

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

SUELEN SILVA ROCHA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS, OPERACIONAIS E
AMBIENTAIS DO MÉTODO *TERRACE MINING* NA MINERAÇÃO DE GIPSITA
DO POLO GESSEIRO DO ARARIPE**

RECIFE
2017

SUELEN SILVA ROCHA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS, OPERACIONAIS E
AMBIENTAIS DO MÉTODO *TERRACE MINING* NA MINERAÇÃO DE GIPSITA
DO POLO GESSEIRO DO ARARIPE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Minerais Industriais

Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza

RECIFE
2017

R672a	Rocha, Suelen Silva. Análise comparativa dos benefícios econômicos, operacionais e ambientais do método TERRACE MINING na mineração de gipsita do polo gesseiro do Araripe / Suelen Silva Rocha. - 2017. 133 folhas, il., tabs. Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Recife, 2017. Inclui Referências e Apêndices. 1. Engenharia Mineral. 2. Gipsita. 3. Polo gesseiro do Araripe. 4. Técnicas de extração. 5. Sustentabilidade na mineração. I. Souza, Júlio César de (Orientador). II. Título
	UFPE
622.35 CDD (22. ed.)	BCTG/2017-323



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS OPERACIONAIS E
AMBIENTAIS DO MÉTODO *TERRACE MINING* NA MINERAÇÃO DE GIPSITA
DO POLO GESSEIRO DO ARARIPE**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Minerais Industriais

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do **Prof. Dr. JÚLIO CÉSAR DE SOUZA**, considera **APROVADA** a aluna **SUELEN SILVA ROCHA**.

Recife, 28 de junho de 2017.

Prof. Dr. JÚLIO CÉSAR DE SOUZA
Orientador - (UFPE)

Profa. Dra. KÊNIA VALENÇA CORREIA
Examinadora Interna - (UFPE)

Prof. Dr. MÁRCIO LUIZ DE SIQUEIRA CAMPOS BARROS
Examinador Interno - (UFPE)

Prof. Dr. JAIR CARLOS KOPPE
Examinador Externo - (UFRGS)

Dedico este trabalho à minha família, amigos, e todos aqueles que sempre acreditaram em mim, em especial à minha mãe, Sônia Maria Silva, que sempre me encorajou a prosseguir firme no meu objetivo e viabilizou a realização de mais uma conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e sobretudo a Deus, que nos criou e foi criativo nesta tarefa, por ser minha força e esperança nos momentos de dúvidas, tornando essa conquista possível. Seu fôlego de vida em mim foi-me sustento e deu-me coragem para prosseguir a cada dificuldade e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

À minha mãe, Sônia Maria Silva, a quem pertence o mérito dessa conquista, por sempre ter me orientado e ensinado a importância de estudar, por ser exemplo de ser humano, por sua dedicação, amor e confiança para comigo, pela educação, incentivo, apoio e por sempre estar ao meu lado.

Aos meus tios, tias, primos e primas, especialmente à tia Zinha, por todo amor, apoio e orações para que eu conseguisse mais essa conquista.

À minha segunda família: Lione, Vilmar, Maurílio, Júnior, Ana Beatriz, João Ricardo, Giovana, Allan, Pedro e Jéssica por todo o apoio e amizade incondicionais prestados a mim em todos os momentos.

A meu grande amigo Maurílio, por sempre se fazer presente mesmo sem estar.

À Poliana e Paula, minha família de Recife, serei eternamente grata a vocês pela acolhida, pelo cuidado e carinho, pela força e por todos os momentos compartilhados. Amo vocês e as levarei comigo sempre, por onde eu for.

À Keyla Melo e sua linda família, pela acolhida, carinho e cuidado.

Aos meus amigos paraenses, Vivianne, Hermeson, Élyda, Amanda, Milene e Anderson por todos os momentos compartilhados.

Aos demais colegas do Departamento de Engenharia de Minas/UFPE, por todas as experiências partilhadas.

Aos docentes do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, pela acolhida, por todo o conhecimento partilhado, em especial aos professores Dr. Márcio Barros, M.Sc. Marinésio Pinheiro e Dra. Kênia Valença Correia, por sua dedicação, ensinamentos e amizade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Júlio César de Souza, que com seu jeito singular e especial de ser Mestre me deixou criar asas e permitiu meu crescimento e entendimento sobre o universo da pesquisa. Obrigada por toda confiança depositada em mim na realização deste trabalho, por todas as oportunidades de crescimento pessoal, profissional e intelectual, por sua amizade, apoio, conselhos, paciência, momentos de descontração e incentivo durante todo esse tempo.

Ao meu Coorientador Prof. M.Sc. Marinésio Pinheiro de Lima por seu apoio e atenção no desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Royal Gipso Ltda. em especial à engenheira Flávia Bastos, pelos dados fornecidos, imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa da Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco pela oportunidade.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

(Charles Chaplin)

RESUMO

O método de lavra deve ser selecionado de modo a produzir condições adequadas para a execução das operações e ser flexível à infraestrutura disponível, permitindo atingir uma produtividade máxima ao menor custo unitário de produção, e visando à sustentabilidade. No Polo Gesseiro do Araripe, na maioria dos depósitos aplica-se o método de lavra *Open Pit Mining* por bancadas múltiplas face ao modo de ocorrência das jazidas de gipsita e de suas características geomorfológicas. Este método de lavra caracteriza-se por movimentar grandes volumes de material estéril para as pilhas de “bota-fora”, localizadas fora do *pit*, o que implica em altos custos operacionais devido às grandes distâncias percorridas para deposição do material, além de significativos impactos ambientais. Devido a este fato, na Mina Ponta da Serra no Polo Gesseiro do Araripe, tal método foi substituído pelo *Terrace Mining* com o objetivo de otimizar as operações de exploração de gipsita e minimizar estes impactos ambientais. Neste contexto, este estudo tem por objetivos demonstrar os benefícios operacionais, econômicos e ambientais ocorridos com a mudança do método de lavra do tipo *Open Pit* para o método *Terrace Mining* na lavra de gipsita da Mina Ponta da Serra da empresa Royal Gipso Ltda., no Polo Gesseiro do Araripe de modo a construir uma análise comparativa entre os mesmos na exploração da gipsita. A metodologia consistiu em realizar levantamentos de dados bibliográficos da mineração de gipsita no Brasil, dos custos operacionais, e também o levantamento de aspectos ambientais relacionados ao desenvolvimento dos dois métodos, numa abordagem econômica e operacional. Os resultados demonstraram que a alteração do método de lavra proporcionou uma otimização nas operações da mina, redução dos custos com as operações unitárias e minimização dos impactos ambientais no que diz respeito ao impacto visual, uma vez que o princípio de operação do *Terrace Mining* permite a concomitância de execução das atividades de extração e recuperação da área degradada, e também por não haver a necessidade de mais custos com a implantação de bota-foras afastados das frentes de lavra. Concluiu-se, então, que a adoção de técnicas que contemplam as características do jazimento, permitindo um melhor e mais econômico controle operacional, e o prezar por políticas ambientalmente mais corretas apontam para o contexto sustentável que a atividade se direciona.

Palavras-chave: Gipsita. Polo gesseiro do Araripe. Técnicas de extração. Sustentabilidade na mineração.

ABSTRACT

The mining method must be selected in order to produce adequate conditions for the execution of the operations and be flexible to the available infrastructure, allowing to achieve maximum productivity at the lowest unit cost of production and aiming at sustainability. In the Gypsum Pole of Araripe, in most of the deposits, the Open Pit Mining method is applied by multiple benches in relation to the mode of occurrence of the gypsum deposits and their geomorphological characteristics. This mining method is characterized by moving large volumes of sterile material to the "outside dump" piles, located outside the pit, which implies high operational costs due to the long distances traveled for material deposition, besides significant environmental impacts. Due to this fact, at the Ponta da Serra Mine at the Gypsum Pole of Araripe, this method was substituted by Terrace Mining with the objective of optimizing gypsum exploitation operations and minimizing these environmental impacts. In this context, this study aims to demonstrate the operational, economic and environmental benefits of changing the Open Pit method for the Terrace Mining method in the gypsum mining of the Royal Gipso Ltda. in the Gypsum Pole of Araripe in order to construct a comparative analysis between them in the exploitation of the gypsum. The methodology consisted in collecting bibliographical data of the gypsum mining in Brazil, of the operational costs, as well as the survey of environmental aspects related to the development of the two methods, in order to construct a comparative analysis between them in the exploitation of the gypsum addressing environmental, operational and economic aspects. The results demonstrate that the alteration of the mining method provided an optimization in the mine operations, reduction of the costs with the unit operations and minimization of the environmental impacts with respect to the visual impact with the restitution of the sterile material in the, since the operating principle of Terrace Mining allows the concomitance of execution of the activities of extraction and recovery of the degraded area, and also because there is no need for more costs with the implantation of outside dumps far from the mining fronts. It is concluded that the adoption of techniques that consider the characteristics of the area, allowing a better and more economic control, and the appreciation of environmentally correct policies, point to the eco-sustainable context that the activity is directed to.

Keywords: Gypsum. Gypsum pole of Araripe. Exploitation techniques. Sustainability in mining.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Variedades Mineralógicas de gipsita: (a) Cocadinha; (b) Rapadura; (c) Estrelinha; (d) Johnson; (e) Alabastro; (f) Selenita; (g) Boró; (h) Anidrita; (i) Minério do Piso.....	20
Figura 2: Mapa de localização da Bacia do Araripe	24
Figura 3: Operações unitárias da exploração de uma jazida ocorrendo em bancadas.....	28
Figura 4: Operação de perfuração com carreta de perfuração rotativa	29
Figura 5: Operação de desmonte com explosivos e desmonte mecânico	30
Figura 6: Operação de desmonte secundário com martelo hidráulico	30
Figura 7: Operação de carregamento com escavadeira.....	31
Figura 8: Operação de transporte com caminhões fora-de-estrada e por correias transportadoras.....	31
Figura 9: Classificação americana dos métodos de lavra a céu aberto	35
Figura 10: Classificação australiana dos métodos de lavra a céu aberto	36
Figura 11: Esquematização da lavra em cava pela metodologia de bancadas simples	38
Figura 12: Esquematização da lavra em cava pela metodologia de bancadas múltiplas	39
Figura 13: <i>Bingham Canyon Mine</i>	44
Figura 14: <i>Escondida Copper Mine</i> , Chile.....	44
Figura 15: Mina de Ferro N5 do Complexo Serra Norte Carajás/PA	45
Figura 16: Mina de Ferro Brucutu, São Gonçalo do Rio Abaixo (MG)	45
Figura 17: Esquematização da lavra em tiras em uma camada de minério com decapeamento por <i>draglines</i>	49
Figura 18: Esquematização da lavra em tiras em uma camada de minério com decapeamento por <i>shovels</i>	49
Figura 19: Mina de Caulim da Mineração Itapoama Ltda, Cabo de Santo Agostinho (PE)...	50
Figura 20: Vista aérea da metodologia de lavra de bauxita da MPSA em Paragominas (PA)	51
Figura 21: Operacionalização típica do método <i>Terrace Mining</i> na lavra de carvão	52
Figura 22: Mina de Carvão <i>Mount Arthur North</i> do Vale Hunter em <i>New South Wales</i> (Austrália).....	53
Figura 23: Vista panorâmica da Mina de Carvão <i>Tagebau Garzweiler</i> , Alemanha	53
Figura 24: <i>Bucket Wheel Excavators</i> 288 e 258 na Mina de Carvão <i>Tagebau Garzweiler</i>	54
Figura 25: Combinação dos métodos <i>Terrace</i> (pré-decapeamento de material inconsolidado) e <i>Strip Mining</i> (remoção de material mais profundo) com equipamentos associados	54
Figura 26: Vista aérea da Mina de Carvão <i>Grooteegeluk</i>	55

Figura 27: Mina de Carvão <i>Grootegeluk</i>	55
Figura 28: Mina de gipsita Ponta da Serra, Araripina/PE	56
Figura 29: Mineração de gipsita através do método <i>Open Pit Mining</i> com bancadas múltiplas, Araripina/PE	57
Figura 30: Mapa rodoviário de Pernambuco – localização do município de Araripina em relação à capital Recife.....	68
Figura 31: Polígono delimitador da área de concessão de lavra da mineração Royal Gipso Ltda.....	69
Figura 32: Mina Ponta da Serra.....	73
Figura 33: Operação de carregamento do material estéril (decapeamento)	78
Figura 34: Disposição do material estéril na cava minerada.....	79
Figura 35: Operação unitária de perfuração	80
Figura 36: Resultado do desmonte com explosivos	81
Figura 37: Fragmentação secundária do minério	81
Figura 38: Operação unitária de carregamento do minério.....	82
Figura 39: Espalhamento do minério na praça da mina	83
Figura 40: Comparação dos métodos quanto à participação dos custos de descobertura nos custos de produção.....	98
Figura 41: Comparação dos métodos quanto à participação dos custos de lavra nos custos de produção	99
Figura 42: Comparação dos métodos de lavra quanto ao custo unitário de produção (R\$/t)	100
Figura 43: Comparação dos métodos de lavra quanto ao índice de margem de lucro (%) ...	101
Figura 44: Pilha de estéril a 1,4 km da frente de lavra na operacionalização do método <i>Open Pit Mining</i>	102
Figura 45: Rampa desenvolvida para aplicação do método <i>Terrace Mining</i>	104
Figura 46: Reabilitação da cava pelo método <i>Terrace Mining</i> em 2016	105
Figura 47: Reabilitação da cava pelo método <i>Terrace Mining</i> em 2017	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das fases de um empreendimento mineral.....	27
Tabela 2: Classificação dos métodos de lavra a céu aberto.....	36
Tabela 3: Coordenadas dos vértices da poligonal (DATUM SIRGAS 2000).....	70
Tabela 4: Descrição dos equipamentos necessários aos dois métodos de lavra.....	88
Tabela 5: Comparação do tempo de ciclo do transporte de estéril para os dois métodos	90
Tabela 6: Comparação do tempo de ciclo de perfuração para os dois métodos.....	92
Tabela 7: Tempo de ciclo e produtividade da W20E-4 1 no método <i>Open Pit Mining</i>	93
Tabela 8: Tempo de ciclo e produtividade da W20E-4 2 no método <i>Open Pit Mining</i>	94
Tabela 9: Tempo de ciclo e produtividade da W20E-4 1 no método <i>Terrace Mining</i>	94
Tabela 10: Tempo de ciclo e produtividade da W20E-4 2 no método <i>Terrace Mining</i>	95
Tabela 11: Equipamentos utilizados na operacionalização do método <i>Open Pit Mining</i>	96
Tabela 12: Equipamentos utilizados na operacionalização do método <i>Terrace Mining</i>	96
Tabela 13: Dados do custeio de produção de gipsita – Método <i>Open Pit Mining</i>	97
Tabela 14: Dados do custeio de produção de gipsita – Método <i>Terrace Mining</i>	97
Tabela 15: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Open Pit Mining</i> - Janeiro/2013	120
Tabela 16: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Open Pit Mining</i> - Fevereiro/2013...	121
Tabela 17: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Open Pit Mining</i> - Março/2013.....	122
Tabela 18: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Open Pit Mining</i> - Abril/2013.....	123
Tabela 19: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Open Pit Mining</i> - Maio/2013.....	124
Tabela 20: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Open Pit Mining</i> - Junho/2013	125
Tabela 21: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Open Pit Mining</i> - Julho/2013	126
Tabela 22: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Terrace Mining</i> - Janeiro/2016	127
Tabela 23: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Terrace Mining</i> - Fevereiro/2016	128
Tabela 24: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Terrace Mining</i> - Março/2016	129
Tabela 25: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Terrace Mining</i> - Abril/2016	130
Tabela 26: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Terrace Mining</i> – Maio/2016.....	131
Tabela 27: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Terrace Mining</i> – Junho/2016	132
Tabela 28: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - <i>Terrace Mining</i> – Julho/2016	133

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	GIPSITA.....	19
2.2	PANORAMA NACIONAL DA GIPSITA	22
2.3	POLO GESSEIRO DO ARARIPE	23
2.4	OPERAÇÕES UNITÁRIAS DE LAVRA	26
2.4.1	Métodos de Lavra a Céu Aberto	32
2.4.1.1	Lavra em Cava (<i>Open Pit</i>).....	37
2.4.1.2	Lavra em Tiras (<i>Strip Mining</i>).....	45
2.4.1.3	Lavra em Terraços (<i>Terrace Mining</i>)	51
2.5	MÉTODOS DE LAVRA DE GIPSITA NO BRASIL	56
2.6	ASPECTOS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE NA MINERAÇÃO	58
2.7	AVALIAÇÃO ECONÔMICA DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO.....	60
2.7.1	Custos operacionais	61
2.7.2	Estimativas de custos.....	62
2.7.3	Custos unitários de produção	64
2.7.4	Índices Financeiros	66
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	68
3.1	LOCALIZAÇÃO E ACESSO	68
3.2	MEMORIAL DESCRITIVO DO POLÍGONO DELIMITADOR DA ÁREA	69
3.3	ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS	70
3.4	ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	71
3.5	MINERAÇÃO ROYAL GIPSO LTDA.	73
4	METODOLOGIA.....	76
4.1	LEVANTAMENTO DE DADOS DO MÉTODO <i>OPEN PIT MINING</i>	76
4.2	LEVANTAMENTOS DE CAMPO	77
4.2.1	Levantamento dos Tempos de Ciclo dos Equipamentos	77
4.2.1.1	Tempo de ciclo da operação de decapeamento	78

4.2.1.2	Tempo de ciclo da operação de perfuração e caracterização do desmonte do minério	80
4.2.1.3	Tempo de ciclo da operação de carregamento do minério	81
4.3	ANÁLISE DOS ASPECTOS AMBIENTAIS	83
4.4	LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO	84
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
5.1	COMPARAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE OPERAÇÃO NOS MÉTODOS DE LAVRA <i>OPEN PIT MINING</i> E <i>TERRACE MINING</i>	87
5.2	ANÁLISE COMPARATIVA DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS DOS MÉTODOS DE LAVRA <i>OPEN PIT MINING</i> E <i>TERRACE MINING</i>	89
5.2.1	Operação de Descobertura	89
5.2.2	Operação Unitária de Perfuração e Caracterização do Desmonte do Minério	91
5.2.3	Operação Unitária de Carregamento do Minério	93
5.3	ANÁLISE COMPARATIVA DOS CUSTOS OPERACIONAIS DOS MÉTODOS DE LAVRA <i>OPEN PIT MINING</i> E <i>TERRACE MINING</i>	95
5.4	ANÁLISE COMPARATIVA DOS ASPECTOS AMBIENTAIS DOS MÉTODOS DE LAVRA <i>OPEN PIT MINING</i> E <i>TERRACE MINING</i>	102
6	CONCLUSÕES.....	107
	REFERÊNCIAS.....	109
	APÊNDICE A – DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO DO MÉTODO <i>OPEN PIT MINING</i> (2013).....	120
	APÊNDICE B – DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO DO MÉTODO <i>TERRACE MINING</i> (2016).....	127

1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação está inserida em um projeto mais amplo que visa a adequação das técnicas de extração aplicáveis ao projeto de lavra do minério de gipsita do Polo Gesseiro do Araripe e figura como projeto piloto resultante da avaliação em termos econômicos, operacionais e ambientais da aplicação do método *Terrace Mining* à mineração de gipsita do referido Polo, que se constitui de extrema importância econômica no contexto do Semiárido Nordestino.

Para tal, essa dissertação se estrutura em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução acerca do tema proposto, com uma visão geral da necessidade e importância da pesquisa, além de seus objetivos e justificativa; o segundo capítulo é constituído pela revisão bibliográfica, que apresenta um panorama nacional e internacional do minério de gipsita e as características operacionais dos métodos de lavra a céu aberto; o capítulo três apresenta a caracterização da área em que se encontra o objeto deste estudo, a Mina Ponta da Serra; o capítulo quatro trata de explicar e detalhar, sistematicamente, a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta dissertação, que consistiu basicamente em realizar levantamentos de dados de campo para realizar uma análise comparativa dos benefícios do método *Terrace Mining* com relação ao *Open Pit*; o quinto capítulo expõe os resultados obtidos com a análise de parâmetros operacionais, econômicos e ambientais da operação do método *Terrace Mining* discutindo os resultados em função da operacionalização dos métodos comparados; e o sexto e último capítulo apresenta as conclusões provenientes dos resultados obtidos.

A atividade de mineração é milenar e essencial para o desenvolvimento socioeconômico da sociedade moderna. É um setor da economia de extrema importância, que emprega milhões de pessoas ao redor do mundo e movimenta bilhões de dólares todo ano. Atualmente, a indústria da mineração está inserida num mercado global e competitivo, que força as empresas, não só de mineração, mas de todos os segmentos, a melhorar suas práticas, seja no âmbito social, ambiental ou econômico (Mahmoud, 2013).

A sociedade contemporânea tem se tornado gradativamente mais dependente dos recursos minerais, e sua dinâmica os exige para o seu funcionamento e desenvolvimento dos seus produtos. A maior parte dos objetos que cercam o homem necessita de alguma espécie de bem mineral como matéria-prima para sua fabricação; portanto, devido a este fato, a atividade de mineração tem sido alvo de estudo na busca do aprimoramento e desenvolvimento, principalmente no que tange aos métodos de extração de minérios (Carli, 2013).

Segundo Hartman e Mutmanský (2002), a sequência de etapas de um empreendimento mineral compreende as fases de Pré-Mineração (Prospecção e Exploração), Mineração (Desenvolvimento e Exploração), e Pós-Mineração (Recuperação e Reabilitação da Área). A fase de exploração compreende a retirada propriamente dita dos recursos naturais para fins de beneficiamento, transformação e utilização, através de técnicas específicas denominadas métodos de lavra.

A escolha do método de lavra é um dos principais elementos para análise de viabilidade econômica do empreendimento mineral. Selecionado o método, que pode ser a céu aberto ou lavra subterrânea, este deve ser seguro e produzir condições adequadas para os funcionários, 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 a infraestrutura disponível permitindo atingir uma produtividade máxima e reduzindo o custo unitário (Nilsson, 1987).

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 (Macêdo, Bazante e Bonates, 2001). Há casos ainda em que se faz necessária à alteração do método aplicado a determinado depósito durante o processo de lavra por motivos operacionais, econômicos e/ou ambientais (Bastos, 2013).

Os tipos de lavra mais comumente utilizados são a lavra a céu aberto e a lavra subterrânea, existindo ainda a lavra por dissolução e a lavra submarina. A lavra a céu aberto se caracteriza por realizar uma escavação superficial para extração de minerais com valor econômico agregado, sendo geralmente aplicada a depósitos estratificados, horizontalizados e maciços e veios mergulhando em ângulos maiores do que o ângulo de repouso do material estéril (Bullivant, 1987).

O Polo Gesseiro do Araripe, que é responsável pela produção de cerca de 90% do gesso produzido no Brasil, utiliza o método de lavra *Open Pit Mining* para exploração do minério de gipsita em face do modo de ocorrência das jazidas e de suas características morfológicas. Este método movimenta grandes volumes de material estéril para as pilhas de “bota-fora”, 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 volumosas pilhas de material estéril, implicando na necessidade de áreas de servidão para disposição de tais pilhas, tornando-se esse um gargalo à operacionalização do método já que em algumas minas não há mais disponibilidade de espaço físico para locação do bota-fora.

Além disso, são formadas grandes crateras após a exploração que não permitem a reinserção da área na paisagem natural da região.

Neste cenário, buscando soluções de engenharia para o melhoramento das operações de exploração de gipsita e o favorecimento da sustentabilidade ambiental com a minimização dos impactos ambientais, a empresa Royal Gipso Ltda., em sua Mina Ponta da Serra, substituiu o método *Open Pit Mining* para o *Terrace Mining*. Este método se caracteriza pelo fato de a recuperação da área ser concomitante a lavra e assim não exigir áreas para locação de bota-fora, sendo a deposição do material estéril feita nos terraços anteriormente minerados.

1.1 JUSTIFICATIVA

A atividade de mineração requer, para sua máxima produtividade, um planejamento de produção a curto, médio e longo prazo. Não obstante, nas minerações de pequeno e médio porte não é prática a realização de estudos que contemplem esse princípio, o que é prejudicial implicando em riscos de perdas no processo produtivo, particularmente quando este não se desenvolve em consonância com as características do jazimento, 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 prezem pelo princípio da sustentabilidade.

Assim, é de fundamental importância avaliar metodologias que não comprometam a produtividade e que proporcionem um melhor andamento da atividade de mineração, no que diz respeito à redução dos custos de operacionalização e, permitam que ela seja desenvolvida visando técnicas mais limpas e ambientalmente mais corretas, o que o método de lavra *Open Pit Mining*, apesar de permitir um adequado desempenho técnico e operacional, não atende a totalidade dessas exigências especialmente no concernente à operação de descobertura ou decapeamento. Por outro lado, o método *Terrace Mining* permite, funcionalmente, a utilização mais eficaz do material do capeamento da mina por meio da deposição imediata deste material na cava minerada. Esse fato soluciona o problema de falta de área de servidão para deposição do estéril, e ainda aponta para a redução dos custos com transporte, uma vez que a distância de carregamento do material é reduzida.

Neste contexto, o presente estudo se justifica pela necessidade da otimização dos parâmetros operacionais aplicados à lavra, de modo a avaliar a metodologia *Terrace Mining* considerada a mais adequada para a exploração do jazimento mineral em comparação com o

método de lavra tradicionalmente utilizado, indicando seus benefícios operacionais, econômicos e ambientais e, garantindo assim uma operação mais sustentável à atividade mineral.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise comparativa dos benefícios econômicos, operacionais e ambientais obtidos com a substituição do método de lavra *Open Pit Mining* pelo *Terrace Mining* na lavra do minério de gipsita da Mina Ponta da Serra da empresa Royal Gipso Ltda. no Polo Gesseiro do Araripe em Pernambuco.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar os equipamentos e quantidade de mão de obra necessários à operacionalização dos métodos de lavra *Open Pit Mining* e *Terrace Mining*;
- Analisar as operações unitárias dos métodos de lavra *Open Pit Mining* e *Terrace Mining*;
- Comparar os custos operacionais dos métodos de lavra *Open Pit Mining* e *Terrace Mining*;
- Analisar os aspectos ambientais relacionados à operação de descobertura e recuperação da área degradada no que se refere ao *layout* do *pit* final dos métodos de lavra *Open Pit Mining* e *Terrace Mining*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GIPSITA

O mineral gipsita é classificado como um sulfato de cálcio di-hidratado, de fórmula química $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e composição química teórica de 32,5% de óxido de cálcio (CaO), 46,6% de trióxido de enxofre (SO_3), e 20,9% de água (H_2O). Cristaliza-se no sistema monoclinico e apresenta hábitos fibroso, prismático, lamelar, maciço ou granular; quanto às propriedades físicas, possui clivagem em 4 (quatro) direções, o brilho pode ser vítreo, nacarado ou sedoso, apresenta dureza que varia de 1,5 a 3 na escala de Mohs, densidade relativa de 2,3, e coloração variada: branco a cinza, amarelo, vermelho, castanho, podendo até ser incolor. Ocorre associada a calcários, folhelhos, margas e argilas (Machado et al., 2005).

A gipsita incorpora-se aos depósitos evaporíticos, constituídos por minerais-minérios dos grupos dos cloretos e sulfatos, de Ca-Mg-K, formados por evaporação intensiva de águas salinas em ambientes restritos, geralmente de pouca profundidade e sob climas secos. É um mineral de origem química formado em jazidas sedimentares, abundante nas camadas mais externas da crosta terrestre, e se deposita por processos de evaporação e precipitação. A precipitação produz materiais finamente cristalizados ou amorfos, enquanto a evaporação produz cristais maiores, como ocorre com os depósitos de gipsita denominados de evaporitos relacionados à alta evaporação do solvente (Popp, 2010).

Este mineral geralmente é encontrado em granulação fina a média, estratificada ou maciça, constituindo as denominadas rochas gipsíferas; destas, fazem parte também outros minerais, eventuais e sempre em quantidades subordinadas, entre os quais pode-se destacar anidrita, calcita, dolomita, halita, enxofre, quartzo e argilas. São essas rochas que constituem o que se designa de minério de gipsita, sempre que os teores de SO_3 ou de gipsita presentes satisfazem às exigências do mercado consumidor (Sobrinho et al., 2001).

Os termos “gipsita”, “gipso” e “gesso” são utilizados frequentemente como sinônimos; porém, somente os termos gipsita e gipso podem ser usados como sinônimos denominando o mineral em estado natural, enquanto “gesso” indica o produto industrial calcinado a temperaturas que variam de 160°-180°C, semi-hidratado e conhecido mineralogicamente como bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) (Oliveira et al., 2012). Outro mineral que ocorre em jazidas sedimentares de evaporitos e que pode ser confundido visivelmente com a gipsita é a anidrita, e estas diferem quanto à composição, pois a anidrita não apresenta água em sua estrutura (CaSO_4) (Bastos, 2013).

Segundo Klein e Dutrow (2012), a gipsita apresenta diversas variedades mineralógicas, sendo as mais conhecidas: Espato Acetinado, que possui aspecto fibroso e brilho sedoso; Alabastro, variedade finamente granulada de aspecto maciço, geralmente colorido, muito utilizado em esculturas; e Selenita, variedade placosa, incolor e translúcida, utilizada para produção de acessórios para investigações sobre microscopia óptica.

No Polo Gesseiro do Araripe, em Pernambuco, as variedades de gipsita são conhecidas como: **Cocadinha**, gipsita estratificada com raros filmes de argila verde; **Rapadura**, variedade estratificada que apresenta filmes milimétricos de argila verde; **Estrelinha**, variedade que apresenta cristais radiados em forma de estrela; a gipsita conhecida como **Johnson**, variedade mais pura, com coloração variando de branca a creme e que se caracteriza por apresentar uma estrutura com “nódulos” e “estrelas”; **Alabastro**, de aspecto fibroso, que apresenta problemas na calcinação devido ao seu aspecto que promove uma anisotropia resultando em crepitação e má qualidade ao gesso; **Selenita**, que ocorre na forma de placas; **Boró**, variedade que ocorre como uma mistura de alabastro e argila; **Anidrita**; e **Minério do Piso**, que apresenta coloração mais escura e é utilizado apenas para fabricação de gesso de fundição (Borges et al., 2002). A figura 1 mostra as formas alotrópicas do minério de gipsita.

Figura 1: Variedades Mineralógicas de gipsita: (a) Cocadinha; (b) Rapadura; (c) Estrelinha; (d) Johnson; (e) Alabastro; (f) Selenita; (g) Boró; (h) Anidrita; (i) Minério do Piso



Fonte: Mineração Royal Gipso Ltda. (2016)

De acordo com Calvo (2003), a gipsita é a principal matéria-prima para produção do gesso devido à sua característica de se desidratar e reidratar de forma estável e com boa consistência mecânica. A partir deste mineral são produzidos os gessos *alfa* e *beta*, com processos de fabricação e aplicação bem diferentes. A classificação e seleção da gipsita de acordo com sua destinação podem ser feitas no momento do desmonte da bancada em:

- Tipo A: para fabricação do gesso *alfa* (α), com fins odontológico, ortopédico ou cerâmico;
- Tipo B: para fabricação do gesso *beta* (β), com fins de revestimento, cerâmica ou fundição;
- Tipo C: para refugo ou para uso como corretivo de solo, na forma de gipsita, com partículas de tamanho entre 0 e 5 mm (Oliveira et al., 2012).

Conforme Oliveira et al. (2012), essa classificação do mineral-minério e sua associação com impurezas e textura é extensiva aos tipos de minérios, os quais, conforme observações frequentes em bancadas de exploração atuais distribuem-se da base ao topo da bancada conforme descrito a seguir, acrescentando-se o seu potencial de produção dos principais tipos de gesso ou mesmo aplicações *in natura*:

- **Minério do Piso:** possui coloração mais escura, por isso é aplicado na fabricação de gesso de fundição;
- **Johnson:** é a gipsita branca, de maior grau de pureza e dureza. Nesta variedade ocorre a presença de selenita (cristais bem formados, transparentes e com boa resistência mecânica), sendo então a gipsita de maior valor agregado e utilizada para fazer gesso tipo *alfa*;
- **Estrelinha:** é a variedade que apresenta cavidades com cristalização radial, com coloração marrom, caracterizando também cristalização tardia, mas com impurezas argilosas na polpa salina, também utilizada como minério tipo A;
- **Cocadinha:** estratificada em camadas mais finas, apresentando coloração mais clara, alto teor de alabastro e a menor dureza entre as diversas variedades. É usada como minério tipo B;
- **Rapadura:** variedade estratificada em camadas mais espessas, com dureza intermediária, algum teor de alabastro e coloração mais escura. Pode ser usada como tipo B;
- **Boró:** material de baixa qualidade onde a gipsita se encontra misturada com alto teor de argila. Normalmente é usada como matéria-prima para corretivo de solos para correção de solos alcalinos bem como em solos deficientes em enxofre, sendo então usada como tipo C. Pode também ser utilizado na fabricação do cimento *Portland*, incorporado ao *clínquer* para retardar o tempo de pega.

Na indústria, além da produção de gesso e cimento, a gipsita é utilizada como matéria-prima em diversos processos como carga para papel, na fabricação de tintas, discos, pólvora, botões de fósforos, no acabamento de tecidos de algodão e como distribuidor e carga de inseticidas; pode também ser adicionada à água na fabricação de cerveja para aumentar sua dureza, no polimento de chapas estanhadas e como *filler* em asfalto para estradas. Além disso, a indústria química aplica a gipsita e a anidrita para a obtenção de ácido sulfúrico, enxofre elementar, cloreto de cálcio etc. Porém, o processo de obtenção destes produtos, embora tecnicamente viável, esbarra em uma grande dificuldade de investimentos financeiros (Sobrinho et al., 2001).

2.2 PANORAMA NACIONAL DA GIPSITA

De modo geral, as reservas do mineral gipsita são abundantes na maior parte dos países produtores, os quais correspondem a China (maior produtor mundial em 2014, responsável por 53,7% de toda a produção), Estados Unidos, Canadá, França, Irã, Japão, Tailândia, México e Espanha; entretanto, não se encontram disponíveis dados atuais sobre as reservas mundiais deste mineral (Queiroz Filho, Amorim Neto e Dantas, 2015). Em 2001, as reservas mundiais de gipsita correspondiam a 2.360 milhões de toneladas (Mt), sendo da ordem de 25 vezes o consumo mundial, que se encontra atualmente em torno de 97 Mt/ano (Oliveira et al., 2012).

No Brasil, as reservas onde se localizam os principais depósitos de gipsita ocorrem associadas às bacias sedimentares conhecidas como Bacia Amazônica (Amazonas e Pará), Bacia do Parnaíba (Maranhão e Tocantins), Bacia Potiguar (Rio Grande do Norte), Bacia do Araripe (Piauí, Ceará e Pernambuco) e Bacia do Recôncavo (Bahia). Do total das reservas brasileiras, 96% localizam-se nos estados da Bahia (43%), do Pará (35%) e de Pernambuco (18%), seguidos dos estados do Maranhão (2,7%), Tocantins (0,6%), Ceará (0,3%), Piauí (0,2%) e Amazonas (0,1%) (Oliveira et al., 2012).

De acordo com o *United States Geological Survey* – USGS (2015), em 2014, a produção mundial de gipsita foi de 246 milhões de toneladas (Mt), sendo a China o maior país produtor (132 Mt). O Brasil é o maior produtor da América do Sul e o 13º do mundo, com produção de aproximadamente 3,4 Mt, sendo sua posição no cenário mundial pouco representativa, embora existam reservas de minério da ordem de 400 Mt e um mercado potencial a ser desenvolvido.

O estado de Pernambuco foi o principal produtor em 2014, sendo o Polo Gesseiro do Araripe, localizado neste estado, responsável por 84,3% do total produzido. Os demais estados produtores foram: Maranhão (10,4%), Ceará (2,6%), Tocantins (1,1%), Amazonas (0,8%), Pará (0,5%) e Rio Grande do Norte (0,3%). As empresas que mais produziram gipsita, responsáveis por 63% da produção nacional em 2014, foram: Mineradora São Jorge S/A, Rocha Nobre Mineração LTDA., Mineração Pernambucana de Gipsita Ltda., Alencar & Parente Mineração Ltda., Votorantim Cimentos N/NE S.A, Mineradora Rancharia Ltda., Mineração Alto Bonito Ltda., CBE – Companhia Brasileira de Equipamento, e Royal Gipso Ltda. (Queiroz Filho, Amorim Neto, Dantas, 2015).

O consumo aparente de gipsita no Brasil em 2014 foi de aproximadamente 3,65 Mt, destinado predominantemente para utilização na construção civil, com apenas um pequeno percentual para utilização como corretivo agrícola. O consumo *per capita* vem crescendo, e a tendência/previsão é de contínuo aumento (Queiroz Filho, Amorim Neto, Dantas, 2015).

O preço médio da gipsita *Run Of Mine* (ROM) informado pelos produtores foi de R\$ 23,66/t em 2014. Este preço é considerado baixo, e é ocasionado por diversos fatores, tais como: concorrência acirrada entre as pequenas empresas mineradoras que reduzem a margem de comercialização; a prática de preços que não remuneram devidamente o capital aplicado; a sonegação de impostos; o aumento da oferta em relação à demanda; e a própria estrutura de mercado, pois uma grande parte da venda da gipsita é destinada à indústria cimenteira que atua na extração deste bem mineral sem visar lucro com o objetivo da atividade. Assim, os preços cobrados visam apenas cobrir os custos de produção (Bastos, 2013).

Ainda de acordo com Bastos (2013), a logística, também, é um fator importante. O frete rodoviário para o sul, sudeste e centro-oeste do país torna-se mais caro que a própria matéria-prima. Para que haja a expansão do Polo Gesseiro do Araripe, deve haver o desenvolvimento logístico de transporte na região, já que o modal atual é o rodoviário, o que reduz a competitividade do Polo. A tendência é que as condições de mercado melhorem com a implantação da Ferrovia Transnordestina, permitindo um escoamento com menor custo e maior abrangência para todo o país.

2.3 POLO GESSEIRO DO ARARIPE

No Brasil, os principais depósitos de gipsita do ponto de vista econômico estão localizados na Bacia Sedimentar do Araripe (Aptiano-Albiano) sob a forma de dois horizontes

complexo gesseiro são Araripina, Bodocó, Trindade, Ouricuri e Ipubí, que estão localizados no extremo oeste do estado de Pernambuco. As reservas de gipsita situam-se em duas áreas principais: Trindade-Ipubí-Bodocó-Ouricuri, que é a faixa que se estende de NE a SW; e Araripina, que é a faixa descontínua a sul e sudoeste do município. O aproveitamento destas reservas no Polo Gesseiro gerou um conjunto de atividades empresariais com forte reflexo na economia local, constituindo um *cluster* bastante dinâmico.

Este processo de organização constitui o Arranjo Produtivo Local do Gesso, que é liderado pelo Sindicato da Indústria do Gesso (Sindusgesso), o qual busca investimentos na oferta de infraestrutura (transportes, comunicação e energia), além de apoio tecnológico adequado para que as atividades de mineração de gipsita e fabricação do gesso continuem acontecendo de forma produtiva e sustentável (Bastos, 2013). As reservas de gipsita no Polo Gesseiro são da ordem de 168 Mt, e em 2014 a produção de gipsita *Run of Mine* (ROM) no âmbito nacional foi 3,45 Mt, sendo este Polo responsável por 84,3% desse total (Queiroz Filho, Amorim Neto e Dantas, 2015).

O minério gipsífero do Polo Gesseiro do Araripe classifica-se como de excelente qualidade industrial no concernente à concentração de sulfatos, que é da ordem de 90 a 95%, enquanto as impurezas de origem terrígena se apresentam em quantidades desprezíveis, raramente ultrapassando o teor de 0,5% no minério. Embora a gipsita seja predominante, também se fazem presentes quantidades subordinadas de anidrita, em geral de 4 a 7%, podendo às vezes chegar até 14% (Menor et al., 1995). Apesar da excelente qualidade do minério, a falta de conhecimentos de dados quantitativos propicia uma carência de investimentos no mercado no que diz respeito a produtos mais nobres e com maior valor agregado, pois a maior parte da gipsita beneficiada é aplicada no suprimento das demandas do mercado da construção civil e a gipsita *in natura* é utilizada nos setores cimenteiro e agrícola.

Ainda assim, segundo dados do Sindusgesso (2014), o Polo Gesseiro do Araripe movimenta cerca de US\$ 1,4 bilhões/ano, e gera 13.900 empregos diretos e aproximadamente 69 mil indiretos, resultantes da atuação de 42 minas de gipsita, 174 indústrias de calcinação e cerca de 750 indústrias de pré-moldados.

As minas de gipsita do Polo Gesseiro apresentam as melhores condições geológicas e de localização para extração do minério, pois os processos de formação geológica originaram depósitos tabulares e com relação estéril/minério (REM) relativamente pequena, em torno de 1:4 ou 1:5, o que torna a retirada do minério bastante viável; em algumas minas esta relação pode ser da ordem de 1:2, mas, sendo o minério de melhor qualidade (tipo A), seu valor comercial custeia a produção, viabilizando a extração (Oliveira et al., 2012).

Apesar de toda a representatividade no cenário nacional quanto aos fatores econômicos e sociais, existe uma preocupação com relação ao significativo impacto ambiental causado pela atividade de extração mineral na região do Araripe, o que é devido principalmente ao modo como a lavra é realizada em praticamente em todas as minas. A lavra é realizada a céu aberto pelo método *Open Pit Mining* com bancadas que variam de 10 a 20 metros; apesar da baixa relação/estéril minério, há muita movimentação de material estéril, e pelo método de lavra utilizado tal material é depositado em áreas que se localizam fora do *pit* de exploração, formando assim grandes pilhas de bota-fora, sendo um dos fatores que ocasiona o impacto ambiental supracitado.

2.4 OPERAÇÕES UNITÁRIAS DE LAVRA

O Departamento Nacional de Produção Mineral define a mineração como uma atividade de natureza fundamentalmente econômica que, também, é referida, em um sentido lato, como indústria extrativa mineral ou indústria de produtos minerais. O objetivo desta atividade é descobrir os recursos existentes, transportar o material extraído da jazida por meio de operações de lavra, quer seja a céu aberto quer seja subterrânea, até diferentes pontos de descarga, deixando o material extraído em condições próprias para ser utilizado pelas indústrias de beneficiamento do mesmo (DNPM, 2011).

A atividade mineradora possui algumas peculiaridades que a diferencia das demais atividades industriais, e sendo esta o ponto de partida para as cadeias industriais de vários segmentos, conseqüentemente, exige uma abordagem diferenciada. A mineração é uma atividade extrativa que trabalha com recursos naturais não renováveis, o que implica em buscá-los onde eles se encontrarem (Girodo, 2005). Decorrente desta afirmativa, a atividade mineradora inevitavelmente é transitória, cuja duração depende do volume do depósito e da taxa de extração.

Cada depósito é singular, o que implica em dizer que cada jazida possui as suas características próprias, diferentes de lugar para lugar, pois muitas vezes algumas características como o teor mineral, distribuição granulométrica e quantidade de estéril variam de local para local dentro de uma mesma jazida. Assim, conclui-se que cada mina exige um projeto próprio e a tecnologia mineral deve ser desenvolvida em cada local de forma diferente, levando sempre em consideração as características predominantes do mesmo. Ao fim da vida de um empreendimento, todas as medidas de reparação do dano mineral incorrido devem ser tomadas caso esse processo não tenha sido realizado durante a sua vida útil.

O desenvolvimento de um empreendimento mineiro envolve diversas fases que estão interligadas entre si e que vão desde a procura e descoberta de ocorrências minerais com possível interesse econômico até a reabilitação da área minerada após a exaustão da mina (Dutra, 2014). Segundo Hartman e Mutmanský (2002) e Herrmann (2006), tais etapas obedecem a uma sequência de realização que compreende as fases de Pré-Mineração (prospecção e exploração), Mineração (desenvolvimento e exploração), e Pós-Mineração (recuperação e reabilitação da área), conforme detalhado na tabela 1.

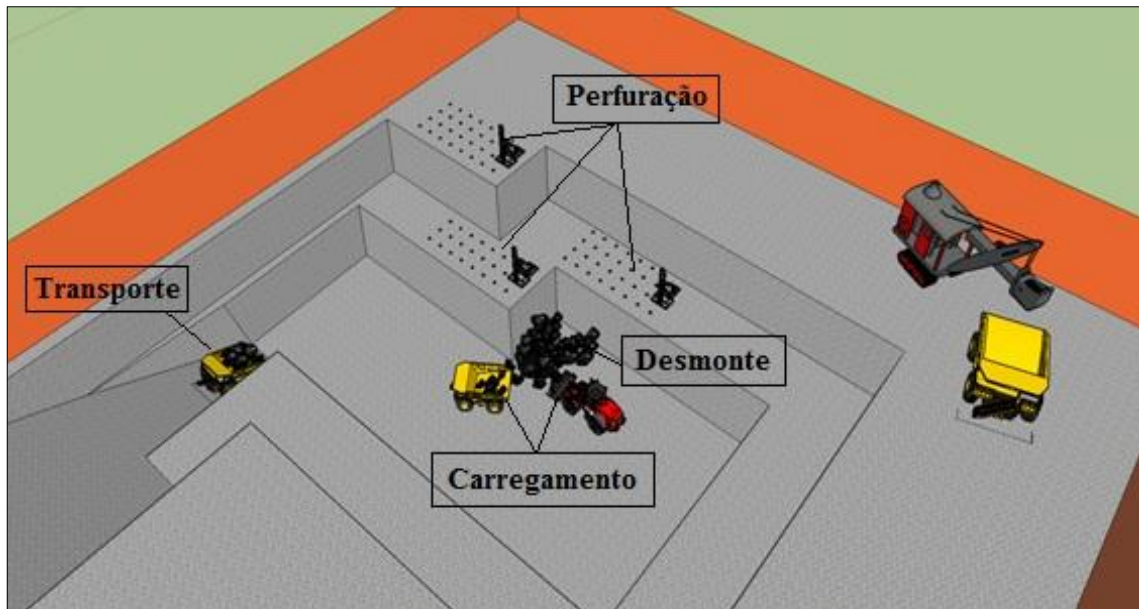
Tabela 1: Resumo das fases de um empreendimento mineral

FASE	PROCEDIMENTOS	TEMPO
PRÉ-MINERAÇÃO		
PROSPECÇÃO (Depósito Mineral)	Procura do minério: a) Métodos de Prospecção Diretos: físicos, geológicos; Indiretos: geofísicos e geoquímicos. b) Localização favorável (mapas, literatura, minas antigas); c) No ar: fotografia aérea, satélite; d) Na superfície: geofísica e geologia; e) Anomalias locais, análises, avaliação.	1 – 3 anos
EXPLORAÇÃO (Corpo Mineral)	Definição do valor e extensão do minério: a) Amostra (perfuração ou escavação), ensaios e testes; b) Estimativa da tonelagem e teor; c) Avaliação econômica do depósito. Avaliação de mercado para tomada de decisão.	2 – 5 anos
MINERAÇÃO		
DESENVOLVIMENTO (Perspectivas)	Abertura do depósito mineral para produção: a) Aquisição ou locação de direitos minerários, se não houver sido realizado na fase anterior; b) Classificação dos impactos ambientais; c) Decapeamento da área; d) Construção dos acessos, sistemas de transporte; e) Construção de instalações.	2 – 5 anos
LAVRA (Mina)	Produção de minério em larga escala: a) Fatores para escolha do método: geológico, econômico, ambiental, social e de segurança; b) Tipos de métodos de mineração: Em superfície: <i>Open Pit</i> , <i>Open Cast</i> etc. Em profundidade: <i>Room and Pillar</i> , <i>Block Caving</i> etc. c) Monitorizar custos e recuperação econômica	3 – 10 anos
PÓS-MINERAÇÃO		
RECUPERAÇÃO	Restauração da área: a) Remoção da planta e edificações; b) Recuperação dos resíduos e refugos; c) Trabalhos de recuperação da área degradada.	1 – 10 anos

Fonte: Hartman e Mutmanský (2002)

A lavra consiste no conjunto de operações unitárias coordenadas que objetiva o aproveitamento econômico de uma jazida. Tais operações compreendem: perfuração, desmonte de rocha, carregamento e transporte, e ocorrem concomitantemente, com exceção do desmonte quando realizado com explosivos, que exige a retirada do pessoal e maquinário da área a ser desmontada por razões de segurança (DNPM, 2004). A figura 3 ilustra uma esquematização do ciclo de operações unitárias.

Figura 3: Operações unitárias da exploração de uma jazida ocorrendo em bancadas



Fonte: Autora (2017)

Antes da lavra propriamente dita, ou concomitante a essa fase, faz-se necessário realizar o desenvolvimento mineiro, o qual compreende os trabalhos de abertura de uma jazida para que a lavra ocorra de forma otimizada. O principal objetivo do desenvolvimento é prover acesso à jazida, permitindo a entrada de pessoal, equipamentos, suplementos, energia e saída do minério e estéril produzidos. Antes do início da fase de exploração, o desenvolvimento é limitado à construção de aberturas primárias ou principais, construção de estruturas, contratação de pessoal e serviços que suportam a lavra e, se necessário, as funções de processamento (Motta, 2002).

Na lavra a céu aberto, o acesso ao minério, coberto pelo estéril ou solo de superfície, é obtido pela operação de decapeamento ou descobertura, que consiste na retirada do material estéril para exposição do corpo mineralizado, bem como a movimentação de material com teores abaixo do teor econômico (teor de corte). O material pode ser composto de solo, argila ou rocha alterada (DNPM, 2004).

Como o material da cobertura apresenta-se geralmente inconsolidado, o decapeamento é realizado utilizando combinações de equipamentos como escavadeiras (*shovels* e *draglines*), escavotransportadoras (*scrappers* e mineradores contínuos – BWE), tratores, caminhões, trens, e transportadores por correias, que formam os chamados Sistemas de Descobertura, os quais podem ser: *Truck-Shovel*, *Shovel-Train*, *Rippers* e *Scrappers*, *Bucket Wheel Excavator* etc., e são selecionados de acordo com fatores geomecânicos, geomorfológicos, econômicos e ambientais. Porém, quando o capeamento apresenta alta resistência mecânica a ponto de

inviabilizar a operação direta dos equipamentos, é necessário realizar a fragmentação prévia do material através do desmonte com explosivos para posterior remoção com os equipamentos disponíveis (Souza, 2001).

Após a exposição do corpo mineral realiza-se a perfuração, que tem por objetivo a abertura de furos com distribuição e geometria adequadas dentro dos maciços para alojar as cargas de explosivos e acessórios iniciadores. Os diferentes métodos de perfuração de rochas se classificam em perfuração percussiva, perfuração rotativa (figura 4), perfuração rotopercussiva (*Top-Hammer* e *Down The Hole*), e perfuração térmica (Silva, 2009). A seleção da perfuratriz é feita de acordo com a perfurabilidade da rocha (medida pelo avanço em m/min), a qual tem relação direta com o custo de penetração: geralmente o custo mais baixo é obtido em rochas brandas até nas de dureza média com perfuração rotativa, em rocha dura com perfuração rotopercussiva, e em rocha muito dura com perfuração térmica (Souza, 2001).

Figura 4: Operação de perfuração com carreta de perfuração rotativa



Fonte: Magno (2014)

A operação de desmonte de rochas (figura 5) pode ser realizada por escavação com equipamentos (desmonte mecânico) ou com explosivos (desmonte por explosivos). No desmonte mecânico, o material é escavado de forma direta utilizando a força mecânica das escavadeiras, pás-carregadeiras ou tratores, que é suficiente para desagregar o insumo mineral (DNPM, 2004). Já no desmonte por explosivos são utilizados os princípios e força dos explosivos com o objetivo de converter a rocha em vários fragmentos menores para que estes possam ser escavados, transportados e britados pelos equipamentos disponíveis, sendo necessário, para isso, obter fragmentação suficiente, deslocamento, movimentação e lançamento da pilha, redução dos problemas ambientais, e mínimo de dano ao maciço remanescente. Esse método de desmonte é empregado em rochas coesas, que são altamente resistentes para serem desmontadas por escavação direta (Silva, 2009).

Figura 5: Operação de desmonte com explosivos e desmonte mecânico



Fonte: Magno (2014)

Por vezes a fragmentação primária do maciço rochoso não é suficiente para obtenção do material com granulometria adequada para as operações subsequentes. Assim, torna-se necessário realizar a operação de desmonte secundário com o objetivo de ajustar tal material às dimensões apropriadas. Os fatores que incorrem nessa fragmentação insuficiente compreendem dureza da rocha, fragmentações ocultas, malha de perfuração e razão de carregamento inadequadas. O desmonte secundário pode ser executado, basicamente, através de três técnicas: utilizando rompedor hidráulico (figura 6), que é um equipamento de impacto que quebrará o bloco de rocha em tamanhos menores; *drop-ball*, que consiste em lançar uma esfera de aço de peso elevado sobre o bloco de rocha para fragmentá-lo; e o fogacho, em que os blocos de rocha são perfurados com martelo pneumático e os furos são carregados com pequenas quantidades de explosivos para serem detonados e assim obter-se o tamanho final desejado (Hustrulid, Kuchta e Martin, 2013).

Figura 6: Operação de desmonte secundário com martelo hidráulico



Fonte: Autora (2016)

O carregamento (figura 7) é a etapa em que o material resultante do desmonte é carregado nas unidades de transporte. É realizado pelas escavadeiras de caçamba única (pás

carregadeiras, *shovels* e *draglines*) e de caçamba múltiplas (pá mecânica de roda frontal giratória ou *Bucket Wheel Excavator* e as dragas de caçamba em linha). A seleção do melhor equipamento é determinada por diversos fatores, sendo o principal deles a escavabilidade do solo, que por sua vez depende da dureza do solo intacto, resistência mecânica, propriedades abrasivas dos minerais constituintes, densidade *in situ* e empolado, grau de preparação do solo, fragmentação etc. (Souza, 2001).

Figura 7: Operação de carregamento com escavadeira



Fonte: Magno (2014)

A operação de transporte (figura 8) compreende o transporte do material desmontado até a usina de beneficiamento ou pátio de estocagem, bem como o transporte do material do capeamento até o depósito de estéril (bota-fora); caracteriza-se por grandes massas a serem transportadas, pequenas distâncias e pequenas velocidades (DNPM, 2004). As unidades de transporte pertencem quase que totalmente aos ramos convencionais (rodoviário, ferroviário e hidroviário), podendo, também, ser os não convencionais, como oleodutos, gasodutos, minerodutos e transportador por correias, sendo a seleção do tipo definida por três fatores básicos: características do jazimento (determinam o método de acesso e sistema de exploração, comprimento das vias, inclinações etc.), tamanho da exploração (determina a capacidade necessária dos meios de transporte), e intensidade de condução dos trabalhos (Souza, 2001).

Figura 8: Operação de transporte com caminhões fora-de-estrada e por correias transportadoras



Fonte: Magno (2014)

A correta execução das etapas do processo de exploração de um minério requer estudos para a definição de fatores de ordem técnica, econômica, ambiental e legal, tais como:

- ❖ Topografia e características naturais e geológicas do corpo mineral, tipos do minério, distribuição espacial do minério e estéril, hidrogeologia, características ambientais da localização da mina, características metalúrgicas do minério etc.;
- ❖ Fatores econômicos: custos operacionais e de investimento, razão de produção, condições de mercado etc.;
- ❖ Fatores legais: regulamentações local, regional e nacional, políticas de incentivo à mineração etc.;
- ❖ Fatores tecnológicos: seleção de equipamentos para a lavra, ângulos de talude, altura de bancada, inclinação de rampas etc.

A necessidade da conexão entre fatores tão distintos ressalta a complexidade das operações envolvidas na exploração de um bem mineral e, por consequência, a importância do planejamento criterioso de tais operações (Curi, 2014). É importante ressaltar que a capacidade desta atividade em fornecer material para a sociedade não é infinita visto que esta faz uso de materiais não renováveis, sendo então de fundamental importância que todos os processos que englobam um empreendimento mineral sejam previamente analisados, objetivando assim a retirada mais completa, mais segura e mais eficaz da massa mineral.

2.4.1 Métodos de Lavra a Céu Aberto

O conceito de lavra de minas é definido legalmente no artigo 36 do regulamento do Código de Mineração como o conjunto de operações coordenadas que objetiva o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração das substâncias minerais úteis que contiver até o beneficiamento (Brasil, 1968).

A lavra a céu aberto se caracteriza por realizar uma escavação superficial para extração de minerais com valor econômico agregado, podendo ser empregada para minerais metálicos e não-metálicos em jazidas aflorantes, de capeamento relativamente reduzido (cuja remoção resulte mais econômica que a lavra subterrânea), jazidas acessíveis em encosta e aquelas lavráveis por poços de extração, e com quantidade que varia de poucas até milhões de toneladas. É geralmente aplicada a depósitos estratificados horizontalizados ou pouco inclinados, depósitos do tipo veio aflorante estreito ou possante mergulhando em ângulos maiores do que o ângulo de repouso do material estéril para evitar escorregamento deste para dentro da cava e com limites compatíveis com manutenção econômica dos taludes impostos

pela segurança dos serviços, e depósitos maciços de considerável profundidade (geralmente até 150 metros) e extensão lateral passíveis de serem lavrados por bancos, em flanco ou em cavas (Bullivant, 1987; Curi, 2017).

Os tipos de lavra existentes são basicamente a lavra a céu aberto e a lavra subterrânea. A maioria dos minerais de minério do mundo são explotados pelos métodos de lavra a céu aberto, visto que estes proporcionam maior produtividade a um menor custo por tonelada, além de permitir maior recuperação do mineral de minério e maior segurança na execução das operações unitárias (Adler et al., 1992). Segundo Hartman e Mutmanský (2002), outros dois fatores de preferência à lavra a céu aberto relacionam-se à possibilidade de aumento constante da eficiência nas operações unitárias executadas, além da dificuldade crescente em se encontrar depósitos que possam ser lavrados economicamente pelos métodos subterrâneos, mesmo com aumento dos custos de reabilitação ambiental das últimas décadas.

No Brasil, a predominância da lavra a céu aberto é absoluta, sobretudo em virtude dos megaprojetos de minérios metálicos e do setor de agregados para a construção civil. De acordo com o *ranking* anual das 200 maiores minas brasileiras publicado em 2015, têm-se entre os minerais metálicos 26 minas de minério de ferro, 14 de bauxita, 12 de ouro, 4 de cobre e 3 de níquel; entre os agregados, têm-se 45 minas que produzem brita, 43 minas de calcário para cimento e 16 de areia e areia industrial; com relação aos minerais industriais, 5 de fosfato, duas de gipsita e duas de caulim (Young, 2015).

Para Morrison e Russell (1973), a lavra a céu aberto permite uma ampla flexibilidade com relação à produção, a qual inclui a habilidade de lavar seletivamente e o potencial para extração de 100% do minério dentro dos limites da cava (*pit*). Assim, menos mão-de-obra é exigida, pois a mecanização permite alta produção unitária e maior segurança do que a lavra subterrânea.

Existem várias formas de se lavar um depósito mineral, designados métodos de lavra, sendo estes definidos como a sistematização e coordenação das várias operações unitárias visando ao aproveitamento de uma jazida mineral. O método de lavra deve definir os diversos ciclos de trabalho e a sequência espacial da evolução da lavra para, em função do tempo, viabilizar o melhor aproveitamento possível da jazida em questão, estando dessa forma sempre correlacionado à configuração geométrica da jazida e também à sequência de avanço estabelecida conforme os volumes requeridos (Curi, 2017).

É possível destacar cerca de dez métodos de lavra principais. Os métodos são limitados pela disponibilidade e desenvolvimento dos equipamentos, e todos os fatores que influenciam em sua seleção devem ser avaliados considerando os aspectos tecnológico,

técnico, social, econômico e político. A escolha do método de lavra é um dos principais elementos para análise de viabilidade econômica, constituindo-se fator preponderante para uma resposta positiva do projeto (Macêdo, Bazante e Bonates, 2001).

O processo de seleção do método deve levar em consideração a avaliação das características físicas e geométricas do depósito, particularidades do minério, presença de água, considerações geotécnicas, e condições geológicas, operacionais, ambientais e sociais para permitir a eliminação de alguns métodos que não sejam condizentes com os critérios desejados. Uma vez escolhido o método, este deve ser seguro e produzir condições de trabalho adequadas aos funcionários, segurança e estabilidade durante a vida útil da mina, minimizar os impactos causados ao meio ambiente, e ser flexível às condições geológicas e à infraestrutura disponível, permitindo atingir uma máxima produtividade a um custo unitário reduzido (Macêdo, Bazante e Bonates, 2001).

O método de lavra ideal deve ser aquele que atenda aos condicionantes econômicos e sociais – extração completa, segura e com o menor impacto ambiental possível. Entretanto, além de mutuamente dependentes, tais condicionantes podem ser conflitantes no sentido de que um método de menor recuperação pode ser economicamente mais vantajoso que outro que possibilite maior aproveitamento da reserva mineral, e de que a mitigação dos impactos envolve despesas suplementares que tendem a diminuir os lucros (Curi, 2017).

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 (Macêdo, Bazante e Bonates, 2001). 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 (Bastos, 2013).

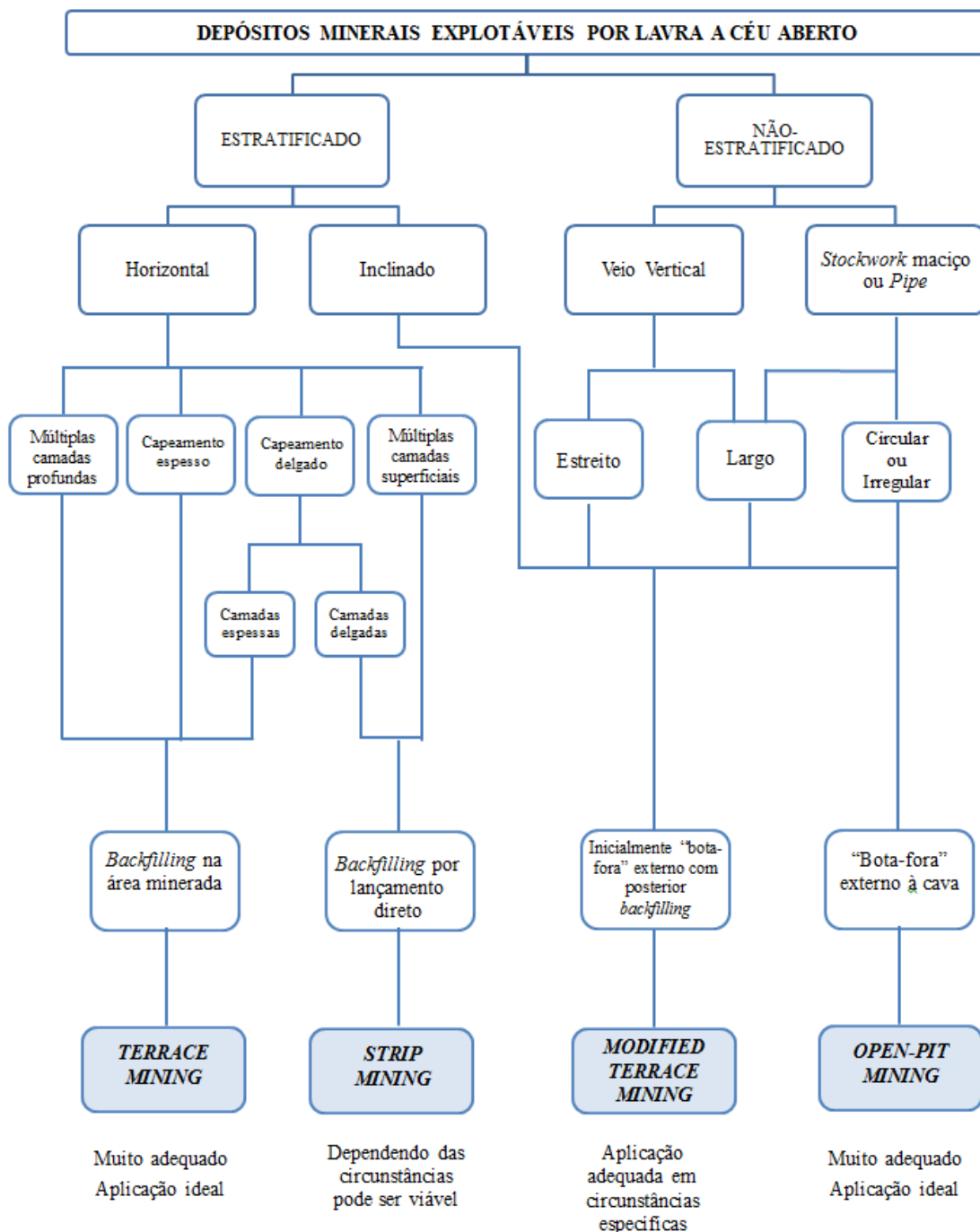
Atualmente existem diversas combinações de técnicas e equipamentos para realização das operações unitárias necessárias à extração de diversos minerais de interesse econômico as quais se subdividem em tipos de lavra a céu aberto, e estes por sua vez originam os métodos de lavra, que podem ser de exploração a seco ou exploração por via úmida (em meio aquoso). Os tipos de lavra a céu aberto, de acordo com Hartman et al. (1992), incluem a lavra manual, lavra hidráulica, e a lavra por bancos, que pode ser em cava ou em encosta.

Com relação aos métodos de lavra, há basicamente duas classificações: a classificação australiana, do *Australasian Institute of Mining and Metallurgy (The AusIMM)*, que agrupa os métodos considerando essencialmente o tipo e a localização dos depósitos (Sweet, 1984), e a classificação americana, instituída pela extinta *United States Bureau of Mines (USBM)*, hoje

denominada *United States Geological Survey* (USGS), que distribui os métodos levando em consideração a geometria da jazida (Bullivant, 1987).

A USBM classificou os métodos de lavra como pode ser visto no organograma da figura 9. Este sistema de classificação geral considera os tipos de depósitos estratificados, o modo como essas camadas estão dispostas, a espessura do capeamento e os meios pelos quais o estéril é manuseado quanto à forma de disposição, que pode ocorrer na área minerada ou em sistemas de disposição externos (bota-foras).

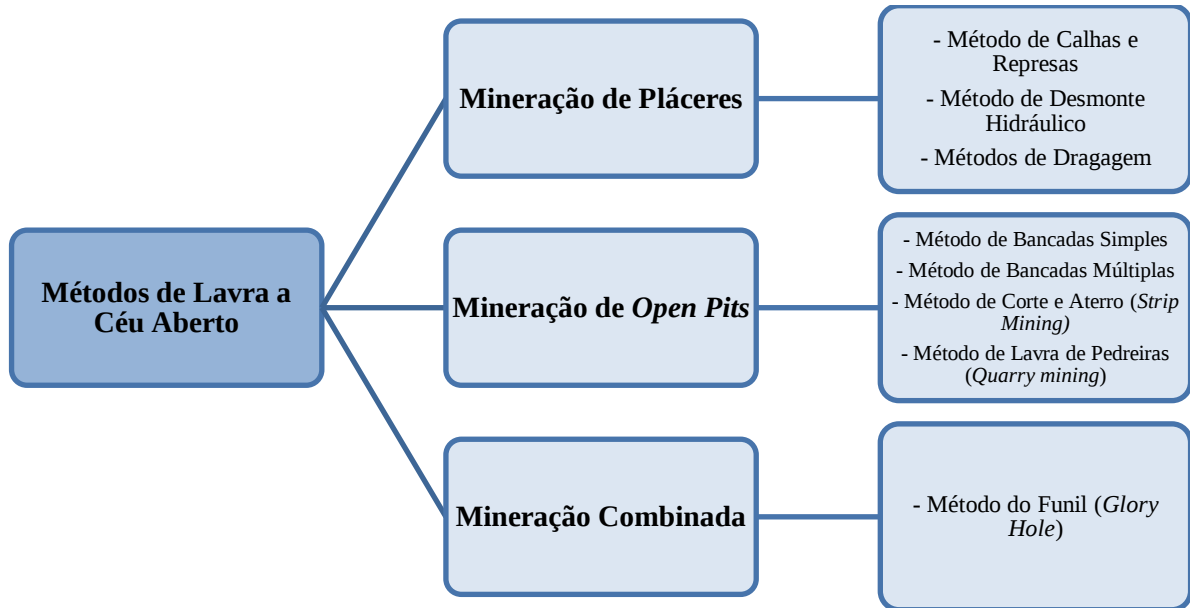
Figura 9: Classificação americana dos métodos de lavra a céu aberto



Fonte: Bullivant (1987)

Já a classificação australiana dos métodos de lavra, determinada pelo *AusIMM*, agrupa os métodos como pode ser visto na figura 10:

Figura 10: Classificação australiana dos métodos de lavra a céu aberto



Fonte: Souza (2001)

Além dessas classificações, Bohnit (1992) *apud* Iramina (2015) dividiu os métodos de lavra a céu aberto em classes e subclasses conforme a necessidade ou não da presença de água para exploração do minério, conforme a tabela 2.

Tabela 2: Classificação dos métodos de lavra a céu aberto

Classe	Subclasse	Métodos
Métodos de Extração Mecânica (exploração a seco)		Lavra em cava (<i>Open Pit Mining</i>)
		Lavra em tiras (<i>Strip Mining</i>)
		Lavra de pedreiras (<i>Quarry Mining</i>)
		Lavra de poço em fundo de cava (<i>Glory Hole</i>)
		Lavra a trado (<i>Auger Mining</i>)
Métodos de Extração em Meio Aquoso (via úmida)	Aluvião (<i>Placer</i>)	Bateamento (<i>Panning</i>)
		Lavra por calhas (<i>Sluicing</i>)
		Desmonte hidráulico (<i>Hydraulic Mining</i>)
		Dragagem (<i>Dredging</i>)
	Em solução (<i>Solution</i>)	Técnicas superficiais (<i>Surface technique</i>)
		Lixiviação <i>in situ</i> (<i>in situ leaching</i>)

Fonte: Iramina (2015)

Entre esses métodos, os que mais se destacam são os de exploração a seco, cujas operações unitárias de lavra são executadas por equipamentos convencionais e em que o uso da água não é imprescindível; estima-se que os métodos mecânicos sejam responsáveis por mais de 90% do volume de produção da mineração a céu aberto em todo o mundo, englobando a grande maioria da produção mineral de carvão, rochas industriais e minerais metálicos em geral. Em termos da tonelagem produzida e da aplicação, os métodos de lavra por bancadas e por tiras ocupam o primeiro lugar entre os mais importantes a céu aberto, e empregam, de modo geral um ciclo convencional de operações (perfuração, desmonte geralmente com explosivos, carregamento e transporte) para lavrar o minério, porém as pedreiras utilizam metodologias específicas, sendo o desmonte executado de modo alternativo normalmente sem o uso de explosivos (Curi, 2017).

Nos métodos de exploração por via úmida, é necessária a utilização da água (ou de um líquido solvente) para o processo de recuperação mineral, seja pela ação da força hidráulica, seja pelo ataque químico de uma solução solvente (Curi, 2017). Segundo Hartman e Mutmanský (2002), esses métodos são responsáveis por apenas 10% de toda a produção mineral a céu aberto, porém alguns ainda são atrativos devido ao seu custo relativo muito baixo. A classe de exploração em meio aquoso é composta por duas subclasses: a lavra de placer, que envolve a recuperação de minerais densos originados principalmente de depósitos do tipo placer através dos métodos de lavra hidráulica e dragagem utilizando água para escavar, transportar e/ou concentrar o mineral, e a lavra por dissolução, aplicada na extração de minerais solúveis ou minerais fundidos ou que podem ser transformados em polpa através dos métodos de lavra química e extração por poço.

De todas as variações dos métodos de lavra a céu aberto mecânicos disponíveis, os mais comuns e de maior produção são os apresentados na classificação realizada pela USBM (*Open Pit*, *Strip Mining* e *Terrace Mining*).

2.4.1.1 Lavra em Cava (*Open Pit*)

Esse tipo de mineração a céu aberto é utilizado para lavrar depósitos minerais irregulares e íngremes com mergulho acentuado em qualquer tipo de rocha aflorante ou próximo à superfície. São os métodos mais indicados para minerar corpos de minério de grandes dimensões horizontais, que permitam altas taxas de produção e assim baixos custos unitários de produção. Neste método de lavra, o capeamento estéril é removido de modo a expor o minério e transportado para uma área de depósito, denominada bota-fora, que se

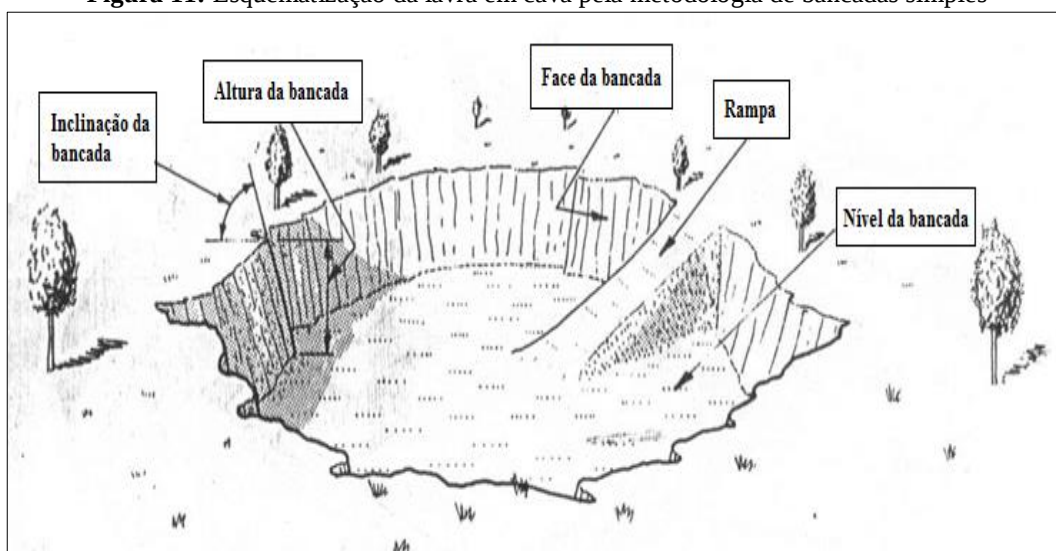
localiza nas imediações da cava, devendo ser o mais próximo possível a essa para diminuir os custos de transporte; tal operação é denominada decapeamento (Souza, 2001).

Dentre os fatores que determinam o *layout* da cava pode-se citar: orientação do depósito, razão de descobertura, taxa de produção requerida e equipamento disponível. Já com relação aos fatores de controle em mineração os mais importantes são: custo de mineração, recuperação do minério e diluição. Para este tipo de método tem-se alguns tipos de metodologia de desenvolvimento da cava que otimizam o processo de extração, tais como: lavra através de bancadas simples e através de bancadas múltiplas (Souza, 2001).

Na lavra em cava, tanto o decapeamento quanto a lavra propriamente dita são desenvolvidos em uma ou mais bancadas sequenciais. Uma bancada corresponde a um nível de operação acima do qual o minério ou o estéril é escavado de um banco contíguo ou da face da bancada. Se o depósito mineral e o capeamento são relativamente pouco espessos, apenas uma bancada pode ser suficiente; entretanto, a exploração de um depósito profundo ou espesso requer um número proporcionalmente maior de bancadas (Peroni, 2007).

A metodologia utilizando bancadas simples (figura 11) é empregada para minerar qualquer tipo de depósito superficial em qualquer tipo de rocha, sendo utilizada geralmente em depósitos de areia e cascalho, exposições superficiais de rochas ornamentais e depósitos de agregados para construção civil, como as minerações de gipsita do Polo Gesseiro do Araripe em Pernambuco. A altura máxima da bancada e inclinação do talude dependem do tipo de rocha que forma a bancada, sendo especificadas pelas regulamentações de cada país e não devem exceder 20 metros de altura. A produção é limitada apenas pela capacidade dos equipamentos que são utilizados na cava e pelo número de frentes de lavra (Bullivant, 1987).

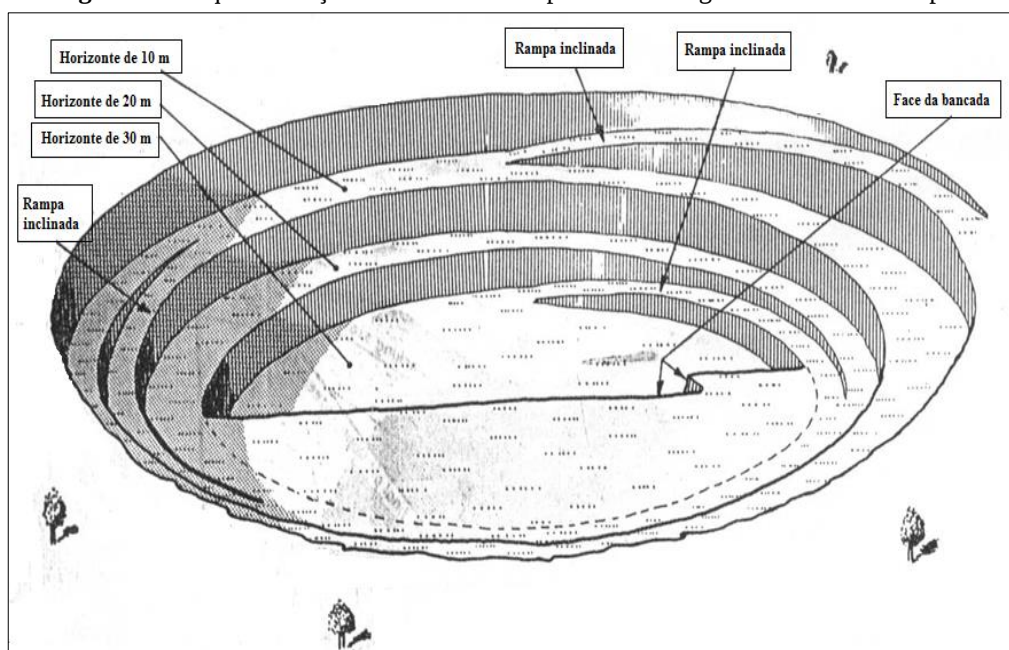
Figura 11: Esquematisação da lavra em cava pela metodologia de bancadas simples



Fonte: Sweet (1984)

Já a metodologia de bancadas múltiplas (figura 12) é mais indicada para os depósitos massivos, de grande espessura, de grande largura lateral e para depósitos tabulares espessos com profundidade superior ao possível uso com a utilização de bancadas simples, sendo empregada quando a profundidade da cava é superior a uma variação de 8 e 15 metros, e as alturas variam de 6 a 20 m. Este método pode ser empregado para lavrar material rochoso de qualquer tipo suficientemente resistente para permitir o desenvolvimento de sucessivas bancadas de altura econômica e segura em material consolidado até rocha dura (Curi, 2017).

Figura 12: Esquematisação da lavra em cava pela metodologia de bancadas múltiplas



Fonte: Sweet (1984)

As conexões em um padrão de bancadas sequencial são realizadas através de rampas de transporte que não possuem elevação constante, mas atravessam uma série de elevações com um número mais ou menos constante de bancos entre rampas. As rampas devem ser largas o suficiente para acomodar os equipamentos de escavação e transporte; portanto, a inclinação geral é menor do que a inclinação interrampas, que é menor do que o ângulo da face da bancada, o que fornece um talude de trabalho menor que a inclinação final do pit final (McCarter et al., 1992).

Dessa forma, nesse método de lavra o desenvolvimento é sempre realizado descendentemente, através de uma série de bancadas consecutivas, iniciando-se pela preparação da bancada situada na cota mais elevada após os trabalhos de supressão vegetal, remoção e estocagem de solo para futura utilização e construção das vias de acesso ao local. Desenvolvida a primeira bancada, passa-se sucessivamente à segunda, terceira, quarta etc. até

se chegar à última necessária, e cada nova bancada consecutiva deve possuir um raio menor que a situada imediatamente acima, pois devem ser considerados os fatores de estabilidade de talude. Neste contexto, obtém-se uma cava que se assemelha, grosseira e esquematicamente, a um formato piramidal ou cônico invertido (McCarter et al., 1992).

Os ângulos de talude são determinados com base em análises geotécnicas e nas características intrínsecas do material escavado, e estes devem impor condições de segurança para que haja o aprofundamento da cava; a seleção de um ângulo inapropriado, muito grande ou muito pequeno, terá consequências muito maiores para as cavas que se aproximem de uma profundidade de 300 m do que para cavas com profundidades na ordem de 30 a 90 m, pois a instabilidade do maciço causada por ângulos muito íngremes pode comprometer toda a operação, e se eles são muito rasos, o custo do decapeamento pode ser excessivo, resultando em perda de receita e baixa recuperação de minério (Peroni, 2007).

A lavra por bancadas possibilita a existência de diversas frentes de exploração e maiores extensões de face livre mineralizada exposta, permitindo que seja realizada uma operação contínua e sustentável e a produção seja mais previsível e homogênea, além de flexibilidade nas operações. Após o avanço da descobertura e exposição do minério, as operações de remoção do estéril e lavra do minério são conduzidas e coordenadas de modo que a receita obtida com a venda do minério seja suficiente para contrabalançar os custos de remoção do estéril, e ao mesmo tempo atingir os objetivos de longo prazo (Curi, 2017).

As dimensões das bancadas individuais devem ser projetadas de modo a acomodar os equipamentos de movimentação de material utilizados para lavar o depósito; sua altura é limitada pelo alcance da escavadeira, e sua largura deve ser suficiente para acomodar o material fragmentando proveniente do desmonte além de prover espaço suficiente para as operações e manobras dos equipamentos gerais de carregamento e transporte (Peroni, 2007).

A mineração *Open Pit* por bancadas constitui-se um método de lavra de operação em grande escala, pois proporciona alta produção e é responsável por mais de 60% de toda a produção da lavra a céu aberto, envolvendo o transporte de quantidades moderadas a grandes de material estéril e minério para fora da cava a distâncias relativamente longas com declividades elevadas. As distâncias médias de transporte ao longo da vida útil da mina precisam ser convenientemente determinadas, pois são pré-requisitos que interferem na configuração/projeto da cava, na seleção e dimensionamento dos equipamentos e nas taxas de produção requeridas (Hartman e Mutmanský, 2002).

Os teores médios dos minérios da maioria das *commodities* minerais normalmente apresentam-se muito baixos, e devido a este fato a produtividade dos equipamentos deve ser

alta a fim de compensar os custos de produção; no entanto, deve-se procurar ter taxas de remoção de estéril a níveis modestos, mantendo a relação estéril/minério variando entre 0,8 m³/t e 4 m³/t. Os limites de profundidade são intermediários, geralmente não ultrapassando os 300 m, porém, o crescente desenvolvimento tecnológico dos equipamentos com consequente redução progressiva dos custos operacionais tem permitido que esse limite seja ultrapassado e maiores profundidades vem sendo cada vez mais atingidas (Hartman e Mutmanský, 2002).

A sequência de desenvolvimento para uma lavra por bancadas inclui: determinação da distribuição tridimensional dos teores da mineralização; estabelecimento dos limites econômicos para o *pit*; seleção de locais adequados para locação das pilhas de estéril e barragens de rejeito; limpeza do terreno com supressão vegetal e remoção e estocagem do solo retirado para reabilitação da área lavrada e do seu entorno; localização das pilhas de estéril, oficinas, escritórios, depósitos provisórios de minério, instalações de beneficiamento e demais instalações necessárias fora dos limites da cava final projetada, mas em suas proximidades para diminuição dos custos de transporte; seleção e aquisição de equipamentos de acordo com a necessidade e abertura das vias de acesso; descobertura inicial para exposição e exploração do minério. As operações de decapeamento e a produção de minério prosseguem concomitantemente de acordo com uma relação estéril/minério em função dos planejamentos de lavra de curto, médio e longo prazos definidos (McCarter et al., 1992).

As atividades inerentes à lavra em cava incluem três principais: remoção do estéril, lavra do minério (ou material de interesse) e operações auxiliares. O ciclo de operações unitárias padrão é empregado tanto na remoção de estéril quanto na lavra do minério, e envolve basicamente: perfuração, a trado para rochas friáveis, perfuratriz rotativa tipo *roller bit* para rochas brandas ou médias, e perfuratriz rotopercussiva tipo *down-the-hole* para rochas muito duras; desmonte, que pode ser mecânico ou por explosivos utilizando ANFO (*Amonium Nitrate and Fuel Oil*) para furos secos ou lamas explosivas para furos com água, e iniciação por espoletas elétricas; escavação/carregamento (escavadeiras, carregadeiras, tratores, *scrappers*, *draglines* e *bucket wheel excavator*); e transporte, utilizando caminhões, correias transportadoras, *scrappers*, trens, *skips* inclinados e transporte hidráulico (Curi, 2017).

O processo de remoção do estéril implica na movimentação de material do capeamento bem como materiais abaixo de teor de corte para exposição do corpo mineralizado. O ciclo de operações unitárias e o modo de execução dessas operações são determinados pelas características e constituição física e química do capeamento: se o material for muito fraturado ou friável o desmonte pode ser mecânico, por exemplo. Os equipamentos para operacionalização são selecionados de modo a satisfazer as condições de

operação, considerando que o estéril precisa ser conduzido a alguma distância para ser depositado (Curi, 2017).

Na lavra do minério propriamente dita, quanto mais semelhante for a rocha estéril da rocha hospedeira da mineralização, maior será a similaridade das operações de remoção do estéril e lavra do minério, de modo que possa ser empregada a mesma frota de equipamentos e se utilizar as mesmas técnicas de desmonte, escavação/carregamento e transporte para ambos. Adiciona-se a esta operação o transporte vertical ou içamento para casos onde a profundidade da cava torna-se fator significativo a fim de vencer com maior eficiência a grande diferença de altura entre os níveis inferiores da cava e a superfície, onde está instalada a planta de beneficiamento, evitando custos excessivos com a aquisição de equipamentos de transporte em excesso para suprir a elevada distância de transporte existente (McCarter et al., 1992).

As operações auxiliares compreendem atividades complementares à lavra propriamente dita, incluindo: controle e monitoramento do meio ambiente, controle de estabilidade do terreno, fornecimento de energia e água, gerenciamento de águas superficiais e subterrâneas, suprimento de material de operação, manutenção e reparo, iluminação, sistema de comunicação e despacho, construção e manutenção de acessos e estradas, e transporte de pessoal (Peroni, 2007).

Entre as principais vantagens do método de lavra em cava pelas metodologias de bancada tem-se que o mesmo pode ser aplicado a praticamente qualquer tipo de mineralização e corpo mineral, permitindo elevado nível de mecanização e produtividades elevadas, principalmente pela escala de produção, apesar de ser empregado também em operações de pequeno porte; trata-se de um método relativamente flexível, podendo variar a escala de produção conforme a demanda, ainda que incorra em variação de investimentos no caso de aumento ou imobilização de capital em caso de redução de produção. Em termos de aproveitamento do depósito a recuperação fica próxima de 100% devido à inclinação das bancadas, à exceção das áreas vizinhas aos limites de cava econômica, com baixa diluição (Peroni, 2007).

Já com relação às desvantagens do método, pode-se enumerar a limitação pela profundidade (limites econômicos determinam a relação estéril/minério máxima), necessidade de elevados investimentos de capital (pela característica de mecanização e razão de produção elevada), altos custos despendidos com remoção, transporte e disposição de material estéril, e principalmente a geração de significativos impactos ambientais tais como formação de grandes pilhas de estéril (impacto visual), geração de poeiras e ruídos, vibrações devido às detonações e formação de grandes crateras, que requerem a recuperação da área minerada e

consequentemente despesas adicionais ao custo de produção (Souza, 2001). Uma das grandes limitações do método está associada à interferência climática (chuvas, neve, insolação, ventos) os quais podem paralisar temporariamente as operações (Maia, 1987).

Para minimizá-los, é imprescindível o gerenciamento da disposição do estéril e o controle ambiental como um todo, incluindo a manutenção da qualidade do ar, a proteção dos mananciais e aquíferos, monitoramento e controle da poeira de mina e dos ruídos e vibrações, monitoramento, por controles geotécnicos efetivos, da estabilidade de taludes e bancadas para a continuidade das operações ao longo da vida útil da mina, gerenciamento de águas e drenagem da cava possibilitando o avanço em profundidade, principalmente em regiões de alta precipitação ou de lavra abaixo do nível freático (Peroni, 2007).

Do ponto de vista ambiental, a operacionalização do método por bancadas baixas provoca menos impacto visual devido a uma menor superfície exposta, além de facilitar a reabilitação da área minerada. Neste sentido, as bancadas baixas proporcionam vantagens do ponto de vista da segurança do trabalho, pois reduzem a exposição ao risco de queda e permitem um maior controle da estabilidade das bancadas; entretanto, a baixa recuperação da lavra implica em necessidade de disponibilidade de vastas áreas para disposição do estéril gerado (Curi, 2017).

A nível mundial, as 10 maiores minas em termos de profundidade e diâmetro operam ou operaram pelo método de lavra *Open Pit Mining* por bancadas múltiplas e incluem explorações de minérios como ferro, cobre, ouro e até diamante. Entre estas estão incluídas: a *Bingham Canyon*, em Utah, nos Estados Unidos, é a maior mina a céu aberto do mundo, com cerca de 4 (quatro) km de largura e mais de 1,2 km de profundidade, iniciou sua operação em 1848 e tem previsão de operação até 2019 e, além da larga produção de cobre, também são produzidas na mina onças de ouro, prata e molibdênio (figura 13); a Escondida *Copper Mine*, é a terceira mina mais profunda do mundo (645 m), localizada no deserto do Atacama, no Chile, e extrai minério de cobre de duas cavas (figura 14); a *Kalgoorlie Super Pit*, maior mina de exploração de ouro a céu aberto em operação na Austrália; a mina de diamante *Diavik Diamonds* situada na região noroeste do Canadá é uma das cinco maiores em operação; a mina de minério de ferro *Hull-Rust-Mahoning Mine*, conhecida como *Grand Canyon do Norte*, localiza-se no estado de Minnesota (EUA) e configura-se a sexta maior mina a céu aberto no mundo; entre outras (Creatori, 2016).

Figura 13: *Bingham Canyon Mine*



Fonte: BHP Billiton (2017)

Figura 14: *Escondida Copper Mine, Chile*



Fonte: Creatori (2016)

No Brasil, a lavra em cava por bancadas é aplicada em todas as minas de minério de ferro, com produções anuais do ROM acima de um milhão de toneladas, em que se incluem as minas do complexo Serra Norte/Carajás (figura 15), no Pará, e as minas do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais (figura 16). Além do ferro, também são explotados por esse método minérios de cobre, manganês, níquel, bauxita, gipsita etc. (Revista Minério e Minerales, 2015).

Figura 15: Mina de Ferro N5 do Complexo Serra Norte Carajás/PA



Fonte: Brazil Modal (2015)

Figura 16: Mina de Ferro Brucutu, São Gonçalo do Rio Abaixo (MG)



Fonte: Jardim (2016)

2.4.1.2 Lavra em Tiras (*Strip Mining*)

Os métodos de lavra a céu aberto em que a recuperação da área degradada é realizada concomitantemente à extração do minério pela disposição imediata do material estéril na área previamente minerada podem ser classificados como *contour mining* e *area mining*, sendo

este último também denominado *open cast* (lavra por lançamento) ou *strip mining* (lavra em tiras) (McCarter et al., 1992).

A lavra em tiras se caracteriza por ser um método de produção em larga escala e consequente baixo custo unitário de produção, alta produtividade, alta recuperação e maior segurança em comparação com a mineração subterrânea. Apresenta similaridade à lavra em cava por bancadas em relação ao ciclo de operações unitárias, porém difere no que concerne à operação de descobertura, pois o material estéril não é transportado para ser depositado em pilhas, mas sim lançado direta e imediatamente, por explosivos ou por equipamentos de escavação em áreas adjacentes já lavradas. Esse processo pode ainda ser realizado em dois estágios: um por lançamento direto e outro por caminhões, que transporta o solo superficial para estocagem e preservação para reabilitações posteriores da área lavrada (McCarter et al., 1992).

Dessa forma, o manuseio de material consiste na escavação e transporte geralmente combinados em uma única operação unitária executada por um único equipamento, que o diferencia em uma técnica de alta produtividade e menor custo unitário dentre os métodos de ampla aplicação em lavra a céu aberto. Porém não é somente o fato de concentrar escavação e transporte em uma única operação que torna o método atrativo, pois o depósito do estéril nas áreas recém-lavradas reduz ao mínimo as distâncias médias de transporte e a concentração das atividades em uma área restrita favorece o processo de reabilitação (Hartman e Mutmanský, 2002).

É um método aplicável a qualquer tipo de maciço rochoso e a qualquer tipo de minério independentemente de sua resistência mecânica, tendo como fator determinante a forma do depósito, que deve ser tabular, contínuo, uniforme, apresentar grande extensão lateral e ser constituído por camadas pouco inclinadas; deve estar em uma profundidade razoável que não ultrapasse os limites econômicos determinados pela REM máxima admissível e as limitações tecnológicas operacionais, impostas para o uso racional dos equipamentos. É muito empregado na exploração de depósitos de carvão dos tipos betuminoso e linhito, fosfato, antracito, bauxita e bentonita (Curi, 2017).

Na metodologia de lavra em tiras, o estéril e o minério podem ser escavados em uma série de longos painéis paralelos, com dezenas de metros de largura e mais de 1 km de extensão. As etapas mais importantes que antecedem o desenvolvimento desse método são a seleção e o dimensionamento dos equipamentos, a localização da planta de tratamento de minérios e a realização dos estudos de impacto ambiental. Pelas características dos depósitos onde são aplicados esse tipo de método e o padrão repetitivo das operações, não é exigido um

planejamento de lavra tão elaborado quanto para a lavra em cava, entretanto em terrenos mais acidentados ou em situações de mergulho acentuado da camada mineralizada o comportamento da REM e a definição dos limites econômicos de lavra são imprescindíveis (Peroni, 2007).

No método de lavra em tiras a remoção do estéril é realizada através de equipamentos de grande capacidade, tais como escavadeiras de arrasto (*draglines*), escavadeira frontal a cabo (*cable shovels*) ou *bucket wheel excavators* (BWEs), os quais escavam e depositam material em uma operação contínua. A escavação em rocha dura tende a favorecer a seleção da escavadeira, e lavras mais profundas favorecem a seleção das *draglines*; quando a escala de produção for comparativamente muito maior, seleciona-se o *bucket wheel* por sua maior capacidade relativa de produção. A mesma função pode ser realizada, em parte, através do uso de explosivos. As técnicas convencionais de escavação e transporte (caminhões e escavadeiras, *scrappers* ou *bulldozers*) também são usadas na operação de decapeamento, operando isoladamente ou em conjunto com uma ou mais máquinas de lançamento direto do material. A escavação e o transporte convencionais podem ser empregados apenas para a remoção da camada de solo superior, ou podem ser utilizados na remoção de solo superficial e do estéril (McCarter et al., 1992).

De modo geral e simplificado, a lavra em tiras progride por meio de uma série de cortes paralelos na forma de trincheiras profundas, denominadas tiras. A metodologia de escavação consiste na remoção dos materiais de cobertura e do minério através da execução de um corte ao longo de uma das dimensões do depósito; outro corte paralelo ao primeiro é posteriormente escavado na direção oposta, e a cobertura vegetal e de rocha estéril é depositada dentro do corte previamente minerado, o que implica na recuperação da área concomitante à extração do minério. Esse ciclo é repetido até alcançarem-se os limites da área de extração (Rocha, 2014).

As principais atividades compreendidas no desenvolvimento da lavra em tiras são: limpeza do terreno com remoção e estocagem em pilhas do solo vegetal superficial para a reabilitação da área; locação e construção das pilhas de estoques de minério, oficinas, instalações de processamento mineral e instalações de transporte em posições estratégicas próximas ao processo de lavra; desenvolvimento inicial da cava com execução do primeiro corte (ou corte de entrada), em que o material do capeamento é transportado e disposto provisoriamente em algum ponto, com avanço curto, até que uma *highwall* é concluída por toda a extensão do corte, possibilitando, desta forma, o ciclo de exploração contínua característica da lavra em tiras (Curi, 2017).

De acordo com as características do capeamento no tocante à resistência da rocha ao desmonte, este ciclo consiste nas operações de escarificação e escavação (rochas brandas ou decompostas) ou perfuração e desmonte (rochas consolidadas e duras); e escavação do material (*draglines*, *cable shovels* ou *bucket wheel*) com disposição imediata do material estéril na tira anteriormente minerada (Curi, 2017).

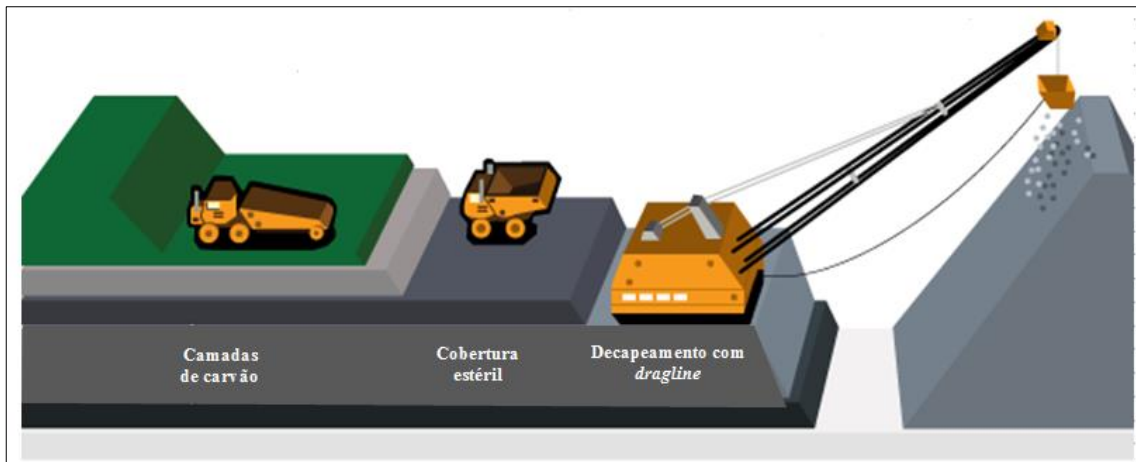
Uma vez que o minério é exposto, inicia-se seu ciclo de exploração propriamente dito, que compreende as operações de:

- Limpeza (opcional), que consiste na varredura da parte superior da camada de minério com equipamento dotado de escovas rotativas;
- Perfuração, que pode ser realizada com trados (rochas friáveis) ou perfuratrizes percussivas a ar comprimido (rochas duras);
- Desmonte, com uso de explosivos (ANFO), ou mecânico através de escarificação do minério;
- Escavação e carregamento do minério com BWEs, carregadeiras frontais, e escavadeiras elétricas ou hidráulicas;
- Transporte, utilizando caminhões, correias transportadoras, *tractor-trailer* e transportadores hidráulicos.

Geralmente quando o minério apresenta baixa resistência mecânica, a escavação e o carregamento são realizados diretamente com os equipamentos apropriados e disponíveis, entretanto um material mais resistente exige escarificação ou desmonte com explosivos para operações eficientes. Na Flórida, nos depósitos de fosfato, a lavra é realizada por desmonte hidráulico, em que jatos de água de alta pressão desmontam o minério transformando-o em polpa e transportando-o para um reservatório de onde será bombeado para as instalações de beneficiamento (McCarter et al., 1992).

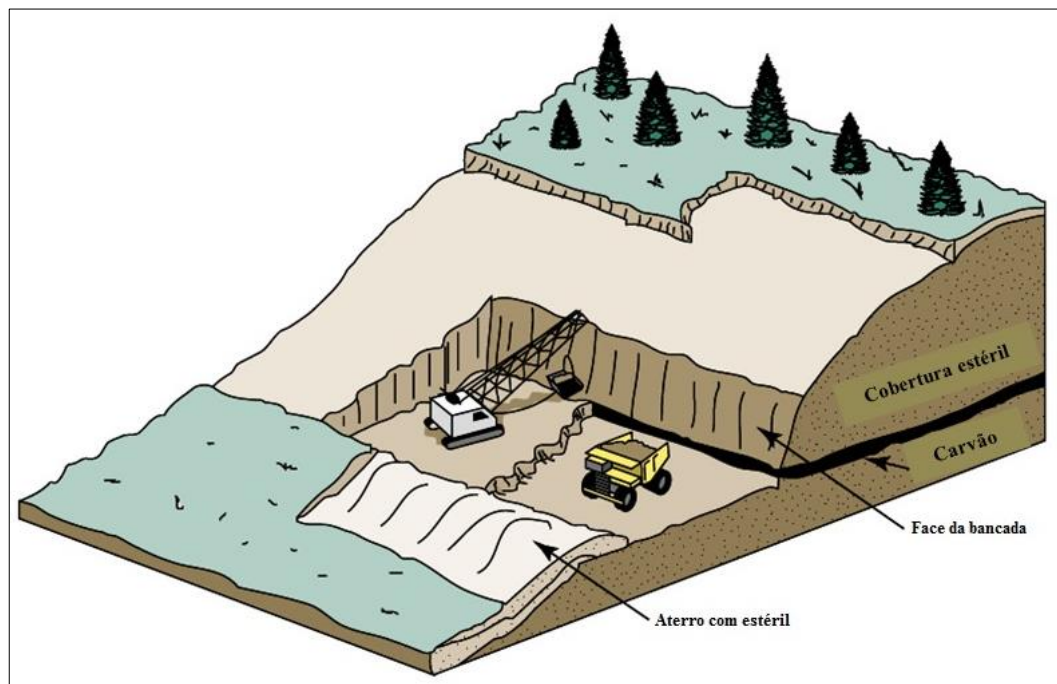
Nas figuras a seguir é possível observar a operação de decapeamento pelo método de lavra em tiras através de *draglines*, que escavam e transportam a rocha estéril fragmentada (figura 17), e realizada por *shovels*, que escavam o material e carregam caminhões que fazem o transporte até o aterro final (figura 18). As dimensões típicas de uma lavra desse tipo são: altura e ângulo do *highwall* variando entre 30-60 metros e 60°-75°, respectivamente; largura dos painéis de lavra (tiras) de 23-45 m; e ângulo da pilha de estéril situado entre 35°-50°.

Figura 17: Esquematisação da lavra em tiras em uma camada de minério com decapeamento por *draglines*



Fonte: Autora (2017)

Figura 18: Esquematisação da lavra em tiras em uma camada de minério com decapeamento por *shovels*



Fonte: Autora (2017)

Entre as operações auxiliares do método *Strip mining* destacam-se a reabilitação paisagística, estabilização dos taludes, construção de acessos, manutenção de equipamentos, drenagem da cava, comunicações, distribuição de energia, controle de poeiras e segurança. A reabilitação das áreas mineradas de modo requerido pela lei, incluindo a recuperação da superfície e abrangendo a proteção ao meio ambiente de modo geral, exigem um intenso trabalho de conservação, com custos significativos ao processo produtivo (Peroni, 2007).

O uso de equipamentos de grande porte e alto volume no método de lavra em tiras garante a alta produtividade, entretanto limita o desenvolvimento de múltiplas frentes de

lavra, pois a produção torna-se altamente dependente de um único equipamento, o que pode acarretar a interrupção das operações por motivos como defeitos mecânicos, manutenção preventiva, fenômenos climáticos ou qualquer outro motivo, ocasionando perdas importantes no processo produtivo. Uma vantagem desse método é que, como a tira permanece aberta por um curto período de tempo, a face do talude do *highwall* pode ser mais verticalizada, bem como as bancadas no estéril poderão ter ângulo igual ao ângulo de repouso natural do material estéril, uma vez que a recomposição topográfica é feita logo a *posteriori* (Curi, 2017).

A lavra em tiras tem ampla aplicação na extração de depósitos do carvão no mundo inteiro, a exemplos das minas da Austrália e da Alemanha, e no Brasil, além das minas de carvão mineral, tal qual a mina de Candiota no Rio Grande do Sul, esse método também é utilizado na lavra de bauxita nos municípios de Porto Trombetas, Juruti e Paragominas, no Pará; e de caulim, no município de Cabo de Santo Agostinho (PE).

Na mineração de caulim, as dimensões das tiras são de 20 m de comprimento e 5 m de largura, a exploração do minério é realizada com o auxílio de uma retroescavadeira (figura 19) e o estéril é removido utilizando-se um trator de esteira auxiliado por um conjunto escavadeira-caminhão; na mineração de bauxita da empresa Mineração Paragominas S/A (MPSA) em Paragominas/PA, as tiras possuem dimensões de 400 m de comprimento e 20-30 m de largura, sendo o minério explotado por mineradores contínuos de superfície e o material estéril removido em operações com tratores de esteiras, escavadeiras hidráulicas e caminhões fora-de-estrada (figura 20).

Figura 19: Mina de Caulim da Mineração Itapoama Ltda, Cabo de Santo Agostinho (PE)



Fonte: Silva (2008)

Figura 20: Vista aérea da metodologia de lavra de bauxita da MPSA em Paragominas (PA)



Fonte: Ferreira (2012)

2.4.1.3 Lavra em Terraços (*Terrace Mining*)

O método *Terrace Mining* se inclui no sistema de lavra *Haulback*, que constitui uma aplicação específica da operação conjunta e sincronizada de carregamento e transporte através de escavadeiras e caminhões, e consiste em um sistema em que o material é transportado e descarregado “de volta” na área previamente minerada (Mitra e Saydam, 2012).

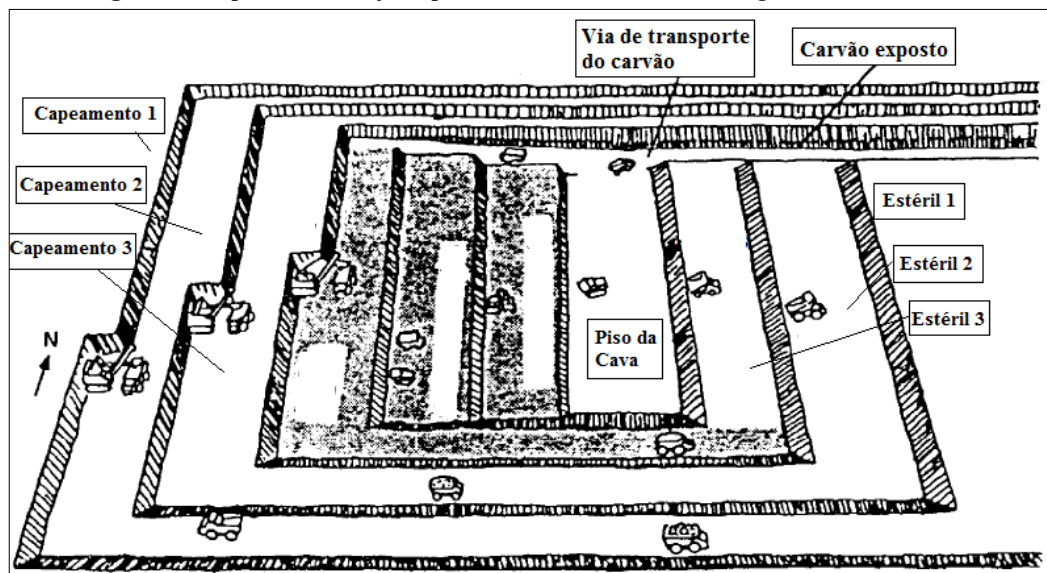
É um método aplicado na lavra de depósitos com coberturas espessas ou quando a lapa do minério possui um mergulho íngreme, o que não permite a disposição do material estéril de volta na cava minerada por lançamento direto, como no método *Strip Mining*, exigindo dessa forma um transporte intermediário desse material, que pode ser cíclico ou contínuo, (caminhões e correias transportadoras, por exemplo) para as áreas onde o minério já foi explotado (Bullivant, 1987).

O método *Terrace Mining* desenvolve-se por movimentação lateral do depósito, pois toda a mina se move sobre o minério de uma extremidade a outra visto que o material estéril é depositado a 180° da frente de lavra (levado para trás) nos locais onde o minério já foi extraído. A operacionalização do método pode ou não exigir o desenvolvimento de múltiplas bancadas tanto para a lavra do minério quanto para a remoção do material estéril, sendo o número de bancos função da profundidade da escavação e do tipo de equipamentos

disponíveis (tipicamente de 1-32 bancadas com alturas que variam entre 10 e 15 metros, na forma de terraços).

A figura 21 ilustra o ciclo de operações típico do método *Terrace Mining* em uma mineração de carvão com três bancadas de material estéril (*Overburden 1-3*) e três bancadas de minério com a lavra se desenvolvendo lateralmente. O processo de exploração da operacionalização típica do método *Terrace Mining* se inicia com a retirada do material da cobertura e disposição deste em uma área adjacente ao corte inicial, uma vez que o avanço do *pit* ainda está estreito para acesso e movimentação dos equipamentos; com o desenvolvimento progressivo da lavra, o estéril poderá ser depositado nas áreas onde o minério já foi lavrado formando bancadas de preenchimento. A movimentação do material do capeamento é realizada através de pás carregadeiras ou escavadeiras e caminhões, e a quantidade de equipamentos depende da espessura da cobertura.

Figura 21: Operacionalização típica do método *Terrace Mining* na lavra de carvão



Fonte: Bullivant (1987)

Exemplos de aplicação do método de lavra *Terrace Mining* são as minas alemãs de carvão do tipo linhito (onde são usadas *bucket wheel excavators* para escavar o material do capeamento – um exemplo típico de um sistema de escavação contínuo) e as minas de carvão da Austrália (por exemplo, a mina *Mount Arthur North* da empresa BHP Billiton em *Hunter Valley, New South Wales* – figura 22). Nestes casos, caminhões e pás carregadeiras são usados para trabalhar bancadas simultaneamente para expor as camadas de carvão; a camada superior de estéril é normalmente extraída usando escavadeiras hidráulicas e caminhões, ou quando o material é friável, usando uma BWE, correia transportadora e empilhador.

Figura 22: Mina de Carvão *Mount Arthur North* do Vale Hunter em *New South Wales* (Austrália)



Fonte: Google Earth (2017)

A figura 23 mostra a mina *Tagebau Garzweiler*, localizada no estado alemão *North-Rhine Westphalia*, que produz carvão do tipo linhito através do método *Terrace Mining* e a remoção do estéril é realizada utilizando BWEs (figura 24) com movimentação de cerca de 140 milhões de m³ anualmente. Atualmente a cava se estende por uma área de 48,0 km² e, apesar de a estimativa de vida útil da mina ser até 2045, as áreas de minério esgotadas já foram revitalizadas pelo preenchimento com material estéril.

Figura 23: Vista panorâmica da Mina de Carvão *Tagebau Garzweiler*, Alemanha



Fonte: RWE Power AG (2013)

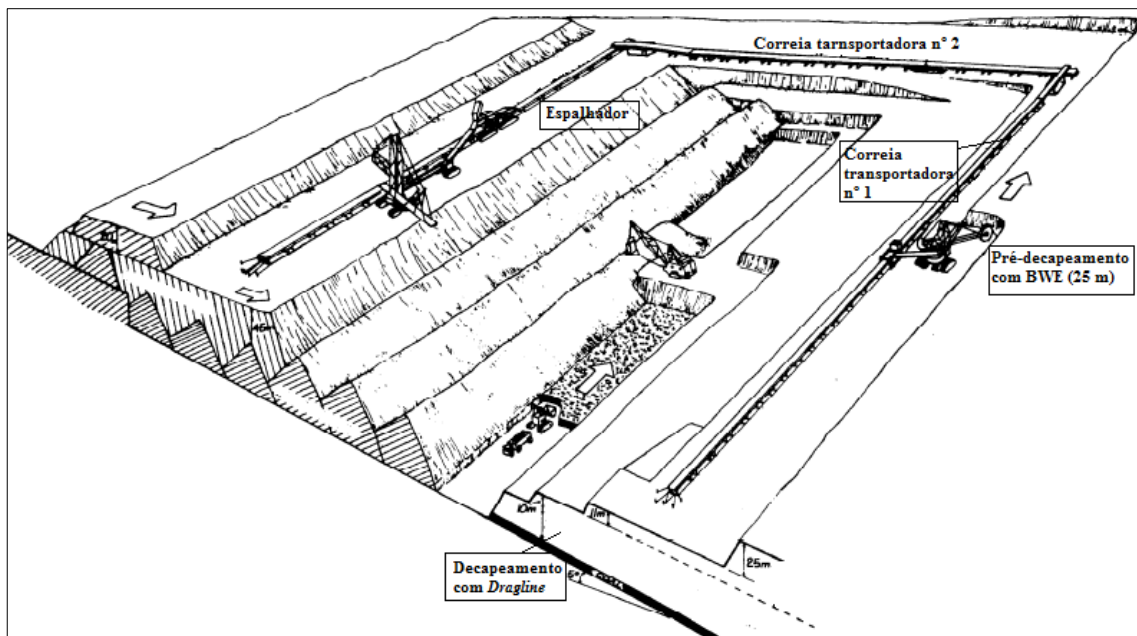
Figura 24: *Bucket Wheel Excavators 288 e 258 na Mina de Carvão Tagebau Garzweiler*



Fonte: RWE Power AG (2013)

A utilização desses sistemas é mais dispendiosa que a operação de uma *dragline*, porém esta não é adequada para este tipo de mineração devido ao seu raio de disposição limitado e a largura muito maior de uma lavra em terraços em comparação a uma lavra em tiras. No entanto, é possível usar uma *dragline* em combinação com um terraço "longo" como ilustrado na figura 25, mas apenas nos bancos menores ou inferiores onde o ponto de escavação e descarga encontra-se no raio de trabalho da *dragline*.

Figura 25: Combinação dos métodos *Terrace* (pré-decapeamento de material inconsolidado) e *Strip Mining* (remoção de material mais profundo) com equipamentos associados



Fonte: Bullivant (1987)

Como outro exemplo de mina que opera com o *Terrace Mining* tem-se a mina *Grootegeluk Colliery* (figuras 26 e 27), na África do Sul. Quando do início de suas atividades em 1980 esta mina operou pelo método de lavra *Terrace Mining Modificado* pois, devido à falta de espaço para movimentação dos equipamentos, inicialmente o material estéril foi depositado fora dos limites do *pit*, entretanto posteriormente foi possível aplicar o método convencional, em que os terraços passaram a ser preenchidos com estéril.

Figura 26: Vista aérea da Mina de Carvão *Grootegeluk*



Fonte: Exxaro (2017)

Figura 27: Mina de Carvão *Grootegeluk*



Fonte: Google Earth (2017)

No Brasil, tem-se a aplicação do método *Terrace Mining* na mineração de gipsita da Mina Ponta da Serra (figura 28), pertencente ao Polo Gesseiro do Araripe, localizado no estado de Pernambuco, de concessão da empresa Royal Gipso Ltda. Esta mina operava através do método *Open Pit* por bancadas até o ano de 2013, e precisou alterar o método de lavra para continuidade das operações de exploração do minério.

Figura 28: Mina de gipsita Ponta da Serra, Araripina/PE



Fonte: Autora (2016)

2.5 MÉTODOS DE LAVRA DE GIPSITA NO BRASIL

O Brasil dispõe de importantes reservas do mineral gipsita, as quais estão inseridas nas bacias sedimentares do Amazonas, do Tocantins, do Parnaíba, Potiguar, do Araripe e do Recôncavo, e se destacam pelo volume e qualidade os depósitos encontrados nos estados do Pará, Bahia e Pernambuco (Queiroz Filho, Amorim Neto, Dantas, 2015).

Apesar de estarem presentes em nove Estados do Brasil – Amazonas, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Bahia e Tocantins, as jazidas de gipsita que apresentam as melhores condições de aproveitamento econômico (relação estéril/minério e infraestrutura) estão contidas na Bacia Sedimentar do Araripe, em que o mineral ocorre sob a forma de horizonte descontínuo, atingindo em alguns locais cerca de 30 m de espessura (MME, 2009). A exploração da gipsita nesta Bacia teve início na década de 1960.

As operações de beneficiamento da gipsita se restringem à britagem e/ou moagem que podem ser realizadas na própria mina ou nas instalações do cliente, sendo estes representados

por empresas de calcinação do gesso e seus derivados, atuantes em todo o país, pelas fábricas de cimento das regiões Norte e Nordeste, e pelo setor agrícola das regiões Norte, Nordeste e Centro Oeste. São relatadas treze plantas de beneficiamento nos estados de Pernambuco, Maranhão e Ceará (MME, 2009).

De modo geral o método de lavra adotado para exploração da gipsita é o método de lavra *Open Pit* através da metodologia por bancadas múltiplas (figura 29) em face ao modo de ocorrência da jazida e de suas características geomorfológicas. Em Pernambuco a inclinação geral dos taludes é de 75°, o que é considerado adequado em termos operacionais e de segurança para resistência mecânica apresentada pela rocha. O acesso a cava geralmente é feito por um único acesso tipo plano inclinado (Bastos, 2013).

Figura 29: Mineração de gipsita através do método *Open Pit Mining* com bancadas múltiplas, Araripina/PE



Fonte: Bastos (2013)

As atividades envolvidas no desenvolvimento da lavra são as típicas do método *Open Pit* por bancadas: desmatamento e limpeza do terreno; abertura de vias de acesso à jazida; locação dos painéis de lavra; locação de área para pilha de estéril e do pátio de estocagem do minério; remoção do material estéril e transporte até o bota-fora; e extração do minério.

As operações de lavra das minerações de médio e grande porte são mecanizadas atingindo um bom nível técnico e equiparando-se aos padrões compatíveis de operação com as minerações de gipsita internacionais, com diferença na escala de produção. Diferenciavam-se das pequenas minerações na condução dos trabalhos de lavra pois nestas as atividades eram semi-mecanizadas, com a utilização de um grande número de pessoas (marroeiros) para a execução da fragmentação secundária e da catação manual. Com a facilidade de abertura de

linhas de créditos bancários em 2010, grande parte das pequenas minerações fizeram aquisições de equipamentos, maximizando a produção e melhorando as condições de desenvolvimento da lavra (Bastos, 2013).

Entretanto, a filosofia de exploração do minério de gipsita neste Polo começou a mudar a partir de 2013, quando uma das minas, a mina Ponta da Serra da empresa Royal Gipso Ltda., substituiu o método de lavra *Open Pit Mining* pelo método *Terrace Mining*. A mudança do método foi provocada por questões de impossibilidade de continuidade das operações de exploração do minério por ausência de área de servidão para disposição do material estéril da cobertura e a aquisição de uma área na época tornou-se inviável por questões operacionais e econômicas. Dessa forma, com o novo método, cuja operação possibilita a disposição do estéril na cava minerada, foi possível dar continuidade às atividades de extração de gipsita nessa mina, e o mais importante, de acordo com os princípios da sustentabilidade, considerando fatores econômicos, operacionais e ambientais.

2.6 ASPECTOS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE NA MINERAÇÃO

A concepção da sociedade ao longo dos anos em relação à mineração é de que esta é uma atividade destruidora do meio ambiente. De acordo com Koppe (2005), a mineração, tanto no Brasil como no exterior, é tida como uma das grandes vilãs do meio ambiente, implicando em sérios impactos ambientais como: desmatamento, alterações topográficas, erosão e poluição dos rios, ar e solo, fazendo-se necessário a disponibilização, por parte dos órgãos ambientais, de um maior rigor na fiscalização dos empreendimentos ligados a essa atividade.

Há uma grande dificuldade de encontrar depósitos minerais de boa qualidade, acessíveis, com alto teor, grande tonelagem e num país estável econômica e politicamente. As reservas consideradas de qualidade e de fácil acesso já foram achadas em tempos passados, resultando numa dificuldade muito maior para os trabalhos atuais, onde, ao lidar com os problemas citados acima, a empresa esbarra em impasses ambientais e de aderência econômica (Mahmoud, 2013). A grave consequência disto são os problemas ambientais e o aumento dos custos operacionais, que contribuem para reduzir o Valor Presente Líquido (VPL) podendo chegar até a inviabilizar o projeto.

O impacto ambiental é inerente à atividade mineradora, uma vez que, para fornecer os recursos necessários para o desenvolvimento da sociedade alteram-se as características ambientais naturais. Desta maneira, a relação do setor mineral com o meio ambiente é mais

complexa que a maioria dos outros setores econômicos, pois, apesar de não ser o único tipo de atividade impactante no ambiente (várias outras atividades causam sérios problemas ambientais de degradação do solo e subsolo, como pode-se perceber no Brasil casos de desmatamento, agricultura, monocultura, pecuária, garimpos e barragens de todos os tipos), a mineração tem proporções maiores e causa degradação visual e estética (Borges, 2009). Além das escavações feitas para a recuperação do minério, outras estruturas são necessárias para o andamento das atividades, como estradas, usinas de beneficiamento, escritórios, oficinas, fornecimento de água e energia etc. Os principais impactos relacionados à mineração estão presentes desde a exploração até sua desativação, trazendo consequências para os meios físico, biótico e socioeconômico.

Segundo Bacci e Eston (2006), os principais impactos ambientais acarretados pela mineração geralmente ocorrem principalmente na fase de exploração dos recursos minerais, sendo percebidos: no processo de abertura e desenvolvimento da cava, que implica em supressão vegetal, escavações, movimentação de grandes massas de material, transporte e disposição destes materiais, mudança na topografia, alteração do perfil litológico, instabilidade de taludes, encostas e terrenos em geral, e poluição visual, da água, do ar e do solo; e na utilização de explosivos que pode provocar lançamento de fragmentos, vibrações, ruído, poeira etc.

Tendo em vista o crescimento da mineração e seus significativos impactos, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) adotou um conjunto de proposições que contemplaram a necessidade da existência de gestão ambiental na atividade e que combinasse com a realidade do setor, dentro dos conceitos de Desenvolvimento Sustentável e dos compromissos assumidos pelo governo na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente em 1992 e Agenda 21, denominadas Diretrizes Ambientais (MMA, 2002).

O conceito de sustentabilidade ambiental foi colocado pela primeira vez na década de 1980, através da elaboração do relatório *Brundland*, também conhecido como “Nosso futuro comum”, na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), realizada em 1987 (*The World Commission on Environment and Development*, da *Oxford University Press*, 1987), que o define da seguinte maneira: “habilidade da humanidade em garantir recursos para atender as necessidades do presente sem comprometer a habilidade de gerações futuras em atender suas próprias necessidades” (Mueller, 1995).

É impossível pensar em desenvolvimento da sociedade, qualidade de vida e crescimento econômico sem a utilização de recursos minerais. Desta forma, o conceito de desenvolvimento sustentável conduz ao pensamento que é evidente a importância da

conciliação entre a atividade mineral e o uso consciente e sustentável da natureza (Borges, 2009). Há, então, a necessidade da integração de fatores econômicos, sociais e ambientais para a tomada de qualquer decisão. Infelizmente, a mineração continua focando seus trabalhos em considerações técnicas e financeiras, enquanto as questões ambientais e sociais são relegadas ao longo da vida da mina, e ao final das atividades acabam sendo tratadas sem o devido cuidado, na maioria das vezes mais como medidas mitigadoras dos impactos, e não da solução deles.

Hoje em dia, não só o fechamento, mas todas as medidas ambientais que devem ser tomadas ao longo da vida da mina devem ser pensadas junto do planejamento de todo o projeto. Em alguns países, incluindo o Brasil, o direcionamento dado para os aspectos ambientais é mandatário até para o começo das atividades da empresa. Deve-se ter em mente que a maximização do VPL sem considerar o fechamento de mina não é uma maximização real do VPL, pois postergar as questões ambientais é desfavorável para a empresa, que arcará com custos muito maiores no futuro (Mahmoud, 2013).

Portanto, considera-se que o setor mineral é indiscutivelmente de grande importância e responsabilidade para o desenvolvimento do país, podendo gerar impactos positivos como, por exemplo, o fornecimento dos insumos básicos, contemplando os setores econômicos (primário, secundário e terciário), assim como gerar impactos negativos, pois para fornecer esses insumos, é necessário que haja algum prejuízo ao meio ambiente, sobretudo na exploração e exploração, mesmo sendo a atividade econômica mais controlada pela legislação ambiental e a única citada nominalmente em vários dispositivos de proteção do meio ambiente presente na Constituição Federal de 1988 (Herrmann, 2006).

2.7 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO

A constante busca pelo aumento da produtividade e redução de custos, aliada ao grande momento que vive o mercado mundial de bens minerais, propicia e estimula o desenvolvimento e aperfeiçoamento de ferramentas e métodos que auxiliem a tomada de decisão na rotina de trabalho de planejamento e operações de mineração. A extração mineral a céu aberto é caracterizada por ser uma atividade de alto custo de investimento, na qual o processo de tomada de decisão possui uma elevada complexidade devido às características estocásticas do sistema (Pinto, 2001).

O controle da produção e dos custos operacionais é essencial na organização de um empreendimento, influenciando sobre os rendimentos, condições de trabalho, aproveitamento

da mão de obra e da máquina (Machado, 1984). Na mineração, assim como nas mais diversas atividades industriais, o custo operacional está associado ao conjunto de atividades necessárias para a obtenção do produto que será vendido. Os custos, em sua grande maioria, são gerados pela execução dos processos produtivos e as vantagens relacionadas ao custo são obtidas na execução desses processos de forma mais eficiente e otimizada possível. Do mesmo modo, a diferenciação surge tanto da escolha dos processos produtivos como da forma como são executados, sendo então os fatores-chave da vantagem competitiva.

A definição bem como a estimativa dos custos associados a empreendimentos minerais constitui-se uma tarefa complexa, pois os aspectos e variáveis envolvidos são dinâmicos. Tais custos consideram, entre outros fatores, a vida útil da mina, que por sua vez se baseia na magnitude das reservas explotáveis. De acordo com Rudenno (2009), os custos intervenientes em um estudo de avaliação econômica são os custos de capital (CAPEX – *Capital Expenditure*), que são os custos associados à infraestrutura necessária para a abertura de uma mina no que concerne à lavra e ao beneficiamento e é composto pelo capital fixo e o capital de giro, e os custos operacionais (OPEX – *Operating Expenditure*), que são os custos diários gerados de forma continuada na produção e processamento da *commodity* mineral e dependem de uma gama de fatores, tais como localização, técnica de lavra, método de beneficiamento, tributação etc., incluindo salários, insumos (produtos químicos, explosivos, combustível etc.), transporte, disposição de rejeitos e energia.

2.7.1 Custos operacionais

Conforme Jimeno e Revuelta (1997), os custos operacionais podem ser subdivididos em três categorias: custos diretos ou variáveis, indiretos ou fixos, e custos gerais.

Os custos diretos com relação ao produto, ou variáveis com relação ao volume, são compostos pelos custos primários de uma operação que se alteram em função das atividades da empresa e consistem, basicamente, no aprovisionamento de pessoal (da operação, supervisão e manutenção) e de materiais (materiais de reposição e reparação, insumos como combustível, eletricidade e água, matérias-primas etc.). Para O'hara e Suboleski (1996), custos com preparação e desenvolvimento (área de produção) como decapeamento do minério e construção das vias de acesso, além da quantidade de pessoas necessária para operação e atividades de apoio influenciam na composição do custo de produção, sendo então considerados custos diretos ou variáveis. Os impostos também são considerados custos diretos; segundo o DNPM (2010), os principais impostos vigentes no Brasil que são aplicados

em empreendimentos de mineração são: encargos trabalhistas (INSS, FGTS, entre outros), Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ), Contribuição Social Sobre Lucro Líquido (CSLL), Programa de Integração Social (PIS), Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS), Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviço (ICMS), e Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM).

Os custos indiretos com relação ao produto ou fixos com relação ao volume são os que independem da produção e podem variar com o nível da produção projetado, mas não em uma relação direta ou inversa com a produção obtida. É composto essencialmente pelos custos de pessoal (administrativo, técnico, segurança e serviços terceirizados, armazéns e oficinas, e outros encargos salariais); seguros da propriedade e de responsabilidade; depreciação; juros; tributos (impostos); recuperação de áreas degradadas; viagens, reuniões, congressos e doações; gastos com oficina e serviços; relações públicas e publicidade (Carareto et al., 2006).

Os custos gerais podem ou não ser incorporados aos custos operacionais e, embora alguns correspondam a um determinado processo ou unidade limitam-se a um nível corporativo do ciclo completo de produção. Incluem custos administrativos (salários do pessoal de engenharia, do departamento de planejamento e geologia, gerência e direção geral, contabilidade, e departamento jurídico e financeiro) e custos de comercialização (vendedores, estudos de mercado, supervisão, viagens e gastos de representação, outros cargos salariais).

Devido à grande variedade de componentes e as particularidades dos custos de cada tipo de empreendimento mineiro, os responsáveis pela estimativa de custos devem ser relacionados às respectivas demandas de cada empreendimento. Em um levantamento de custos para uma avaliação econômica, nem todos os itens descritos anteriormente precisam estar presentes na composição dos custos, ou por não estarem no objetivo de tal avaliação ou por possuírem importância relativamente baixa no resultado final; mas cabe ressaltar que quanto maior o nível de detalhamento de um projeto, menor será o erro associado aos dados nele contidos (Borges, 2013).

2.7.2 Estimativas de custos

Para uma correta avaliação econômica de projetos e/ou operações inseridas na produção de um projeto mineiro deve-se realizar, da maneira mais precisa possível, uma estimativa de custos, pois os resultados obtidos interferem no fluxo de caixa e, por conseguinte, na rentabilidade das alternativas de investimento. Isso porque as empresas buscam, por um lado, a maximização das receitas, e por outro lado existe a preocupação

constante com a redução dos custos do processo produtivo dos projetos, a fim de propiciar o início e/ou continuidade de suas operações. Existem diversos tipos e classificações de estimativas de custos. Um procedimento a ser adotado nesta estimativa é a reunião de dados de custo, os quais devem ser revisados constantemente (Borges, 2013).

Os custos operacionais dependem de uma série de condicionantes, tais como localização do projeto, método de lavra, rota de processamento mineral etc., o que dificulta seu processo de estimativa, visto que cada cenário é muito singular. O estudo dos custos operacionais pode ser feito sob dois enfoques: o econômico, que diz respeito aos custos para tomada de decisões, e o contábil para apuração de resultados. Existem vários métodos para estimativa dos custos operacionais, sendo os mais utilizados o custeio por absorção, custeio variável, e o custeio baseado em atividades (ABC).

Em suma, o método de custeio é a apuração de valores de custos dos bens, mercadorias ou serviços das entidades públicas e privadas. Tais métodos visam determinar a metodologia de atribuição de custos a produtos.

O sistema de custeio por absorção é aquele que apura o valor dos custos dos bens ou serviços, tomando como base todos os custos da produção e atribui tais custos aos produtos fabricados, quer de forma direta ou indireta. Assim todos os custos, sejam eles fixos ou variáveis, são absorvidos pelos produtos. Os custos diretos são apropriados mediante apontamento de forma objetiva e os custos indiretos são apropriados através de rateio. A principal distinção existente no uso do custeio por absorção é entre custos e despesas. A separação é fundamental porque as despesas são jogadas imediatamente contra o resultado do período, enquanto que apenas os custos relativos aos produtos vendidos terão o mesmo tratamento. Já os custos relativos aos produtos em elaboração e aos produtos acabados que não tenham sido vendidos são ativados nos estoques destes produtos (Carareto et al., 2006).

Meglierini (2012) afirma que a dificuldade encontrada para alocar custos indiretos reside na definição da base de rateios a ser utilizada, pois é uma tarefa que envolve aspectos subjetivos e arbitrários. Se o critério adotado não for bem consistente, o resultado de custos ficará por certo deficiente para atender aos fins a que se propõem. Nesse sentido, o gestor de custos ficará “amarrado” pelo próprio sistema.

A utilização do método de custeio variável fundamenta-se na identificação dos custos variáveis e fixos, ou seja, os custos que oscilam de forma proporcional ao volume de produção e vendas, e dos custos que se mantêm estáveis perante o volume de produção e vendas. São imputados aos bens e serviços produzidos somente os custos variáveis de produção (diretos e indiretos). Este método permite observar quais são os custos variáveis dos

produtos e o volume de unidades necessárias para cobrir a estrutura de custos fixos das empresas, além de gerar resultados para os acionistas (Carareto et al., 2006).

O método de custeio ABC (*Activity Based Costing*) baseia-se na identificação, análise e controle dos custos envolvidos nas atividades e processos de uma empresa, atribuindo aos produtos, individualmente, a parcela dos custos indiretos consumida por cada um deles. É uma metodologia desenvolvida para facilitar a análise estratégica de custos relacionados com as atividades que mais impactam o consumo de recursos de uma empresa. Permite identificar as atividades e os processos existentes nos setores produtivos de uma organização industrial ou prestadora de serviço, atribuindo os custos aos produtos através da utilização dos direcionadores ou geradores de custos destas atividades. No custeio ABC, se a empresa conseguir eliminar ou reduzir os geradores negativos, as atividades que dão origem a esses geradores deixarão de existir por si só e, conseqüentemente, os recursos consumidos por estas atividades já não serão necessários. Com isso, cortam-se os recursos de forma racional e eficaz (Megliorini, 2012).

2.7.3 Custos unitários de produção

O custo de produção é constituído por todos os custos desde a operação para exposição do corpo mineral até o beneficiamento do minério extraído, sendo que as operações que mais encarecem esse custo são o decapeamento (remoção de estéril da cobertura) e as operações nas bancadas (desmonte mecânico ou com explosivos dos bancos, transporte, construção e manutenção dos acessos).

É apropriadamente dividido por setores de trabalho, e cada setor possui seus próprios centros de custo, onde o custo total é dividido direta ou indiretamente através de coeficientes de rateio proporcionalmente à sua utilização pelo centro de custos. De acordo com Souza (2001), os setores de trabalho compreendem:

- Serviços de desenvolvimento (descobertura, construção das vias de acesso etc.);
- Mineração (desmonte de bancos, carregamento etc.);
- Beneficiamento;
- Serviços administrativos;
- Serviços auxiliares (drenagem, disposição de rejeitos, manutenção etc.);
- Transporte externo.

Estes custos podem ser divididos em diretos (serviços de desenvolvimento, mineração e beneficiamento), e indiretos (serviços administrativos, serviços auxiliares, manutenção e transporte externo).

Os centros de custo são:

- Desenvolvimento (manual ou mecanizado);
- Perfuração e desmonte;
- Carregamento;
- Transporte do minério;
- Segurança, iluminação, sinalização, higiene;
- Manutenção eletromecânica de equipamentos;
- Amortização e supervisão;
- Despesas financeiras (juros e amortizações).

Os custos de investimento (equipamentos e instalações) devem ser amortizados ao longo de sua vida útil e não devem ser considerados no custo de um mês. As quotas principais de cada setor referem-se principalmente a mão-de-obra, encargos sociais e materiais de consumo. O custo operacional de cada setor é a soma dessas quotas principais e é isento das despesas relativas à depreciação dos equipamentos, amortização de capital, impostos e encargos financeiros.

De modo geral, com relação ao grau de detalhamento o custo de produção pode ser total, médio unitário, e unitário. O custo total é o conjunto de custos atribuído a uma atividade ou conjunto de atividades, dadas às quantidades de fatores de produção utilizados. Já o custo unitário corresponde ao conjunto de custos a ser imputado a uma unidade de fator de produção utilizada ou de produto produzido (Bacic, 2010).

Em mineração, o custo unitário de produção se refere ao valor gasto para a obtenção de 1 (uma) tonelada de minério *Run Of Mine* (custo unitário de lavra) e também 1 (uma) tonelada de concentrado mineral (custo unitário de beneficiamento), sendo formado então pela soma dos custos de mineração mais beneficiamento do minério ROM (Souza, 2001).

Para calcular o custo por tonelada deve-se fazer o rateio dos custos indiretos que estão inseridos nos custos diretos, pois os valores que realmente influenciam no cálculo do custo final são os gastos com extração do minério bruto e com o beneficiamento desse minério. Assim, rateados os custos indiretos, calcula-se o custo unitário de produção de acordo com a equação 1, proposta por Souza (2001):

$$C_{unitário}(R\$/ton) = \frac{Despesa\ total\ (R\$)}{Produção\ (ton)} = \frac{D}{P} \quad (1)$$

sendo a despesa total (D) correspondente aos custos unitários das operações de lavra (equação 2) e de beneficiamento do minério (equação 3):

$$C_{\text{unitário de extração}} (\text{R\$/ton}) = \frac{\text{Custo de extração (R\%)}}{\text{Produção líquida (ton)}} \quad (2)$$

$$C_{\text{unitário de beneficiamento}} (\text{R\$/ton}) = \frac{\text{Custo de beneficiamento (R\%)}}{\text{Produção líquida (ton)}} \quad (3)$$

2.7.4 Índices Financeiros

A análise do desempenho econômico-financeiro de uma empresa pode ser realizada com base nos dados disponibilizados nas demonstrações financeiras elaboradas pelas mesmas em conjunto com os índices financeiros agregados de mercado, visando-se obter conclusões sobre o desempenho retrospectivo, presente e futuro da empresa (Vieira et al., 2011)

Os índices financeiros compreendem relações entre contas ou grupos de contas das demonstrações financeiras que objetivam fornecer informações que não são facilmente perceptíveis nessas demonstrações; são valores numéricos utilizados para o cálculo de um determinado produto ou setor, entre um mês e outro, utilizando como base determinados produtos ou serviços, sendo a técnica de análise mais empregada por fornecer uma ampla visão da situação econômico-financeira da empresa. Esses índices geralmente são agrupados em: índices de rentabilidade, de atividade, de endividamento e de liquidez (Ribeiro e Boligon, 2009; Silva, 2009).

A análise do índice de rentabilidade evidencia a lucratividade que a empresa tem alcançado através dos capitais investidos, o quanto renderam os investimentos e qual o resultado econômico da empresa; é expresso por valores que demonstram a dimensão dos lucros obtidos dentro das atividades das empresas, sendo assim o seu conceito analítico relacionado a “quanto maior, melhor” (Silva, 2009).

Apesar de consistirem em medidas quantitativas de cálculo simples, torna-se imprescindível a aplicação dos indicadores de rentabilidade para expressar a lucratividade em uma empresa, pois analisar somente o lucro líquido de uma companhia pode não refletir seu potencial econômico e financeiro total e real, além de facilitar uma análise gerencial acerca da capacidade da empresa de gerar retornos. O índice de rentabilidade pode ser avaliado através de sua subdivisão em quatro índices: Giro do Ativo, Margem Líquida (ou Lucratividade), Rentabilidade do Ativo e Rentabilidade do Patrimônio Líquido (Ribeiro e Boligon, 2009).

Denominado Margem Operacional, o índice de Margem Líquida evidencia qual foi o retorno que a empresa obteve frente ao que conseguiu gerar de receitas, ou seja, quanto o que sobrou para a firma representa sobre o volume faturado; o índice de lucratividade relaciona o lucro líquido com as vendas líquidas do período (equação 4), fornecendo o percentual de lucro que a empresa obteve em relação ao seu faturamento:

$$ML (\%) = \frac{\text{Lucro líquido (R\$)}}{\text{Faturamento (R\$)}} \times 100 \quad (4)$$

sendo o lucro líquido o valor referente ao faturamento com as vendas do produto subtraído do custo de produção em determinada atividade ou operação (Silva, 2009).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

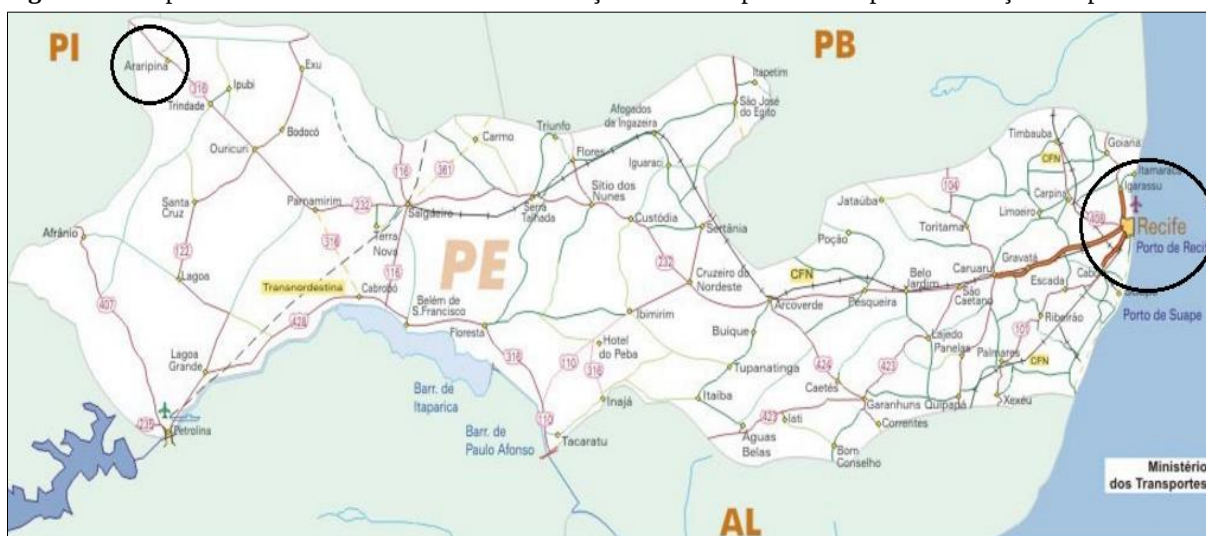
A área de estudo dessa dissertação foi a mina de gipsita Ponta da Serra, que se constitui numa área de concessão de lavra da mineração Royal Gipso Ltda. e localiza-se no município de Araripina, estado de Pernambuco.

3.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O município de Araripina encontra-se localizado na mesorregião Sertão e na microrregião Araripina do estado de Pernambuco, limitando-se a Norte com o estado do Ceará, a sul com Ouricuri, a leste com Ipubi e Trindade, e a oeste com o estado do Piauí. Possui área de 2.037,4 km² e representa 1,93% do estado de Pernambuco; está inserido cartograficamente nas Folhas SUDENE de Fronteira, Campos Sales, Ouricuri e Simões na escala de 1:100.000 (MME, 2005).

A sede do município tem uma altitude aproximada de 622 metros, coordenadas geográficas 7°34'34" de latitude Sul e 40°29'54" de longitude Oeste, distando 683,2 km da capital, Recife, cujo acesso se dá pela BR 232/316, conforme pode ser observado na figura 30 (MME, 2005).

Figura 30: Mapa rodoviário de Pernambuco – localização do município de Araripina em relação à capital Recife



Fonte: Ministério dos Transportes (2012)

A área onde se encontra a Mina Ponta da Serra localiza-se no distrito de Lagoa do Barro, no povoado Gergelim, pertencente ao município de Araripina (30 quilômetros de distância da sede). O acesso se dá por estrada asfaltada da sede do município até Gergelim,

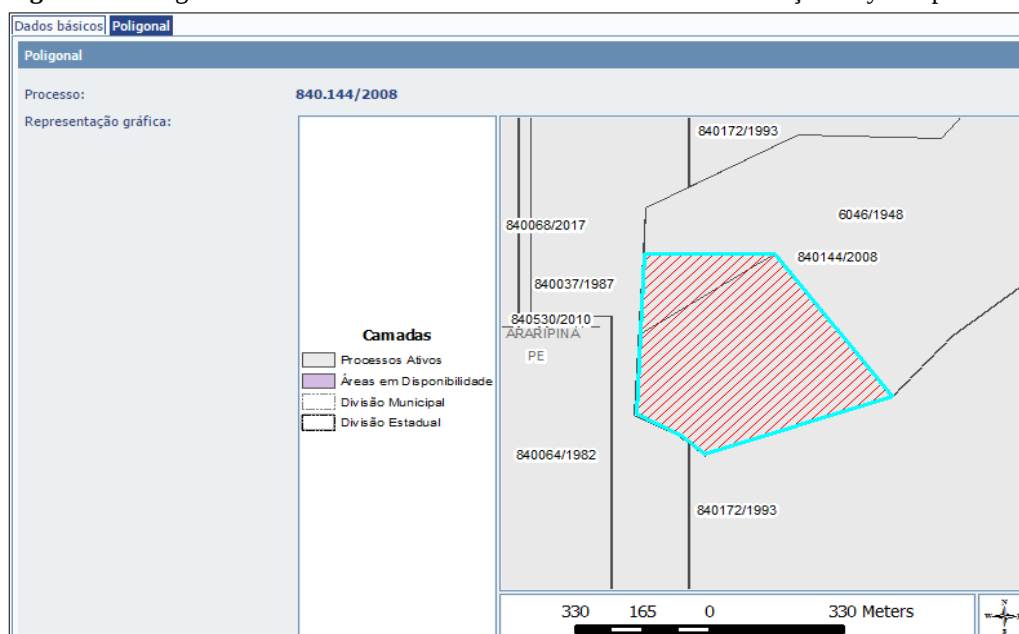
inletindo à esquerda em direção ao Sítio Ponta da Serra, percorrendo mais 3,5 km por estrada vicinal até a área em questão.

O município possui algumas características que viabilizam e facilitam a mineração de gipsita no mesmo, tais como: disponibilidade de mão-de-obra, energia elétrica fornecida pela Companhia Elétrica de Pernambuco (CELPE), agência de Correios, rede móvel de telefonia celular, agências regionais do INSS, assistência médico-hospitalar, agências bancárias, conexões rodoviárias com todas as capitais dos estados do Nordeste, SESI (Serviço Social da Indústria), SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), SENAC (Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial), e SEBRAE (Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas) (Bastos, 2013).

3.2 MEMORIAL DESCRITIVO DO POLÍGONO DELIMITADOR DA ÁREA

O polígono delimitador da área de concessão de lavra é irregular e possui 05 lados, conforme pode ser visto na figura 31.

Figura 31: Polígono delimitador da área de concessão de lavra da mineração Royal Gipso Ltda.



Fonte: DNPM (2017)

A área da cava da mina totaliza 23,1 ha (vinte e três hectares e 10 ares), e encontra-se na fase de Concessão de Lavra pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) com número de processo 840.144/2008; é composta por 05 vértices (tabela 3), com o ponto de amarração coincidente com o vértice 01 da poligonal.

Tabela 3: Coordenadas dos vértices da poligonal (DATUM SIRGAS 2000)

Latitude	Longitude
-07°44'21"908	-40°27'47"020
-07°44'34"375	-40°27'37"648
-07°44'39"430	-40°27'52"489
-07°44'37"743	-40°27'54"466
-07°44'35"965	-40°27'57"952

Fonte: DNPM (2017)

3.3 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

Antes de ser elevado à categoria de município, Araripina era distrito de Ouricuri e tinha o nome de São Gonçalo; em 11 de setembro de 1928, pela Lei Estadual n.º 1931, o vilarejo de São Gonçalo se tornou o município Araripina, sendo atualmente formado pelos distritos: Sede, Lagoa do Barro, Nascente e Rancharia, e pelos povoados de Feira Nova e Gergelim (MME, 2005).

De acordo com o censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2010, a população residente total em Araripina era de 77.302 habitantes, sendo 46.908 na Zona Urbana (60,68%) e 30.394 na Zona Rural (39,32%); os habitantes do sexo masculino totalizam 37.836 (48,9%), enquanto que do feminino perfazem 39.466 (51,1%), resultando em uma densidade demográfica de 40,84 habitantes/Km². A população estimada para 2016 foi de 83.287 habitantes (IBGE, 2010).

A rede de saúde é constituída por 02 (dois) Hospitais, 209 Leitos, 16 Ambulatórios e 62 Agentes Comunitários de Saúde Pública (IBGE, 2000).

Na área da educação, o município possui 156 estabelecimentos de ensino fundamental com 16.261 alunos matriculados, e 10 estabelecimentos de ensino médio com 2.282 alunos matriculados; a rede de ensino totaliza 478 salas de aula, sendo 120 da rede estadual, 246 da municipal, e 112 particulares (IBGE, 2000).

Dos 16.294 domicílios particulares permanentes, 7.017 (43,4%) são abastecidos pela rede geral de água, 1.018 (6,2%) são atendidos por poços ou fontes naturais, e 8.259 (50,7%) por outras formas de abastecimento. A coleta de lixo urbano atende 7.007 (43,0%) dos domicílios (IBGE, 2000).

Os gastos sociais *per capita* são R\$ 45,00 em educação e cultura, R\$ 16,00 em habitação e urbanismo, R\$ 02,00 em saúde e saneamento e R\$ 3,00 em assistência e previdência social (IBGE, 2000).

Os setores de atividade econômica formais são: Indústria de transformação, gerando 1.086 empregos em 90 estabelecimentos; Comércio, com 493 empregos em 165 estabelecimentos; Serviços, com 463 em 64; Administração Pública, com 834 em 02; Agropecuária, Extrativismo Vegetal, Caça e Pesca, com 08 em 06; Extrativa Mineral, com 272 em 09; Serviços Industriais de Utilidade Pública, com 03 em 03; e Construção Civil, com 21 em 08 (MME, 2005). A região possui uma grande quantidade de mão de obra que precisa de qualificação profissional, sendo as atividades mineradoras e agrícolas as que mais absorvem mão-de-obra.

O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M) é 0,65, situando o município em 52º no ranking estadual. O Índice de Exclusão Social, que é construído por 07 (sete) indicadores (pobreza, emprego formal, desigualdade, alfabetização, anos de estudo, concentração de jovens e violência) é de 0,345, ocupando a 72º colocação no ranking estadual e a 4.158º no ranking nacional (IBGE, 2000).

3.4 ASPECTOS GEOLÓGICOS

No contexto geológico regional, o município de Araripina está inserido na Província da Borborema, sendo constituído por litotipos dos complexos Granjeiro e Itaizinho, da Suíte Calcialcalina de Médio a Alto Potássio Itaporanga, e dos granitoides de quimismo indiscriminado (Araújo, 2004). Os principais registros sedimentares incluem rochas pelíticas da Formação Santana (onde se inserem horizontes gipsíferos), rochas arenosas da Formação Exu, além dos depósitos incoerentes, aluvionares e coluvionares, resultantes da exumação Tércio quaternária da Bacia do Araripe (MME, 2005).

A Bacia Sedimentar do Araripe, resultante do relevo da Chapada do Araripe, começou a formar suas escarpas e encostas no Paleozoico, quando foram depositados os sedimentos da Formação Mauriti, porém, foi nos períodos Jurássico e Cretáceo que se deram os eventos geológicos mais importantes para a formação desta bacia, a qual foi formada pela reativação de estruturas do embasamento pré-cambriano devido à propagação de esforços tectônicos relacionados à fase *rifte* das bacias marginais brasileiras (Arai, 2006; Araújo, 2004).

A Bacia do Araripe localiza-se no interior da região Nordeste do Brasil numa área que compreende o sul do estado do Ceará, o noroeste do estado de Pernambuco e o leste do Piauí, estando limitada aproximadamente pelas coordenadas latitude 7°04' – 7°50' S e longitude 38°35' – 40°50' W. Em termos geomorfológicos, esta bacia abrange as feições da Chapada do Araripe e do Vale do Cariri, sendo sua área total de aproximadamente 12.200 km², com

orientação geral Leste-Oeste, apresentando maior extensão nessa direção (250 km) do que na Norte-Sul (68 km) (Rios-Netto et al., 2012).

De acordo com Arai (2006), a Bacia do Araripe se constitui de um registro fragmentário de várias bacias, histórica e geneticamente distintas, separadas no tempo e parcialmente superpostas no espaço, materializadas por quatro sequências estratigráficas de terceira ordem, limitadas inteiramente por discordâncias regionais, as quais são: Paleozoica, Juro-Neocomiana (pré-rifte e rifte), Aptiano-Albiana (pós-rifte I) e Alblano-Cenomaniana (pós-rifte II). Tais estratigrafias possuem origem em contextos paleogeográficos diferentes, integrados a outras bacias adjacentes. A sequência Aptiano-Albiana (ou sequência Pós-Rifte I) é composta pelas Formações Barbalha e Santana, ocorrendo em quase toda a extensão da Chapada do Araripe, e difere estrutural e estratigraficamente das duas sequências sotopostas, sobre as quais se assenta em discordância angular; é a sequência onde se localiza a área em estudo (Assine, 1992).

A região da exploração pertence à Formação Santana, a qual se subdivide em três membros: Membro Crato, que é constituído por calcários finamente laminados e caracteriza-se pela abundância e diversidade de fósseis; o Membro Ipubi, que apresenta sedimentação predominantemente evaporítica, onde se intercalam gipsita, anidrita, folhelhos e carbonatos, e que também contém fósseis; e o Membro Romualdo, superior, constituído por leitos pelítico-margosos intercalados por folhelhos betuminosos muito fossilíferos, arenitos e bancos calcários, principalmente no topo, onde ocorreu a maior influência marinha, contendo níveis de concreções carbonáticas ricas em fósseis.

O membro Ipubi, que é onde se localiza a mina de gipsita em estudo, possui origem marinha/lacustre e apresenta uma sequência sedimentar estratificada, quase horizontal, constituída por gipsita e anidrita com folhelhos escuros intercalados. Embora existam diversas ocorrências em toda a bacia, as camadas de gipsita concentram-se principalmente na porção oeste, de Ipubi a Araripina/PE (Manso e Hessel, 2012).

Na região há predominância da sequência estratificada de gipsitas intercaladas com anidritas e folhelhos pirobetuminosos; as camadas de gipsita são lenticulares, possuem cristais colunares dispostos em paliçadas, e são lateralmente contíguas a folhelhos cinza-esverdeados, carbonatos ou mesmo arenitos. Há também ocorrências de pseudomorfos de gipsita lenticular, anidrita laminada e nodular; a gipsita secundária é representada pelas variedades alabastro, porfiroblástica (rosetas de gipsita incolor) e nodular (Assine, 1992).

O minério de gipsita extraído caracteriza-se por apresentar concentrações de sulfato da ordem de 90% a 95%, e impurezas na ordem de 5% em média; também porque a gipsita,

quando submetida a diferentes condições de pressão e temperatura, pode se transformar em anidrita; entretanto, fenômenos geológicos como erosão ou movimento tectônico, podem fazer com que a anidrita fique próxima à superfície e, havendo uma reidratação devido ao contato com águas meteóricas, voltar à forma de gipsita. Assim, podem-se encontrar concentrações de anidrita que variam de 4% a 7% (Bastos, 2013).

3.5 MINERAÇÃO ROYAL GIPSO LTDA.

A empresa Royal Gipso Ltda. foi fundada em março de 1999 e além da exploração do mineral industrial gipsita atua na fabricação de gesso pré-moldado (blocos para construção civil). A empresa é de médio porte e emprega cerca de 40 funcionários. Sua sede está localizada no Sítio Lagoa de Dentro em Araripina/PE. A Mina Ponta da Serra, área objeto deste estudo, pertence à empresa Royal Gipso Ltda., e encontra-se na localidade denominada fazenda Ponta da Serra, no povoado Gergelim, município e comarca de Araripina no Estado de Pernambuco. O depósito de gipsita encontra-se na parte central da área e compreende uma área de 23,1 ha (figura 32) (DNPM, 2017).

Figura 32: Mina Ponta da Serra



Fonte: Google Earth (2011)

Assim como os demais depósitos da Formação geológica a que pertence a jazida, o depósito 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 e sob diversas formas alotrópicas, popularmente conhecidas como Boró, Cocadinha, Rapadura, Estrelinha, *Johnson* e Minério do Piso, com espessuras que variam de 9,5 metros até 14,8 metros, e essa variação é devida à irregularidade da superfície que tem provável origem nos processos erosivos que modelaram a superfície do corpo; o capeamento é constituído por argilas, margas e arenitos, e se caracteriza por constituir-se de material pouco consolidado recoberto por uma camada de solo, com espessuras que variam de 18,7 metros a 30,0 metros (Bastos, 2013).

A partir de dados topográficos e de sondagens foram geradas as plantas topográfica e planialtimétrica da área, que auxiliaram na determinação do volume do depósito:

- ✓ Volume de material estéril (*in situ*) a ser escavado: 1.800.944,20 m³;
- ✓ Volume e tonelagem da reserva medida de gipsita: 857.930,93 m³ e 1.973.241,55 t;
- ✓ Volume e tonelagem de gipsita disponível no piso: 19.687,90 m³ e 45.282,17 t.

O método de lavra utilizado pela empresa na Mina Ponta da Serra até o primeiro semestre do ano 2013 foi o *Open Pit Mining* desenvolvido por bancadas múltiplas de altura média de 11,3 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 1,4 km da frente de lavra.

Entretanto, ainda no ano de 2012 a operação através do referido método encontrou um gargalo que não permitiu sua continuidade. Tal gargalo estava associado à disponibilidade de área próxima a cava para disposição da pilha de estéril (bota-fora), uma vez que o levantamento topográfico da jazida realizado em 2010 para reavaliação de reservas constatou que nas áreas próximas aos limites do *pit* não existia mais disponibilidade de espaço físico para o bota-fora, pois as concessões de lavra de terceiros estavam muito próximas (áreas contíguas ao processo da Royal Gipso) e a área disponível englobava minério.

Neste cenário, após um estudo de viabilidade realizado pela empresa em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco, através da engenheira de minas responsável pela referida mineração, Flávia de Freitas Bastos, em 2013 o método de lavra *Open Pit Mining* foi substituído pelo método *Terrace Mining*. Este método foi selecionado em função das características físicas do depósito de gipsita (tabular, de grande extensão lateral e coberto por camadas espessas de material estéril) e principalmente por sua operacionalização prever a disposição do material estéril dentro da cava em áreas já mineradas reduzindo assim as distâncias médias de transporte, o que permitiu a continuidade das operações de exploração da gipsita na mina Ponta da Serra.

Com a mudança do método de lavra, as operações unitárias para exploração do minério permaneceram praticamente as mesmas, havendo mudanças somente na operação de descobertura no que diz respeito à forma e local de disposição do material estéril. As operações são mecanizadas e consistem em: decapeamento (desmonte mecânico com escavadeira hidráulica e transporte do material em caminhões rodoviários), desmonte primário (explosivos), fragmentação secundária (rompedores hidráulicos), carregamento (pás-carregadeiras e escavadeira hidráulica) e transporte (o minério bruto é vendido para terceiros). Todos os equipamentos em operação na lavra são terceirizados e a produção de minério atual da mina varia de 12.000 a 16.000 toneladas por mês.

Os produtos comercializados na mineração são classificados como minério A, B e C, que possuem qualidade e preços diferenciados no mercado. A maior parte das vendas é do minério tipo A (Cocadinha, Rapadura e Estrelinha e *Johnson*) com um preço médio de 23,50 R\$/t (vinte e três reais e cinquenta centavos por tonelada), cerca de 80% da produção, o qual confere ao gesso uma coloração mais branca e com um tempo de pega mais lento (gesso de revestimento), enquanto o minério tipo B (minério do piso) é utilizado para se fazer o gesso de fundição por possuir uma coloração mais escura que o gesso tipo A e com um tempo de pega mais rápido. A expedição do minério segue a modalidade FOB (*Free on Board*), em que o frete é de responsabilidade do cliente.

4 METODOLOGIA

A comparação entre os métodos *Open Pit Mining* e *Terrace Mining* na lavra de gipsita da Mina Ponta da Serra foi realizada em 5 (cinco) etapas durante visitas técnicas à área de estudo e análises comparativas entre os métodos em laboratório, as quais encontram-se detalhadas nos itens a seguir:

- Na primeira etapa realizou-se um levantamento de dados operacionais, econômicos e ambientais no período de 15 a 26 de fevereiro de 2016 junto à empresa acerca do método *Open Pit Mining* quando da época de sua aplicação na Mina Ponta da Serra;
- A segunda etapa, que foi realizada no período de 11 a 21 de setembro de 2016, consistiu nos trabalhos de obtenção dos dados operacionais referentes ao método de lavra *Terrace Mining*. Foram coletados dados referentes ao desenvolvimento das bancadas e construção e manutenção dos acessos referentes à execução das operações unitárias e cronometragem do tempo de ciclo dos equipamentos em tais operações;
- Ainda no período referido acima, na terceira etapa foram levantados também os aspectos ambientais relacionados à operação do método *Terrace Mining* no que concerne às atividades de recomposição topográfica da área minerada;
- Na quarta etapa, também em setembro de 2016, realizou-se um levantamento de custos de todas as operações unitárias do processo de extração da gipsita com a metodologia *Terrace Mining*;
- E por fim, com todos os dados reunidos foi desenvolvida uma análise comparativa entre os métodos de lavra *Terrace Mining* e *Open Pit Mining* aplicados na lavra de gipsita da Mina Ponta da Serra, abordando os benefícios obtidos com relação aos aspectos operacionais, econômicos e ambientais. Esta etapa foi realizada no período de outubro de 2016 a maio de 2017 no Laboratório de Planejamento de Lavra do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco (LAPLA/CTG/UFPE).

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DO MÉTODO *OPEN PIT MINING*

Os dados operacionais e econômicos bem como os aspectos ambientais referentes à operacionalização do método *Open Pit Mining* foram obtidos em relatórios técnicos cedidos pela empresa e também pesquisa de outros dados secundários dos quais a principal referência como fonte de informações acerca do referido método é o trabalho intitulado “Aplicação da

Terrace Mining como alternativa para lavra de gipsita na região do Araripe – Pernambuco” desenvolvido por Bastos (2013), que avaliou a viabilidade econômica da aplicabilidade e implementação do método *Terrace Mining* na Mina Ponta da Serra.

4.2 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Para a obtenção dos dados de campo (dados primários) foi realizado inicialmente o reconhecimento geral da área através do qual puderam ser estabelecidas as diretrizes das atividades a serem desenvolvidas com relação à caracterização das operações unitárias de exploração da gipsita bem como a obtenção dos tempos de ciclo dos equipamentos utilizados no método *Terrace Mining*.

4.2.1 Levantamento dos Tempos de Ciclo dos Equipamentos

De acordo com Ricardo e Catalani (2007), um ciclo compreende o conjunto de operações que um equipamento executa em um determinado período de tempo, e o tempo de ciclo é o intervalo decorrido entre duas passagens consecutivas da máquina por qualquer ponto do ciclo. Convencionou-se que o tempo de ciclo seja medido a partir do instante em que o equipamento inicia a operação até o momento em que retorna a essa posição inicial, sendo a fixação do início da medida do tempo do ciclo uma medida arbitrária.

O ciclo de operação dos equipamentos é executado por meio das operações básicas de escavação (ou corte), carregamento da caçamba, transporte e descarga. Este ciclo pode ser decomposto em uma sequência de movimentos elementares correspondentes a tempos que se mantêm constantes (tempos fixos) enquanto outros são muito variáveis pois dependem diretamente das distâncias percorridas (tempos variáveis). Entre os tempos fixos têm-se os tempos de carga, descarga e manobras por esses serem constantes independentemente das distâncias percorridas num grande número de ciclos repetidos e os tempos variáveis correspondem aos tempos de transporte, carregado ou vazio (retorno), que dependem essencialmente das distâncias percorridas (Ricardo e Catalani, 2007).

O trabalho de levantamento dos tempos de ciclo dos equipamentos na mineração Royal Gipso Ltda. na operação do método *Terrace Mining* compreendeu a coleta e análise dos tempos de ciclo das seguintes operações unitárias:

- Tempo de ciclo do decapeamento;
- Tempo de ciclo da perfuração;

- Tempo de ciclo do carregamento do minério.

O tempo de ciclo da operação de transporte do minério ao seu destino final não foi coletado pelo fato de o mesmo não configurar um custo para a empresa Royal Gipso Ltda.; a gipsita é vendida na forma bruta aos seus clientes e a expedição do minério segue a modalidade FOB (*Free on Board*), em que o frete é de responsabilidade do cliente.

Com base nos dados obtidos, foi possível realizar uma avaliação comparativa em termos de eficiência operacional, equipamentos necessários e custos entre os dois métodos de lavra em análise. Vale salientar que os equipamentos são todos terceirizados e a locação destes é o fator gerador de maior custo para a mineração.

4.2.1.1 Tempo de ciclo da operação de decapeamento

Na operação unitária de decapeamento (figura 33) no método *Open Pit Mining* eram utilizados 05 (cinco) caminhões basculantes do fabricante Volkswagen modelo Constellation VW 31320 com capacidade nominal de 16 m^3 para o transporte do material estéril (figura 34), uma escavadeira hidráulica sobre esteiras Hyundai, modelo R320LC-7 com capacidade nominal de caçamba de $1,73\text{ m}^3$ para o carregamento do material estéril nos caminhões, e uma pá-carregadeira sobre rodas CASE modelo W20E-5 com capacidade de caçamba de $1,91\text{ m}^3$ que “empurrava” o material estéril nas encostas dos taludes no bota-fora (Bastos, 2013).

Figura 33: Operação de carregamento do material estéril (decapeamento)



Fonte: Autora (2016)

Figura 34: Disposição do material estéril na cava minerada



Fonte: Autora (2016)

Semelhantemente ao trabalho desenvolvido por Bastos (2013), para realizar a comparação em termos operacionais entre os métodos *Open Pit* e *Terrace Mining* com relação à operação de decapeamento realizou-se o levantamento do tempo de ciclo dos equipamentos envolvidos na operação, através de um cronômetro. Os seguintes tempos foram coletados: tempo de carregamento do caminhão pela escavadeira (T_c), tempo do percurso de ida do caminhão até a pilha de estéril (T_i), tempo de posicionamento para basculamento e basculamento (T_b), e tempo do percurso de retorno do caminhão (T_r). Além dos tempos de ciclo foram computadas as distâncias de ida (D_i) e retorno (D_r) dos caminhões para o trajeto da pilha de estéril através dos odômetros dos caminhões.

Com relação ao *Open Pit*, utilizou-se os dados obtidos por Bastos (2013). À época deste método, os tempos de ciclo dos equipamentos foram coletados quando do decapeamento de uma área para desenvolvimento de uma rampa de acesso que estava sendo construída na direção nordeste da cava. Para este levantamento foi utilizado o caminhão de placa PEX 7060, totalizando 30 amostras.

O levantamento dos tempos de ciclo do método *Terrace Mining* foi realizado na operação de decapeamento para exposição de uma bancada de minério. Os dados foram coletados utilizando o caminhão de placa PEX 7370 em setembro de 2016 e totalizou 30 amostras.

4.2.1.2 Tempo de ciclo da operação de perfuração e caracterização do desmonte do minério

Com relação à operação de perfuração, os dados referentes à operacionalização do método *Open Pit* foram obtidos a partir do estudo realizado por Bastos (2013) durante a perfuração de uma bancada de 11 metros de altura média, e o tempo de ciclo da perfuração no método *Terrace Mining* foi coletado em setembro de 2016 para o desmonte de uma bancada de altura média de 12 metros. O equipamento utilizado para a perfuração da bancada nos dois métodos é uma perfuratriz pneumática *Atlas Copco Wagondrill* que opera juntamente a um compressor marca *Atlas Copco* modelo XATS 127 (figura 35).

Figura 35: Operação unitária de perfuração



Fonte: Autora (2016)

No caso estudado, o desmonte é realizado em duas bancadas de minério, separadas em função do tipo de minério, sendo a bancada superior composta de minério tipo A com altura média de 11 metros, e a bancada inferior de minério tipo B com altura média de 3 metros.

O desmonte é realizado com explosivos (figura 36), e para tal utiliza-se ANFO (*Amonium Nitrate and Fuel Oil*) granulado e emulsão encartuchada. Os parâmetros do plano de fogo compreendem a quantidade de furos que varia de 12 a 15 por desmonte. São utilizados 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 por explosivos, é necessária a fragmentação secundária do minério (figura 37), que é realizada por rompedores hidráulicos acoplados a escavadeiras.

Figura 36: Resultado do desmonte com explosivos



Fonte: Autora (2016)

Figura 37: Fragmentação secundária do minério



Fonte: Autora (2016)

4.2.1.3 Tempo de ciclo da operação de carregamento do minério

Na operação de carregamento do minério utilizam-se duas pás-carregadeiras sobre rodas do fabricante CASE modelo W20E-4 com caçamba frontal de capacidade de $1,91 \text{ m}^3$ e uma retroescavadeira hidráulica Hyundai modelo R210LC-7 com caçamba de capacidade $1,2 \text{ m}^3$ tanto à época do método *Open Pit* quanto no método *Terrace Mining* (figura 38). A pá-

carregadeira consiste em um trator ligeiramente modificado que possui caçamba articulada em relação aos braços a qual é acionada por dois pistões, podendo ocupar as posições de escavação ou de carregamento, ou qualquer posição intermediária. Com relação ao carregamento das unidades de transporte, as carregadeiras se deslocam, movimentando-se entre o talude de terra ou a pilha de material e o veículo, sendo que em um ciclo completo de carga haverá dois movimentos à frente e dois a ré.

Figura 38: Operação unitária de carregamento do minério



Fonte: Autora (2016)

Conforme o Manual Prático de Escavação, o tempo de ciclo básico de uma carregadeira de pneus articulada varia de 0,45 e 0,60 minutos; porém, este tempo deve ser corrigido de acordo com as variações provenientes das condições reais de trabalho (tipo e condição do material, altura da pilha, operação contínua ou descontínua etc.), além do tempo de espera da carregadeira enquanto aguarda a manobra de posicionamento da unidade de transporte, o qual é bastante variável já que depende em grande parte das condições do local de carga.

Na operação convencional de carregamento do minério atualmente em uso 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 (figura 39). Para fins de comparação com relação à operação de carregamento do minério entre os métodos *Open Pit* e *Terrace Mining*, foram coletados os

tempos de ciclo das duas pás-carregadeiras disponíveis para o carregamento de um caminhão caçamba de aproximadamente 20 toneladas. Foram utilizados os tempos de ciclo da operação de carregamento do método *Open Pit* resultantes do estudo realizado por Bastos (2013), e para o método *Terrace Mining* os dados de tempo de ciclo do carregamento foram coletados em setembro de 2016.

Figura 39: Espalhamento do minério na praça da mina



Fonte: Autora (2016)

4.3 ANÁLISE DOS ASPECTOS AMBIENTAIS

Para a análise quanto aos aspectos ambientais após a substituição do método de lavra, foi realizada uma estimativa com relação à reabilitação da cava minerada em termos percentuais de volume utilizando-se dados secundários obtidos por meio de relatórios técnicos cedidos pela empresa.

A análise quantitativa compreendeu dados referentes ao volume total de material estéril que recobre o depósito de gipsita da Mina Ponta da Serra e também a profundidade do *pit* após a exaustão da mina através dos dados de volume e área provenientes dos trabalhos de topografia (2010), sondagem (campanhas de 1993 e 2012) e cubagem da jazida para reavaliação do volume de material remanescente na mina, realizada em 2012.

A metodologia consistiu em calcular o percentual em termos de volume de recuperação da área minerada a partir dos dados obtidos no levantamento topográfico e na cubagem que determinou a reserva medida de gipsita bem como de material estéril. O volume

de material estéril *in situ* é 1.800.944,2 m³ e o volume de minério totaliza 877.618,83 m³ (minério de bancada e do piso). A profundidade média da cava determinada de acordo com a espessura média das camadas de estéril e de minério perfaz 31,9 metros, sendo 20,6 m a espessura média da camada de estéril e 11,3 m a espessura média da camada de minério. Segundo dados da empresa, o volume de material estéril presente no bota-fora construído à época da operação pelo método *Open Pit Mining* perfaz 326.250 m³, e teve o correspondente descontado do volume total de estéril da cava. O empolamento considerado para o capeamento foi 40%, correspondente a materiais argilosos. De posse dos dados, fez-se a estimativa do percentual em volume de recuperação da área que será conseguida após a exaustão das operações de exploração da gipsita conforme a equação 5.

$$\text{Recuperação da área (\%)} = \frac{\text{Volume de estéril total (m}^3\text{)} - \text{Volume do bota - fora (m}^3\text{)}}{\text{Volume total da cava (m}^3\text{)}} \quad (5)$$

4.4 LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO

Para fins da análise comparativa de custos entre os métodos *Open Pit* e *Terrace Mining*, realizou-se o levantamento dos custos de produção unitários concernentes a cada etapa do processo produtivo de obtenção da gipsita dos dois métodos de lavra, possibilitando dessa forma quantificar os benefícios advindos da implementação do *Terrace Mining*. Para facilitar a análise dos dados, o custo operacional da mineração foi devidamente separado por setores de trabalho em:

- ✓ Setor de decapeamento (custos da operação de descobertura);
- ✓ Setor de extração do minério (custos de lavra – perfuração, desmonte, e carregamento do minério);
- ✓ Setor de serviços administrativos e serviços auxiliares de produção (custos indiretos relacionados à mão-de-obra).

A composição do custo por setor se configurou da seguinte forma:

❖ 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 referente a cada equipamento determinado através do consumo médio de combustível de cada equipamento;
- ❖ Custo com frete de caminhões para transporte do material da frente de trabalho até o

local de deposição deste.

❖ **Custos de lavra do minério:**

- ❖ Custo com locação dos equipamentos: uma escavadeira hidráulica e duas pás-carregadeiras que realizam o carregamento do minério nos caminhões, uma escavadeira hidráulica com rompedor hidráulico acoplado, um compressor e uma perfuratriz pneumática;
- ❖ Custos com diesel dos equipamentos utilizados através da estimativa de consumo médio de combustível de cada um;
- ❖ Custo com explosivos.

❖ **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 e auxiliares de produção.

Neste contexto, baseado no banco de dados de controle de produção da empresa Royal Gipso Ltda. para a Mina Ponta da Serra, foram levantados os dados de produção mensal de gipsita, bem como os custos e o faturamento atinentes a essa produção. Para o método *Open Pit Mining* foram utilizados os dados de produção e custos referentes ao período entre janeiro e julho de 2013, provenientes da dissertação elaborada pela Engenheira de Minas Flávia Bastos e os dados de produção e custos relativos ao método *Terrace Mining* foram obtidos através de levantamentos de campo e relatórios de controle de produção cedidos pela empresa.

O banco de dados dos custos da Mina Ponta da Serra da mineração Royal Gipso Ltda. utilizado para a análise dos custos de produção foi construído com base no conceito de custeio por absorção, que apura o valor dos custos dos bens ou serviços atribuindo aos produtos fabricados todos os custos de produção, quer de forma direta mediante discriminação de forma objetiva, ou indireta pela apropriação dos custos através de rateio. Assim todos os custos, sejam eles fixos ou variáveis, são absorvidos pelos produtos (Crepaldi, 2004). Esse método foi escolhido e é utilizado pela mineradora pelo fato de que pode acontecer de nem todo o minério desmontado em determinado período ser comercializado no referido período, principalmente os minérios tipo B e C; assim, os custos desse minério não vendido não serão considerados no fluxo de caixa.

Com o levantamento do banco de dados dos custos da empresa 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 de lavra *Open Pit Mining* e *Terrace Mining*, apontando os benefícios operacionais e econômicos conseguidos com a implementação e operacionalização deste último.

Para facilitar a análise comparativa, foram utilizados o custo unitário de produção calculado de acordo com a equação (1) referente a cada operação componente do custo total de produção e o índice de margem de lucro líquida (equação 4), que apresenta em percentual o lucro obtido com a comercialização do minério de gipsita após o desconto dos custos operacionais, apontando a rentabilidade alcançada com a aplicação do método *Terrace Mining*.

O índice de margem de lucro líquida (ML) foi obtido a partir da adaptação da equação (4) de modo a se calcular este índice diretamente a partir do custo operacional, que são os dados disponíveis; fazendo-se a adaptação, a equação resultou em:

$$ML (\%) = \frac{\text{Lucro líquido (R\$)}}{\text{Faturamento (R\$)}} \times 100 \quad (4)$$

$$ML (\%) = \frac{\text{Faturamento (R\$)} - \text{Custo operacional}}{\text{Faturamento (R\$)}} \times 100$$

$$ML (\%) = 1 - \frac{\text{Custo Operacional (R\$)}}{\text{Faturamento (R\$)}} \times 100 \quad (6)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a avaliação dos parâmetros econômicos, operacionais e ambientais relativos à operação de lavra através dos métodos *Open Pit Mining* e *Terrace Mining* na Mina Ponta da Serra no Polo Gesseiro do Araripe, comparando tais resultados no sentido de analisar em aspectos qualitativos e principalmente em termos quantitativos os benefícios resultantes da implementação do método *Terrace Mining* em substituição ao *Open Pit Mining* na mineração de gipsita. As tabelas completas utilizadas como base de dados para os cálculos estão em anexo.

5.1 COMPARAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE OPERAÇÃO NOS MÉTODOS DE LAVRA *OPEN PIT MINING* E *TERRACE MINING*

A operacionalização do método *Terrace Mining* em substituição ao método *Open Pit Mining* na Mina Ponta da Serra da empresa Royal Gipso Ltda. não alterou as operações executadas e sequência das mesmas para extração do minério, sendo elas: decapeamento (carregamento e transporte do material estéril), perfuração e desmonte do minério, fragmentação secundária do minério e carregamento do minério. Entretanto, quando da realização do estudo de viabilidade para aplicação do *Terrace Mining* na Mina Ponta da Serra, foram levantados os gargalos existentes em todas as operações unitárias, e a implementação do mesmo possibilitou a otimização de todo o processo de exploração da gipsita por meio, principalmente, dos benefícios conseguidos na operação de descobertura.

Após a aplicação do *Terrace Mining* houve alterações no regime de produção da mineração, na quantidade de equipamentos necessários para a demanda de produção requerida, e no volume de mão-de-obra necessária à operacionalização da lavra. O regime de produção para obtenção de 10.000 a 12.000 toneladas/mês de gipsita à época do método *Open Pit Mining* era, de acordo com Bastos (2013), 8 horas/dia, 25 dias/mês e 300 dias/ano. Com a implantação do *Terrace Mining*, a capacidade de produção da mineração aumentou, passando 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 possibilitados pela maior quantidade de área de minério exposta com a nova metodologia de lavra.

Os equipamentos necessários à extração de gipsita na Mina Ponta da Serra da Mineração Royal Gipso Ltda. dentro dos parâmetros especificados estão discriminados na

tabela 4, que apresenta o comparativo dos equipamentos que eram utilizados no método *Open Pit Mining* e os equipamentos que são utilizados com a operacionalização do método *Terrace Mining*.

Tabela 4: Descrição dos equipamentos necessários aos dois métodos de lavra

Método Open Pit Mining		Método Terrace Mining	
Equipamento	Quantidade	Equipamento	Quantidade
Escavadeira hidráulica Hyundai R320LC-7 de 1,7 m ³	01	Escavadeira hidráulica Hyundai R320LC-7 de 1,7 m ³	01
Caminhões basculantes Volkswagen 31320 de 16 m ³	05	Caminhões basculantes Volkswagen 31320 de 16 m ³	02
Pá-carregadeira CASE W20E-4 e W20E-5 de 1,9 m ³	03	Pá-carregadeira CASE W20E-4 e W20E-5	03
Escavadeira hidráulica CASE CX220B com Rompedor hidráulico BM Britamaq acoplado	01	Escavadeira hidráulica CASE CX220B com Rompedor hidráulico BM Britamaq acoplado	01
Escavadeira Hidráulica Caterpillar 416E com Rompedor hidráulico Sandvik acoplado	02	Escavadeira Hidráulica Caterpillar 416E com Rompedor hidráulico Sandvik acoplado	00
Compressor portátil Atlas Copco XATS 127	01	Compressor portátil Atlas Copco XATS 127	01
Perfuratriz pneumática Wagon Drill	01	Perfuratriz pneumática Wagon Drill	01
Escavadeira hidráulica Hyundai R210LC-7 de 1,2 m ³	01	Escavadeira hidráulica Hyundai R210LC-7 de 1,2 m ³	01
Total	15		10

A tabela mostra que houve redução de 05 (cinco) equipamentos das operações de lavra, sendo 03 (três) equipamentos referentes ao setor de decapeamento da mina (caminhões) e 02 (duas) retroescavadeiras de pequeno porte que operavam na operação de fragmentação secundária. A substituição do método *Open Pit Mining* pelo método *Terrace Mining* influenciou diretamente a redução do número de caminhões e indiretamente a diminuição da quantidade de retroescavadeiras, pois esta ocorreu somente após o levantamento dos gargalos operacionais no estudo para implantação do *Terrace Mining* possibilitando a otimização da operação de fragmentação.

A redução do número de caminhões foi devida principalmente à mudança do modo de execução da atividade de disposição do material estéril na operação de descobertura, que à época do *Open Pit* era realizada em uma bota-fora externo à cava, o qual se localizava a cerca de 1,5 km de distância da frente de lavra, e com o método *Terrace Mining* o material passou a ser depositado de volta na cava minerada, a uma distância média de transporte de 450 metros, propiciando desta forma a reabilitação topográfica da área. A diminuição do número de caminhões impactou significativamente a operação no setor de decapeamento visto que

possibilitou uma negociação no valor do frete dos mesmos, diminuindo consideravelmente os custos relativos a este setor.

As escavadeiras da operação de fragmentação secundária foram substituídas por uma escavadeira de maior porte que, por sua capacidade de produção, consegue atender a demanda de volume de minério fragmentado requerido pela empresa. Essa escavadeira de maior porte com rompedor hidráulico acoplado já operava na mina no método *Open Pit Mining*, entretanto em regime intermitente, apenas quando por um problema mecânico de algum dos outros equipamentos ou em casos de produção de minério acima da média para atender estas demandas. Após estudo de implantação do *Terrace Mining*, mesmo com o aumento da quantidade de gipsita produzida, a mineração conseguiu eliminar a utilização contínua desses equipamentos e cumprir seus compromissos de comercialização, além de gerar economias com custos com locação das retroescavadeiras.

Tal redução influenciou também o volume de mão-de-obra necessária, com diminuição de 05 (cinco) operadores de máquinas e 02 (dois) auxiliares de produção. De acordo com o levantamento realizado por Bastos (2013), o custo mensal com mão-de-obra para o método *Open Pit Mining* era da ordem de R\$ 18.000,00, e diminuiu à ordem de R\$ 9.000,00 para o método *Terrace Mining* (tabelas em anexo), implicando em redução de cerca de 50% do custo operacional com este setor.

5.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS DOS MÉTODOS DE LAVRA *OPEN PIT MINING* E *TERRACE MINING*

5.2.1 Operação de Descobertura

A análise comparativa da operação de descobertura para os métodos de lavra *Open pit Mining* e *Terrace Mining* foi realizada em termos de tempo de ciclo dos caminhões na operação de cada método. A tabela 5 apresenta a comparação dos tempos de ciclo para os métodos *Open Pit Mining* e *Terrace Mining*.

Os tempos coletados compreendem: tempo de carregamento dos caminhões (T_c), executado pela escavadeira hidráulica; tempo de percurso de ida do caminhão até o local de disposição do estéril (T_i); tempo de posicionamento para basculamento e basculamento propriamente dito (T_B); e tempo de retorno do caminhão para a frente de trabalho (T_r). Os resultados dos tempos de ciclo elementares para os dois métodos de lavra em análise foram:

Tabela 5: Comparação do tempo de ciclo do transporte de estéril para os dois métodos

Tempo de ciclo – <i>Open Pit Mining</i>	Tempo de ciclo – <i>Terrace Mining</i>
$T_c = 4,04$ minutos	$T_c = 2,07$ minutos
$T_i = 4,30$ minutos	$T_i = 1,90$ minutos
$T_B = 1,36$ minutos	$T_B = 0,65$ minutos
$T_r = 2,30$ minutos	$T_r = 1,35$ minutos

De acordo com os dados das tabelas, o tempo de ciclo médio dos caminhões para o método *Open Pit Mining* era de 12 minutos. As condições operacionais quando da coleta de dados eram de distâncias médias de transporte da frente de trabalho até o bota-fora, localizado externamente a cava, de cerca de 1.400 metros, sendo a distância média do percurso de ida do caminhão até o bota-fora de 709,9 metros e a distância média do percurso de volta de 700,5 metros (Bastos, 2013). Já para o método *Terrace Mining* o tempo de ciclo médio coletado foi 6 minutos, e a distância média de transporte para este ciclo foi 450 metros, sendo a distância média do percurso de ida do caminhão até o local de disposição do estéril, a própria cava minerada, de 500 metros e a distância média do percurso de volta de 400 metros.

Observa-se que houve diminuição em todos os valores dos tempos elementares que compõem o ciclo operacional dos caminhões após a mudança do método de lavra na mina. Essa redução de 50% no tempo de ciclo dos caminhões na Mina Ponta da Serra é atribuída principalmente à diminuição significativa das distâncias de ida e retorno desses equipamentos ao local de disposição do material estéril após a implementação do método *Terrace Mining*. Além de permitir a continuidade das operações de exploração da gipsita, pois não havia mais área de servidão disponível para disposição do material do capeamento e o bota-fora existente já havia atingido o volume máximo de material, o referido método reduziu, em termos percentuais de acordo com os dados, cerca de 60% a distância média de transporte percorrida pelos caminhões na operação de descobertura.

A diminuição do tempo de carregamento do material pela escavadeira hidráulica nos caminhões pode ser atribuída à resistência mecânica do material que estava sendo escavado quando os dados foram coletados, considerando que no método *Open Pit Mining* estava sendo escavado o estéril localizado em maior profundidade, e para o método *Terrace Mining* este material pertencia às camadas superficiais do capeamento da gipsita, constituindo-se, portanto, de material argilo-arenoso. Além disso, pode-se atribuir também essa diminuição às habilidades ao operador do equipamento de carregamento.

Com relação ao tempo de posicionamento para basculamento e basculamento propriamente dito, pode-se atribuir sua redução à forma com que esta atividade é realizada em cada método de lavra, pois na disposição do estéril pelo método *Open Pit Mining* o caminhão

despendia de maior tempo devido ao fato de ter que se posicionar para despejar o material de modo que o mesmo caísse pelo talude natural formado com o aumento de volume cada vez maior da pilha de estéril, enquanto que no método *Terrace Mining* esse posicionamento não exige tanto rigor, pois a deposição do material não é realizada em um bota-fora, e sim no piso do *pit* onde o minério já foi extraído.

No que concerne à atividade de carregamento do estéril com escavadeira hidráulica, o estudo de viabilidade para implantação do método através de dimensionamento dos equipamentos realizado por Bastos em 2013 mostrou que a capacidade da caçamba de 1,73 m³ da escavadeira R320LC-7 utilizada para o decapeamento estava superestimada, sendo necessário um equipamento com capacidade de apenas 0,7 m³ para a produção requerida da mina. Entretanto, como a partir de 2015 o regime de produção foi alterado, a produção de gipsita também aumentou e, conseqüentemente teve-se que aumentar a quantidade de estéril removido para liberação do minério, exigindo então que a R320LC-7 continuasse operando.

Com relação à atividade de espalhamento do estéril no local de disposição também houve uma redução no número de horas de operação exigidas pela pá-carregadeira que a executa, visto que não se faz mais necessário o espalhamento contínuo e rigoroso do material antes executado para estabilização das encostas de taludes do bota-fora, permitindo assim um regime de trabalho intermitente e demandado apenas com o objetivo de reestabelecer a topografia da área minerada.

Além da redução do tempo de ciclo médio dos caminhões e otimização das atividades de carregamento e espalhamento do material estéril da operação de descobertura, a substituição do método *Open Pit Mining* pelo método *Terrace Mining* permitiu a diminuição de três caminhões da frota, pois apenas dois caminhões são suficientes para atender as demandas de produção sem formação de filas de espera para o carregamento, o que conseqüentemente reduziu o consumo de combustível.

5.2.2 Operação Unitária de Perfuração e Caracterização do Desmonte do Minério

Os resultados para fins de comparação entre os métodos de lavra em estudo na operação unitária de perfuração encontram-se na tabela 6, que mostra o tempo médio de atividade de cada haste na perfuração.

Tabela 6: Comparação do tempo de ciclo de perfuração para os dois métodos

Média dos tempos de perfuração das hastes	<i>Wagon Drill (Open Pit Mining)</i>	<i>Wagon Drill (Terrace Mining)</i>
Haste 1	00:08:48	00:12:52
Haste 2	00:09:12	00:15:13
Haste 3	0:09:46	00:11:45
Haste 4	0:12:14	00:13:23

A diferença do tempo da perfuração de cada haste na abertura dos furos para o desmonte pode ser justificado pela quantidade e comprimento dos furos realizados para cada desmonte e diferença de resistência mecânica do minério. Na coleta de dados para o método *Open Pit*, foram realizados 10 furos de comprimento médio de 11 metros, e para o *Terrace Mining* foram 15 furos com comprimento médio de 12 metros.

Como dito anteriormente, os parâmetros relativos à operação de perfuração e desmonte não se alteraram com a aplicação do *Terrace Mining*. Esta operação continua sendo realizada por uma *Wagon Drill* do fabricante *Atlas Copco* que consiste em uma associação da perfuratriz, de um avanço de corrente e de uma estrutura de suporte dotada de 04 (quatro) rodas com pneumático e uma barra de tração. Este equipamento possui facilidade de deslocamento proporcionada pela estrutura sobre pneus e de ser tracionado por um trator, somado ao fato de permitir o emprego de perfuratrizes pesadas e de fundo de furo. Neste caso a perfuratriz presa à placa deslizante do avanço de corrente é substituída por um motor de rotação.

Para o método *Open Pit*, o custo unitário da operação foi de R\$ 7,09 por metro perfurado, considerando a perfuração de cerca de 110 metros em 6 horas de operação, totalizando um valor de R\$ 744,00 (Bastos, 2013). Para o método *Terrace Mining*, o custo unitário dessa operação foi 11,42 R\$/metro perfurado, considerando a perfuração de cerca de 180 metros em 13 horas de operação, totalizando R\$ 2.400,00. Pode-se concluir então que o custo da operação aumentou em consonância ao aumento do custo de locação dos equipamentos, do combustível e do aumento da produção.

Com relação ao desmonte com explosivos também não houve alterações nos parâmetros do plano de fogo, exceto quanto à quantidade de volume de minério detonado devido ao aumento da produção. Assim como no método *Open Pit*, no *Terrace Mining* o desmonte das bancadas do minério tipo A e B possuem velocidades de extração diferentes devido ao fato de que a demanda do minério tipo B no mercado é baixa em relação ao minério tipo A.

Já a operação de fragmentação secundária passou a ser realizada com um único

equipamento após sua otimização. Considerando a utilização das duas retroescavadeiras, o custo mensal com esta operação à época do *Open Pit* era R\$ 26.038,60 mais o custo da operação intermitente da escavadeira CX220B (que não foi estimado pela indeterminação da quantidade de horas exatas de operação). No método *Terrace Mining*, este custo mensal, considerando o custo R\$ 3,10 por litro de diesel e o novo regime de produção, é R\$ 25.049,60, ou seja, houve redução no custo com a operação de fragmentação secundária.

5.2.3 Operação Unitária de Carregamento do Minério

Na operação de carregamento os equipamentos utilizados para os dois métodos em avaliação são pás-carregadeiras de pneus. O ciclo de uma pá-carregadeira pode ser decomposto nos movimentos elementares de avanço até o corte ou pilha de material, carga da caçamba, retorno carregado, manobra, avanço até o veículo, descarga, retorno vazio, e manobra. Nesses movimentos elementares há tempos variáveis, que dependem diretamente da distância percorrida, e tempos fixos, que permanecem mais ou menos constantes no decorrer de muitos ciclos. Os tempos de ciclo compreendendo os movimentos elementares dos equipamentos da operação de carregamento estão apresentados nas tabelas 7, 8, 9 e 10:

Tabela 7: Tempo de ciclo e produtividade da W20E-4 1 no método *Open Pit Mining*

Tempo de ciclo da Pá-carregadeira W20E-4 1		
Placa do caminhão	Tempo (minutos)	Peso (t)
DAJ 8255	06:08	18,65
KFZ 3907	08:52	22,10
KKO 9040	07:16	18,50
OFM 2104	06:13	18,20
KKB 9789	05:30	17,20
KGW 0819	06:00	21,03
PEI 7370	07:20	23,33
HMG 0248	06:28	19,51
JKK 1960	06:28	19,98
KIC 9703	05:58	18,87
KLP 0876	09:54	19,62
TRG 4360	05:38	18,65
MYK 5198	05:38	19,50
JUO 5467	04:58	19,64
OUT 0987	07:21	19,40
Média	06:38	19,61
Produtividade	ton/h	177,36

Tabela 8: Tempo de ciclo e produtividade da W20E-4 2 no método *Open Pit Mining*

Tempo de ciclo da Pá-carregadeira W20E-4 2		
Placa do caminhão	Tempo (minutos)	Peso (t)
DFR 5467	04:31	17,80
KTY 9599	05:13	18,49
LPT 4625	09:08	22,10
JDR 0312	05:00	18,81
PEI 1926	05:54	23,50
KFE 3907	04:39	18,81
KGW 0819	07:30	22,10
HWE 6108	04:34	20,03
JLP 7632	04:00	17,60
IKM 5410	05:24	19,06
CBY 2701	12:26	22,10
JFL 5180	06:00	19,29
DRF 4356	07:24	19,64
GTX 7934	06:14	19,50
WFB 8547	07:35	19,50
Média	06:22	19,90
Produtividade	ton/h	174,93

Tabela 9: Tempo de ciclo e produtividade da W20E-4 1 no método *Terrace Mining*

Tempo de ciclo da Pá-carregadeira W20E-4 1		
Placa do caminhão	Tempo (minutos)	Peso (ton)
KFZ 8255	07:14	16,80
KIC 9703	06:07	17,49
PEI 1926	06:22	22,10
PEX 7370	06:45	19,02
PEY 7390	06:24	18,90
OPL 7654	07:34	19,98
KGW 0819	06:12	20,03
JHG 5489	05:31	19,50
WDF 3478	06:57	18,60
VRT 8745	05:59	17,00
DRF 4356	07:01	21,20
MYK 5198	06:34	18,90
IKM 5410	05:58	18,40
KKB 9789	06:23	17,60
KFZ 3907	06:10	19,90
Média	06:28	19,03
Produtividade	ton/h	175,45

Tabela 10: Tempo de ciclo e produtividade da W20E-4 2 no método *Terrace Mining*

Tempo de ciclo da Pá-carregadeira W20E-4 2		
Placa do caminhão	Tempo (minutos)	Peso (ton)
DFG 7890	04:14	15,80
ERF 5643	06:07	16,60
KFZ 3907	08:22	18,90
YHT 6709	06:45	17,80
GFE 3421	05:34	20,10
DWA 3210	04:56	18,90
BHM 7659	05:12	19,05
FDG 9845	05:31	18,50
JKH 4578	06:05	18,60
DVB 4390	08:32	17,40
KIC 9703	06:15	20,90
MYK 6590	06:34	19,00
PEI 1926	04:46	17,40
PEX 7370	05:00	16,70
JFP 7890	09:21	17,90
Média	06:12	18,24
Produtividade	ton/h	182,40

Observa-se nas tabelas que os dados de tempo de ciclo e produtividade de cada equipamento nos dois métodos são bem semelhantes, o que implica em dizer que não houve diferença significativa quanto à operação de carregamento do minério, pois a capacidade dos caminhões dos clientes não mudou. Quanto ao custo da operação no que se refere aos equipamentos, o aumento foi relativo ao aumento do custo de locação dos mesmos, aumento do combustível e mudança no regime de produção. O custo mensal de locação de uma pá carregadeira era de R\$ 19.902,00 por equipamento, e da escavadeira hidráulica era de R\$ 25.810,00 no método *Open Pit Mining*; no método *Terrace Mining* o custo da pá carregadeira passou a R\$ 28.825,00 e o da escavadeira hidráulica passou a R\$ 36.625,00.

5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CUSTOS OPERACIONAIS DOS MÉTODOS DE LAVRA *OPEN PIT MINING* E *TERRACE MINING*

As tabelas 11 e 12 apresentam os equipamentos distribuídos por setor, o custo de locação horário (que já inclui a manutenção) e o consumo médio de combustível estimado para cada equipamento para os dois métodos:

Tabela 11: 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 <i>Atlas Copco</i> XATS 127	R\$ 60,00	9 litros/hora
Perfuratriz pneumática <i>Atlas Copco Wagon Drill</i>	R\$ 55,00	

Fonte: Mineração Royal Gipso Ltda.

Tabela 12: 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 <i>Atlas Copco</i> XATS 127	R\$ 95,00	9 litros/hora
Perfuratriz pneumática <i>Atlas Copco Wagon Drill</i>	R\$ 60,00	

Fonte: Mineração Royal Gipso Ltda.

Observa-se nas tabelas que após a substituição do método *Open Pit Mining* para o *Terrace Mining* o custo de locação horária por equipamento obteve um acréscimo, o que já era esperado visto que da avaliação do *Open Pit* para o *Terrace* transcorreram 3 (três) anos.

Os resultados obtidos com as determinações dos custos com cada setor dos métodos de lavra *Open Pit Mining* e *Terrace Mining* a partir do banco de dados somado às informações de consumo médio de combustível apresentam-se resumidos nas tabelas 13 e 14 e de forma detalhada nas tabelas em anexo.

Tabela 13: Dados do custeio de produção de gipsita – Método *Open Pit Mining*

Mês	Setor de Custo	Produção de gipsita (t)	Custo Unitário de Produção (R\$/t)	Participação no Custo (%)
Janeiro/2013	Descobertura	12.010,55	6,76	36,35
	Lavra		10,40	55,96
	Mão-de-obra		1,43	7,69
Fevereiro/2013	Descobertura	14.124,71	5,79	36,18
	Lavra		8,93	55,84
	Mão-de-obra		1,28	7,97
Março/2013	Descobertura	13.652,09	6,35	37,40
	Lavra		9,32	54,84
	Mão-de-obra		1,32	7,76
Abril/2013	Descobertura	11.797,91	5,59	36,46
	Lavra		8,21	53,58
	Mão-de-obra		1,53	9,96
Maio/2013	Descobertura	17.015,02	5,53	34,82
	Lavra		9,29	58,51
	Mão-de-obra		1,06	6,67
Junho/2013	Descobertura	11.972,60	5,64	34,47
	Lavra		9,22	56,34
	Mão-de-obra		1,50	9,19
Julho/2013	Descobertura	11.382,77	7,66	41,74
	Lavra		9,10	49,63
	Mão-de-obra		1,58	8,63

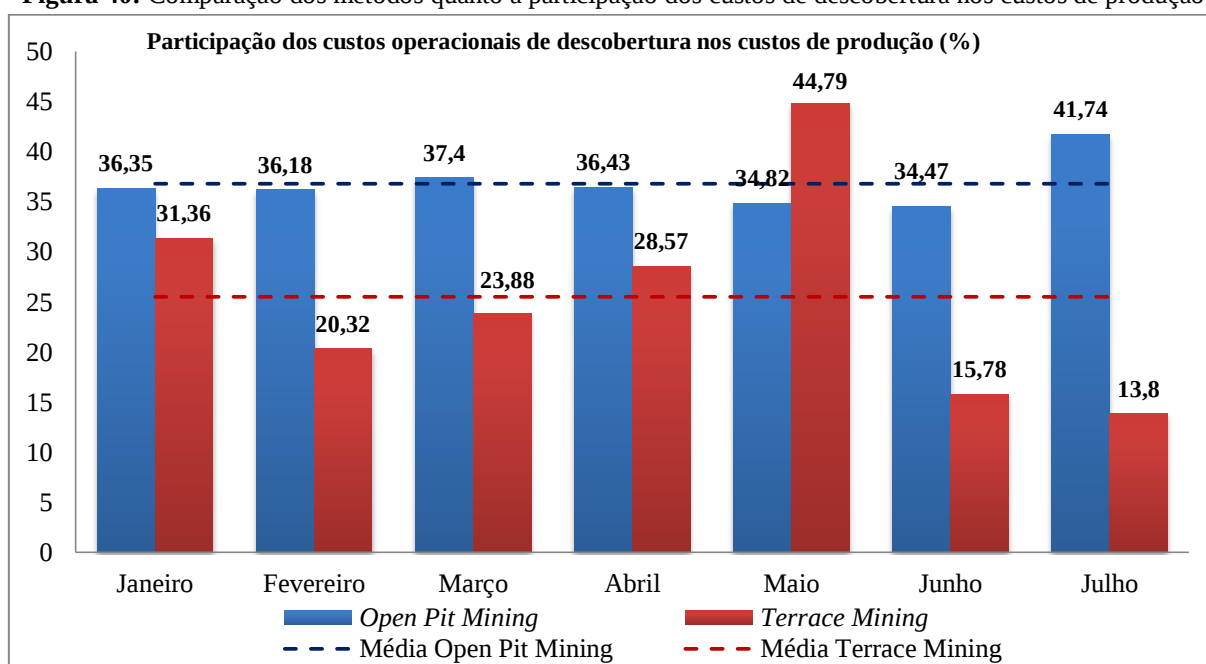
Tabela 14: Dados do custeio de produção de gipsita – Método *Terrace Mining*

Mês	Setor de Custo	Produção de gipsita (t)	Custo Unitário de Produção (R\$/t)	Participação no Custo (%)
Janeiro/2016	Descobertura	10.104,62	3,71	31,36
	Lavra		7,31	61,81
	Mão-de-obra		0,81	6,84
Fevereiro/2016	Descobertura	14.061,72	2,65	20,32
	Lavra		9,81	75,22
	Mão-de-obra		0,58	4,46
Março/2016	Descobertura	13.895,67	2,69	23,88
	Lavra		8,00	70,86
	Mão-de-obra		0,59	5,26
Abril/2016	Descobertura	11.853,34	4,32	28,57
	Lavra		10,07	66,58
	Mão-de-obra		0,73	4,85
Maio/2016	Descobertura	11.324,55	7,33	44,68
	Lavra		8,31	50,64
	Mão-de-obra		0,77	4,68
Junho/2016	Descobertura	15.517,81	1,78	15,78
	Lavra		8,96	79,25
	Mão-de-obra		0,56	4,97
Julho/2016	Descobertura	16.168,99	1,61	13,80
	Lavra		9,51	81,44
	Mão-de-obra		0,56	4,76

De acordo com os dados das tabelas, foram construídos os gráficos a seguir que apresentam as comparações das operações dos métodos *Open Pit Mining* e *Terrace Mining* 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 nos dois métodos de lavra.

O gráfico da figura 40 mostra a participação dos custos operacionais do setor de descobertura nos custos totais de produção no primeiro semestre de 2013 para o método *Open Pit Mining* e no primeiro semestre de 2016 para o método *Terrace Mining*.

Figura 40: Comparação dos métodos quanto à participação dos custos de descobertura nos custos de produção



A média de participação dos custos de descobertura nos custos totais de produção para o método *Open Pit Mining* foi 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 confirma os resultados já apresentados com relação ao benefício operacional e econômico alcançado com a aplicação do método *Terrace Mining* na Mina Ponta da Serra. O menor custo referente à operação de descobertura encontrado para o novo método é explicado pela redução do número de caminhões em atividade nesta operação, o que foi conseguido com a diminuição significativa de 1.400 m para 450 m nas distâncias médias de transporte que os caminhões perfaziam da frente de trabalho até o bota-fora.

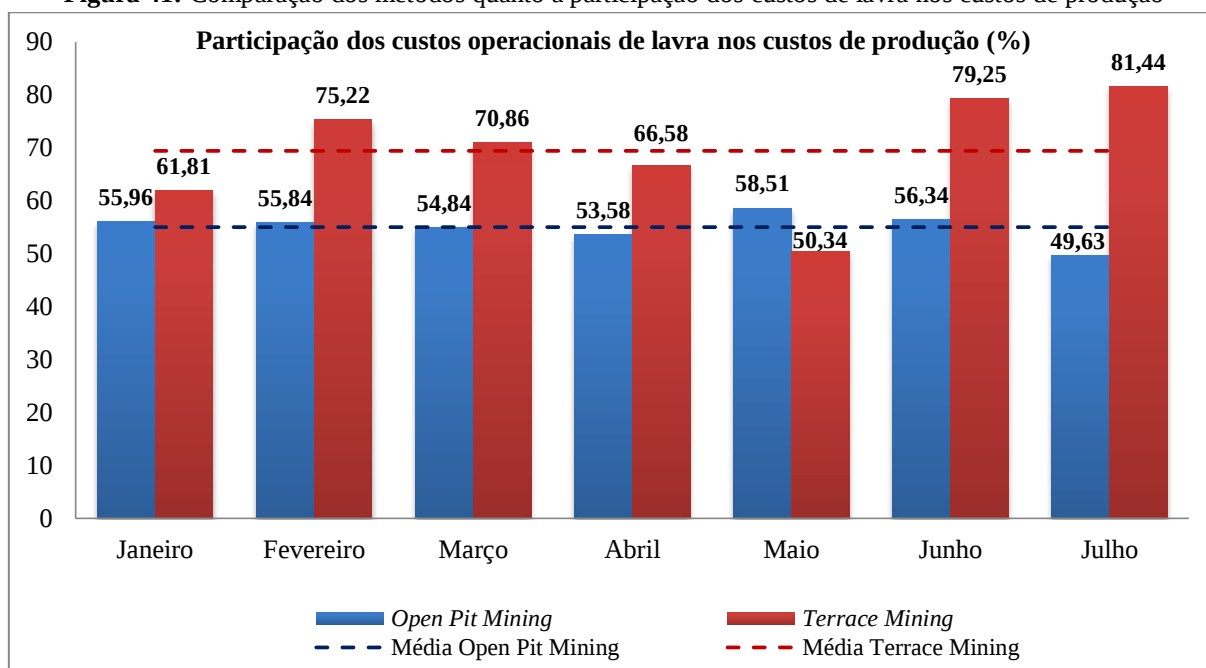
A quantidade de caminhões foi reduzida de 05 (cinco) para 02 (dois). Segundo informações da empresa Ingesel Ltda. que é responsável pela locação dos caminhões, o custo

com o combustível representa cerca de 49% do seu custo total; assim, a redução da quantidade destes equipamentos e da distância de transporte possibilitaram a negociação do valor do frete, pois conforme Bastos (2013) o valor do frete dos caminhões era 18,50 R\$/ciclo com o valor do combustível incluso. Entre os anos de 2014 até o primeiro semestre de 2016 esse valor teve reajuste de apenas R\$ 1,50 passando a 20,00 R\$/ciclo, e de 2016 até o presente momento o frete de cada caminhão custa 22,00 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 para um caminhão, no método *Open Pit Mining* com preço do frete a R\$ 18,50 o custo mensal com uma unidade era da ordem de R\$ 33.762,50 e, conseqüentemente, o custo mensal da frota era de R\$ 168.812,50. No método *Terrace Mining*, mesmo com o aumento do valor do frete para 20 R\$/ciclo e o custo mensal de um caminhão sendo 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 maior percentual de participação no custo total calculado para o método *Terrace Mining* (44,8%), superior ao maior percentual apresentado pelo *Open Pit Mining* é explicado pela alta produção de minério que se obteve nos meses de junho e julho/2016, o que exigiu a descobertura prévia de uma área maior para possibilitar a produção de minério requerida pelo mercado nesse período.

O gráfico da figura 41 apresenta a participação dos custos operacionais do setor de lavra do minério nos custos totais de produção para os dois métodos.

Figura 41: Comparação dos métodos quanto à participação dos custos de lavra nos custos de produção

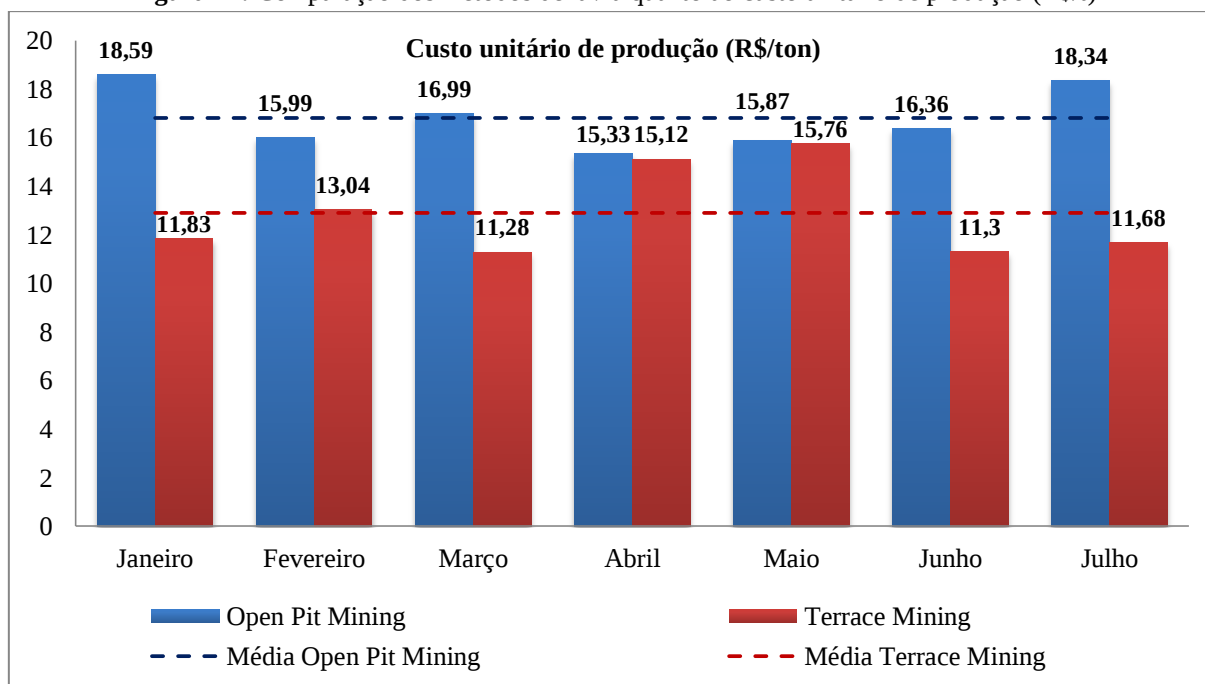


A média de participação dos custos de lavra nos custos totais de produção para o método *Open Pit Mining* foi 55%, enquanto que para o *Terrace Mining* este valor foi de 69,9%. Os percentuais de participação do custo de lavra no custo total do método *Terrace Mining* superaram todos os custos do *Open Pit*, exceto no mês de maio/2016 quando a quantidade de minério lavrada foi menor.

Os resultados obtidos corroboram os que já foram apresentados nesta dissertação. 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. Ainda assim, com o estudo para implantação do método *Terrace Mining*, como dito anteriormente, conseguiu-se uma otimização quanto à lavra na fragmentação secundária do minério, e foi possível substituir a operação de 3 equipamentos pela operação de apenas 1 equipamento, gerando uma economia anual da ordem de R\$ 10.000,00.

O gráfico da figura 42 mostra o custo unitário de produção do minério de gipsita da Mina Ponta da Serra no primeiro semestre de 2013 para o método *Open Pit Mining* e no primeiro semestre de 2016 para o método *Terrace Mining*.

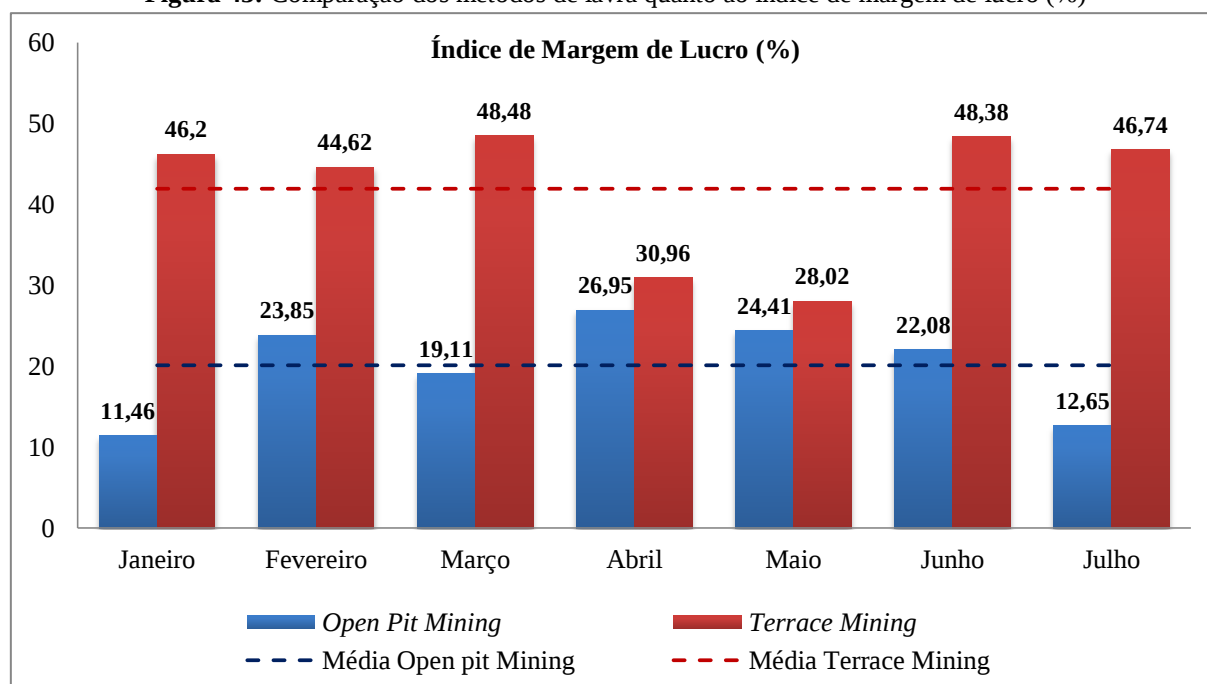
Figura 42: Comparação dos métodos de lavra quanto ao custo unitário de produção (R\$/t)



O custo unitário médio de produção para o método *Open Pit Mining* foi 16,8 R\$/t, e para o *Terrace Mining* este valor foi de 12,8 R\$/t, ou seja, houve uma redução de R\$ 4,00 no

custo de produção de cada tonelada de gipsita produzida, sem levar em consideração os efeitos da inflação no período. Tal redução aponta, mais uma vez, à confirmação de que a aplicação do método *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 operacionalização do método *Open Pit Mining* em 2013 e do método *Terrace Mining* em 2016:

Figura 43: 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 método *Open Pit Mining* foi 20,1%, ao passo que para o *Terrace Mining* esse índice apresentou valor de 41,91%, o que confirma o resultado obtido com relação ao menor 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 método *Open Pit Mining* e houve um aumento médio de cerca de 22% na rentabilidade da empresa. Observa-se que o menor valor de 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.

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS ASPECTOS AMBIENTAIS DOS MÉTODOS DE LAVRA *OPEN PIT MINING* E *TERRACE MINING*

Um dos principais gargalos ambientais em operações mineiras relaciona-se com a disposição temporária ou permanente do material estéril de granulometria grosseira ou fina proveniente da operação de descobertura e do rejeito oriundo do processamento mineral. Com relação ao material estéril, são necessárias áreas superficiais de terreno para sua disposição, que devem estar localizadas o mais próximo possível da frente de lavra para redução do custo de transporte e não interferir nas operações mineiras, a menos que a operacionalização do método de lavra permita a realização do reenchimento (*backfilling*) das áreas já mineradas dentro da mina concomitantemente à lavra do minério (Souza, 2001; IBRAM, 2016).

Na Mina Ponta da Serra da mineração Royal Gipso Ltda., com a operacionalização do antigo método de lavra, *Open Pit Mining*, o material estéril era colocado fora dos limites da cava a aproximadamente 1,4 km da frente de exploração. O depósito utilizado era do tipo rampa (*ramped dumps*), construído em bancada única, com ângulo de talude natural de acordo com o espalhamento do material nas encostas do bota-fora, e já alcançava altura em torno de 25 m (figura 44); não havia operações de estabilização das encostas do talude e nem drenagem e controle de infiltração de água para melhoria da estabilidade dos aterros de estéril.

Figura 44: Pilha de estéril a 1,4 km da frente de lavra na operacionalização do método *Open Pit Mining*



Fonte: Autora (2016)

Conforme afirma o Instituto Brasileiro de Mineração (2016), este tipo de depósito é construído sem nenhum tipo de seleção do material estéril, pois todo o material escavado é basculado no bota-fora sem qualquer técnica de classificação, o que não permite um melhor controle da estabilidade da pilha de estéril e perde-se irremediavelmente a camada de solo vegetal que poderia ser usada na recomposição paisagística das minas. Na área da Mina Ponta da Serra, além do passivo ambiental da construção do antigo depósito que ficará mesmo após a exaustão da mina, existe grande quantidade de concreções calcárias com presença de fósseis nas camadas da cobertura estéril, as quais também foram depositadas no aterro e dessa forma descartadas sem possibilidade de recuperação posterior para estudos científicos, culturais e possivelmente fonte econômica.

O planejamento das pilhas de disposição do estéril envolve fatores relativos à capacidade de acumulação (relacionado à área envolvida) e estabilidade do depósito. Além desses problemas, o bota-fora da mineração estava com a área de disposição operacional no limite, sem espaço adequado para manobra e retorno dos caminhões sendo necessária a mudança de local de disposição do material estéril. Porém, a falta de área para disposição de material estéril dentro do processo de concessão de lavra tornou-se um gargalo para a operação do método *Open Pit*.

Diante disso, com o objetivo de manter as atividades de lavra, foi realizado, no ano de 2012, um levantamento de custo para verificar a possibilidade de aquisição de um terreno fora dos limites da concessão de lavra da mineradora encontrando-se um terreno nas redondezas situado a 3,5 km de distância. O custo do hectare para áreas sem minério, na época, era de R\$ 9.000,00 e o tamanho da área necessária à disposição de estéril era de 78.791,00 m² ou 7,9 ha. Desta forma, o custo para aquisição da área seria de aproximadamente R\$ 71.000,00 e o valor unitário do frete dos caminhões passaria de 18,50 R\$/ciclo para 29,60 R\$/ciclo devido ao enorme aumento no consumo de combustível, o que inviabilizaria a continuidade da lavra. Atualmente este custo estaria em torno de R\$ 88.000,00, considerando uma área de 87.792,87 (8,7 hectares) m² e o custo de R\$ 10.000,00 por hectare.

A atividade de mineração, impactante por natureza, tem como obrigação verificar e minimizar os impactos produzidos ao meio ambiente, principalmente na fase de lavra, pois assim esses impactos poderão ter dimensões reduzidas. Com o passar do tempo, tem aumentado a conscientização de que não é mais possível exercer a atividade de extração mineral sem um rigoroso controle sobre os impactos ambientais, pois deve-se prezar pelo

princípio básico da sustentabilidade, e este afirma que se deve usar os bens naturais de forma a garantir a disponibilidade destes bens para gerações futuras.

Assim, após o estudo de viabilidade e a substituição do método de lavra *Open Pit Mining* para o método *Terrace Mining* foi possível utilizar o material do capeamento do minério para o preenchimento das áreas já mineradas em uma sistemática que prevê uma operação sincronizada de escavação da cobertura juntamente com o transporte deste material para dentro da cava obtendo-se uma distância de transporte a menor possível.

Os resultados referentes à recomposição topográfica da área com a aplicação do método *Terrace Mining* em substituição ao método *Open Pit Mining* começaram a ser obtidos desde o início de sua operacionalização, pois foi necessário o desenvolvimento de uma nova rampa na direção sudeste da área de exploração (figura 45), considerando como referencial o vértice V_1 da poligonal, paralelamente à principal rampa de acesso na época, e a disposição do material estéril foi realizada nesta rampa antiga, iniciando e proporcionando o processo de reabilitação topográfica da área.

Figura 45: Rampa desenvolvida para aplicação do método *Terrace Mining*



Fonte: Bastos (2013)

Hoje com o método devidamente implementado, foi realizada uma estimativa da recuperação da área minerada em termos de volume. O resultado obtido de acordo com a equação (5) foi uma possibilidade de recuperação em torno de 81% em volume da área que já foi minerada, o que corresponde a uma profundidade da cava de cerca de 26 metros implicando em recomposição de boa parte do *pit* final pós-exploração, o que se considera um importantíssimo benefício visto que com a metodologia *Open Pit Mining* o *pit* final pós-

exploração não seria reenchido, impossibilitando a reinserção da área na paisagem natural da região.

Entretanto, mesmo já tendo sido descontado o volume referente ao bota-fora, não se conseguirá tal recuperação, pois como dito anteriormente, parte do estéril já foi depositado na área da antiga rampa quando da construção do novo acesso para o método *Terrace Mining* e um pequeno volume do estéril foi depositado em outra área de concessão da empresa durante o processo de substituição do método.

Ainda assim, o benefício ambiental conseguido com a aplicação do método *Terrace Mining* na Mina Ponta da Serra da empresa Royal Gipso Ltda. do Polo Gesseiro do Araripe configura-se de extrema importância diante da realidade vivida hoje na atividade de mineração no que concerne à obrigatoriedade da recomposição topográfica da área minerada, principalmente no tocante às empresas de pequeno e médio porte, visto que esta etapa da mineração implica em altos custos, e estas empresas muitas vezes simplesmente não o fazem por indisponibilidade de capital.

A Mina Ponta da Serra ainda se encontra em operação com exploração do remanescente de minério da bancada superior (tipo A) e do minério do piso (tipo B). A reabilitação da área minerada tem acontecido de forma contínua, conforme pode ser visto nas imagens a seguir, que mostram o processo de recomposição em setembro de 2016 quando ainda não havia sido retirado todo o minério do piso no início da cava (figura 46) e em abril de 2017, quando tal minério já havia sido extraído (figura 47):

Figura 46: Reabilitação da cava pelo método *Terrace Mining* em 2016



Fonte: Autora (2016)

Figura 47: Reabilitação da cava pelo método *Terrace Mining* em 2017



Fonte: Mineração Royal Gipso Ltda. (2017)

6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da presente dissertação evidenciou os benefícios, vantagens e economias com relação a parâmetros operacionais, econômicos e ambientais obtidos com a aplicação do método *Terrace Mining* em substituição ao método *Open Pit Mining* por bancadas múltiplas na Mina Ponta da Serra da empresa Royal Gipso Ltda. em Araripina/PE no Arranjo Produtivo Local do Gesso.

O método de lavra *Open Pit Mining*, apesar de proporcionar um bom desenvolvimento técnico da lavra, gera um grande impacto ambiental representado pelas pilhas de material estéril depositadas em áreas externas a cava, implicando em longas distâncias de transporte, além de que com a exaustão do minério e consequente fim da exploração são formadas grandes crateras que não permitem a reinserção da área minerada na paisagem natural da região e dificultam seu uso futuro. Na mina Ponta da Serra a operação de lavra com esse método tornou-se um gargalo a ponto de inviabilizar as atividades de mineração da gipsita.

Neste contexto, na Mina Ponta da Serra, o método foi substituído na tentativa de dar continuidade às operações de exploração do minério, o que de fato aconteceu. Considerando que as operações unitárias dos dois métodos de lavra são correspondentes, a principal diferença ocorrida com a aplicação do *Terrace Mining* foi a mudança no método e 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 neste 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 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 exploração, pois a filosofia de lavra atualmente empregada permite que o estéril seja devolvido à cava minerada, permitindo uma reabilitação de aproximadamente 81% 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.

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

Adler, L. et al. Mining Exploitation. In: Hartman, H. L. (ed.) **Mining Engineering Handbook**. 2nd ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1992. pp. 529-675.

Arai, M. Chapadas: relict of mid-Cretaceous interior seas in Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 436-438, dezembro de 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/285637600_Chapadas_relict_of_mid-Cretaceous_interior_seas_in_Brazil>. Acesso em: 14 jan. 2017.

Araújo, S. M. S. **O Polo Gesseiro do Araripe**: Unidades geo-ambientais e impactos da mineração. 2004. 276 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Geociências. Área de Administração e Política de Recursos Minerais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

Assine, M. L. Bacia do Araripe. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 371-389, maio/nov. 2007.

Assine, M. L. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 3, p. 289-300, setembro de 1992. Disponível em: <<http://sbg.sitepessoal.com/bjg/1992/n.3/5.pdf>>. Acesso em: 2017 jan. 10.

Bacci, D. L. C.; Landim, P. M. B.; Eston, S. M. Aspectos e impactos ambientais de pedreira em área urbana. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 1, p. 47-54, Mar. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672006000100007&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 19 mai. 2017.

Bacic, M. J. **Metodologia de Análise Econômica**: questões conceituais e práticas da determinação e gestão de custos. Campinas: Instituto de Economia da Universidade estadual de Campinas, 2010.

Bastos, F. F. **Aplicação da Terrace Mining como alternativa para lavra de gipsita na região do Araripe – Pernambuco**. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) –

Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife: UFPE, 2013.

BHP Billiton. **Image Gallery**. 2017. Disponível em: <<http://www.bhpbilliton.com/media-and-insights/image-gallery/locations-and-operations/escondida-chile>>. Acesso em: 13 de maio de 2017.

Borges, L. A. F. **Gerenciamento Ambiental de Projetos de Mineração**: um estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto: UFOP, 2009.

Borges, L. E. P. et al. Caracterização mineralógica/cristalográfica da gipsita do Araripe. Congresso Brasileiro de Geologia: a Geologia e o Homem, XLI, 15 a 20 de setembro de 2002, João Pessoa. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia: a Geologia e o Homem**. João Pessoa: SBG, 2002. p. 184.

Borges, T. C. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração**. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto: UFOP, 2013.

Brasil. Decreto-lei nº 62.934, de 02 de julho de 1968. Aprova o regulamento do Código de Mineração. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, 02 jul. 1968.

Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Resultados do Censo Demográfico 2010 divulgados no Diário Oficial da União em 04.11.2010**. Brasília: IBGE, 2010. Disponível em: <cidades.ibge.gov.br/v3/cidades/municipio/2601102>. Acesso em: 10 jan. 2017.

Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Brasília: IBGE, 2010. Disponível em: <biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv49230.pdf>. Acesso em: 2017 jan. 14.

Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Demográfico 2000**. Brasília: IBGE, 2000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/default_censo_2000.shtm>. Acesso em: 2017 jan. 14.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM). **Relatório Técnico 34**: perfil da gipsita. Brasília: MME, 2009.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Secretaria de Desenvolvimento Energético. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea em Pernambuco**: Diagnóstico do Município de Araripina. Brasília-DF, out. 2005. 26 p.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Programa Nacional do Meio Ambiente (PNMA II). **Apostila de Legislação Ambiental Sobre Licenciamento e Fiscalização**. Brasília: SECTMA/CPRH, 2002.

Brasil. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. . **Mapa rodoviário de Pernambuco**. 2012. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/mapas-multimodais/mapas-multimodais/pe.pdf>>. Acesso em: 13 de mai. 2017.

Brazil Modal. **Carajás expande a lavra para novas áreas**. 2015. Disponível em: <<http://brazilmodal.com.br/2015/highlights/carajas-expande-a-lavra-para-novas-areas/>>. Acesso em: 13 de maio de 2017.

Bullivant, D. Current Surface Mining Techniques. **Journal for the Transportation of Materials in Bulk**: Bulk Solids Handling, v. 7, n. 6, p. 827-833, 1987.

Calvo, J. P. Y. In.: **Curso Internacional de Técnico Especialista en Rocas y Minerales Industriales**. Madrid, 29 de setembro a 03 de outubro, 2003.

Carareto, E. S. et al. Gestão Estratégica de Custos: custos na tomada de decisão. **Revista de Economia da UEG**, Anápolis (GO), v. 2, nº 2, 2006.

Carli, C. **Análise de Projetos Limite: Lavra a Céu Aberto x Lavra Subterrânea**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre: UFRGS, 2013.

Creatori, P. **Conheça as dez maiores minas a céu aberto do mundo**. 2016. Disponível em: <<http://www.parmetal.com.br/conheca-as-dez-maiores-minas-a-ceu-aberto-do-mundo/>>. Acesso em: 13 de maio de 2017.

Curi, A. **Lavra de Minas**. São Paulo: Oficina de textos, 2017.

Curi, A. **Minas a Céu Aberto – Planejamento de Lavra**. São Paulo: Oficina de textos, 2014.

Crepaldi, S. A. **Curso básico de contabilidade de custos**. São Paulo: Atlas, 2004.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **A Importância Econômica da Mineração no Brasil**. Brasília: DNPM, 2011.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Capítulo 4: Planejamento na Mineração. In: DNPM. **Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba: DNPM, 2004. p. 135-184.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Consulta de processo: Dados básicos e poligonal do processo 840.144/2008**. 2017. Disponível em: <<https://sistemas.dnpm.gov.br/SCM/Extra/site/admin/dadosProcesso.aspx>>. Acesso em 18 mai. 2017.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Sumário Mineral – 2015**. v. 35. Brasília: DNPM, 2016.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Tributação da Mineração no Brasil: Análise da situação atual e das mudanças propostas na reforma tributária**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp>. Acesso em: 10 mar. 2017.

Dutra, R. **Mineração – Atividades e Responsabilidades**. Associação Paulista de Engenheiros de Minas. Ponta Grossa/PR, 2014. Disponível em: <<http://www.apemi.eng.br/mineracao-atividades-e-responsabilidades.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

Exxaro. **Exxaro's Grootegeluk mine**. Disponível em: <<https://br.pinterest.com/pin/409898003554872434/>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

Ferreira, L. F. M. **Avaliação de três cenários operacionais no decapeamento da lavra de bauxita de Paragominas – PA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente) – Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente. Marabá: UFPA, 2012.

Girodo, A. C. **Mineração: Projeto APA SUL RMBH – Estudos do Meio Físico**. v. 2. Belo Horizonte: CPRM, 2005. 168 p.

Google Earth. **Mina Ponta da Serra – Araripina/PE**. 2011.

Google Earth. **Mount Arthur North, Hunter Vale, New South Wales (Austrália)**. 2017.

Google Earth. **Grootegeluk Mine**. 2017.

Hartman, H. L. et al. Introduction to Mining. In: Hartman, H. L. (ed.) **Mining Engineering Handbook**. 2nd ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1992. pp. 3-41.

Hartman, H. L.; Mutmanský, J. M. **Introductory Mining Engineering**. 2. ed. John Wiley and Sons, 2002.

Herrmann, H. **Legislação mineiro-ambiental para aproveitamento de agregados: Agregados para a construção civil no Brasil, contribuições para formulação de políticas públicas**. 2006.

Hustrulid, W.; Kuchta, M.; Martin, R. **Open Pit Mine: planning & design**. 3 ed. Leiden: The Netherlands: CRC Press, 2013.

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília: IBRAM, 2016.

Iramina, W. S. **Métodos de Lavra a Céu Aberto**. Apostila do Curso de Introdução à Engenharia Aplicada à Indústria Mineral do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Universidade de São Paulo (USP), 2015.

Jardim, L. **Maior mina da Vale em Minas Gerais quase tem os trabalhos interrompidos**. 2016. Disponível em: <<http://blogs.oglobo.globo.com/lauro-jardim/post/maior-mina-da-vale-em-mg-quase-tem-os-trabalhos-interrompidos.html>>. Acesso em: 13 de maio de 2017.

Klein, C.; Dutrow, B. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

Koppe, J. C. A lavra e a indústria mineral no Brasil: estado da arte e tendências tecnológicas. In: Fernandes, F. R. C.; Matos, G. M. M.; Castilhos, Z. C.; Luz, A. B. (Org.). **Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 81-102.

Machado, C. C. **Planejamento e controle de custos na exploração florestal**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1984.

Machado, F. B. et al. Enciclopédia Multimídia de Minerais e Atlas de Rochas [on-line]. 2005. Disponível em: <www.rc.unesp.br/mudeudpm/banco/sulfatos/gipsita.html>. Acesso em: 14 abr. 2017.

Macêdo, A. J. B.; Bazante, A. J.; Bonates, E. J. L. Seleção do método de lavra: arte e ciência. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 3, p. 221-225, Jul/Set 2001.

Magno, L. **Gestão da Dinâmica do Conhecimento: Lavra a Céu Aberto**. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

Mahmoud, A. A. A. **Development of an Integrated Mining and Processing Optimization System**. Dissertation (Master's degree in geosciences) – Faculty of Geosciences, Geo-Engineering and Mining of the Technische Universität Bergakademie. Freiberg, 2013.

Maia, J. **Curso de Lavra de Minas: desenvolvimento**. 2. ed. Ouro Preto: Fundação Gorceix, UFOP, 1987.

Manso, C. L. C.; Hessel, M. H. Novos equinoides (Echinodermata: Echinoidea) do Albiano da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 42, n. 1, p. 187-197, março de 2012. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7881>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

McCarter, M. K. et al. Mining Exploitation. In: Hartman, H. L. (ed.) **Mining Engineering Handbook**. 2nd ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1992. pp. 1365-1451.

Meglierini, E. **Custos: análise e gestão**. 3ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

Menor, E. A. et al. **Programa Nacional de Estudos dos Distritos Mineiros: projeto Gipsita** – etapa I. Recife: DNPM, 1995. 36 p.

Mineração Royal Gipso Ltda. **Registros fotográficos**. 2016.

Miranda Júnior, I. S. **Diretrizes Fundamentais para um estudo de avaliação econômica de empreendimentos de mineração: um estudo bibliográfico**. 2011. 321 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto: UFOP, 2002.

Mitra, R.; Saydam, S. Surface Coal Mining Methods in Australia. In: Onargan, T. (ed.). **Mining Methods**. Austrália: InTech, 2012. pp. 3-23. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/mining-methods/surface-coal-mining-methods-in-australia>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

Motta, R. S. N. **Desenvolvimento Mineiro**. Vassouras/RJ: USS, 2002.

Morrison, R. G. K.; Russel, P. L. Selecting a Mining Method: Rock Mechanics, Other Factors. In: Cummins, A. B.; Given, I. A. **Mining Engineering Handbook**. 1st ed. New York: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1973. Seção 9, p. 9.2-9.22.

Mueller, Charles. As contas Nacionais e os Custos Ambientais da Atividade Econômica. **Análise Econômica**, Porto Alegre, v. 13, n. 23, p. 66-99, 1995.

Nilsson, D. Open-pit or underground mining. In: Hustrulid, W. A. (ed.) **Underground Mining Methods Handbook**. Society of Mining Engineers of AIME, 1982. p. 70-87.

O'hara, T. A.; Suboleski, S. C. Costs and Cost Estimation. In: Hartman, H. L. (ed.). **Mining Engineering Handbook**. 2nd ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1992. pp. 405-424.

Oliveira, F. M. C. et al. Características mineralógicas e cristalográficas da gipsita do Araripe. **Holos**, Natal/RN, ano 28, v. 5, p. 71-82, nov. 2012. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1140>>. Acesso em 10 jan. 2017.

Peroni, R. L. **Lavra a Céu Aberto: teoria e prática**. Apostila do Curso de Lavra a Céu Aberto do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2007.

Pinto, L. R.; Merschmann, L. H. C. Planejamento operacional de mina usando modelos matemáticos. **Revista Escola de Minas**, v. 54, n.3, 211-214. 2001

Popp, J. H. **Geologia Geral**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2010.

Queiroz Filho, A. A.; Amorim Neto, A. A.; Dantas, J. O. C. Gipsita. In: DNPM. **Sumário Mineral 2015**. v. 35. Brasília: DNPM/MME, 2015. p. 72-73. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>>. Acesso em: 13 jan. 2017.

Revuelta, M. B., Jimeno, C. L. **Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras**. Madrid: Entorno Gráfico, 1997.

Revista Minérios e Minerales. **200 maiores minas brasileiras**. Pinheiros/SP, nº 375, jun. 2015.

Ribeiro, M. O.; Boligon, J. A. R. Análise por meio de índices financeiros e econômicos: um estudo de caso em uma empresa de médio porte. **Disciplinarum Scientia**. Série: Ciências Sociais Aplicadas, S. Maria, v. 5, n. 1, p. 15-34, 2009.

Ricardo, H. S.; Catalani, G. **Manual Prático de Escavação: Terraplanagem e Escavação de Rocha**. 3ª. Ed. rev. e ampliada. São Paulo: Editora Pini, 2007.

Rios-Netto, A. M. et al. Formalização estratigráfica do Membro Fundão, Formação Rio da Batateira, Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 42, n. 2, p. 281-292, junho de 2012. Disponível em: <http://www.igeo.ufrj.br/ismar/2/2_52.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2017.

Rocha, S. S. **Avaliação de blindagem com correntes em caminhões fora de estrada CAT 777 F/G da Mina de bauxita da Mineração Paragominas S/A**. 69 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente) – Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará. Marabá: UNIFESSPA, 2014.

Rudenno, V. **The Mining Valuation Handbook: Mining and Energy Valuation for Investors and Management**. 3 ed. Sydney: Wrightbooks, 2009.

RWE Power AG. **Garzweiler opencast mine**. 2013. Disponível em: <<http://www.rwe.com/web/cms/en/59998/rwe-power-ag/fuels/garzweiler/>>. Acesso em: 12 de jun. 2017.

Silva, A. M. P. **Sustentabilidade Operacional no Contexto da Indústria Mineral: caso da lavra de caulim no município de Cabo de Santo Agostinho/PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife: UFPE, 2008.

Silva, G. D. **Índices financeiros e lucratividade – um estudo dos índices de rentabilidade**. Belém: UFPA, 2015.

Silva, V. C. **Operações Mineiras**. Apostila do curso de Perfuração e Desmonte de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 2009.

Sobrinho, A. C. P. L. et al. Gipsita. In: Departamento Nacional de Produção Mineral. **Balanco Mineral Brasileiro**. Brasília-DF: DNPM, 2001. 387-409. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001>>. Acesso em: 2017 jan. 12.

Souza, J. C. **Métodos de Lavra a Céu Aberto**. Apostila do Curso de Métodos de Lavra a Céu Aberto do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), 2001.

Sweet, K. **Quarrying 1**. Perth, W. A.: Technical Publications Trust, 1984.

United States Geological Survey (USGS). **Mineral Commodity Summaries 2015**. Washington: USGS, 2015. 196 p. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

Veiga, M. M.; Silva, A. R. B.; Hinton, J. J. O garimpo de ouro na Amazônia: aspectos tecnológicos, ambientais e sociais. In: Barros, R.; Trindade, E. **Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: CETEM, 2002. p. 287-295.

Vieira, C. B. H. A. et al. Índices de rentabilidade: um estudo sobre os indicadores ROA, ROI, e ROE de empresas do subsetor de tecidos, calçados e vestuários listados na BOVESPA. In: Congresso Virtual Brasileiro de Administração, 8, 2011, São Paulo. **Anais do 8º Congresso Virtual Brasileiro de Administração**. São Paulo: Instituto Pantex de Pesquisa, 2011. 14 p.

Young, J. (Ed.). The 200 Largest Mines in Brazil. **Revista Minérios & Minerales**, Pinheiros/SP, ano XXXIX, n. 375, Out. 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO DO MÉTODO *OPEN PIT MINING* (2013)

Tabela 15: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - *Open Pit Mining*- Janeiro/2013

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	81.167,34	6,76	36,35
Equipamentos (R\$)	32.839,00		
Diesel (R\$)	13.462,34		
Frete caminhões (R\$)	34.866,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	124.967,10	10,40	55,96
Equipamentos (R\$)	80.620,89		
Explosivos (R\$)	32.473,71		
Diesel (R\$)	11.872,50		
CUSTO INDIRETO (R\$)	17.180,43	1,43	7,69
Mão de obra (R\$)	17.180,43		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	223.314,87	18,59	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	12.010,55 t		
FATURAMENTO (R\$)	252.221,55		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	11,46 %		

Tabela 16: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - *Open Pit Mining* - Fevereiro/2013

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
	R\$		
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	81.729,67	5,79	36,18
Equipamentos (R\$)	26.724,50		
Diesel (R\$)	11.074,17		
Frete caminhões (R\$)	43.931,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	126.132,50	8,93	55,84
Equipamentos (R\$)	85.515,95		
Explosivos (R\$)	15.410,90		
Diesel (R\$)	25.205,65		
CUSTO INDIRETO (R\$)	18.010,43	1,28	7,97
Mão de obra (R\$)	18.010,43		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	225.872,60	15,99	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	14.124,71 t		
FATURAMENTO (R\$)	296.618,91		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	23,85 %		

Tabela 17: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - *Open Pit Mining* - Março/2013

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	86.731,75	6,35	37,40
Equipamentos (R\$)	27.776,50		
Diesel (R\$)	11.272,25		
Frete caminhões (R\$)	47.683,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	127.174,08	9,32	54,84
Equipamentos (R\$)	89.020,65		
Explosivos (R\$)	11.407,40		
Diesel (R\$)	26.746,03		
CUSTO INDIRETO (R\$)	17.988,43	1,32	7,76
Mão de obra (R\$)	17.988,43		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	231.894,26	16,99	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	13.652,09 t		
FATURAMENTO (R\$)	286.693,89		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	19,11 %		

Tabela 18: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - *Open Pit Mining* - Abril/2013

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	65.956,16	5,59	36,46
Equipamentos (R\$)	29.974,00		
Diesel (R\$)	12.088,66		
Frete caminhões (R\$)	23.893,50		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	96.918,77	8,21	53,58
Equipamentos (R\$)	62.678,45		
Explosivos (R\$)	11.539,50		
Diesel (R\$)	22.700,82		
CUSTO INDIRETO (R\$)	18.010,43	1,53	9,96
Mão de obra (R\$)	18.010,43		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	180.885,36	15,33	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	11.797,91 t		
FATURAMENTO (R\$)	247.630,11		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	26,95 %		

Tabela 19: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - *Open Pit Mining* - Maio/2013

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	94.048,95	5,53	34,82
Equipamentos (R\$)	36.923,50		
Diesel (R\$)	14.889,95		
Frete caminhões (R\$)	42.235,50		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	158.041,62	9,29	58,51
Equipamentos (R\$)	119.221,75		
Explosivos (R\$)	13.502,90		
Diesel (R\$)	25.316,97		
CUSTO INDIRETO (R\$)	18.010,43	1,06	6,67
Mão de obra (R\$)	18.010,43		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	270.101,00	15,87	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	17.015,02 t		
FATURAMENTO (R\$)	357.315,42		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	24,41 %		

Tabela 20: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - *Open Pit Mining* - Junho/2013

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	67.526,46	5,64	34,47
Equipamentos (R\$)	24.497,00		
Diesel (R\$)	10.025,46		
Frete caminhões (R\$)	33.004,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	110.364,08	9,22	56,34
Equipamentos (R\$)	74.218,25		
Explosivos (R\$)	16.776,60		
Diesel (R\$)	19.369,23		
CUSTO INDIRETO (R\$)	18.010,43	1,50	9,19
Mão de obra (R\$)	18.010,43		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	195.900,97	16,36	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	11.972,60 t		
FATURAMENTO (R\$)	251.424,60		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	22,08 %		

Tabela 21: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - *Open Pit Mining* - Julho/2013

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	87.152,92	7,66	41,74
Equipamentos (R\$)	32.847,50		
Diesel (R\$)	13.246,92		
Frete caminhões (R\$)	41.058,50		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	103.633,43	9,10	49,63
Equipamentos (R\$)	71.877,25		
Explosivos (R\$)	3.944,60		
Diesel (R\$)	27.811,58		
CUSTO INDIRETO (R\$)	18.010,43	1,58	8,63
Mão de obra (R\$)	18.010,43		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	208.796,78	18,34	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	11.382,77 t		
FATURAMENTO (R\$)	239.038,17		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	12,65 %		

APÊNDICE B – DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO DO MÉTODO *TERRACE MINING* (2016)

Tabela 22: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - *Terrace Mining* - Janeiro/2016

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	37.498,59	3,71	31,36
Equipamentos (R\$)	13.714,50		
Diesel (R\$)	7.824,09		
Frete caminhões (R\$)	15.960,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	73.912,47	7,31	61,81
Equipamentos (R\$)	44.523,00		
Explosivos (R\$)	12.555,36		
Diesel (R\$)	16.834,11		
CUSTO INDIRETO (R\$)	8.176,45	0,81	6,84
Mão de obra (R\$)	8.176,45		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	119.587,51	11,83	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	10.104,62 t		
FATURAMENTO (R\$)	222.301,64		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	46,20 %		

Tabela 23: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - Terrace Mining - Fevereiro/2016

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	37.252,62	2,65	20,32
Equipamentos (R\$)	13.385,05		
Diesel (R\$)	7.547,57		
Frete caminhões (R\$)	16.320,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	137.915,46	9,81	75,22
Equipamentos (R\$)	82.773,50		
Explosivos (R\$)	20.265,53		
Diesel (R\$)	34.876,43		
CUSTO INDIRETO (R\$)	8.176,45	0,58	4,46
Mão de obra (R\$)	8.176,45		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	183.344,53	13,04	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	14.061,72 t		
FATURAMENTO (R\$)	331.053,08		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	44,62 %		

Tabela 24: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - Terrace Mining - Março/2016

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	37.434,71	2,69	23,88
Equipamentos (R\$)	13.852,50		
Diesel (R\$)	7.902,21		
Frete caminhões (R\$)	15.680,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	111.096,88	8,00	70,86
Equipamentos (R\$)	64.357,00		
Explosivos (R\$)	18.114,53		
Diesel (R\$)	28.625,35		
CUSTO INDIRETO (R\$)	8.254,45	0,59	5,26
Mão de obra (R\$)	8.254,45		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	156.786,04	11,28	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	13.895,67 t		
FATURAMENTO (R\$)	304.315,17		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	48,48 %		

Tabela 25: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - Terrace Mining - Abril/2016

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	51.199,17	4,32	28,57
Equipamentos (R\$)	21.937,50		
Diesel (R\$)	12.541,67		
Frete caminhões (R\$)	16.720,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	119.335,92	10,07	66,58
Equipamentos (R\$)	73.541,00		
Explosivos (R\$)	16.574,92		
Diesel (R\$)	29.220,00		
CUSTO INDIRETO (R\$)	8.694,10	0,73	4,85
Mão de obra (R\$)	8.694,10		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	179.229,19	15,12	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	11.853,34 t		
FATURAMENTO (R\$)	259.588,15		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	30,96 %		

Tabela 26: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - Terrace Mining – Maio/2016

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	79.961,30	7,06	44,79
Equipamentos (R\$)	26.859,00		
Diesel (R\$)	16.002,30		
Frete caminhões (R\$)	37.100,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	89.865,24	7,94	50,34
Equipamentos (R\$)	56.291,00		
Explosivos (R\$)	12.461,59		
Diesel (R\$)	21.112,65		
CUSTO INDIRETO (R\$)	8.694,10	0,77	4,87
Mão de obra (R\$)	8.694,10		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	178.520,64	15,76	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	11.324,55 t		
FATURAMENTO (R\$)	248.007,65		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	28,02 %		

Tabela 27: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - Terrace Mining – Junho/2016

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	27.678,29	1,78	15,78
Equipamentos (R\$)	10.921,50		
Diesel (R\$)	6.016,79		
Frete caminhões (R\$)	10.740,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	139.016,97	8,96	79,25
Equipamentos (R\$)	80.458,50		
Explosivos (R\$)	24.318,30		
Diesel (R\$)	34.240,17		
CUSTO INDIRETO (R\$)	8.713,90	0,56	4,97
Mão de obra (R\$)	8.713,90		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	175.409,16	11,30	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	15.517,81 t		
FATURAMENTO (R\$)	339.840,04		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	48,38 %		

Tabela 28: Dados de Custeio e Produção de Gipsita - Terrace Mining – Julho/2016

DADOS DE CUSTEIO E PRODUÇÃO		Custo unitário (R\$/t)	Participação Custos (%)
CUSTOS DESCOBERTURA (R\$)	26.061,09	1,61	13,80
Equipamentos (R\$)	10.434,30		
Diesel (R\$)	5.706,79		
Frete caminhões (R\$)	9.920,00		
CUSTO DE LAVRA (R\$)	153.816,89	9,51	81,44
Equipamentos (R\$)	83.310,50		
Explosivos (R\$)	27.962,18		
Diesel (R\$)	42.544,21		
CUSTO INDIRETO (R\$)	8.994,10	0,56	4,76
Mão de obra (R\$)	8.994,10		
CUSTO TOTAL NA MINA (R\$)	188.872,08	11,68	100,00
PRODUÇÃO MENSAL GIPSITA	16.168,99 t		
FATURAMENTO (R\$)	354.643,89		
ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE NA LAVRA	46,74 %		