Lavra do Minério		
Escavadeira hidráulica R210LC-7	R\$ 100,00	15 litros/hora
Pá-carregadeira CASE W20E-4	R\$ 75,00	13 litros/hora
Escavadeira hidráulica CASE CX220B com Rompedor hidráulico BM Britamaq acoplado	R\$ 100,00	16 litros/hora
Compressor portátil Atlas Copco XATS 127	R\$ 95,00	9 litros/hora
Perfuratriz pneumática Atlas Copco Wagon Drill	R\$ 60,00	

Após a aplicação do *Terrace Mining* houveram alterações no regime de produção da mineração. Para obtenção de 10.000 a 12.000 toneladas/mês de gipsita à época do método *Open Pit Mining* o regime era de 8 horas/dia, 25 dias/mês e 300 dias/ano. No método *Terrace mining* a produção passou de 12.000 t/mês a até 16.000 t/mês de minério operando 10 horas/dia, 25 dias/mês e 300 dias/ano. O aumento do número de horas trabalhadas e consequentemente da capacidade de produção da Mina Ponta da Serra foram conseguidos devido a maior exposição de minério obtida com a nova metodologia de lavra.

Houve também alteração na quantidade de equipamentos necessários e no volume de mão-de-obra necessária. Foram reduzidos 05 (cinco) equipamentos na lavra sendo 03 (três) caminhões e 02 (duas) retroscavadeiras de pequeno porte que operavam na operação de fragmentação secundária, o que conseqüentemente influenciou no volume de mão-de-obra, com diminuição de 05 (cinco) operadores de máquinas e 02 (dois) auxiliares de produção, implicando em redução de cerca de 50% do custo operacional com este setor. Com o método *Open Pit Mining* esse custo era da ordem de R\$ 18.000,00 e diminuiu para R\$ 9.000,00 utilizando-se o *Terrace Mining*.

Os gráficos a seguir apresentam as comparações das operações dos dois métodos referentes às participações dos custos operacionais de descobertura e de lavra nos custos de produção, aos custos unitários de produção e ao índice de margem de lucro obtido para a Mina Ponta da Serra.

O gráfico da figura 2 mostra a participação dos custos operacionais do setor de descobertura nos custos totais de produção no primeiro semestre de 2013 para o *Open Pit Mining* e no primeiro semestre de 2016 para o *Terrace Mining*.

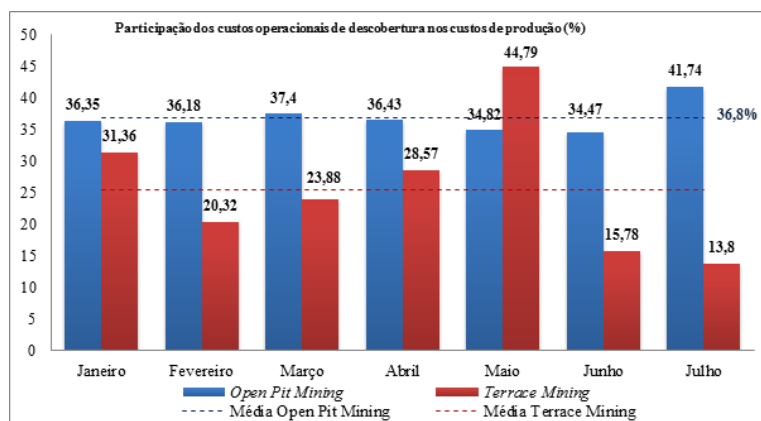


Figura2. Comparação quanto à participação dos custos de descobertura nos custos de produção

A média de participação do custo de descobertura nos custos totais de produção para o *Open Pit Mining* foi de 36,8%, enquanto que para o *Terrace Mining* este valor foi de 25,5%, implicando em uma redução de cerca de 11% na participação desse custo no custo total de lavra, o que é explicado pela redução do número de caminhões em atividade nesta operação que foi possível com a diminuição significativa de 750 m para 450 m nas distâncias médias de transporte da frente de descobertura até o bota-fora, o que conseqüentemente diminuiu seu tempo de ciclo, de 12 para 6 minutos. Assim, a quantidade necessária de caminhões para atender as demandas de produção também diminuiu, reduzindo o consumo de combustível.

Na operação do *Terrace Mining*, a quantidade de caminhões foi reduzida de 05 (cinco) para 02 (dois). Segundo informações da empresa responsável pela locação dos caminhões, o custo com o combustível representa 49% do seu custo total. A redução da quantidade de caminhões e da distância de transporte possibilitaram a negociação do valor do frete: o valor do frete dos caminhões era de 18,50 R\$/ciclo com o valor do combustível incluso passando a 20,00 R\$/ciclo. Diante disso e conhecendo-se o aumento linear do custo do diesel por litro, que em 2013 era R\$ 2,27 e em 2016 custava R\$ 3,10, pode-se afirmar que o valor do frete permaneceu praticamente constante desde 2013.

Considerando a quantidade de 73 ciclos/dia/caminhão no método *Open Pit Mining*, com preço do frete de R\$ 18,50, o custo mensal com uma unidade era da ordem de

R\$ 33.762,50 e, conseqüentemente, o custo mensal da frota de R\$ 168.812,50. No método *Terrace Mining*, mesmo com o aumento do valor do custo mensal de um caminhão para R\$ 36.500,00, houve uma economia anual da ordem de R\$ 95.000,00 com a redução de 03 (três) caminhões da frota. O gráfico da figura 3 apresenta a participação dos custos operacionais do setor de lavra do minério nos custos totais de produção para os dois métodos.

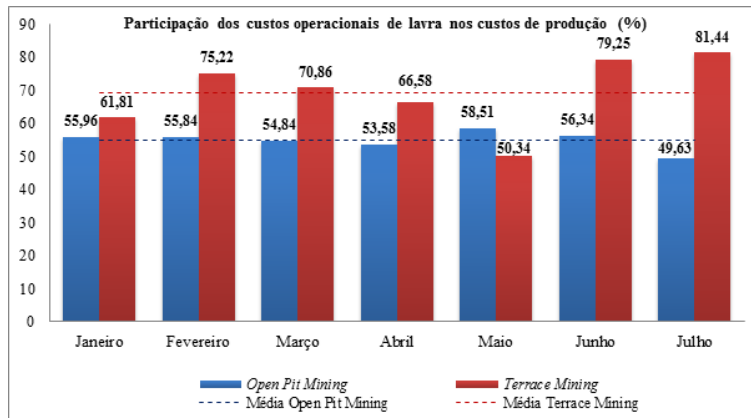


Figura 3. Comparação quanto à participação dos custos de lavra nos custos de produção

A média de participação dos custos de lavra nos custos totais de produção para o método *Open Pit Mining* foi 55%, enquanto que para o *Terrace Mining* foi de 69,9%. Os maiores custos são explicados pela diminuição obtida no custo da operação de decapeamento, pelo aumento no regime de produção e quantidade de minério produzida, pelo aumento dos custos de locação dos equipamentos necessários à lavra, bem como o aumento significativo dos custos com combustível. O gráfico da figura 4 mostra o custo unitário de produção de gipsita da Mina Ponta da Serra para os métodos *Open Pit Mining* e *Terrace Mining*.

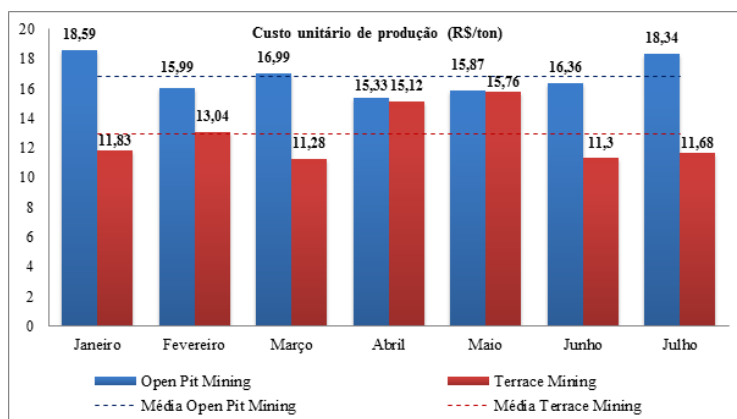


Figura 4. Comparação dos métodos de lavra quanto ao custo unitário de produção

O custo unitário médio de produção para o *Open Pit Mining* foi 16,8 R\$/t, e para o *Terrace Mining* este valor foi 12,8 R\$/t, ou seja, houve uma redução de R\$ 4,00 no custo de produção de cada tonelada de gipsita produzida (-23,8). Tal redução confirma que a aplicação do *Terrace Mining* permite um enorme benefício econômico na Mina Ponta da Serra referente às operações necessárias à produção do minério de gipsita. Para complementar a análise com relação aos benefícios econômicos obtidos, o gráfico a seguir mostra o índice da margem líquida de lucro resultante da operação do *Open Pit Mining* em 2013 e do *Terrace Mining* em 2016:

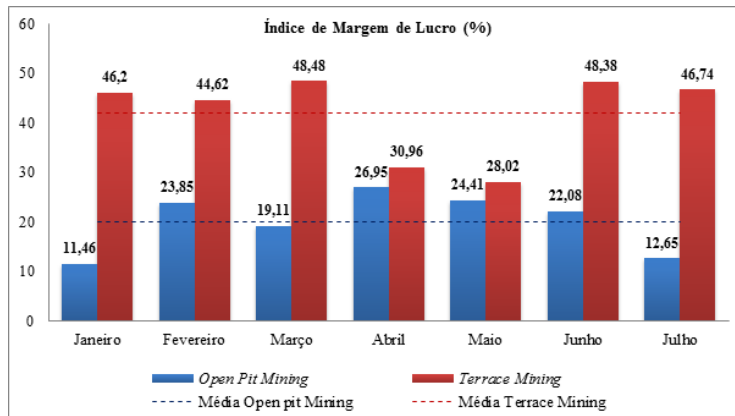


Figura5. Comparação dos métodos de lavra quanto ao índice de margem de lucro

Segundo o gráfico, o índice de lucratividade médio da Mina Ponta da Serra para o *Open Pit Mining* foi 20,1%, ao passo que para o *Terrace Mining* esse índice apresentou valor de 41,9%, o que confirma o resultado obtido com relação à redução no custo unitário de produção conseguido com a substituição do método *Open Pit* para o *Terrace Mining* mesmo com o aumento de produção de gipsita e aumento dos custos de insumos necessários à produção do minério (explosivos, combustível etc.).

Esse resultado mostra que, com a aplicação do método *Terrace Mining*, a mineradora conseguiu dobrar o lucro líquido nas operações de lavra do minério em relação ao *Open Pit Mining* e houve um aumento médio de cerca de 22% na rentabilidade da empresa. Observa-se que o menor valor mensal do índice de lucratividade obtido no método de lavra *Terrace Mining* (28,02%) ainda é maior que o maior índice de lucratividade conseguido com o método *Open Pit Mining* (26,95%). Diante desses resultados, pode-se afirmar que o método *Terrace Mining* se configura mais vantajoso em termos econômicos e operacionais do que o método *Open Pit Mining* para a mineração de gipsita da Mina Ponta da Serra do Polo Gesseiro do Araripe.

5 CONCLUSÕES

A principal diferença ocorrida com a aplicação do *Terrace Mining* foi a mudança na sistemática de remoção e deposição do material estéril da cobertura, que agora é disposto diretamente na cava minerada, eliminando o custo de aquisição de áreas de servidão, favorecendo a operação visto que a mineração não possui mais áreas disponíveis sem minério para este fim em sua zona de concessão.

Na operação de descobertura pelo método de lavra *Terrace Mining* implicou em uma redução de 11% dos custos em termos de participação nos custos totais de produção em relação ao método *Open Pit Mining*, o que se traduz em economias de cerca de R\$ 95.000,00/ano, obtidas com a redução de 03 (três) dos 05 (cinco) caminhões que eram utilizados devido à diminuição das distâncias médias de transporte. Além disso, conseguiu-se uma diminuição nas horas de operação da pá-carregadeira responsável pelo espalhamento do material no local de deposição (bota-fora), pois não há mais a necessidade de trabalho contínuo para estabilização das encostas do bota-fora, e também uma otimização da operação de carregamento, visto que foram eliminadas as filas de espera dos caminhões.

Com relação às operações unitárias de lavra do minério, o método *Terrace Mining* obteve maior percentual (69,9%) de participação deste setor nos custos totais de produção do que o *Open Pit Mining* (55%), o que se explica pelo aumento de capacidade de produção da mineração, pelo aumento dos custos de locação dos equipamentos necessários à lavra, aumento significativo dos custos com combustível e principalmente pela redução dos custos com decapeamento. Ainda se conseguiu uma redução nos custos com a fragmentação secundária do minério, através da substituição de 3 por apenas 1 equipamento após o estudo de viabilidade de implantação do *Terrace Mining*, o que propiciou uma otimização nesta operação, gerando uma economia anual da ordem de R\$ 10.000,00.

A diminuição de 05 (cinco) equipamentos da frota da mina na produção de gipsita da Mina Ponta da Serra através da *Terrace Mining* implicou diretamente na redução dos custos de mão-de-obra, propiciando economias na ordem de R\$ 90.000,00 anuais.

Neste cenário estima-se que com a aplicação do método *Terrace Mining* houve uma redução de R\$ 4,00 no custo de produção de cada tonelada de gipsita e obteve-se um índice de rentabilidade médio na lavra de 41,9%, o que mostra que a mineradora consegue cobrir seus custos de produção com menos da metade de seu faturamento com as vendas do minério, e em relação ao método *Open Pit Mining* houve um aumento médio de cerca de 22% na rentabilidade da empresa, mesmo com o aumento dos custos de insumos necessários à produção do minério (explosivos, combustível etc.).

Conclui-se então que a substituição do método *Open Pit Mining* pelo *Terrace Mining* na Mina Ponta da Serra propiciou a continuidade das atividades de mineração de gipsita bem como gerou benefícios operacionais com a otimização na execução das operações unitárias e benefícios econômicos relativos à redução anual de custos na ordem de R\$ 200.000,00.

Além disso, obtiveram-se também benefícios quanto a aspectos ambientais no que concerne ao *layout* do *pit* ao final das atividades de lavra pois a filosofia atualmente empregada permite que o estéril seja devolvido à cava minerada, permitindo uma reabilitação topográfica em volume da cava total. O benefício econômico atrelado a esse aspecto é a não necessidade de custos com área para deposição do material estéril que representaria um custo adicional de R\$ 88.000,00 além da possibilidade de reflorestamento das áreas mineradas recuperadas com espécies vegetais com potencial energético para produção de lenha para utilização nos fornos das calcinadoras da região, substituindo o uso da caatinga nativa da região.

Assim, com esta nova metodologia já implementada na Mina Ponta da Serra deu-se um passo muito importante no que diz respeito à sustentabilidade econômica e ambiental para toda a cadeia produtiva da gipsita, que no futuro poderá proporcionar uma mudança nas técnicas de mineração em todo o Polo Gesseiro do Araripe, adotando-se técnicas e práticas operacionais que contemplam as características geométricas dos jazimentos de gipsita, permitindo uma operação mais econômica e a implantação de metodologias ambientalmente mais corretas que apontam para uma operação mineira conforme os princípios da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- 1 Ahmed AAM. Development of an Integrated Mining and Processing Optimization System (Tese de doutorado). Faculty of Geosciences, Geo-Engineering and Mining of the Technische Universität Bergakademie, Freiberg, Alemanha. 2013.

- 2 Laurence D. Establishing a sustainable mining operation: an overview. *J Clean Prod.*, 2011 [acesso em 2018 jun 18];19(2-3):278-284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.019>.
- 3 Eugene B, Otto R, Tarrant E, Yashar P. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. *J Clean Prod.* 2011 [acesso em 2018 jun 18];26(6):1065-1071. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.09.015>.
- 4 Hartman HL, Mutmanský JM. *Introductory Mining Engineering*. 2nd ed. Reino Unido: John Wiley & Sons; 2002.
- 5 Resende AG, Lima HM, Flores JCC. Analysis of the mine closure plan in the economic exploitation plan for an ore body - an NRM-20 requirement. *RevEsc de Minas.* 2010 [acesso em 2018 jun 15];63(4):685-690. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672010000400014>
- 6 Adler L, Thompson SD. Mining Methods Classification System. In P. Darling, (Ed.) *Mining Engineering Handbook*. 3rd ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc; 2011. pp. 349-355
- 7 Macêdo AJB, Bazante AJ, Bonates E JL. Seleção do método de lavra: arte e ciência. *RevEsc Minas.* 2001 [acesso em 2018 jun 15];54(3):221-225. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672001000300010>
- 8 Bastos FF. *Aplicação da Terrace Mining como alternativa para lavra de gipsita na região do Araripe – Pernambuco (Dissertação de Mestrado)*. Recife: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco; 2013.
- 9 Rocha SS. *Análise Comparativa dos Benefícios Econômicos, Operacionais e Ambientais do Método Terrace Mining na Mineração de Gipsita do Polo Gesseiro do Araripe – PE (Dissertação de Mestrado)*. Recife: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco; 2017.
- 10 Oliveira FMC, Borges LEP, Melo EB, Barros MLSC. Mineralogical and crystallographic characteristics of Araripe gypsum. *Holos.* 2012 [acesso em 2018 jun 15];5:71-82. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1140>
- 11 Zhixiang L, Wengang D, Qingling L, Guanghui C, Kang P. Optimization of clay material mixture ratio and filling process in gypsum mine goaf. *Int Min Science Tech.* 2013 [acesso em 2018 jun 15];23(3):337-342. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.05.018>
- 12 Wetherelt A, Van der Wielen KP. Introduction to Open-Pit Mining. In P. Darling, (Ed.) *Mining Engineering Handbook*. 3rd ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2011. pp. 857-876
- 13 Rocha SS, Souza JC, Bastos FF, Rodrigues HC, Silva RA. Comparative Analysis of Economics, Operational and Environmental Benefits in the Mining Methods Terrace Mining and Open Pit Mining: Gypsum Mining Case. *Proceedings of the 24th World Mining Congress*. Rio de Janeiro: IBRAM; 2016.
- 14 Mitra R, Saydam S. Surface Coal Mining Methods in Australia. In: T. Onargan (Ed.) *Mining Methods*. Austrália: InTech; 2012. pp. 3-23. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/mining-methods/surface-coal-mining-methods-in-australia>
- 15 Souza JC, Rodrigues HC, Rocha SS, Bastos FF, Silva RA. Mining Planning of Gypsum Exploitation with Terrace Mining Approach. *Proceedings of the 24th World Mining Congress*. Rio de Janeiro: IBRAM, 2016.
- 16 Nehring M, Cheng X. An investigation into the impact of mine closure and its associated cost on life of mine planning and resource recovery. *J Clean Prod.* 2016 [acesso em 2018 jun 15];127:228-239.