



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL
PPGEMinas - UFPE

HERMESON CARNEIRO RODRIGUES

ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE LAVRA *TERRACE MINING* E
STRIP MINING PARA MINERAÇÃO DE GIPSITA

Recife
2018

HERMESON CARNEIRO RODRIGUES

ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE LAVRA *TERRACE MINING* E
STRIP MINING PARA MINERAÇÃO DE GIPSITA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Minerais Industriais.

Linha de Pesquisa: Planejamento de lavra.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza.

Coorientador: Prof. M. Sc. Marinésio Pinheiro de Lima.

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

- R696a Rodrigues, Hermeson Carneiro.
Análise comparativa dos métodos de lavra *Terrace Mining* e *Strip Mining* para mineração de gipsita / Hermeson Carneiro Rodrigues. – Recife, 2018.
118 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza.
Coorientador: Prof. M.Sc. Marinésio Pinheiro de Lima.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEMinas, 2018.
Inclui Referências, Apêndices e Anexo.
1. Engenharia Mineral. 2. Gipsita. 3. Sequenciamento de lavra. 4. *Terrace Mining*. 5. *Strip Mining*. 6. Planejamento de lavra I. Souza, Júlio César de (Orientador). II. Lima, Marinésio Pinheiro de (Coorientador). III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
HERMESON CARNEIRO RODRIGUES

“ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE LAVRA *TERRACE MINING*
E *STRIP MINING* PARA MINERAÇÃO DE GIPSITA”
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MINERAIS INDUSTRIAIS

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do **Prof.**
Dr. JÚLIO CÉSAR DE SOUZA

Considera o aluno, **Aprovado.**

Recife, 16 de março de 2018.

Dr. Júlio César de Souza
Orientador - (UFPE)

Márcio Luiz S. Campos Barros
Examinador Interno – (UFPE)

Rodrigo de Lemos Peroni UFRGS
Examinador Externo - UFRGS

Aos meus pais
Izanete e Reginaldo,
aos meus filhos, Heloísa e Emanuel,
e à minha companheira Bruna,
com amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Uma vez terminado este ciclo desta minha existência, não posso deixar de agradecer aqueles que me ajudaram a cumprir esta etapa.

Grato sou, a Deus, criador de todas as coisas visíveis e invisíveis, ao Mestre Jesus, pelos seus ensinamentos de amor e caridade, e aos Bons Espíritos pelas suas instruções, direcionamentos e orientações.

Ao Espiritismo, por ter me resgatado com sua proposta de amor e caridade, ensinamentos do Cristo Jesus, e por ensinar-me que o Universo é regido por um Deus de Amor, e que todas as coisas conspiram para o bem.

A minha família, em especial aos meus pais, Reginaldo e Izanete, que desde sempre não mediram esforços em investir na minha educação. Aos meus irmãos, Josiel, Maruschka e Lucas, agradeço pela palavra amiga nos momentos de dificuldade e pelo apoio financeiro. Aos familiares, agradeço também pelo bom conselho e palavras de ânimo.

À minha companheira Bruna, mulher de fé e guerreira, agradeço por ter suportado comigo as tribulações do trabalho, do lar, do estudo, e dos momentos de incertezas para ambos. Por ter tido paciência com minhas dúvidas, minhas ausências. A ela muito devo.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Júlio César sou grato por desde antes da minha chegada na cidade de Recife, mostrar-se solícito e ter muito contribuído para minha formação; com ele muito aprendi.

Agradeço também ao meu coorientador e amigo Prof. M. Sc. Marinésio Pinheiro, pelos ensinamentos, pela paciência, e pelas mini-aulas que tive dele, e que foram essenciais para meu aprendizado.

A M. Sc. Eng. de Minas Flávia Bastos, por ter aberto as portas da mineração Ponta da Serra para que este trabalho fosse realizado, por não medir esforços em passar todas as informações para que esta pesquisa se tornasse realidade.

Ao Prof. M. Sc. Artur Angelo, por mostrar-se solícito e ajudar-me com as análises de risco que são apresentadas neste trabalho.

Aos amigos Keyla, Silas, Raissa, Claudson, Rodrigo, Élyda, Vivianne e Suelen, pela amizade, pelos conselhos e pelo conhecimento compartilhado

Aos Professores e Funcionários do PPGEMinas pela amizade e momentos de encorajamento.

RESUMO

Nessa dissertação são discutidas e comparadas duas metodologias para a lavra de gipsita na região do Polo Gesseiro do Araripe compreendendo a modelagem geológica de uma jazida localizada na região de Araripina – PE, o planejamento e projeto de lavra. Esse estudo comparativo foi realizado visando a determinação de um modelo de lavra de melhor desempenho para minas e jazidas de gipsita comparando-se os métodos de lavra *Terrace Mining* e *Strip Mining*, tendo como referência as jazidas existentes no Polo Gesseiro do Araripe, Pernambuco. Um dos principais objetivos do sequenciamento da produção é a maximização do Valor Presente Líquido, aliado a uma sequência de lavra que proporcione uma melhor flexibilidade operacional da mina e ao mesmo tempo atenda as metas de produção e qualidade do minério. Os métodos de lavra *Terrace Mining* e *Strip Mining* são comparados com o *Open Pit Mining*, o método de lavra atualmente utilizado pela maioria das empresas do Polo Gesseiro. Sabe-se que esses dois primeiros métodos de lavra permitem abordagens ambientalmente sustentáveis para sequenciar a lavra de forma que os avanços ou cortes da mina já lavrados sirvam para a deposição do estéril proveniente dos novos avanços, o que permite a reabilitação de áreas já mineradas na mina concomitantemente à lavra. A utilização desses métodos evita a necessidade de onerar novas áreas para construção de pilhas de estéril, com significativos benefícios associados à redução do impacto ambiental sem comprometer as metas de produção e resultados econômicos. Os resultados alcançados com este estudo comprovam os melhoramentos esperados com a aplicação do *Terrace Mining* e *Strip Mining*, e poderão dar subsídios para o desenvolvimento de modelos de mineração para a lavra de gipsita mais sustentáveis e econômicos.

Palavras-chave: Gipsita. Sequenciamento de lavra. *Terrace Mining*. *Strip Mining*. Planejamento de lavra.

ABSTRACT

In this research, two methodologies for gypsum mining in the region of the Polo Gesseiro do Araripe are discussed and compared, comprising the geological modeling of a deposit located in the Araripina - PE region, project and mining planning. This comparative study was carried out aiming the determination of a better performance mining model for mines and gypsum deposits comparing the mining methods *Terrace Mining* and *Strip Mining*, based on existing deposits in the Polo Gesseiro do Araripe, Pernambuco. One of the main objectives of production scheduling is the maximization of the Net Present Value, combined with a mining sequence that provides the best operational flexibility of the mine and at the same time ensures that production and quality goals of the ore are met. The *Terrace Mining* and *Strip Mining* methodologies are compared to the mining methodology currently used by Polo Gesseiro companies, *Open Pit Mining*. It is known that these two methods allow environmentally sustainable approaches to mining scheduling so that the cuts of the mine already mined serve for the backfilling or direct casting of the overburden, which allows the rehabilitation of areas already mined concomitantly the mining, avoids the need to buy new areas for the construction of sterile piles, with significant benefits associated with reducing environmental impact without compromising production targets and economic results. The results achieved with this study confirm the improvements expected with the application of *Terrace Mining* and *Strip Mining* and will provide subsidies for the development of more sustainable and economical gypsum mining models.

Keywords: Gypsum. Mining scheduling. *Terrace Mining*. *Strip Mining*. Mining planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Variedades da Gipsita.....	22
Figura 2- Classificação dos Métodos de Lavra	25
Figura 3- Imagem aérea da mina de cobre Kennecott, USA.....	26
Figura 4- Mina Ranger de Urânio, na Austrália.....	27
Figura 5- Desenho esquemático ilustrando algumas das estruturas que compõem uma cava.....	27
Figura 6- Imagem aérea da mina de caulim de Ipixuna.	29
Figura 7- Esquema de Lavra em Tiras.	30
Figura 8- <i>Terrace Mining</i> (remoção do capeamento mole) e <i>Strip Mining</i> (remoção do estéril das camadas duras inferiores) combinados e com equipamentos associados.	31
Figura 9- <i>Mina Grootegeluk</i> , Lephalale, Limpopo, África do Sul.....	32
Figura 10- Operação típica de uma <i>Terrace Mining</i>	32
Figura 11- <i>Terrace Mining</i> com transportador de correia ao redor da cava, escavadeira hidráulica e caminhões basculantes.....	33
Figura 12- Mineração Ponta da Serra.....	33
Figura 13- Mina <i>Nakhon Sawan</i> , localizada no Norte da Tailândia.	34
Figura 14- Mina <i>San Pietro - PratoNuovo</i> , localizada, em Murisengo, Piemonte, Alexandria, Itália.	35
Figura 15- Mina de Novomoskovskoye, Rússia.	35
Figura 16- Mina de Altsi, Creta, Grécia.....	36
Figura 17- Ciclo básico de mineração à céu aberto.	37
Figura 18- Processo de blendagem.....	39
Figura 19- Processo de simulação através da Técnica de Monte Carlo.	42
Figura 20- Metodologia do trabalho.....	43
Figura 21- Área em estudo no estado de Pernambuco.	44
Figura 22- Área em estudo próxima ao distrito de Gergelim.....	44
Figura 23- Síntese da Estratigrafia da Bacia do Araripe.....	46
Figura 24- Curvas de Nível.	53
Figura 25- Modelo Digital de Terreno ou DTM.	53
Figura 26- Furos de sondagem em vista plana.....	54
Figura 27- Furos de sondagem em vista lateral.....	54
Figura 28- Modelo geológico do minério.	54

Figura 29- Mapa de iso-relação estéril-minério.	55
Figura 30- Cava final.....	57
Figura 31- Localização da jazida.	58
Figura 32- Sequência anual de lavra e direção dos avanços.	59
Figura 33- Carreta de Perfuração PWH-5000.	63
Figura 34- Perfuratriz pneumática PWHP-126LS.	63
Figura 35- Compressor XAS 770, Atlas Copco.....	63
Figura 36- Rompedor hidráulico H160ES, Caterpillar.	69
Figura 37- Ponteira usada no desmonte secundário.	69
Figura 38- Escavadeira hidráulica modelo 336D2 L, Caterpillar.	70
Figura 39- Carregadeira modelo 1021 1F Z-Bar da marca CASE.....	72
Figura 40- Escavadeira hidráulica R320LC-9S da fabricante Hyundai.....	74
Figura 41- Caminhão Axor 3344 da marca Mercedes-Benz.....	75
Figura 42- <i>Dragline</i> modelo HS 895 HD marca LIEBHERR.	83
Figura 43- Layout de cava com o método de lavra <i>Terrace Mining</i>	86
Figura 44- Aspectos geométricos da lavra com <i>Terrace Mining</i>	86
Figura 45- Layout de cava com o método de lavra <i>Strip Mining</i>	87
Figura 46- Aspectos geométricos da lavra com <i>Strip Mining</i>	87
Figura 47- Índice de preços ao produtor por commodities para máquinas e equipamentos; 2003.....	89
Figura 48- Índice de preços ao produtor por commodities para máquinas e equipamentos; 2018.....	89
Figura 49- Sensibilidade do VPL ao investimento.....	100
Figura 50- Sensibilidade do VPL as receitas.	100
Figura 51- Sensibilidade do VPL ao Custo de operação.....	101
Figura 52- Gráfico da distribuição de probabilidade do VPL com curva cumulativa para o <i>Terrace Mining</i>	102
Figura 53- Gráfico da distribuição de probabilidade do VPL com curva gaussiana para o <i>Terrace Mining</i>	102
Figura 54- Gráfico da distribuição de probabilidade do VPL com curva cumulativa para o <i>Strip Mining</i>	103
Figura 55- Gráfico da distribuição de probabilidade do VPL com curva gaussiana para o <i>Strip Mining</i>	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química teórica da gipsita e da anidrita.....	20
Tabela 2- Custos totais e unitários.	56
Tabela 3- Relação Estéril-Minério Econômica.	57
Tabela 4- Avaliação das reservas lavráveis.....	58
Tabela 5- Parâmetros técnicos da mineração.	59
Tabela 6- Sequenciamento de lavra para 20 anos de operação.	60
Tabela 7- Regime de trabalho.	61
Tabela 8- Parâmetros para técnicos da mineração.	61
Tabela 9- Equações utilizadas para determinação do plano de fogo.....	62
Tabela 10- Dados técnicos da perfuratriz.....	64
Tabela 11- Dados técnicos do compressor.....	64
Tabela 12- Vida útil dos componentes da perfuratriz.	67
Tabela 13- Número de hastes e luvas.....	68
Tabela 14- Resumo do consumo de componentes da perfuração.	68
Tabela 15- Volumes de gipsita a serem produzidos por mês, dia e hora.	68
Tabela 16- Volumes de estéril a serem produzidos por mês, dia e hora.	73
Tabela 17- Custos de aquisição dos equipamentos da <i>Terrace Mining</i>	88
Tabela 18- Custos de aquisição dos equipamentos da <i>Strip Mining</i>	88
Tabela 19- Índice de atualização do custo de operação dos equipamentos.	89
Tabela 20- Custos de produção horário e unitário dos equipamentos da <i>Terrace Mining</i>	90
Tabela 21- Custos de produção horário e unitário dos equipamentos da <i>Strip Mining</i> . .	90
Tabela 22- Custos com explosivos e acessórios.....	91
Tabela 23- Custos com acessórios de perfuração.....	91
Tabela 24- Custos anuais com mão-de-obra.	92
Tabela 25- Custos anuais com alimentação da equipe.....	92
Tabela 26- Preço atual da gipsita.	93
Tabela 27- Percentual cobrado por cada imposto.	93
Tabela 28- Depreciação anual dos equipamentos usados na <i>Terrace Mining</i>	94
Tabela 29- Depreciação anual dos equipamentos usados na <i>Strip Mining</i>	94
Tabela 30- Fluxo de caixa para a <i>Terrace Mining</i> (Ano 0 ao Ano 9).	95
Tabela 31- Fluxo de caixa para a <i>Terrace Mining</i> (Ano 10 ao Ano 20).....	96

Tabela 32- Fluxo de caixa para a <i>Strip Mining</i> (Ano 0 ao Ano 9).....	97
Tabela 33- Fluxo de caixa para a <i>Strip Mining</i> (Ano 10 ao Ano 20).....	98
Tabela 34- Parâmetros econômicos da <i>Terrace Mining</i>	99
Tabela 35- Parâmetros econômicos da <i>Strip Mining</i>	99
Tabela 36- Estatística do resultado da simulação de Monte Carlo para o <i>Terrace Mining</i>	102
Tabela 37- Estatística do resultado da simulação de Monte Carlo para o <i>Strip Mining</i>	103

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO	18
3	OBJETIVOS	19
3.1	GERAL	19
3.2	ESPECÍFICOS	19
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1	GIPSITA	20
4.1.1	Aplicações	20
4.2	POLO GESSEIRO DO ARARIPE	22
4.3	MÉTODOS DE LAVRA À CÉU ABERTO	23
4.3.1	Método de lavra <i>Open Pit Mining</i>	26
4.3.2	Método de lavra <i>Strip Mining</i>	28
4.3.3	Método de lavra <i>Terrace Mining</i>	30
4.4	LAVRA DE GIPSITA NO EXTERIOR	34
4.5	OPERAÇÕES UNITÁRIAS DA LAVRA À CÉU ABERTO	36
4.6	PLANEJAMENTO DE LAVRA	38
4.6.1	Sequenciamento de Lavra	40
4.7	SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	41
5	METODOLOGIA	43
6	ESTUDO DE CASO	44
6.1	LEVANTAMENTO DE DADOS	45
6.2	GEOLOGIA DA ÁREA	45
6.3	CRIAÇÃO DO BANCO DE DADOS PARA O <i>STUDIO 3</i>	48
6.4	MODELAMENTO DO TERRENO E DA JAZIDA	49
6.5	DESENVOLVIMENTO DA CAVA	49
6.6	SEQUENCIAMENTO DE LAVRA	50
6.7	DEFINIÇÃO DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS E DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DE LAVRA	51
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
7.1	MODELAMENTO GEOLÓGICO DA JAZIDA DE GIPSITA	53
7.2	DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ESTÉRIL-MINÉRIO ECONÔMICA	55
7.3	DETERMINAÇÃO DA CAVA FINAL	57
7.4	SEQUENCIAMENTO DE LAVRA	59
7.5	OPERAÇÕES UNITÁRIAS E DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS	60
7.5.1	Lavra do Minério	61
7.5.1.1	Perfuração e Desmonte	61
7.5.1.2	Desmonte Secundário	68
7.5.1.3	Carregamento	70

7.5.2	Decapeamento	72
7.5.2.1	Decapeamento no método de lavra <i>Terrace Mining</i>	73
7.5.2.1.1	<i>Desmonte mecânico e Carregamento</i>	73
7.5.2.1.2	<i>Transporte</i>	75
7.5.2.2	Decapeamento no método de lavra <i>Strip Mining</i>	82
7.5.2.2.1	<i>Desmonte mecânico, Carregamento e Transporte</i>	82
7.6	LAYOUT TÍPICO DE OPERAÇÃO E ASPECTOS GEOMÉTRICOS DA MINA	85
7.7	CUSTOS DE AQUISIÇÃO E OPERAÇÃO NOS MÉTODOS <i>TERRACE</i> E <i>STRIP MINING</i>	88
7.8	ANÁLISE ECONÔMICA COMPARATIVA ENTRE <i>STRIP</i> E <i>TERRACE MINING</i>	93
7.8.1	Análise de sensibilidade	99
7.8.2	Análise de risco através da Técnica de Monte Carlo	101
8	CONCLUSÕES	105
9	RECOMENDAÇÕES	107
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICES	114
	APÊNDICE A - FUROS DE SONDAGENS	114
	APÊNDICE B - ARQUIVOS <i>COLLAR</i> E <i>GEOLOGY</i> PARA ENTRADA NO <i>STUDIO 3</i>	115
	ANEXO A - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO PLANIALTIMÉTRICO	119

1 INTRODUÇÃO

Um desafio global nos próximos anos será o aproveitamento ambientalmente amigoso e atrativo financeiramente dos recursos minerais para atender a demanda crescente da sociedade cada vez mais consumista. Atualmente, a mineração a céu aberto contribui significativamente na produção de bens minerais (SHISHVAN; SATTARVAND, 2015).

A mineração à céu aberto pode ser definida como uma escavação superficial para remoção de minerais de interesse econômico. Pode ser empregada para a extração de minerais metálicos e não metálicos em depósitos próximos à superfície, geralmente com profundidades menores que 150 m. O tamanho dos depósitos pode variar de poucas toneladas até milhões de toneladas (SOUZA, J.C., 2001).

Mineração em bancadas múltiplas ou *Open Pit Mining* é um método de lavra à céu aberto através do qual o depósito é acessado por meio da escavação de uma grande abertura na superfície, chamada de cava ou *pit*, para expor o minério.

A operação deste método de lavra inicia com uma pequena cava que se desenvolve para cavas maiores que evoluem as anteriores em sequência. Estas sequências de cavas são chamadas de *pushbacks* e desenvolvem-se até que seja alcançada uma configuração final de cava chamada de cava final (SHISHVAN; SATTARVAND, 2015).

O *Terrace Mining* é um método de lavra à céu aberto que é aplicado em depósitos minerais tabulares e que possuem capeamento de camadas de finas a espessas. Neste método, o material estéril da cobertura pode ser depositado dentro da cava nas áreas onde o minério já foi extraído. O *Terrace Mining* trabalha com múltiplas bancadas tanto para o minério quanto para o capeamento. A escavação desenvolve-se na direção da maior dimensão do depósito podendo ser tanto em bancadas simples como em bancadas múltiplas. O número de bancadas é função da profundidade da escavação, porte dos equipamentos e competência do material escavado. O material estéril é nos locais onde o minério já foi lavrado (BULLIVANT, 1987).

A lavra realizada através do método de lavra *Strip Mining* também é a céu aberto e de forma similar à *Terrace Mining* permite a deposição do capeamento dentro das tiras formadas durante a lavra da jazida, o que facilita a recuperação da área degradada pela escavação e ao mesmo tempo possibilita a diminuição da distância do transporte do estéril da cobertura. É aplicado a jazidas formadas por várias camadas de rochas mineralizadas com orientações horizontais ou semi-horizontais, de pouca espessura, localizadas a

profundidades não muito grandes (± 50 m), e com grande extensão e volume. Contudo, os mesmos equipamentos usados na lavra do minério não podem ser usados para a lavra do capeamento. O material estéril é depositado a 90° da frente de lavra (*direct casting*) nos locais onde o minério já foi lavrado (MACÊDO; ALFONSO; SOUZA, 2012; ROCHA, 2014).

O método de lavra à céu aberto *Open Pit Mining* com bancadas múltiplas é tradicionalmente utilizado pela indústria de mineração no Polo Gesseiro do Araripe, localizado no Estado de Pernambuco, Brasil (MACÊDO et al., 2012).

As sucessivas operações necessárias à lavra do minério exigem a movimentação de grandes volumes de estéril da cobertura, além da geração de grandes pilhas de estéril. A lavra por *Terrace Mining* e *Strip Mining*, ambas, permitem a deposição do estéril retirado das camadas superiores do depósito dentro dos cortes formados nas etapas anteriores de desenvolvimento da mina, o que torna os métodos mais atrativos do ponto de vista ambiental e econômico. Estas metodologias podem ser bem aplicadas para minas e jazidas de gipsita.

O sequenciamento da produção, *scheduling*, é um processo de tomada de decisão realizado regularmente que desempenha um papel fundamental na indústria mineral. Um sequenciamento da produção eficaz tornou-se uma necessidade no atual ambiente competitivo, sendo de grande importância para atingir metas e uso eficiente de recursos (ANDRADE, 2014).

O sequenciamento de lavra em minas à céu aberto é uma importante etapa do planejamento de mina, uma vez que determina as matérias-primas a serem produzidas anualmente ao longo da vida da mina, avalia o valor de operação do empreendimento, e contribui para a utilização sustentável dos recursos minerais. Descobrir um sequenciamento de lavra ótimo é uma tarefa complexa, que envolve grandes conjuntos de dados e múltiplas restrições (LAMGHARI; DIMITRAKOPOULOS; FERLAND, 2015).

Entretanto, além dos critérios técnicos e econômicos, uma demanda que tem sido progressivamente exigida no sequenciamento de lavra é o atendimento das restrições ambientais da mina. A partir dos anos setenta, a proteção ambiental passou a ter maior importância na tomada de decisões, o que provocou sérias transformações na indústria mineral. Esta evolução gerou uma mudança de visão em relação ao papel da mineração na sociedade: a atividade mineral passou a ser entendida como uma forma de uso temporário do solo, e não de uso final como era no passado, e as empresas do setor começaram a pensar em meio ambiente em todas as fases da mineração, com a execução

de atividades dirigidas a revegetação, paisagismo, melhoria do solo e desenvolvimento socioeconômico regional (CARVALHO, 2009).

Em contrapartida, na última década, houve um aumento significativo da demanda global por bens minerais. Esse fato desencadeou diversos esforços para o aumento da capacidade produtiva do setor mineral, tanto em termos de infraestrutura de produção, quanto na identificação de novos recursos minerais. Neste contexto, há a necessidade de expansão da produção das minas em operação, além da abertura de novos projetos.

Todo novo projeto de mineração ou expansão de um já existente requer a aceitação dos órgãos ambientais. Desse modo, todo novo projeto ou mudança nos projetos de disposição de estéril também depende de licenciamento ambiental. Essa situação introduz incertezas adicionais no sequenciamento de lavra, uma vez que a disposição de estéril através da expansão das minas atuais ou através de novos projetos dependerá da aprovação de todo o procedimento legal de licenciamento de implantação em tempo hábil para atender as necessidades do plano de lavra (CARVALHO, 2009).

Desta forma, o principal objetivo desse trabalho é caracterizar a implantação dos métodos de lavra *Terrace Mining* e *Strip Mining* para a lavra para gipsita, para que possam servir como modelos para mineração de gipsita na região do Polo Gesseiro do Araripe, em substituição ao método de lavra atual, *Open Pit Mining*.

2 JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO

O presente estudo foi realizado no Polo Gesseiro do Araripe, região responsável por 84,3% da gipsita produzida no Brasil (DNPM, 2015). A lavra desse bem mineral pode ser executada de forma mais sustentável do ponto de vista técnico, econômico e ambiental em relação à metodologia de lavra que vem sendo adotada pela maior parte das mineradoras há anos. Desta forma, o método de lavra *Terrace Mining* mostra-se como excelente alternativa ao método de lavra para ser empregado em minas que atualmente utilizam o *Open Pit Mining*. Em jazidas novas a serem desenvolvidas a lavra através de *Strip Mining* parece ser o método de lavra mais adequado para a região do Polo Gesseiro.

Em projetos de mineração são necessários estudos de planejamento da produção a longo, médio e a curto prazo. Como as minas da região são lavradas majoritariamente por empresas de pequeno e médio porte, estas não costumam investir ou realizar estudos deste tipo e acabam por ter perdas econômicas significativas. Além disso, o aumento das exigências ambientais por parte de órgãos regulamentadores e o surgimento de novas legislações forçam as empresas a adotarem metodologias de trabalho menos agressivas ambientalmente.

Neste contexto, o presente estudo mostra-se relevante por sugerir modelos de lavra alternativos para as minas e jazidas de gipsita da região do Polo Gesseiro do Araripe em Pernambuco, de acordo com os métodos de lavra *Terrace Mining* e *Strip Mining*, que podem gerar aumentos significativos de produtividade e, conseqüentemente, maiores lucros, além de serem mais sustentáveis ambientalmente que na mineração de gipsita atual.

3 OBJETIVOS

3.1 GERAL

Realizar uma análise técnica e econômica do processo de mineração de gipsita na região do Polo Gesseiro do Araripe através da modelagem geológica, projeto e planejamento de lavra de uma jazida existente em Araripina, comparando-se dois métodos de lavra tradicionais na mineração: *Terrace Mining* e *Strip Mining*.

3.2 ESPECÍFICOS

- Levantar dados de topografia e sondagens da jazida de gipsita em estudo;
- Produzir um banco de dados geológico para entrada no software *Studio 3*;
- Desenvolver modelos geológicos da jazida de gipsita utilizando ferramentas computacionais e determinar as reservas geológicas disponíveis;
- Determinar a Relação Estéril-Minério Econômica do projeto;
- Modelar a cava final da jazida de gipsita no *Studio 3* e determinar as reservas lavráveis e relação estéril-minério geral da cava;
- Realizar o sequenciamento de lavra anual no longo prazo para 20 anos;
- Dimensionar os equipamentos e operações necessários à lavra da jazida através da *Terrace Mining* e *Strip Mining*, determinando o investimento inicial (CAPEX) e custos operacionais (OPEX);
- Desenvolver o fluxo de caixa de operação para longo prazo, determinando a viabilidade econômica dos métodos de lavra *Terrace Mining* e *Strip Mining* na mineração de gipsita;
- Desenvolver o estudo de risco através de estudos de sensibilidade e da Técnica de Monte Carlo (simulação condicional gaussiana) visando determinar a sensibilidade e probabilidades de insucesso do projeto frente a variações nos diversos parâmetros econômicos e incertezas nas estimativas de custo e receitas;
- Estabelecer uma comparação entre os métodos de lavra indicando as vantagens operacionais, econômicas e ambientais da *Terrace Mining* e da *Strip Mining* em relação ao método tradicionalmente utilizado na região do Polo Gesseiro do Araripe – *Open Pit Mining*.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 GIPSITA

Os dois minerais de sulfato de cálcio, gipsita e anidrita, ocorrem em muitas partes do mundo e há muito tempo a gipsita tem importância econômica na família dos minerais industriais. A gipsita, forma di-hidratada do sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e a anidrita, a forma anidra (CaSO_4) são frequentemente encontradas em associação, e é raro que um depósito de sulfato de cálcio consista exclusivamente em um mineral ou outro.

Embora depósitos de gipsita sejam vastos, a anidrita constitui a maior parte das reservas totais de sulfato de cálcio. No entanto, esta possui uso econômico muito menor e a maior parte da discussão a seguir será dedicada à gipsita (SME, 1990).

O sulfato de cálcio é um dos principais constituintes dos depósitos de evaporitos e quando puro, tem a seguinte composição:

Tabela 1- Composição química teórica da gipsita e da anidrita.

Mineral/Composto	CaO %	SO ₃ %	H ₂ O %
Gipsita	32,6	46,5	20,9
Anidrita	41,2	58,8	

Fonte: SME (1990).

Depósitos de gipsita pura ou de anidrita pura, que sejam suficientemente grandes para serem considerados comerciais, nunca foram encontrados por causa da relação metaestável entre os dois minerais e a presença de impurezas tais como carbonatos de cálcio ou magnésio, cloretos, outros minerais de sulfato, minerais de argila ou sílica. Como resultado, a maior parte da produção de gipsita em minas variará entre 85 e 95% de pureza. Muitas vezes é utilizada da forma como é extraída, embora em certos casos, uma ou mais formas de beneficiamento mineral são utilizados para melhorar o produto.

4.1.1 Aplicações

O uso mais frequente da gipsita é baseado na propriedade única que o sulfato de cálcio tem de prontamente abandonar, ou absorver, a água de cristalização. Com a aplicação de uma quantidade moderada de calor, num processo conhecido como calcinação, a gipsita é convertida em gesso (sulfato de cálcio, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) que, quando

misturado com água irá endurecer à medida que o sulfato de cálcio regressa à forma di-hidratada (SME, 1990).

O campo de utilização do hemidrato (gesso) pode ser dividido em dois grandes grupos: o gesso para construção civil e o gesso industrial (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005).

Na construção civil o gesso pode ser utilizado das seguintes maneiras: gesso de fundição utilizado para a confecção de pré-moldados, placas para rebaixamento de tetos, blocos para paredes divisórias, gesso para isolamento térmico, gesso para portas corta fogo, gesso de revestimento de aplicação manual, utilizado em paredes e tetos, geralmente em substituição de rebocos e/ou massas para acabamento, gesso de projeção, para aplicação mecanizada de revestimento de parede, gesso com pega retardada, gesso cola, para rejunte de pré-moldados em gesso, entre outros (BALTAR et al., 2005).

O gesso industrial é um produto de maior pureza e valor agregado, podendo ter aplicações nos seguintes campos: cerâmica, indústria do vidro, carga mineral, fabricação de papel, plásticos, adesivos, tintas, madeira, têxtil, alimentos, indústria farmacêutica, decoração, escolar (giz), ortopédico, dental, bandagens de alta resistência e outros usos como: indústria automobilística, fabricação de fósforos, fabricação de cerveja, indústria eletrônica, etc (BALTAR et al., 2005).

As utilizações da gipsita não calcinada são principalmente como retardador para o cimento Portland, como condicionador de solo, como enchimento mineral e outras aplicações industriais menores. Cerca de 25% da gipsita extraída nos Estados Unidos vai para esses mercados; no entanto, em países menos desenvolvidos, onde a construção e outros usos industriais podem ser bastante limitados, o uso de gipsita não calcinada para o retardador de cimento Portland pode muito bem ser o mercado dominante, se não o único, para o mineral (SME, 1990).

A Formação Santana contém a gipsita encontrada no Polo Gesseiro do Araripe, em Pernambuco, e é caracterizada pela presença de calcários, argilas e folhelhos de espessura bem reduzida.

A gipsita que ocorre nesta região apresenta diversas formas alotrópicas, isto é, com formas diferentes e propriedades físicas distintas, e que são popularmente chamadas de: Boró, Cocadinha, Rapadura, Estrelinha, Johnson e minério do piso.

O Boró é caracterizado por ser uma mistura de gipsita intercalada com argila. Pode ser usado na fabricação do cimento *Portland*, incorporado ao *clinker* para retardar o tempo de pega ou pode ser utilizado na agricultura *in natura* e moído como corretivo de

solos. Na calcinação devido à grande quantidade de argila na sua composição existe restrição do uso do Boró por interferir na qualidade gesso.

Os tipos Cocadinha, Rapadura e Estrelinha são utilizados para o processo de calcinação do gesso tipo Beta (gesso de fundição, gesso de revestimento e gessos aditivados: gesso projetado e o gesso cola), ao passo que a variedade Johnson, que possui cristais bem definidos e alinhados e com maior resistência mecânica, é utilizada para fazer gesso tipo Alfa (gesso ortodôntico e gesso ortopédico). O minério do piso, com alta resistência mecânica e coloração mais escura é utilizado apenas para fazer gesso de fundição. A Figura 1 apresenta as variedades mineralógicas da gipsita encontradas no Polo Gesseiro do Araripe (BASTOS, 2013).



Fonte: BASTOS (2013).

4.2 POLO GESSEIRO DO ARARIPE

A região do Araripe, localizada no extremo oeste de Pernambuco, é composta pelos municípios de Araripina, Bodocó, Cedro, Dormentes, Exu, Granito, Ipubí, Moreilândia, Ouricuri, Parnamirim, Santa Cruz, Santa Filomena, Serrita, Terra Nova e Trindade, que juntos correspondem a 18% da área total de estado de Pernambuco. Nessa região encontra-se o Polo Gesseiro do Araripe (SINDUSGESSO, 2014).

O Polo Gesseiro do Araripe-PE é um importante Arranjo Produtivo Local – APL, que abrange os municípios de Araripina, Bodocó, Exu, Ipubi, Ouricuri e Trindade. No Polo Gesseiro do Araripe são gerados 13,9 mil empregos diretos e 69 mil indiretos, resultantes da atuação de 42 minas de gipsita, 174 indústrias de calcinação e cerca de 750 indústrias de pré-moldados, que geram um faturamento anual na ordem de R\$ 1,4 bilhões/ano (SINDUSGESSO, 2014).

O Polo Gesseiro do Araripe encontra-se inserido na Bacia Sedimentar do Araripe, no semiárido nordestino, cujas jazidas constituem o Membro Ipubi da Formação Santana. O Polo Gesseiro do Araripe é o responsável pela produção de 84,3% da gipsita produzida no Brasil (DNPM, 2015), e estima-se que produz 97% do gesso consumido no Brasil (SINDUSGESSO, 2014).

A geologia e a localização das jazidas de gipsita no Araripe propiciam as melhores condições para seu aproveitamento, sendo estes fatores os que proporcionaram a supremacia na produção nacional de gipsita no Polo Gesseiro do Araripe desde a metade da década de 1960, permanecendo assim até o presente, também em função de suas melhores condições para lavra, principalmente do capeamento pouco espesso e também da quantidade e qualidade de suas reservas minerais (ARAÚJO, S. M.; MARTINS, 2012).

As jazidas da região do Araripe apresentam concentração de sulfato da ordem de 90 a 95%, impurezas em torno de 0,5% e uma concentração de anidrita que varia de 4 a 7% (BASTOS, 2013). Outra característica marcante destas é o fato de apresentarem-se como depósitos tabulares, fator crucial para escolha do método de lavra a ser adotado para a lavra do minério de gipsita.

Por uma questão cultural e tradicional, o método de lavra adotado nas minas do Polo Gesseiro do Araripe é o *Open Pit Mining*, com bancadas simples, que variam de 10 a 20 metros de altura.

Apesar da representatividade no cenário nacional existe uma preocupação quanto aos fatores econômicos e sociais, além do impacto ambiental causado pela atividade de extração mineral na região, através da geração de cavas e grandes pilhas de estéril (BASTOS, 2013).

4.3 MÉTODOS DE LAVRA À CÉU ABERTO

A mineração a céu aberto pode ser definida como uma escavação superficial para remoção de minerais de interesse econômico. Pode ser empregada para a lavra de

minerais metálicos e não metálicos (industriais, energéticos) em depósitos próximos à superfície, geralmente com profundidades menores que 150 m. O tamanho dos depósitos pode variar de poucas toneladas até milhões de toneladas (SOUZA, 2001).

Comumente o método de lavra é designado como sendo a técnica de extração de um mineral de interesse econômico. O emprego do termo "técnica de extração" reflete os aspectos técnicos da seleção do método, que é parte fundamental da análise, dimensionamento dos equipamentos, disposição das bancadas e cortes e sequência de execução da lavra.

De modo geral, a lavra a céu aberto é indicada para as jazidas aflorantes, para as jazidas de reduzido capeamento, para as jazidas que ocorrem em encosta e para as jazidas lavráveis por furos de sonda (lavra por dissolução).

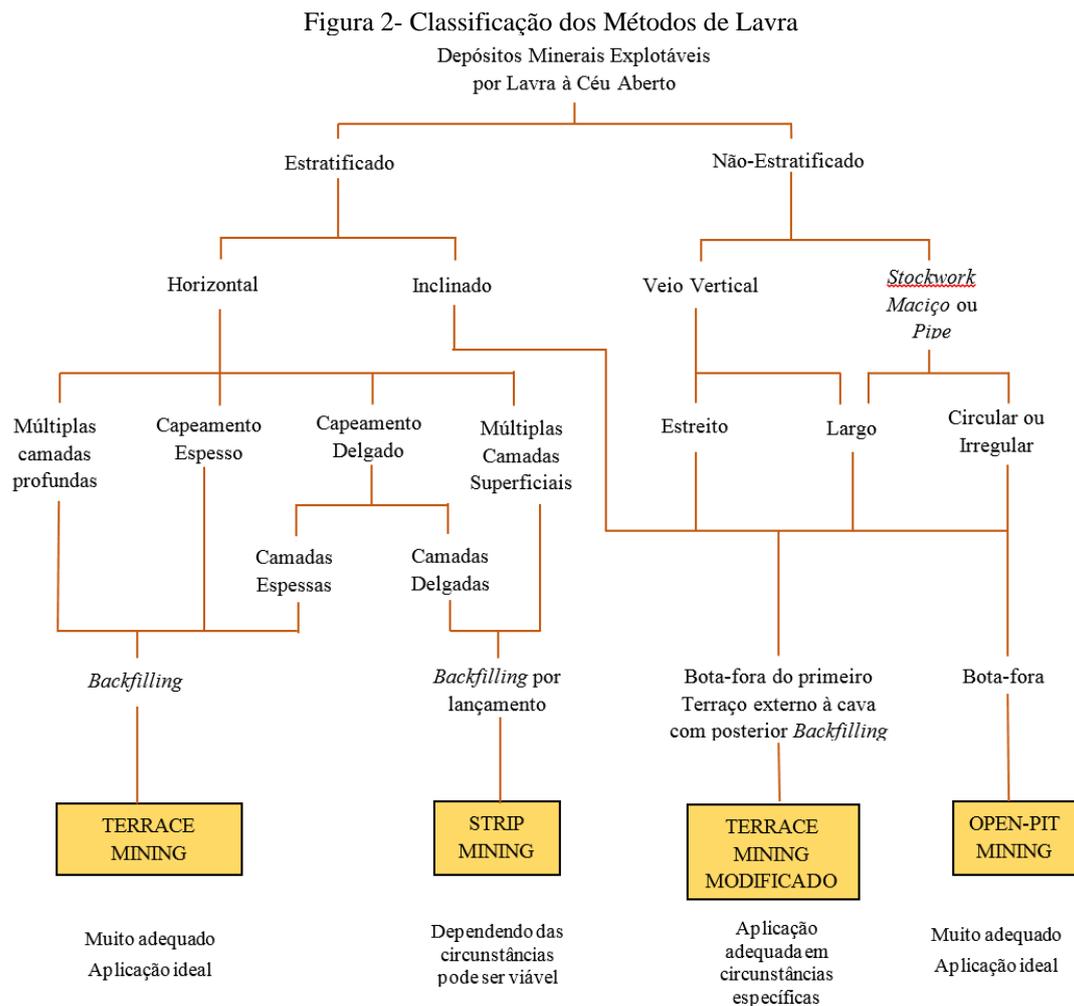
Especificamente, teríamos:

- Jazidas estratificadas relativamente horizontais com cobertura fina ou espessa;
- Depósitos estratificados com uma inclinação maior do que o ângulo natural de repouso do material de modo que os resíduos não possam ser depositados dentro da cava;
- Depósitos maciços, profundos e muito grandes lateralmente, de modo que a descarga do estéril no interior da cava não é possível;
- Veios aflorantes;
- Jazidas profundas lavráveis por furos de sonda. Caso típico de jazidas de petróleo, gases combustíveis e, ocasionalmente jazidas de sais solúveis.

De todos os métodos de lavra a céu aberto disponíveis, os três mais comuns são, segundo Bullivant (1987):

- *Strip Mining*;
- *Terrace Mining*;
- *Open Pit Mining*.

A Figura 2 mostra a classificação dos métodos de lavra a céu aberto proposta por Bullivant (1987) onde se pode verificar as condições de aplicação dos mesmos em função dos tipos de depósito (estratificado ou não estratificado), da geometria e disposição do corpo de minério, dos tipos de camadas, da espessura da cobertura e forma de deposição do estéril retirado da cava, especificamente se, dentro ou fora da cava.



Fonte: BULLIVANT (1987).

Uma consideração adicional é o tipo de equipamento a ser utilizado para a lavra e descobertura em cada tipo de operação mineira, nomeadamente, cíclicos (descontínuos) ou contínuos. A descrição e análise desses sistemas e como eles podem ser aplicados e sob quais circunstâncias para cada tipo de método de lavra, serão realizadas nos próximos tópicos.

Destacam-se ainda as seguintes vantagens da lavra a céu aberto:

1. Elevada produtividade;
2. Maior concentração de operações e mais fácil e eficiente gestão de recursos humanos;
3. Maior produtividade por desmonte;
4. Menor custo por tonelada desmontada;
5. Maior recuperação com menor diluição;
6. Não existe limitação à dimensão e ao peso das máquinas.

4.3.1 Método de lavra *Open Pit Mining*

Este método de lavra consiste na escavação tradicional em forma de cone (embora possa ser de qualquer forma, dependendo do tamanho e forma do corpo de minério) que é tipicamente usado quando o minério é em forma de *pipe*, veio, estratificado ou irregular com mergulho íngreme. Embora seja mais frequentemente associado a minérios metálicos pode ser usado para qualquer geometria de depósito ao qual o método possa ser adaptado, mais tipicamente os *pipes* de diamante (BULLIVANT, 1987).

A escavação é normalmente realizada por escavadeiras a cabo ou hidráulica e o transporte realizado com caminhões que transportam minério e estéril. Perfuração e desmonte de rochas são frequentemente utilizados, o que torna o processo cíclico. O estéril é transportado e descarregado fora da área minerada, uma vez que não há espaço disponível na cava. O estéril deve ser depositado o mais próximo possível do limite final da cava para minimizar os custos com transporte (BULLIVANT, 1987). A Figura 3 e a Figura 4 ilustram, respectivamente, a mina de cobre de Kennecott, nos Estados Unidos e a mina de Urânio Ranger, localizada no Parque Nacional de Kakadu, no norte da Austrália.

Figura 3- Imagem aérea da mina de cobre Kennecott, USA.



Fonte: DE CARLI (2013).

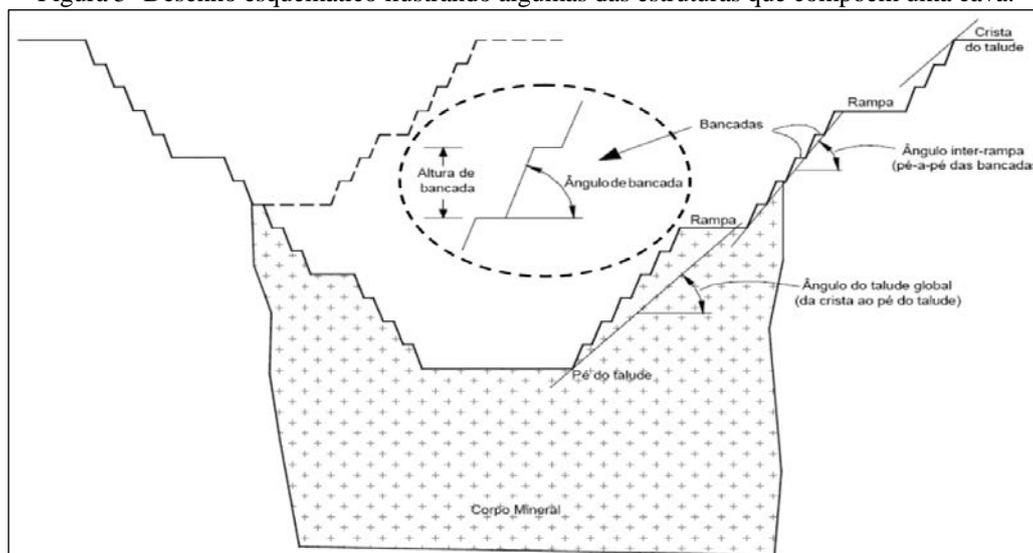
Figura 4- Mina Ranger de Urânio, na Austrália.



Fonte: MINERAÇÃO UNIBH (2015).

As bancadas geralmente possuem de 2 a 15 m de altura entre as quais o acesso é construído. As bancadas de uma cava possuem um ângulo de face íngreme enquanto que o conjunto delas (ângulo inter-rampa) e os ângulos globais de talude são mais suaves, ajudando assim a evitar rupturas nos taludes. A partir de uma análise da geometria geral de talude, quanto mais inclinado é um talude, mais material pode ser minerado, a fim de se reduzir a relação estéril-minério. No entanto, esta regra é limitada pelo gradiente máximo do acesso - tipicamente de 8 a 10%, o que requer cristas mais largas e a necessidade de haver ângulos de talude mais suaves para proporcionar sua estabilidade (BULLIVANT, 1987). A Figura 5 mostra os principais componentes geométricos que definem a estrutura geral de uma cava à céu aberto.

Figura 5- Desenho esquemático ilustrando algumas das estruturas que compõem uma cava.



Fonte: FURTADO (2013).

O transporte do minério e do estéril são as atividades de maior custo na operação de uma lavra em *Open Pit Mining*. Para reduzir este custo, especialmente quando a cava se aprofunda, as seguintes opções são possíveis:

- Unidades de britagem móvel juntamente com uma correia transportadora (sistema de transporte contínuo) em vez do transporte com caminhões. Geralmente permitem um custo unitário de transporte menor e podem ser instaladas em um ângulo de talude mais inclinado, desta forma minimizando os custos de remoção de estéril em virtude da redução da relação estéril-minério;
- *Trolley-assistance* no acesso principal (fornecimento de energia elétrica para caminhões), resultando em caminhões mais rápidos, estradas mais inclinadas ou menores custos por tonelada transportada.
- Sistema de despacho: uso mais eficiente da frota de caminhões;
- Ângulos de bancada mais inclinados (em outras palavras, uma relação estéril-minério menor) até onde a estabilidade os permita - especialmente na parte inferior do *pit* quando LOM se aproxima do fim.

O *Open Pit Mining* pode ser aplicado a praticamente qualquer depósito mineral, possibilitando elevada mecanização e, portanto, altas taxas de produção. Ainda assim pode ser aplicado para pequenas minerações (minas com produção anual inferior a 100.000 t). É flexível, portanto, a escala de produção pode variar no decorrer da mineração, permitindo quase 100% de recuperação do depósito, e é menos agressivo que qualquer método de lavra subterrâneo (PERONI, 2007).

Além disso, é limitado pela profundidade da cava, onde o limite tecnológico estabelece a limitação dos equipamentos e limites econômicos determinam a relação estéril-minério máxima. Devido às altas taxas de mecanização e razão de produção, exige elevados investimentos de capital. Exige recuperação da área degradada, cava e pilhas de estéril. A manutenção e monitoramento dos taludes da mineração são fundamentais para continuidade da escavação e segurança nos trabalhos. O gerenciamento de águas e drenagem da cava são essenciais para o avanço em profundidade. Deve ter disponibilidade de áreas para disposição de estéril (PERONI, 2007).

4.3.2 Método de lavra *Strip Mining*

A lavra por *Strip Mining* ou Lavra em Tiras consiste em depositar o estéril retirado das camadas superiores do depósito dentro dos cortes formados nas etapas anteriores de

lavra da mina. Desta forma, ele oferece menores impactos ambientais já que diminui consideravelmente a quantidade de estéril depositado na superfície. Isto reflete positivamente sobre o desempenho econômico da empresa, visto que gera uma diminuição da distância de transporte do estéril, além de facilitar a exposição do minério, bem como agiliza os processos de recuperação ambiental, e uma posterior exploração econômica da área após o término da mineração (MACÊDO et al., 2012).

O conjunto de técnicas que compõem o método *Strip Mining* são aplicáveis perfeitamente à jazidas formadas por várias camadas de rochas mineralizadas com orientações horizontais ou semi-horizontais, de pouca espessura, localizadas a profundidades não muito grandes (± 50 m) e com grande extensão e volume. É aplicada em diversas jazidas lavradas a céu aberto que apresentam estratificação típica de depósitos de origem sedimentar. Este método é utilizado na lavra de vários minerais como carvão, bauxita, arenito oleoso, folhelho pirobetuminoso, fosfato, bentonita, gipsita e mineração de outros depósitos que possuem baixa coesão (MACÊDO et al., 2012; ROCHA, 2014). Contudo, diferentemente da lavra em cava, o mesmo equipamento utilizado na retirada da cobertura não pode ser utilizado para a retirada do minério, o que acarreta maiores gastos com investimento de máquinas (DE CARLI, 2013).

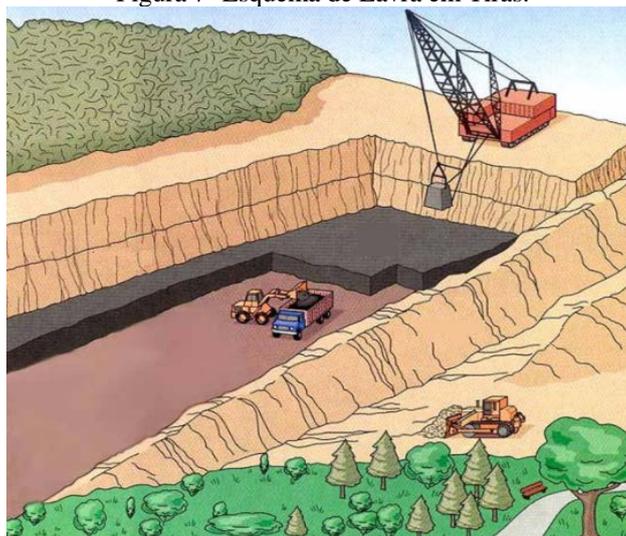
A Figura 6 e a Figura 7 mostram a configuração geométrica do Método de Lavra em Tiras. No primeiro caso, tem-se uma imagem aérea da cava da mina de Caulim de Ipixuna no Pará, e no segundo, um esquema ilustrativo da metodologia, onde a operação de descobertura é realizada com *dragline* e a lavra do minério com o sistema *truck-loader*.

Figura 6- Imagem aérea da mina de caulim de Ipixuna.



Fonte: DE CARLI (2013).

Figura 7- Esquema de Lavra em Tiras.



Fonte: SLIDE PLAYER (2017).

No Brasil, a *Strip Mining* é utilizada na lavra de folhelho pirobetuminoso – xisto para produção de óleo, em São Mateus do Sul (PR); de carvão a céu aberto em Candiota (RS); e de bauxita nos municípios de Porto Trombetas, Juruti e Paragominas, no Pará.

4.3.3 Método de lavra *Terrace Mining*

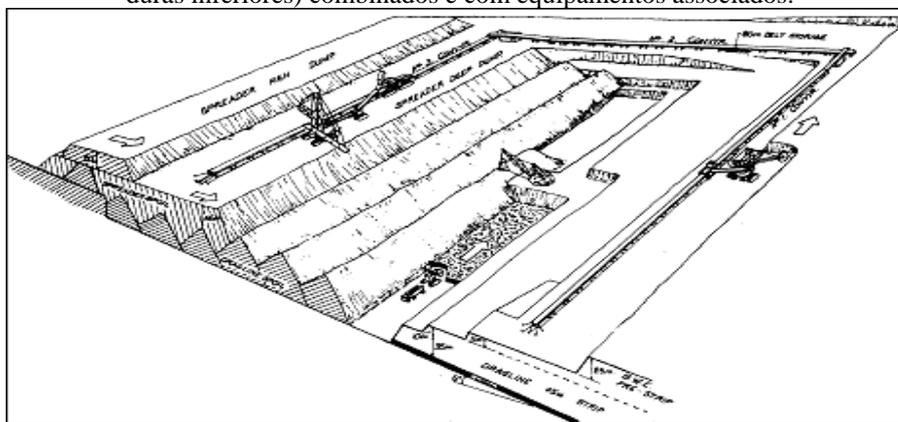
Esta metodologia de lavra é utilizada quando o capeamento é muito espesso ou a lapa do minério possui mergulho muito acentuado para permitir a deposição de estéril diretamente dentro da cava (como é o caso quando se usa uma *dragline* e lançamento direto no método de lavra *Strip Mining*), sendo necessário usar equipamentos de transporte cíclicos ou contínuos (isto é, caminhões ou transportadores de correia) para transportar o estéril do capeamento para regiões da cava previamente mineradas (BULLIVANT, 1987).

É um método de lavra de múltiplas bancadas com acessos laterais, em que a mina move-se sobre o minério de uma extremidade para a outra, mas não necessariamente numa bancada única. O número de bancadas utilizadas geralmente é função da profundidade da escavação e do tipo de equipamento utilizado (normalmente entre 10 a 15m de altura e de 1 a 32 bancadas no terraço).

Exemplos desse tipo de mineração são as minas alemãs de linhito (onde *BWE's* são usadas para escavar o capeamento - um exemplo típico de um sistema de escavação contínua) e, em menor escala, algumas minas de carvão no Reino Unido. Nestes casos, caminhões e *shovels* são utilizados para trabalhar 10 bancadas simultaneamente a fim de

expor as camadas de carvão subjacentes. A camada superior de cobertura é normalmente removida com escavadeiras hidráulicas e caminhões, ou (quando existe material macio) usando um *BWE* (*bucket wheel excavator*), correia transportadora e empilhador tipo *stacker*. Estes métodos são mais caros do que o uso de uma *dragline* mas esta última não é própria para este tipo de mineração devido ao raio de descarga limitado do equipamento e à largura muito maior do corte realizado na *Terrace Mining* comparado com a *Strip Mining*. No entanto, é possível utilizar uma *dragline* em combinação com um terraço “comprido” como ilustrado na Figura 8, mas apenas nas bancadas menores ou inferiores onde o ponto de escavação e de descarga estão dentro do raio de trabalho da *dragline*.

Figura 8- *Terrace Mining* (remoção do capeamento mole) e *Strip Mining* (remoção do estéril das camadas duras inferiores) combinados e com equipamentos associados.



Fonte: BULLIVANT (1987).

Na África do Sul, a mina *Grootegeluk Colliery* (Figura 9), situada a 20 km de Lephalale na província de Limpopo, África do Sul, é um exemplo típico de uma *Terrace Mining* onde 11 bancos são minerados, 6 de camadas de estéril e 5 de camadas de carvão. Uma *dragline* não pode ser usada devido à profundidade do carvão e à largura da cava, mas futuramente durante a vida da mina, os terraços minerados serão preenchidos com estéril (ou seja, o método de lavra irá mudar de *Modified Terrace Mining* para o *Terrace Mining* convencional). Em menor escala a mina *Mooiplaas Dolomite* é também uma operação de Lavra em Terraços (neste caso, o minério é transportado para fora da mina usando uma unidade de britagem móvel dentro da mina e transportador de correia, ao passo que o estéril é transportando diretamente para zonas mineradas como previsto em uma Lavra em Terraços). A Figura 10 ilustra uma típica *Terrace Mining* operando com 3 bancadas de estéril (OB1-3) e 3 bancadas de carvão, com a mineração movendo-se da direita para a esquerda no diagrama (BULLIVANT, 1987).

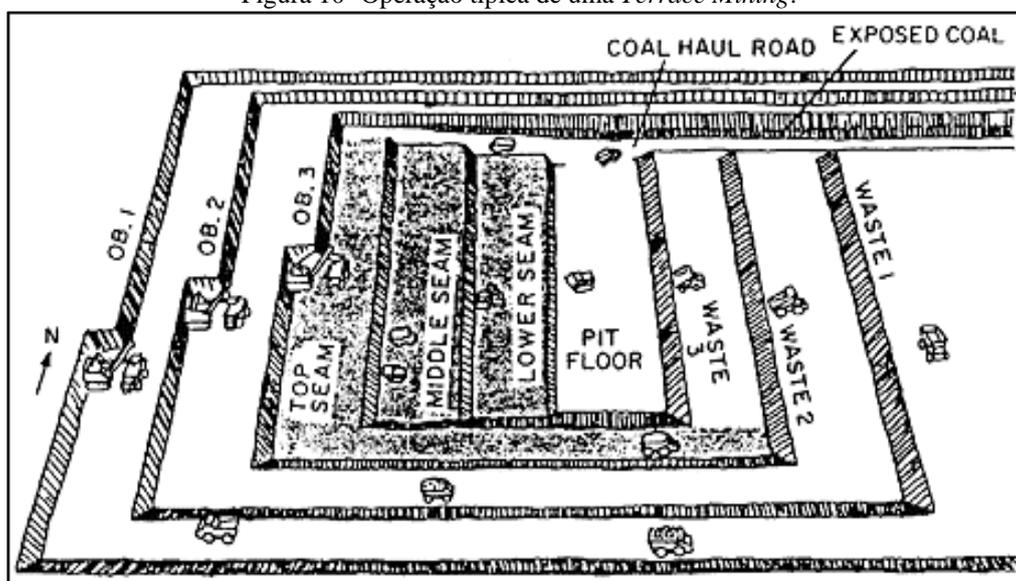
Figura 9- Mina Grootegeluk, Lephalale, Limpopo, África do Sul.



Fonte: GOOGLE MAPS (2018).

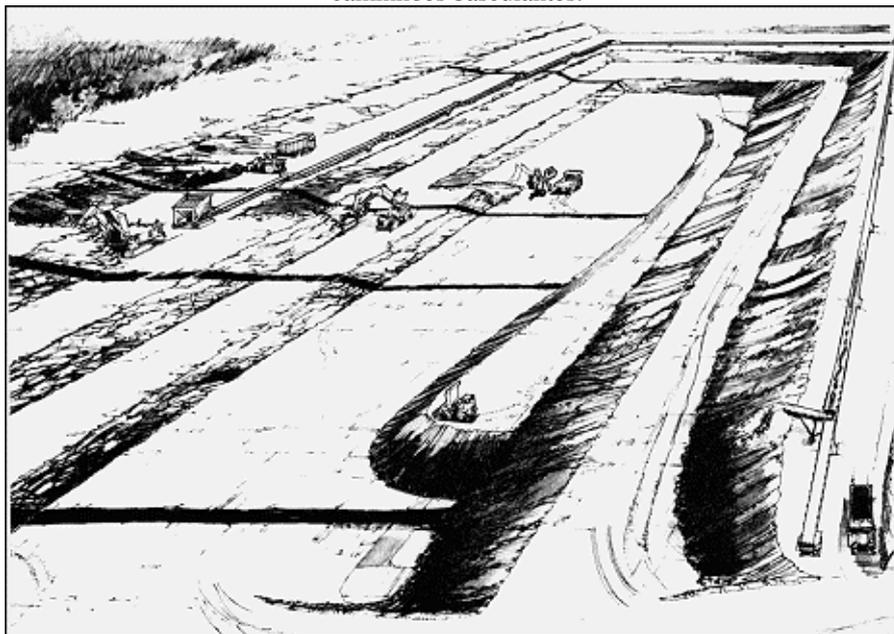
Quando são encontrados minérios de mergulho acentuado, o método de lavra modificado é mais frequentemente aplicado como mostrado na Figura 11 em uma típica operação de uma *Terrace Mining*, com 3 bancadas de estéril, e corpo de minério de mergulho íngreme. Neste caso, as dimensões da cava são limitadas pela exposição do carvão (comprimento da cava) e área de trabalho disponível para mineração e descarregamento de material (largura da cava).

Figura 10- Operação típica de uma *Terrace Mining*.



Fonte: BULLIVANT (1987).

Figura 11- *Terrace Mining* com transportador de correia ao redor da cava, escavadeira hidráulica e caminhões basculantes.



Fonte: BULLIVANT (1987).

No Polo Gesseiro do Araripe, localizado no estado de Pernambuco, tem-se a aplicação do método *Terrace Mining* na mineração de gipsita da Mina Ponta da Serra, como mostrado na Figura 12. Esta mina operava através do método *Open Pit Mining* por bancadas múltiplas até o ano de 2013 e necessitou alterar o método de lavra para continuidade da mineração.

Figura 12- Mineração Ponta da Serra.



Fonte: ROCHA (2017).

4.4 LAVRA DE GIPSITA NO EXTERIOR

Conforme já mencionado, por uma questão cultural, o método de lavra adotado pelas minas do Polo Gesseiro do Araripe é o *Open Pit Mining* ou lavra em cava com bancadas múltiplas. Em outros países, no entanto, para lavra de gipsita, existem as mais variadas aplicações de metodologias de lavra, aliadas a diferentes combinações de operações unitárias nas escavações.

Um dos exemplos disso é a mina *Nakhon Sawan* (Figura 13), localizada em Nong Bua, um distrito na parte nordeste da província de Nakhon Sawan, no norte da Tailândia. A mesma opera com o método de lavra *Open Pit Mining*, produz 1.970.000 toneladas de gipsita ao ano, e apresenta operacionalidade semelhante à das minas do Polo Gesseiro: decapeamento, perfuração e desmonte, carregamento e transporte; e uma britagem com 450 tph (PHATUB, 2016).

Figura 13- Mina *Nakhon Sawan*, localizada no Norte da Tailândia.



Fonte: PHATUB (2016).

A mina *San Pietro-Prato Nuovo* localizada em Murisengo, uma comuna italiana da região do Piemonte, província de Alexandria, é subterrânea, estruturada em 5 níveis e com 90 m de profundidade. Para extração da gipsita é utilizado o método de lavra Câmara e Pilares. O minério é separado do maciço rochoso através de desmonte com explosivos (ESTRAZIONE GESSO, 2017). A Figura 14 apresenta algumas imagens da mina.

Figura 14- Mina *San Pietro - PratoNuovo*, localizada, em Murisengo, Piemonte, Alexandria, Itália.



Fonte: ESTRAZIONEGESSO (2017).

Na Rússia, merece destaque a mina subterrânea localizada no depósito de Novomoskovskoye. É caracterizada por galerias de grandes dimensões e caminhões que transportam até 37 toneladas. Para obtenção da gipsita é necessário a perfuração e desmonte do minério com explosivos, ventilação das galerias, carregamento do material nos caminhões, transporte até a britagem localizada dentro da mineração e finalmente transporte do material britado para vagões fora da mina através de transportador de correia (VATROSLAWSKI, 2015). A Figura 15 abaixo mostra as operações dentro da mina.

Figura 15- Mina de Novomoskovskoye, Rússia.



Fonte: VATROSLAWSKI (2015).

A mineração de gipsita localizada em Altsi, município de Sitia, na unidade regional de Lasíti, região de Creta, Grécia, é operada desde 1980, pela empresa LAVA S.A pertencente ao grupo LAFARGE. É uma cava à céu aberto que produz 300.000

toneladas por ano de minério, o qual é desmontado com explosivos, carregado com pás carregadeiras e transportado em caminhões até a britagem (LAVA S.A., 2017). A Figura 16 apresenta a Mina de Altsi, na Grécia.

Figura 16- Mina de Altsi, Creta, Grécia.



Fonte: LAVA MINING AND QUARRYING CO (2017).

É notável, desta forma, que em diversos lugares ao redor do mundo, a lavra de gipsita é operacionalizada de variadas formas e com diferentes métodos de lavra. Pode-se destacar a lavra subterrânea de gipsita no exterior, algo que ainda não é praticado no Brasil.

4.5 OPERAÇÕES UNITÁRIAS DA LAVRA À CÉU ABERTO

Nas fases de Pesquisa, Lavra e Beneficiamento Mineral as atividades são executadas de forma cíclica através da aplicação de diversas *operações unitárias* que em conjunto definem o método de mineração.

Especificamente na lavra, essas operações seguem uma série de procedimentos fundamentais para extrair e transportar o minério e/ou estéril até o seu destino (ROCHA, L. C., 2017). As *operações unitárias* em lavra de minas a céu aberto abrangem principalmente as operações básicas de perfuração, desmonte, carregamento e transporte. Se estas *operações unitárias* são executadas para a extração do minério são ditas *operações de produção*; ao passo que as *operações auxiliares* servem de suporte a produção de minério, mas geralmente não são diretamente relacionadas com essa produção, a não ser que sejam essenciais para segurança ou eficiência operacional.

O processo de lavra tem início com a preparação da área a ser lavrada, chamada frente de lavra. Após o material ser desmontado por meio de explosivos ou mecanicamente, os equipamentos de transporte são carregados pelos equipamentos de carregamento, transportando o material desmontado (minério ou estéril) das frentes de lavra até um determinado ponto de descarga, podendo terminar em uma usina de beneficiamento ou aterro de estéril. O processo de carregamento e transporte de minério e estéril pode ser executado simultaneamente em diferentes frentes de lavra (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002).

Duas funções básicas devem ser realizadas na extração mineral: escavação e movimentação. Para escavação de recursos minerais mais duros, exige-se a perfuração e desmonte com explosivos. Quando este processo é empregado, é geralmente chamado de fragmentação. Para recursos minerais brandos, os minerais podem facilmente serem obtidos usando-se equipamentos de escavação mecânica. Este processo é normalmente chamado de escavação. Movimentação, mais precisamente refere-se à movimentação de material e é geralmente realizada em dois passos: carregamento e transporte.

A sequência de operações unitárias usadas para executar o desenvolvimento da mina ou lavra é chamada ciclo de operações, isto é, a sequência de operações que é repetida inúmeras vezes para produzir o bem mineral. O ciclo de operações mais comum usado para produção em minas é o seguinte (Figura 17):

Figura 17- Ciclo básico de mineração à céu aberto.



Fonte: SOUZA, J.C. (2007).

Ciclo básico de produção = perfuração + desmonte + carregamento + transporte.

Este ciclo de operações é frequentemente alterado para acomodar o tipo de equipamento e tecnologia melhor adaptáveis para o processo de produção. Já que a mecanização está constantemente sendo incorporada em operações mineiras, as operações unitárias são com frequência fortemente afetadas pelo uso de maquinário. Por exemplo, os equipamentos de escavação contínua podem substituir as operações unitárias de perfuração, desmonte e carregamento. O ciclo básico de produção então seria simplificado a escavação e carregamento. Como um segundo exemplo, pode-se citar as operações unitárias em mineração subterrânea onde o suporte das galerias torna-se uma parte integral do ciclo de operações. Neste caso, as operações unitárias seriam perfuração, desmonte, carregamento, transporte e suporte. Um dos objetivos da mineração moderna é mecanizar e automatizar as operações unitárias de modo que estas fundam-se em um processo único de mineração. Entretanto, a mineração verdadeiramente contínua e automatizada está alguns anos à frente. Desta forma, é necessário lidar com o processo de aperfeiçoar a prática mineira com uma eficiente utilização das operações unitárias (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002).

4.6 PLANEJAMENTO DE LAVRA

Em praticamente todas as empresas de mineração, principalmente as de médio e grande porte, há a necessidade de se fazer um planejamento estratégico de retirada (lavra) do minério para atender às necessidades do mercado. Isto se deve ao fato de que nessas situações o ser humano não consegue analisar todos os cenários possíveis e detectar as melhores opções em tempos compatíveis. Para executar essa tarefa, conhecida como Planejamento de Lavra, é necessário se conhecer com riqueza de detalhes a área a ser explorada e lavrada (ARAÚJO, 2008).

Normalmente, um planejamento é elaborado considerando-se três fases: longo, médio e curto prazo.

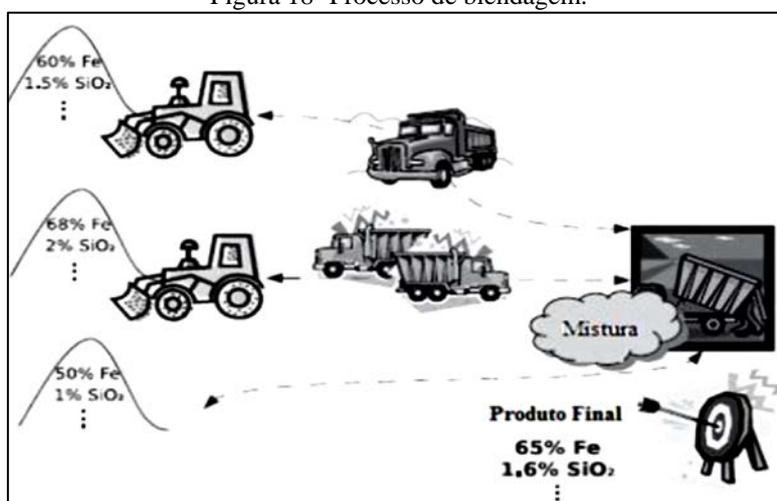
O planejamento estratégico de lavra ou planejamento de longo prazo representa o processo para determinar o projeto e sequenciamento da lavra mais adequado, baseado numa estratégia previamente estabelecida. Visa alcançar os objetivos de longo prazo, maximizando os valores econômicos do empreendimento e obedecendo às restrições técnicas, operacionais, ambientais e de segurança. Não é uma atividade que deva ser realizada somente uma única vez (por exemplo, com a finalidade de estudar a viabilidade do projeto), mas sim periodicamente, principalmente devido a uma variedade de razões,

as quais podem incluir alterações de variadas fontes: circunstâncias econômicas, condições de mercado, novas informações relacionadas ao corpo mineralizado, dentre outras (SILVA, 2008).

No planejamento de lavra de médio prazo, ou tático, comumente são agregadas metas de produção gerando um sequenciamento da retirada de um conjunto de blocos a serem extraídos atendendo restrições de ângulos de segurança para satisfazer as demandas de ROM. Modelos de *scheduling* de veículos de transporte do material lavrado são decisões operacionais tomadas em um horizonte de curto prazo, visando à maximização dos recursos envolvidos e atendimento das metas de produção (ANDRADE, 2014).

O planejamento de curto prazo é normalmente realizado por profissionais de Geologia, Engenharia de Minas, Qualidade, Produção e Administração. Esta equipe interage com o objetivo final de atender ao cliente e é a mais exigida tendo em vista à necessidade de se cumprir tudo aquilo que fora pré-estabelecido pelas equipes responsáveis pelo longo e médio prazo (ARAÚJO, 2008). Para atender as necessidades do planejamento operacional de lavra de curto prazo quanto ao sequenciamento e programação das atividades, deve-se garantir, sempre que possível, que a lavra efetuada pelos equipamentos de carga comece e termine de forma a atender as metas de produção horária. A taxa de extração em cada frente de lavra de minério define a quantidade extraída na mina, formando a qualidade do produto, uma vez que cada bloco possui composição definida. A Figura 18 apresenta uma situação comum em minas a céu aberto onde os equipamentos de carga, nesse caso pás carregadeiras, carregam caminhões com ROM, *run-of-mine*, de características distintas (ANDRADE, 2014).

Figura 18- Processo de blendagem.



Fonte: ANDRADE (2014).

Normalmente nas três fases do planejamento de mina (longo, médio e curto prazo) são considerados períodos temporais. Na primeira fase, a de longo prazo, faz-se um planejamento mais amplo. Por exemplo, pensa-se na mina para alguns anos. Na segunda, a de médio prazo, faz-se um planejamento para até um ano e na terceira fase, a de curto prazo, trabalha-se num planejamento diário, mensal e até trimestral. É importante salientar que esses intervalos de tempo não são rígidos e, portanto, podem variar de uma empresa para outra.

4.6.1 Sequenciamento de Lavra

A otimização de uma cava a céu aberto é realizada a partir da definição dos limites do corpo mineral. Estes limites são construídos através de interpretação geológica e estimativa de teores, sendo possível avaliar a quantidade e a qualidade dos parâmetros de interesse.

Uma vez definido o corpo de minério é possível obter o modelo de blocos representativo da mineralização. De posse do modelo de blocos gera-se a chamada cava ótima, que pode ser obtida através de algoritmos de otimização. Os métodos que alcançaram a maior popularidade e conseqüente implementação computacional, foram às técnicas dos Cones Flutuantes e o algoritmo de Lerchs-Grossmann.

Após a determinação da cava final otimizada é possível realizar-se o sequenciamento da lavra e planejamento da produção na mina. Para que o sequenciamento possa ser definido é necessário definir a capacidade de produção necessária da mina e da planta de beneficiamento, bem como o dimensionamento dos equipamentos envolvidos na lavra e no transporte do minério, uma vez que estes são parâmetros que limitam a quantidade a ser extraída por unidade de tempo. De posse desses dados, os blocos contidos dentro da cava ótima são sequenciados respeitando as restrições técnicas, operacionais e econômicas. A etapa de sequenciamento da lavra define o tempo de vida útil de um projeto de mineração, uma vez que revela a quantidade de anos necessários para se exaurir a cava (DE CARLI, 2013).

O sequenciamento de lavra é, portanto, o processo de definir a seqüência de extração dos blocos e simular sua remoção analisando os resultados acumulados em cada período de tempo, de modo a alcançar metas estratégicas predeterminadas, sendo que este tem efeito significativo no fluxo de caixa de operações mineiras. O objetivo do planejamento é normalmente aperfeiçoar o sequenciamento da produção no que diz

respeito a maximização do valor presente dos fluxos de caixa, obedecendo a um conjunto de restrições que incluem:

- Ângulos geotécnicos, os quais são modelados por um conjunto de arcos que definem a precedência entre os blocos;
- Limitantes de lavra, a quantidade máxima de rocha que pode ser lavrada em um determinado período (normalmente um ano);
- Limitantes de processo, a quantidade máxima de minério que pode ser processado pela planta em um determinado período de tempo e;
- Limitantes de mercado, quantidade máxima de concentrado que pode ser comercializada em um determinado período de tempo.

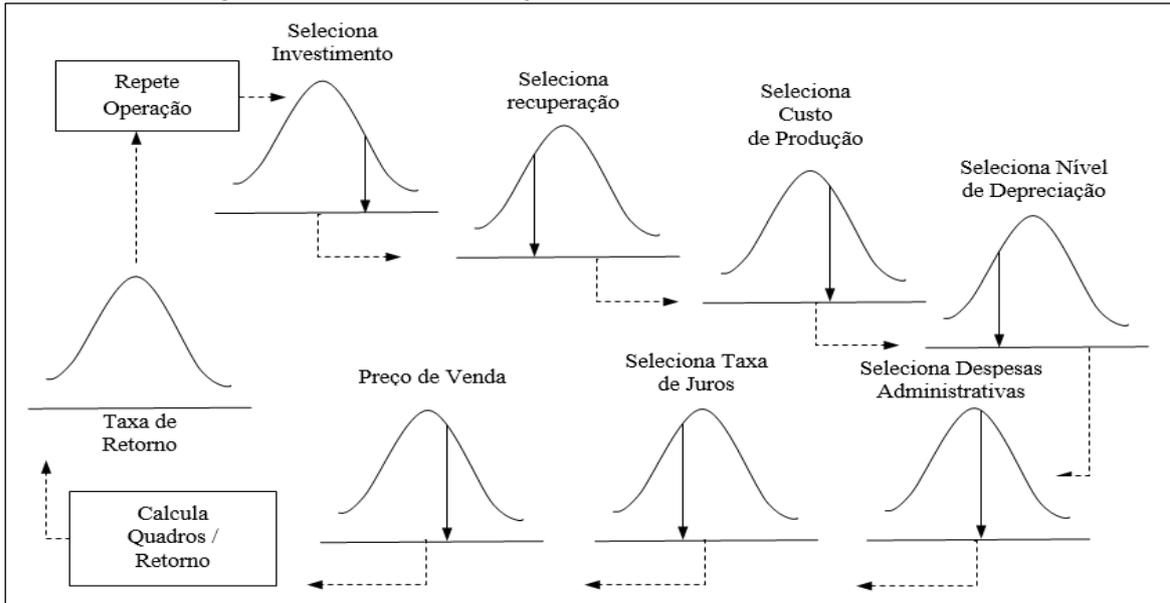
A complexidade inerente ao sequenciamento da produção, na prática, requer uma solução computacional que use programação matemática como técnica de otimização ou pode ser executado manualmente dependendo da complexidade e tamanho da jazida. A programação linear (PL) é a técnica mais usada na otimização do sequenciamento de produção em minas (FREITAS, 2009).

4.7 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Essa técnica, quando aplicada à análise de projetos, refere-se à relação estocástica ou aleatória de variáveis, sendo conhecida também como método de Monte Carlo. O método de Monte Carlo simula, através da geração de números aleatórios, um grande número de parâmetros do projeto com características modeladas estatisticamente. A simulação pelo método de Monte Carlo é orientada para o uso de computadores e sem a velocidade desses a maioria dos modelos de simulação tornam-se impraticáveis.

Uma vez estimado cada um dos parâmetros do Fluxo de Caixa (investimentos, preço de venda, custos de produção, recuperações, teores, despesas administrativas, nível de depreciação, taxa de juros de empréstimos, produção, etc.) estima-se um intervalo de variação possível e suas correspondentes curvas de distribuição de probabilidades. A partir destas curvas, avalia-se e determinam-se as respectivas funções de distribuição de probabilidade acumulada (SOUZA; SILVA, 2014). O processo de simulação é descrito na Figura 19.

Figura 19- Processo de simulação através da Técnica de Monte Carlo.



Fonte: SOUZA e SILVA (2014).

5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para realização deste trabalho é apresentada na Figura 20, cujos detalhamentos serão descritos no Tópico 6 – ESTUDO DE CASO.

Figura 20- Metodologia do trabalho.



Fonte: AUTOR (2018).

6 ESTUDO DE CASO

Este trabalho é resultado de uma parceria entre a UFPE, através do Laboratório de Planejamento de Lavra do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral e a empresa Royal Gipso Ltda / Ponta da Serra Mineração Ltda. O objeto de estudo deste trabalho é uma área de concessão da empresa Royal Gipso Ltda / Ponta da Serra Mineração Ltda localizada próximo ao distrito de Gergelim, município de Araripina, Pernambuco, cuja poligonal pertence ao processo minerário 840.107/2010 DNPM.

A Figura 21 e a Figura 22 apresentam a localização da área de estudo sob a qual encontra-se o depósito de gipsita, sendo a primeira figura em uma visão ampla do estado de Pernambuco e a segunda em uma visão aproximada da área.

Figura 21- Área em estudo no estado de Pernambuco.



Fonte: GOOGLE EARTH (2018).

Figura 22- Área em estudo próxima ao distrito de Gergelim.



Fonte: GOOGLE EARTH (2018).

6.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Os dados do levantamento topográfico e das sondagens realizadas nesta área foram também fornecidos pelo grupo Royal Gipso. O ANEXO A apresenta o Levantamento Topográfico Planialtimétrico e o APÊNDICE A mostra uma tabela contendo as informações obtidas nas sondagens. O levantamento topográfico tem papel importante neste trabalho uma vez que fornece as curvas de nível do terreno, posição de estradas, forma e posição da poligonal, ao passo que as sondagens informam o número de furos, posição dos furos e espessura das camadas litológicas.

Em fevereiro de 2015 foi realizada uma visita a Mineração Royal Gipso Ltda que se localiza numa área chamada Fazenda Ponta da Serra, no município e comarca de Araripina no Estado de Pernambuco. A Figura 12 ilustra a mineração visitada cuja operação é realizada atualmente com o método de lavra *Terrace Mining*. Esta excursão teve como finalidade o estudo e análise das operações unitárias da mineração, do *layout* de cava com *Terrace Mining*, dos aspectos geométricos de cava e também o recebimento de orientações dos colaboradores da Royal Gipso Ltda quanto à transição que ocorreu na mineração do método de lavra *Open Pit* para a *Terrace Mining*.

Desta forma, para o desenvolvimento deste projeto de lavra a Mineração Royal Gipso serviu como referência para obtenção de informações sobre o processo produtivo e desempenho de equipamentos de mineração uma vez que já foi objeto de estudo de outras dissertações realizadas no Laboratório de Planejamento de Lavra (LAPLA) do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) conforme Bastos (2013), Silva (2013) e Rocha (2017).

6.2 GEOLOGIA DA ÁREA

Os minerais gipsita e anidrita ocorrem em várias regiões do mundo, sendo encontrados em depósitos de origem evaporítica, cuja formação resulta da precipitação de sulfato de cálcio a partir de soluções aquosas concentradas e condições físicas favoráveis. A evaporação e conseqüente concentração do sal é favorecida em ambiente quente e seco. Os depósitos de gipsita costumam apresentar, além da anidrita, contaminantes como argilas, quartzo, carbonatos de cálcio e magnésio, cloretos e outros sulfatos. Em geral, a produção é obtida a partir de minério com 80 a 95% de pureza (BALTAR et al., 2005).

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. 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) (ROCHA, 2017 *apud* RIOS-NETTO et al., 2012).

Há diferentes propostas para a sequência estratigráfica da Bacia do Araripe. Uma delas é a de Assine (2007), citado por Rocha (2017), e pode ser vista na Figura 23.

Figura 23- Síntese da Estratigrafia da Bacia do Araripe.

Era	Período	Andar	Unidade litoestratigráfica
MESOZOICO	CRETÁCEO	CENOMANIANO	Formação Exu
		?	
		ALBIANO	Formação Araripina
		?	Formação Santana Membro Romualdo
		NEOAPTIANO	Formação Santana Membros Crato/Ipubi
	JURÁSSICO	EOCRETÁCEO	Formação Barbalha
		NEOJURÁSSICO	Formação Missão Velha
			Formação Brejo Santo
	PALEOZOICO	SILURIANO	
		ORDOVICIANO	Formação Cariri
PRECAMBRIANO		embasamento cristalino (granito)	

Fonte: ASSINE (2007).

De acordo com Arai (2006), conforme citado por Rocha (2017), 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 (ROCHA, 2017 *apud* ASSINE, 1992).

A região onde ocorre mineração 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.

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).

A formação geológica dos depósitos do Membro Ipubi da Formação Santana se caracteriza por jazimentos tabulares, com espessuras que podem atingir 30 metros. A camada de gipsita apresenta-se subdividida em horizontes e sob diversas formas alotrópicas, popularmente conhecidas como Boró, Cocadinha, Rapadura, Estrelinha, *Johnson* e Minério do Piso; o capeamento é constituído por argilas, margas e arenitos, e se caracteriza por constituir-se de material pouco consolidado, com espessuras que variam de 18,7 metros a 23,5 metros (BASTOS, 2013).

6.3 CRIAÇÃO DO BANCO DE DADOS PARA O *STUDIO 3*

Para se trabalhar com planejamento mineiro no software *Studio 3*, é necessário a criação de um banco de dados que deve conter informações referentes a jazida em estudo, em diferentes arquivos.

Quando coletadas todas as informações referentes ao jazimento, isto é, topografia, teores, geologia, inclinação e posição dos furos de sondagens, é possível gerar os arquivos necessários para entrada no software *Studio 3*, que são: *survey*, *geology*, *assays* e *collar*. Na prática e dependendo do depósito estudado, não há a necessidade de ter-se todos estes arquivos.

O arquivo *collar.txt* refere-se às coordenadas X, Y e Z das bocas dos furos das sondagens, o *surveys.txt* refere-se ao azimute e inclinação de cada amostra da sondagem, *assays.txt* faz alusão aos teores obtidos a partir de análises químicas das amostras e o *geology.txt* mostra a distribuição das camadas litológicas das sondagens.

No caso da jazida em estudo e conforme dados fornecidos pela empresa, tem-se apenas os arquivos *collar* e *geology* (APÊNDICE B). Isto se deve ao fato de que as variedades de gipsita são lavradas todas juntas sem a necessidade de separação, pois todas são calcinadas misturadas. Logo, as empresas da região não fazem análises químicas das amostras obtidas nas sondagens uma vez que não necessitam e, portanto, cabe a estas apenas o conhecimento da geologia, espessura das camadas e coordenadas dos furos. O *collar* foi construído a partir das coordenadas X, Y e Z dos furos em formato UTM, ao passo que o *geology* com base nos dados litológicos da jazida, ambas informações obtidas a partir dos dados do APÊNDICE A. Na geologia desta área tem-se basicamente como material de cobertura a argila, seguida do minério de gipsita e abaixo deste, o folhelho. Assim, para criação do arquivo *geology*, fez-se quatro colunas em um arquivo de texto: BHID - refere-se à numeração do furo de sondagem, FROM - trata-se da cota de início de uma camada litológica, TO - remete a cota que encerra uma camada e ROCK - reporta ao tipo de litologia (1: argila, 2: gipsita e 3: folhelho).

O APÊNDICE B mostra os arquivos *collar* e *geology* produzidos a partir dos dados fornecidos pela empresa Royal Gipso Ltda / Ponta da Serra Mineração Ltda, e que foram importados no software *Studio 3*.

6.4 MODELAMENTO DO TERRENO E DA JAZIDA

Os dados obtidos na pesquisa da área serviram como informações de entrada no software *Studio3* para realização da modelagem geológica da jazida.

Para a modelagem do terreno no software *Studio 3* foram necessárias as curvas de nível da superfície do terreno, apresentadas do ANEXO A. O Modelo Digital de Terreno ou DTM (*Digital Model Terrain*) delimita a superfície da área estudada e é criado a partir de triângulos produzidos (*wireframe*) no *software* de forma semi-automática.

Para a modelagem geológica da jazida mineral foram necessárias as informações obtidas na campanha de sondagem. Basicamente, o banco de dados de sondagens deve conter informações de posição das bocas dos furos e litologia. É o que ocorre neste estudo, por circunstâncias já elucidadas onde se utilizou os arquivos *collar* e *geology*, para importação no *Studio 3*. A importação e combinação destes arquivos, seguida da construção de uma legenda, dá origem aos furos de sondagem.

Uma vez construídos os furos de sondagem no software e conhecido o comportamento da litologia, pode-se obter o corpo mineral de gipsita e determinar as reservas geológicas da jazida.

Para o modelamento geológico desta jazida utilizou-se o Método das Seções Verticais. Para isto foram desenhadas secções da jazida coincidentes com os furos de sondagem.

A partir das secções foi possível criar o Modelo Geológico da jazida num processo similar ao da criação da Topografia, isto é, através de *wireframes*.

6.5 DESENVOLVIMENTO DA CAVA

O projeto da cava final foi executado a partir do modelamento geológico e topográfico da área em estudo no software *Studio 3*. O critério de decisão adotado para a determinação da cava final foi a Relação Estéril-Minério Econômica.

Para execução deste modelo de cava projetou-se na topografia as bancadas do estéril da cobertura a partir da borda superior do minério. A região da topografia que cobre o minério, assim como a parte superior do sólido do minério foram suprimidas do modelo geológico com a finalidade de gerar-se um espaço vazio, isto é, a cava em si.

Para o minério considerou-se apenas uma bancada de altura variável conforme a espessura deste ao passo que, no estéril da cobertura considerou-se bancadas de 10 m de

altura com inclinação de 75°, podendo haver regiões da cava com até 3 bancadas para a *Terrace Mining*. Para a cava lavrada por *Strip Mining* tem-se apenas 1 bancada de descobertura, independente da altura dessa camada.

Os aspectos geométricos da mina como altura de bancada, inclinação da face dos taludes, área da praça operacional, acessos (largura, inclinação, etc), largura de bermas, etc foram determinados com base nos dados coletados na visita à Mineração Royal Gipso, uma vez que esta já opera com a lavra em *Terrace Mining*.

6.6 SEQUENCIAMENTO DE LAVRA

O sequenciamento de lavra na *Terrace Mining* inicia através do prolongamento dos acessos laterais para o transporte de estéril da cobertura, realizado em geral através de 2 bancadas com cerca de 8-15 m de altura, ligando os níveis de escavação da cobertura com os respectivos níveis de deposição no interior da lavra, em áreas já exauridas pela mineração de gipsita.

Paralelamente é realizado o avanço nas frentes de lavra de gipsita, em direção perpendicular aos cortes, tanto aos que estão sendo desenvolvidos como também aos que estão sendo preenchidos por estéril.

No método de lavra *Strip Mining*, o sequenciamento difere na forma como é realizada a operação de descobertura, que ocorre por lançamento direto do material. Neste caso, apenas um equipamento realiza as operações de desmonte, carregamento e transporte do estéril, necessitando de apenas uma bancada na escavação da cobertura.

Como a operação dos métodos de lavra *Terrace Mining e Strip Mining* ocorre de forma similar, o mesmo sequenciamento de lavra foi considerado para ambos. Neste projeto de lavra o sequenciamento foi realizado no software *Studio 3*. Desta forma o modelo geológico foi projetado no modelo topográfico a fim de produzir-se um modelo geológico para o estéril. Uma vez criado um sólido para o estéril, foram feitos cortes de 30 m de largura tanto no estéril quanto no minério. Os cortes do minério foram subdivididos em comprimentos correspondentes a um volume de 300.000 m³, e os cortes do estéril foram também subdivididos em comprimentos iguais aos do minério. O volume de 300.000 m³ representa a produção anual de minério adotada para este estudo, enquanto que a produção anual de estéril depende da porção topográfica que recobre o corte, já que para o sequenciamento anual ambos, minério e estéril, apresentam as mesmas larguras. O sequenciamento anual foi realizado para 20 anos de produção.

6.7 DEFINIÇÃO DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS E DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DE LAVRA

A lavra de gipsita é composta de várias operações unitárias, que são descritas a seguir.

Primeiramente devem ser construídas todas as obras de infraestrutura de mina, para a lavra, mais especificamente as estradas de acesso à mina e locais de infraestrutura (escritório, paióis, etc).

Em seguida deve ser executada a supressão vegetal da superfície, para que se possa atingir o capeamento da jazida. Esta operação é geralmente realizada com tratores de esteiras, com auxílio de correntes, caso seja necessário, tratores com concha para o carregamento do material nos caminhões, também são usados nesta operação.

Uma vez realizada a supressão vegetal inicia-se a operação de descobertura, que consiste na escavação do material estéril que cobre o minério, para a exposição deste último. Esta operação pode ser realizada com: tratores de esteira, escavadeiras hidráulicas, caminhões, *draglines* e pás-carregadeiras. Para o projeto de lavra com *Terrace Mining* foi dimensionada uma operação com utilização de escavadeiras hidráulicas e caminhões para a descobertura da jazida. Ao mesmo tempo em que é executada a descobertura, constroem-se os acessos ao minério. Apenas o primeiro corte escavado nesta operação é depositado em forma de pilha de estéril, visto que o minério ainda não apresenta nenhuma área minerada livre para *backfilling*. Os demais cortes, realizados paralelamente ao primeiro corte, são desenvolvidos fazendo-se com que a cobertura estéril escavada seja depositada dentro da cava em área já minerada.

Para o projeto de lavra da *Strip Mining* optou-se pela utilização de uma *dragline* de pequeno porte e o lançamento direto na tira adjacente onde já ocorreu a lavra da gipsita (*direct casting*), sem a necessidade de acessos para o transporte da cobertura estéril.

A lavra do minério é feita geralmente com as operações unitárias de perfuração, desmonte, carregamento e transporte do minério. Para isto, utilizam-se, perfuratrizes, pás-carregadeiras e caminhões, em geral. Os equipamentos da operação de lavra também foram dimensionados neste projeto através de metodologias de cálculo propostas por Ricardo e Catalani (2007) e Souza, J. C. (2001).

Na lavra de gipsita com os métodos de lavra *Terrace Mining* e *Strip Mining*, a recuperação ambiental da mineração ocorre concomitante a lavra, isto significa que o

material estéril proveniente da operação de descobertura é depositado dentro da cava à medida que a lavra do minério ocorre.

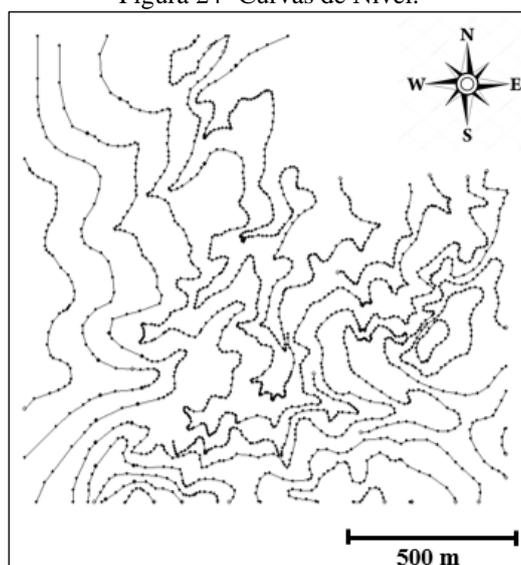
A diferença fundamental entre os métodos estudados na presente dissertação para a lavra da gipsita com o método *Open Pit Mining*, restringe-se ao modo como é executada a operação de descobertura, uma vez que nos primeiros métodos o capeamento é depositado por *backfilling* ou *direct casting*, isto é, o material é depositado em áreas já mineradas, ao passo que na mineração com *Open Pit Mining* o estéril é depositado em aterros (bota-fora) em áreas fora da cava.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 MODELAMENTO GEOLÓGICO DA JAZIDA DE GIPSITA

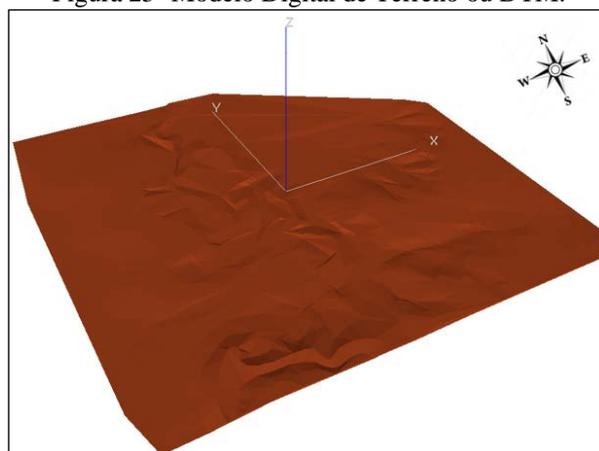
A Figura 24 apresenta o resultado da importação das curvas de nível no software *Studio 3*, ao passo que a Figura 25 mostra o Modelo Digital de Terreno obtido a partir destas curvas.

Figura 24- Curvas de Nível.



Fonte: AUTOR (2018).

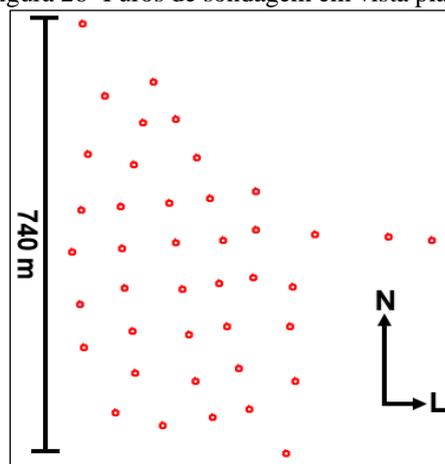
Figura 25- Modelo Digital de Terreno ou DTM.



Fonte: AUTOR (2018).

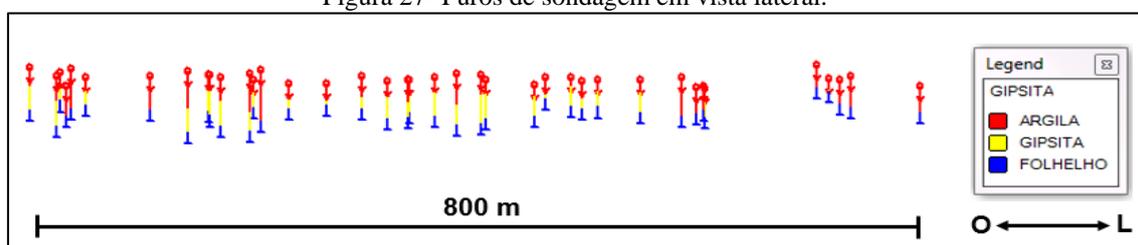
A Figura 26 e a Figura 27 apresentam os furos de sondagem criados a partir dos arquivos *collar* e *geology*. A cor vermelha representa o capeamento argiloso, a cor amarela representa a gipsita e o azul o folhelho.

Figura 26- Furos de sondagem em vista plana.



Fonte: AUTOR (2018).

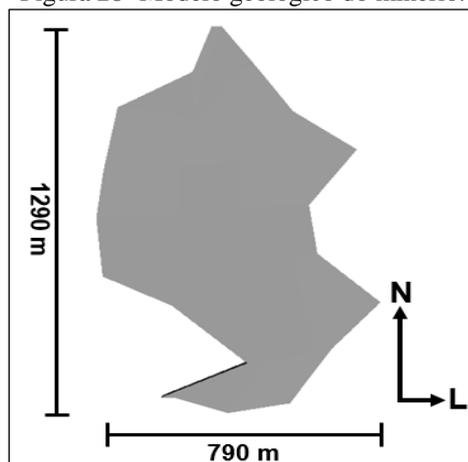
Figura 27- Furos de sondagem em vista lateral.



Fonte: AUTOR (2018).

Após a união entre as secções obteve-se o sólido que representa o corpo de minério, conforme a Figura 28.

Figura 28- Modelo geológico do minério.

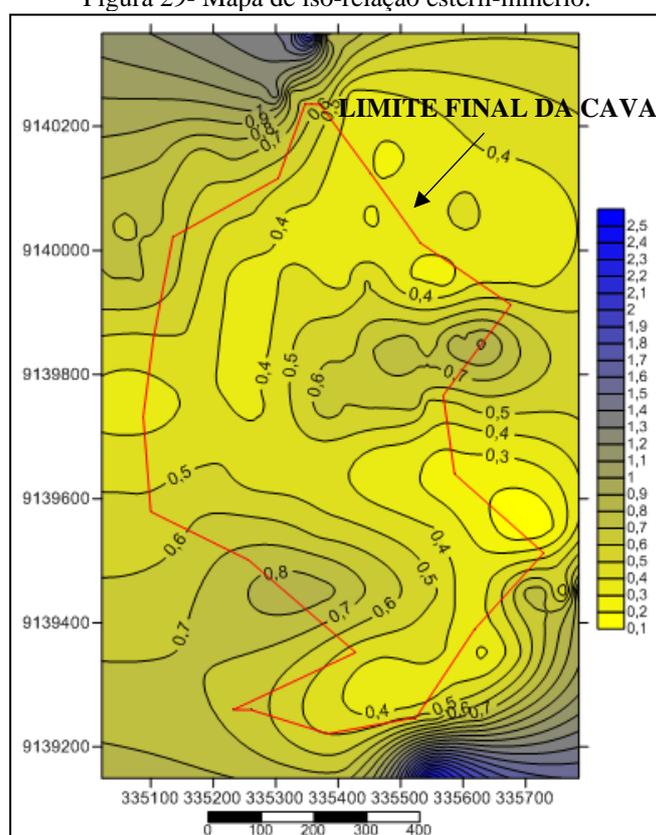


Fonte: AUTOR (2018).

7.2 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ESTÉRIL-MINÉRIO ECONÔMICA

Uma vez que no Polo Gesseiro do Araripe o minério é lavrado sem distinção, isto é, não há um fator limitante para separação de diferentes produtos, como teor ou forma alotrópica da gipsita por exemplo, o limite final da cava e o ponto onde iniciará a lavra foram determinados a partir da Relação Estéril-Minério (REM) Econômica. Assim foi produzido no *software Surfer* um Mapa de Iso-Relação Estéril-Minério da jazida, conforme mostrado na Figura 29.

Figura 29- Mapa de iso-relação estéril-minério.



Fonte: AUTOR (2018).

A REM Econômica foi determinada a partir dos custos unitários de produção necessários para funcionamento do empreendimento. Os detalhes referentes a obtenção dos valores dos custos são descritos no Tópico “CUSTOS DE AQUISIÇÃO E OPERAÇÃO NOS MÉTODOS *TERRACE* E *STRIP MINING*”, deste trabalho. Assumiu-se um lucro desejado de 15%. A REM Econômica é determinada de acordo com a equação 1 (SOUZA, J.C., 2001):

$$REM_{econ} = \frac{P_v + (C_{LA} + C_{BENEF} + L)}{C_{DECAP}} \quad (1)$$

Onde:

REM _{econ} :	Relação estéril-minério econômica;
P _v :	Preço de venda;
C _{LA} :	Custo de lavra à céu aberto;
C _{BENEF} :	Custo de beneficiamento;
L:	Lucro desejado;
C _{DECAP} :	Custo de decapeamento.

A Tabela 2 apresenta os custos totais para implantação do empreendimento e os custos unitários de lavra para ambos os métodos de lavra.

Tabela 2- Custos totais e unitários.

CAPEX (Aquisição de Equipamentos)	Custo Total	Custo unit. (\$/m ³)
Equipamentos da Lavra do Minério	\$ 758.027,69	\$ 0,25
Equipamentos do Decapeamento - <i>Terrace Mining</i>	\$ 491.358,02	\$ 0,13
Equipamentos do Decapeamento - <i>Strip Mining</i>	\$ 2.407.407,41	\$ 0,63
OPEX		
Equipamentos da Lavra do Minério		\$ 1,81
Equipamentos do Decapeamento - <i>Terrace Mining</i>		\$ 0,58
Equipamentos do Decapeamento - <i>Strip Mining</i>		\$ 0,50
Explosivos e acessórios	\$ 335.441,04	\$ 1,12
Acessórios de perfuração	\$ 51.543,21	\$ 0,17
Mão-de-obra e alimentação-Terrace Mining	\$ 234.983,78	
Lavra do minério		\$ 0,26
Decapeamento		\$ 0,21
Mão-de-obra e alimentação-Strip Mining	\$ 216.158,59	
Lavra do minério		\$ 0,26
Decapeamento		\$ 0,16
Despesas Administrativas	\$ 204.756,38	
Lavra do minério		\$ 0,13
Decapeamento		\$ 0,17
Impostos	\$ 2.966.782,64	\$ 9,89
Depreciação		
Equipamentos da lavra	\$ 75.802,47	\$ 0,25
Equipamentos Decapeamento - <i>Terrace Mining</i>	\$ 49.135,80	\$ 0,13
Equipamentos Decapeamento - <i>Strip Mining</i>	\$ 240.740,74	\$ 0,63
Custo total da lavra do minério		\$ 13,88
Custo total com decapeamento - Terrace Mining		\$ 1,22
Custo total com decapeamento - Strip Mining		\$ 2,10

Fonte: AUTOR (2018).

A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados para o cálculo das REMs Econômicas, assim como o valor da REM Econômica para ambos os métodos de lavra.

Tabela 3- Relação Estéril-Minério Econômica.

Custo total da lavra do minério (\$/t)	\$ 6,04
Custo total com decapeamento - <i>Terrace Mining</i> (\$/m ³)	\$ 1,22
Custo total com decapeamento - <i>Strip Mining</i> (\$/m ³)	\$ 2,10
Lucro Desejado	\$ 1,55
REM Econômica (m³/t)	
<i>Terrace Mining</i>	2,25
<i>Strip Mining</i>	1,31

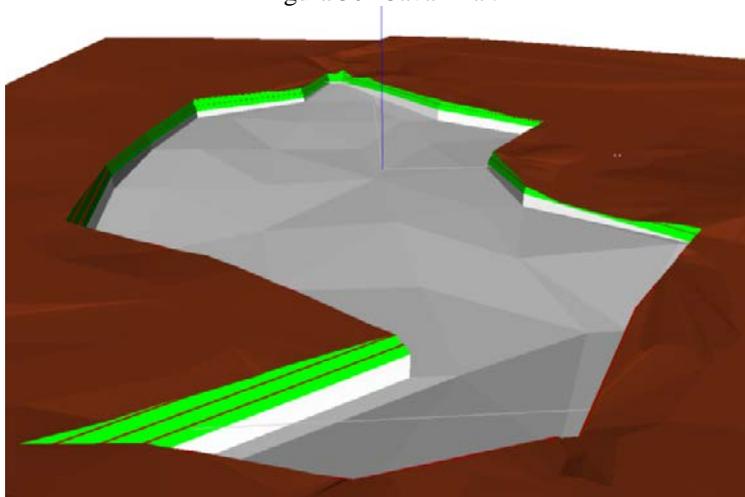
Fonte: AUTOR (2018).

Pelos resultados da REM Econômica a lavra pode iniciar em qualquer ponto da cava, uma vez que de acordo com a Figura 29, a região onde será a cava apresenta Relações Estéril-Minério físicas bem abaixo das Relações Estéril-Minério Econômicas determinadas para ambos os métodos de lavra. Assim, assumiu-se que a lavra deve iniciar no ponto mais a Sul da jazida devido à maior proximidade com a PE-615 e também devido à rigidez de ambos os métodos de lavra, *Terrace Mining* e *Strip Mining*.

7.3 DETERMINAÇÃO DA CAVA FINAL

Uma vez definidos os valores das Relações Estéril-Minério Econômicas para ambos os métodos de lavra, verificou-se que toda a jazida pode ser lavrada dentro dos limites econômicos. Deste modo definiu-se a cava final projetando-se na topografia as bancadas do estéril a partir do minério. A Figura 30 apresenta a cava produzida no *Studio 3*, com faces das bancadas do estéril inclinadas em 75°, 10 m de altura e 2m de berma.

Figura 30- Cava final.



Fonte: AUTOR (2018).

A Figura 31 mostra um contorno que representa a jazida projetada sobre o terreno. Nota-se a facilidade de acesso ao local da futura mineração através da PE-615 e outras estradas vicinais.

Figura 31- Localização da jazida.



Fonte: AUTOR (2018).

A modelagem no *Studio 3*, fornece também informações de volumes dos sólidos obtidos. Desta forma foi possível avaliar a reserva, determinar a REM global, o volume de minério e estéril *in situ* a ser desmontado por mês e a vida útil da mina. A Tabela 4 apresenta informações de volumes e tonelagens.

Tabela 4- Avaliação das reservas lavráveis.

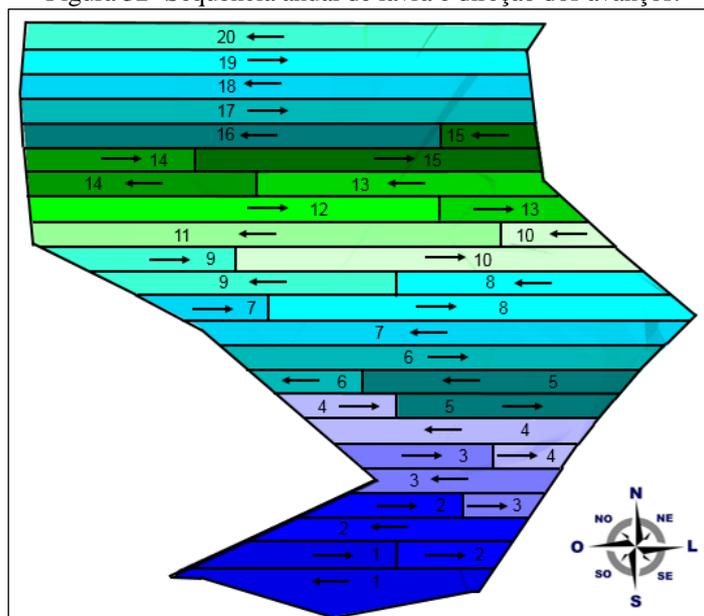
Volume da Jazida	m ³	9.740.721,98
Volume de Estéril	m ³	11.000.658,69
REM Global	m ³ /m ³	1,13
Massa Específica Gipsita <i>In Situ</i>	t/m ³	2,30
Massa Reserva Medida	ton	22.403.660,55
Massa Reserva Lavrável (90%)	ton	20.163.294,50
Espessura média do minério	m	15
Espessura média do estéril	m	20

Fonte: AUTOR (2018).

7.4 SEQUENCIAMENTO DE LAVRA

O sequenciamento de lavra foi executado de modo a obterem-se volumes anuais de gipsita de 300.000 m³. A Figura 32 apresenta o sequenciamento de lavra para os 20 primeiros anos de operação da mina, onde os avanços estão numerados por ano de extração.

Figura 32- Sequência anual de lavra e direção dos avanços.



Fonte: AUTOR (2018).

A Tabela 5 apresenta características da jazida e da mina obtidas a partir do sequenciamento. Com a produção determinada no projeto de lavra, a vida útil da mina será de 30 anos.

Tabela 5- Parâmetros técnicos da mineração.

Largura de uma tira	m	30
Volume de gipsita <i>in situ</i> a desmontar mensalmente	m ³	25.000
Massa Específica Gipsita <i>In Situ</i>	t/m ³	2,30
Volume de gipsita <i>in situ</i> a desmontar mensalmente	ton	57.500
Empolamento da Gipsita	%	50
Volume de gipsita empolado a desmontar mensalmente	m ³	37.500
Volume de Esteril <i>in situ</i> a desmontar mensalmente	m ³	31.707
Massa Específica de Estéril <i>In Situ</i>	t/m ³	1,42
Volume de Esteril <i>in situ</i> a desmontar mensalmente	ton	45.024
Empolamento do Estéril	%	40
Volume de estéril empolado a desmontar mensalmente	m ³	44.390
Vida Útil da Mina	anos	30

Fonte: AUTOR (2018).

A Tabela 6 apresenta os valores de volumes e tonelagens de minério, volumes de estéril e REM anuais em m³/t, obtidos a partir do sequenciamento de lavra e das características geológicas da jazida.

Tabela 6- Sequenciamento de lavra para 20 anos de operação.

ANO/LITOLOGIA	Minério (m³)	Minério (t)	Estéril (m³)	REM (m³/t)
Ano 1	295.267,30	679.114,79	475.549,57	0,70
Ano 2	301.731,86	693.983,28	358.509,14	0,52
Ano 3	283.489,87	652.026,70	267.778,29	0,41
Ano 4	317.135,94	729.412,66	332.643,13	0,46
Ano 5	288.685,94	663.977,66	320.735,09	0,48
Ano 6	304.367,45	700.045,14	454.394,15	0,65
Ano 7	306.355,99	704.618,78	504.177,71	0,72
Ano 8	312.519,64	718.795,17	386.870,32	0,54
Ano 9	324.410,79	746.144,82	456.177,58	0,61
Ano 10	286.388,07	658.692,56	256.119,02	0,39
Ano 11	342.557,65	787.882,60	372.320,18	0,47
Ano 12	313.039,89	719.991,75	325.194,03	0,45
Ano 13	291.203,93	669.769,04	216.271,35	0,32
Ano 14	178.427,42	410.383,07	340.051,81	0,83
Ano 15	287.851,28	662.057,94	264.599,02	0,40
Ano 16	297.006,60	683.115,18	317.364,11	0,46
Ano 17	335.696,26	772.101,40	354.218,88	0,46
Ano 18	320.823,90	737.894,97	342.868,81	0,46
Ano 19	295.505,90	679.663,57	338.564,56	0,50
Ano 20	283.201,45	651.363,34	343.765,58	0,53

Fonte: AUTOR (2018).

7.5 OPERAÇÕES UNITÁRIAS E DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS

As operações unitárias foram definidas de acordo com o material a ser lavrado. Portanto, para este caso, tem-se a lavra do material de cobertura e a lavra do minério. A lavra do minério ocorre de forma similar tanto para o método de lavra *Terrace Mining* como para o método de lavra *Strip Mining*. A diferença reside na lavra do capeamento onde, para este estudo, adotou-se o sistema de escavação com Escavadeiras hidráulicas e Caminhões para o método de lavra *Terrace Mining* e escavação com Escavadeira com lança de arrasto ou *Dragline* para o método de lavra *Strip Mining*. Além disso, foi definido um regime de trabalho, conforme mostrado na Tabela 7, similar ao adotado na região, conforme Bastos (2013).

Tabela 7- Regime de trabalho.

REGIME DE TRABALHO	
horas/dia	8
dias/semana	6
dias/mês	25
horas/semana	48
horas/mês	200

Fonte: AUTOR (2018).

7.5.1 Lavra do Minério

A lavra de gipsita na região do Araripe é realizada com as seguintes operações unitárias: Perfuração, Desmonte com explosivos, Desmonte secundário com rompedor hidráulico e Carregamento. A operação de Transporte neste caso não ocorre uma vez que a expedição do minério segue a modalidade FOB (*Free on Board*), em que o frete é de responsabilidade do cliente. Vale ressaltar que, a lavra nos métodos *Terrace Mining* e *Strip Mining* ocorre de forma similar. Os tópicos seguintes tratam do dimensionamento de equipamentos e das operações unitárias para lavra do minério de gipsita.

7.5.1.1 Perfuração e Desmonte

O mesmo plano de fogo dimensionado foi adotado tanto para a lavra com *Terrace Mining* como para a lavra por *Strip Mining*. Para a determinação do plano de fogo e equipamentos necessários para execução desta operação foram utilizados os dados da Tabela 8:

Tabela 8- Parâmetros para técnicos da mineração.

Volume a ser produzido mensal (m³)	25.000
Altura média da bancada (m)	15
Largura de uma tira (m)	30
Diâmetro do furo (pol)	3
Diâmetro do furo (mm)	76
Inclinação do furo (graus)	15

Fonte: AUTOR (2018).

O plano de fogo foi determinado de acordo com a metodologia de Olofsson (2002), cujos parâmetros e equações estão sumarizados na Tabela 9:

Tabela 9- Equações utilizadas para determinação do plano de fogo.

L_b		$L_b = 5 \text{ kg/m}$	Concentração de carga
$B_{\max} = 1,45 \times \sqrt{L_b}$	(2)	$B_{\max} = 3,24 \text{ m}$	Afastamento máximo
$U = 0,3 \times B_{\max}$	(3)	$U = 1 \text{ m}$	Subfuração
K		$K = 15 \text{ m}$	Altura da bancada
$H = 1,05 \times (K+U)$	(4)	$H = 16,77 \text{ m}$	Profundidade do furo
d		$d = 76 \text{ mm}$	Diâmetro do furo
$E = \frac{d}{1000} + 0,03 \times H$	(5)	$E = 0,58 \text{ m}$	Erro de perfuração
$B = B_{\max} - E$	(6)	$B = 2,66 \text{ m}$	Afastamento
$S = 1,25 \times B$	(7)	$S = 3,33 \text{ m}$	Espaçamento
$B \times S$		$2,5 \text{ m} \times 3,5 \text{ m} = 8,75 \text{ m}^2$	Malha de Perfuração
$T = B$	(8)	$T = 2 \text{ m}$ (valor adotado)	Tampão
$h = H - T$	(9)	$h = 14,27 \text{ m}$	Altura de carga
$Q = L_b \times h$	(10)	$Q = 71,36 \text{ kg/furo}$	Peso da carga
$\frac{\text{Volume}}{\text{fogo}} = \frac{25.000 \frac{\text{m}^3}{\text{mês}}}{8 \frac{\text{fogos}}{\text{mês}}}$		$\frac{\text{Volume}}{\text{fogo}} = 3.125 \frac{\text{m}^3}{\text{fogo}}$	Volume desmontado por fogo
$\frac{\text{Área desmontada}}{\text{fogo}} = \frac{3.125 \frac{\text{m}^3}{\text{fogo}}}{15 \text{ m}}$		$\frac{\text{Área desmontada}}{\text{fogo}} = 210 \text{ m}^2$ (21m x 10m)	Área desmontada por fogo
Número de furos/linha = $\frac{21}{3,5} = 6$ Número de linhas = $\frac{10}{2,5} = 4$		$\frac{\text{Número de furos}}{\text{detonação}} = 6 \times 4 = 24$	Número de furos por desmonte
$R_c = \frac{Q \times \text{número de furos}}{\text{Volume a desmontar/mês}}$	(11)	$R_c = 0,544 \text{ kg/m}^3$	Razão de carga
$P_T = 24 \times 16,77 \text{ m}$		$P_T = 402,51 \text{ m}$	Comprimento total perfurado por fogo

Fonte: AUTOR (2018).

- Dimensionamento do equipamento de perfuração

Para execução da operação unitária de perfuração foi adotada uma perfuratriz PWHP-126LS, montada sobre uma carreta de perfuração PWH-500, ambas da marca PW Hidropneumática. Para o funcionamento da perfuratriz optou-se por um compressor portátil modelo XAS 770, marca Atlas Copco. A Figura 33 mostra a carreta de perfuração, a Figura 34, a perfuratriz e a Figura 35, o compressor, ao passo que a Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam os dados técnicos da perfuratriz e do compressor.

Figura 33- Carreta de Perfuração PWH-5000.



Fonte: PW HIDROPNEUMÁTICA (2018).

Figura 34- Perfuratriz pneumática PWHP-126LS.



Fonte: PW HIDROPNEUMÁTICA (2018).

Figura 35- Compressor XAS 770, Atlas Copco.



Fonte: CR EQUIPAMENTOS (2018).

Tabela 10- Dados técnicos da perfuratriz.

	PWHP-131LS	PWHP-126LS	PWHP-121LS	PWHP-135LS
Diâmetro do cilindro	130 mm	126 mm	121 mm	135 mm
Curso do pistão	65 mm	65 mm	65 mm	65 mm
Impactos	2.400 p/min.	2.400 p/min.	2.400 p/min.	2.400 p/min.
Máximo torque	315 NM	315 NM	315 NM	315 NM
Diâmetro de furação	Até 3 ½"	Até 3"	Até 2 ½"	Até 3 ½"
Consumo total de ar perfurando	800 pcm	700 pcm	600 pcm	900 pcm
Peso	194 Kgs	194 Kgs	194 Kgs	194 Kgs
Diâmetro do pistão	130 mm	126 mm	121 mm	135 mm
Rotação	90 rpm	90 rpm	90 rpm	90 rpm
Pressão	7 Kgm/cm ²	7 Kgm/cm ²	7 Kgm/cm ²	7 Kgm/cm ²
Diâmetro da bucha	38 mm	38 mm	38 mm	38 mm
Diâmetro da haste	38 mm	38 mm	38 mm	38 mm
Comprimento	850 mm	850 mm	850 mm	850 mm

Fonte: PW HIDROPNEUMÁTICA (2018).

Tabela 11- Dados técnicos do compressor.

Tipo		XAS 770
Pressão de Trabalho	bar	7
Vazão de Ar	pcm	771
Nível de ruído a 7 m	dB(A)	74
Capacidade do sistema de óleo	Litros	60
Máxima temperatura ambiente	°C	50
Motor Diesel - MWM		XAS 770
Modelo	MWM	Max Force 6.5L
Potência	CV	215
Número de Cilindros	--	6
Capacidade do tanque de combustível	Litros	348

Fonte: CR EQUIPAMENTOS (2018).

Este modelo de carreta de perfuração foi escolhido, pois utiliza hastes de extensão de até 3,70 metros de comprimento, com diâmetro de \varnothing 38 mm e bits de \varnothing 64 a 115 mm, o que é compatível com o plano de fogo. A perfuratriz foi selecionada baseada no diâmetro da perfuração (3 polegadas ou 76 milímetros) e porque, segundo o fabricante, é indicada para perfuração de rochas brandas. Além disso, para o bom funcionamento da perfuratriz é recomendado um compressor de 750 pcm, e por este motivo adotou-se o compressor XAS 770 com 771 pcm de vazão de ar.

Uma vez que, por especificação, a carreta de perfuração admite hastes de até 38 mm, escolheram-se hastes de 38 mm de diâmetro e 3.050 mm (3 metros) de comprimento.

- Determinação da Produtividade do equipamento de perfuração

A determinação da produtividade horária do equipamento de perfuração pode ser determinada conforme a equação (12):

$$Q = n \times \frac{60}{T} \times H \quad (12)$$

Onde:

Q: produtividade horária do equipamento de perfuração, em m/h;

n: minutos efetivamente trabalhados em cada hora;

T: tempo de ciclo do equipamento, em minutos.

H: profundidade do furo, em metros.

Neste estudo considerou-se 50 minutos efetivamente trabalhados em cada hora.

Para determinar o tempo de ciclo do equipamento é necessário antes de tudo, considerar os tempos de execução de cada tarefa da máquina que são divididos em:

- 1) T₁: alinhar a broca e embocar o furo.
- 2) T₂: tempo de perfuração;
- 3) T₃: manuseio e colocação de hastes;
- 4) T₄: retirada das hastes;
- 5) T₅: deslocamento do equipamento entre furos.

Para T₁ considerou-se 1 min.

Para determinação de T₂ é necessário conhecer a velocidade de avanço da perfuração. Uma vez que este valor depende de características do equipamento e da rocha, foi estimado baseado em um equipamento similar que há na Mineração Ponta da Serra, o *Rockdrill*. Segundo Bastos (2013), este equipamento perfura 123 metros em 2 horas, portanto:

$$\text{Velocidade de avanço} = \frac{123}{2}$$

$$\text{Velocidade de avanço} = 61,5 \text{ m/h}$$

Desta forma T_2 será determinado a partir da velocidade de avanço da perfuração e o comprimento de cada furo:

$$T_2 = 16,77 \times \frac{60}{61,5} = 16,36 \text{ min}$$

Para o cálculo do valor de T_3 é necessário saber quantas hastes são usadas para a perfuração de um furo. Como foram adotadas hastes de 3m e a profundidade de cada furo é de 16,77m, tem-se:

$$\frac{\text{Número de hastes}}{\text{furo}} = \frac{16,77}{3} = 6$$

Deste modo assumiu-se 0,5 minutos ou 30 segundos como o tempo para manuseio e colocação de cada haste e, portanto:

$$T_3 = 6 \times 0,5 = 3 \text{ min}$$

Assumiu-se 0,5 min para o tempo de retirada de cada haste, e como são usadas 6 hastes para perfuração de cada furo, T_4 assim pode ser escrito:

$$T_4 = 6 \times 0,5 = 3 \text{ min}$$

Para o deslocamento do equipamento entre furos, T_5 , assumiu-se 0,75 min.

O tempo de ciclo total do equipamento de perfuração é determinado pela soma dos tempos de cada operação feita pela máquina, conforme a equação (13):

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \quad (13)$$

$$T = 1 + 16,36 + 3 + 3 + 0,75 = 24,11 \text{ min}$$

Dado que o tempo de ciclo do equipamento de perfuração foi determinado, pode-se obter a produtividade horária do equipamento, segundo equação (12):

$$Q = \frac{50}{60} \times \frac{60}{24,11} \times 16,77$$

$$Q = 34,78 \text{ m/h}$$

De acordo com a Tabela 7 que trata do regime de trabalho, tem-se 200 horas por mês para realização dos trabalhos mineiros. Assim pode-se determinar o número de horas necessárias de trabalho do equipamento de perfuração por detonação:

$$n = \frac{\text{comprimento total perfurado/fogo}}{\text{produtividade horária da perfuratriz}}$$

$$n = \frac{402,51}{34,78} = 11,57 \text{ h/fogo}$$

Uma vez que se estimam 8 detonações por mês, tem-se

$$n = 11,57 \times 8 = 93 \text{ h}$$

Deste modo, pode-se assumir 12,5 horas de trabalho do equipamento de perfuração por desmonte ou 100 horas de trabalho por mês.

- Determinação do consumo de hastes, luvas, punhos e coroas

O cálculo do número de hastes e luvas encontra-se na Tabela 13 e a vida útil de cada componente na Tabela 12. Para obter-se o número de hastes de luvas é necessário conhecer a relação entre metros de haste e metro por furo (K), indicada na equação (14).

Tabela 12- Vida útil dos componentes da perfuratriz.

Componente	Vida útil (m)
hastes	1.500
luvas	1.500
punhos	1.500
coroas	150

Fonte: AUTOR (2018).

Tabela 13- Número de hastes e luvas.

C	C = 3 m	Comprimento da haste de perfuração
H	H = 16,77 m	Profundidade do furo
$K = \frac{H+C}{2 \times C}$ (14)	K = 3,30	Relação entre metros de haste e metro por furo
P _T	P _T = 402,51	Profundidade perfurada por fogo
$N_H = N_L = \frac{P_T \times K}{\text{Vida útil}}$ (15)	N _H = N _L = 0,88 haste/fogo	Número de hastes e luvas
$N_p = \frac{P_T}{\text{Vida útil}}$ (16)	N _p = 0,27 punho/fogo	Número de punhos
$N_b = \frac{P_T}{\text{vida útil}}$ (17)	N _b = 2,68 bits/fogo	Número de coroas

Fonte: AUTOR (2018).

Assumindo 5% de quebras prematuras pode-se chegar aos valores da Tabela 14 para o consumo de componentes.

Tabela 14- Resumo do consumo de componentes da perfuração.

componente	consumo/desmante	consumo/mês	consumo/ano
hastes	0,93	7,43	100
luvas	0,93	7,43	100
punhos	0,28	2,25	30
coroas	2,82	22,54	300

Fonte: AUTOR (2018).

7.5.1.2 Desmante Secundário

Na mineração de gipsita, comumente, a fragmentação primária com desmante por explosivos não é suficiente para a obtenção da granulometria adequada para a alimentação do britador primário (britador de mandíbulas), que é o geralmente utilizado nas calcinadoras. Assim, torna-se necessária a fragmentação secundária do minério.

A Tabela 15 apresenta os volumes de gipsita a serem desmontados de acordo com as unidades de tempo do regime de trabalho.

Tabela 15- Volumes de gipsita a serem produzidos por mês, dia e hora.

VOLUMES	
Coefficiente empolamento da gipsita (50%)	1,5
Volume médio gipsita in situ/mês (m ³)	25.000
Volume médio gipsita empolado/mês (m ³)	37.500
Volume médio gipsita in situ/dia (m ³)	1.000
Volume gipsita empolado a ser desmontado/dia (m ³ /dia)	1.500
Volume gipsita in situ a ser desmontado/hora (m ³ /h)	125
Volume gipsita empolado a ser desmontado/hora (m ³ /h)	188

Fonte: AUTOR (2018).

Para seleção do equipamento que realizará a fragmentação secundária, utilizou-se como referência o Manual de Produção da Caterpillar (2000) que apresenta estimativas de produtividade baseadas no tipo de rocha a ser fragmentada e produtividade desejada pelo comprador para jornadas de 8 horas de trabalho.

O equipamento que mais se adequa a esta situação é uma escavadeira hidráulica com rompedor hidráulico acoplado a mesma. Este conjunto trabalha em um material já primariamente fragmentado e, portanto, é encarregado de desmontar apenas o material não fragmentado no desmorte com explosivos. Desta forma, assumiu-se que 40% do material fragmentado no desmorte com explosivos necessita passar pela operação de fragmentação secundária, ou seja, 600 m³ (40% de 1.500 m³/dia) de gipsita necessitam de fragmentação secundária a cada dia ou jornada de 8 h.

Deste modo o rompedor hidráulico que mais se adequa a operação de fragmentação secundária para este projeto é o modelo H160ES de 3.530 kg da marca Caterpillar com produção estimada no intervalo de 268 a 688 m³ por 8 horas de trabalho. A Figura 36 mostra o rompedor acoplado a uma escavadeira hidráulica.

Figura 36- Rompedor hidráulico H160ES, Caterpillar.



Fonte: CATERPILLAR (2013).

Para o desmorte secundário, a Caterpillar recomenda que o rompedor hidráulico trabalhe com ponteira embotada, conforme mostra a Figura 37.

Figura 37- Ponteira usada no desmorte secundário.



Fonte: CATERPILLAR (2013).

É recomendação dos fabricantes de martelos hidráulicos que estes tenham pesos que não ultrapassem 10% dos pesos operacionais dos equipamentos aos quais eles estão ligados. Por este motivo, a escavadeira hidráulica adequada para o acoplamento do rompedor hidráulico é a modelo 336D2 L de peso operacional 37.086 kg e da marca Caterpillar. A Figura 38 mostra a escavadeira 336D2 L.

Figura 38- Escavadeira hidráulica modelo 336D2 L, Caterpillar.



Fonte: CATERPILLAR (2015).

A operação de desmonte secundário ocorrerá de forma contínua sempre que houver minério proveniente do desmonte primário com granulometria inadequada à operação subsequente, na praça da mina.

7.5.1.3 Carregamento

O equipamento utilizado na operação de carregamento foi dimensionamento com base no Manual Prático de Escavação de Ricardo e Catalani (2007). A equação de define a produtividade de um equipamento de terraplenagem é a seguinte (18):

$$Q = \frac{C \times f \times \varphi \times E}{t_c} \quad (18)$$

Onde:

Q: produção horária do equipamento, em m³/h;

C: capacidade da caçamba, em m³/h;

f: fator de carga da caçamba;

φ: fator de empolamento;

t_c: tempo de ciclo de uma carga;

E: fator de eficiência.

- Determinação da Produtividade da unidade de carregamento

Para determinar a produtividade do equipamento de carregamento do minério, deve-se antes de tudo, conhecer o tempo de ciclo do mesmo. Ricardo e Catalani (2007) definem que o tempo de ciclo de uma carregadeira pode ser decomposto nos seguintes tempos elementares:

- 1- Tempo de carga, em minutos;
- 2- Tempos de manobras, em minutos;
- 3- Tempo de transporte
- 4- Tempo de descarga

De acordo com as características da operação: o tempo de carga é 0,20 minutos (para matacões); o tempo de manobras e transporte é 0,22 minutos (0,10 para manobras e 0,12 para transporte); o tempo de descarga mais posicionamento do caminhão é 0,07 minutos. O tempo de ciclo básico deve ser corrigido a partir de variações provenientes das condições reais de trabalho. Deste modo aplicou-se as seguintes correções: para material de 150 mm ou mais (+0,03 minutos); materiais empilhados de 3 m de altura ou menos (+0,01); caminhões de terceiros (+0,04 minutos). Então, o tempo de ciclo total é:

$$t_c = 0,20 + 0,22 + 0,07 + 0,03 + 0,01 + 0,04$$

$$t_c = 0,57 \text{ min ou } 34,2 \text{ seg}$$

A produção horária de minério desejada é 188 m³/h, portanto, foi determinada a capacidade necessária da caçamba do equipamento, de acordo com a equação (18). Para isso, utilizou-se como fator de carga da caçamba 0,75 para rocha regularmente fragmentada, eficiência do equipamento de 0,83 (50 minutos trabalhados a cada 1 hora ou 60 min) e fator de empolamento da gipsita de 50% (já incluso na produção horária):

$$C = \frac{Q \times t_c}{60 \times 60 \times f \times \varphi \times E}$$

$$C = \frac{188 \times 34,2}{60 \times 60 \times 0,75 \times \frac{50}{60}}$$

$$C = 2,85 \text{ m}^3$$

Baseando-se na capacidade da caçamba calculada escolheu-se a carregadeira modelo 1021 1F Z-Bar da marca CASE, cuja caçamba de 2,96 m³ de capacidade rasa a permite transportar materiais de até 2.317 kg/m³. A Figura 39 apresenta este modelo de equipamento.

Figura 39- Carregadeira modelo 1021 1F Z-Bar da marca CASE.



Fonte: CASE CONSTRUCTION (2015).

A produtividade real deste equipamento pode então ser obtida a partir da equação (18):

$$Q = \frac{60 \times 60 \times C \times f \times \varphi \times E}{t_c}$$

$$Q = \frac{60 \times 60 \times 2,96 \times 0,75 \times \frac{50}{60}}{34,2}$$

$$Q = 195 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q = 195 \times 200$$

$$Q = 38.947 \text{ m}^3/\text{mês}$$

7.5.2 Decapeamento

Para a operação de decapeamento são analisadas duas possibilidades: uma com caminhões e escavadeiras hidráulicas para o método de lavra *Terrace Mining* e outra com *Dragline* para a lavra com *Strip Mining*.

7.5.2.1 Decapeamento no método de lavra *Terrace Mining*

Na operação de descobertura realizada utilizando o método de lavra *Terrace Mining* o desmonte do material estéril e o seu carregamento são realizados com escavadeira hidráulica, ao passo que o transporte é realizado com caminhões que fazem o basculamento numa área da mina já minerada. Os tópicos posteriores tratam do dimensionamento e escolha destes equipamentos que foram embasados no Manual Prático de Escavação de Ricardo e Catalani (2007).

7.5.2.1.1 Desmonte mecânico e Carregamento

A escavadeira hidráulica desempenha dupla função neste caso, realizando o desmonte mecânico do estéril, sendo este material argiloso e de fácil escavação, e ao mesmo tempo executa o carregamento dos caminhões.

O dimensionamento deste equipamento foi feito tendo como base o volume médio mensal de estéril de 31.707 m³, definido no sequenciamento de lavra conforme mostra a Tabela 5.

A Tabela 16 apresenta os volumes de estéril *in situ* e empolado que devem ser produzidos por unidade de tempo, conforme definido no regime de trabalho.

Tabela 16- Volumes de estéril a serem produzidos por mês, dia e hora.

VOLUMES	
Coefficiente de empolamento argila (40%)	1,4
Volume médio estéril <i>in situ</i> /mês (m ³)	31.706,62
Volume médio estéril empolado/mês (m ³)	44.389,27
Volume médio estéril <i>in situ</i> /dia (m ³)	1.268,26
Volume estéril empolado a ser desmontado/dia (m ³ /dia)	1.775,57
Volume estéril <i>in situ</i> a ser desmontado/hora (m ³ /h)	158,53
Volume estéril empolado a ser desmontado/hora (m ³ /h)	221,95

Fonte: AUTOR (2018).

A capacidade da caçamba da escavadeira hidráulica necessária para o decapeamento foi determinada de acordo com a equação (18). Para definição do fator de eficiência, considerou-se que o equipamento trabalha 50 minutos a cada hora (60 min). O fator de empolamento da argila na região do Araripe é de 40% conforme já definido por Bastos (2013). O fator de carga da caçamba de escavadeiras quando carregam argila,

segundo Ricardo e Catalani (2007), é de 1,1. O tempo de ciclo da escavação foi considerado 25 segundos, obtido através de medições de campo na Mineração Ponta da Serra. Uma vez reunidos esses dados, pode-se definir o volume de caçamba necessário para realizar esta operação:

$$C = \frac{Q \times t_c}{60 \times 60 \times f \times \varphi \times E}$$

$$C = \frac{221,95 \times 25}{60 \times 60 \times 1,1 \times \left(\frac{50}{60}\right)}$$

$$C = 1,68 \text{ m}^3$$

Vale ressaltar que o fator de empolamento já está incluso no valor da produção que se deseja alcançar de 221,95 m³/h. Assim a escavadeira escolhida foi a modelo R320LC-9S da marca Hyundai com capacidade de caçamba de 1,74 m³ (Figura 40).

Figura 40- Escavadeira hidráulica R320LC-9S da fabricante Hyundai.



Fonte: HYUNDAI (2012).

A produtividade da escavadeira pode ser estimada com a equação (18):

$$Q = \frac{60 \times 60 \times 1,74 \times 1,1 \times \left(\frac{50}{60}\right)}{25}$$

$$Q = 229,68 \text{ m}^3/\text{h}$$

A produção mensal da escavadeira será então:

$$Q = 229,68 \times 200$$
$$Q = 45.936 \text{ m}^3/\text{mês}$$

O número de escavadeiras necessárias é obtido usando-se os valores da produtividade da escavadeira e o quanto foi previsto de produção no sequenciamento:

$$n = \frac{44.389}{45.936}$$
$$n = 1 \text{ escavadeira}$$

7.5.2.1.2 Transporte

No Polo Gesseiro do Araripe geralmente usam-se caminhões com caçambas de 16 m³ para a realização da operação de transporte, e por este motivo adotou-se caminhões modelo Axor 3344 6x4 Basculante Fora de Estrada da marca Mercedes-Benz (Figura 41).

Figura 41- Caminhão Axor 3344 da marca Mercedes-Benz.



Fonte: MERCEDES-BENZ (2017).

É necessário, portanto, determinar o número de unidades e a produtividade da frota de transporte.

- Determinação do número de ciclos da escavadeira

Admite-se que 90% da caçamba do caminhão seja preenchida por material estéril durante o carregamento pela escavadeira. Desta forma, utilizando-se a equação (19) pode-se determinar o número de ciclos dado pela escavadeira para o enchimento da caçamba do caminhão.

$$n = \frac{C \times f_1}{c \times f_2} \quad (19)$$

Onde:

C: capacidade da caçamba do caminhão, em m³/h;

f_1 : fator de carga da caçamba do caminhão;

c: capacidade da caçamba da escavadeira, em m³/h

f_2 : capacidade da caçamba da escavadeira;

Assim pode-se atribuir os seguintes valores na equação e obter o número de ciclos por carregamento:

$$n = \frac{16 \times 0,9}{1,74 \times 1,1}$$

$$n = 7,52$$

Portanto, são necessários 8 ciclos da escavadeira para o enchimento da caçamba da unidade de transporte.

- Determinação do tempo de ciclo da unidade de transporte

Para determinação do tempo de ciclo do transporte é necessário considerar os diferentes tempos atribuídos as etapas realizadas pelo equipamento para o transporte do material estéril que são:

1-Tempo de carga da unidade;

2-Tempo de transporte carregado;

3-Tempo de manobra e descarga;

4-Tempo de retorno vazio;

5-Tempo de posicionamento para a carga.

Os tempos de transporte são variáveis pois dependem das distâncias percorridas e os demais são fixos. O tempo de carga da unidade de transporte dependerá do número de ciclos da unidade de carregamento, sendo definido conforme a equação (20):

$$t_{\text{carga}} = t_c \times n \quad (20)$$

Onde:

t_c : tempo de ciclo da unidade carregadora; em segundos;

n : número de ciclos da unidade carregadora.

Portanto:

$$t_{\text{carga}} = \frac{25 \times 8}{60}$$

$$t_{\text{carga}} = 3,33 \text{ min}$$

O tempo de carga da unidade de transporte é de 3,33 minutos.

Após ser carregado, o caminhão deve transportar o material estéril para a pilha de estéril dentro da área da cava já minerada. O tempo que a unidade de transporte gasta para realizar esta operação depende da velocidade do equipamento. Na Mineração Ponta da Serra os caminhões carregados andam a uma velocidade média de 30 km/h e por este motivo, este valor foi adotado. Outro fator de influência no tempo de transporte é a distância a ser percorrida pela unidade, que neste estudo foi obtida através de medidas no modelo geológico, levando em consideração a largura das tiras e potência média da jazida, chegando-se ao valor de 720 m.

A equação (21) mostra como determinar o tempo de transporte com a unidade transportadora carregada:

$$t_{tc} = \frac{DMT}{V_{ida}} \quad (21)$$

Onde:

t_{tc} : tempo de transporte com o caminhão carregado;

DMT: distância média de transporte, em metros;

V_{ida} : velocidade do caminhão carregado, em metros/minutos.

Tem-se então:

$$t_{tc} = \frac{720}{\frac{30 \times 1000}{60}}$$

$$t_{tc} = 1,44 \text{ min}$$

Chegado no aterro o equipamento de transporte deve realizar a manobra e descarga do estéril. O tempo necessário para execução desta tarefa é estimado em 1,3 minutos para condições de operações médias (RICARDO; CATALANI, 2007).

Após o basculamento do material estéril a unidade transportadora retorna com a caçamba vazia para a frente de lavra e o tempo requerido para executar esta tarefa é estimado de igual modo ao tempo de transporte carregado. Na Mineração Ponta da Serra, a velocidade da unidade transportadora vazia é estimada em torno de 40 km/h, e assim adotou-se esse valor. O tempo de retorno do caminhão do aterro até a frente de lavra é determinado conforme equação (22).

$$t_{rv} = \frac{DMT}{V_{\text{retorno}}} \quad (22)$$

Onde:

t_{rv} : tempo de retorno vazio, em minutos;

DMT: distância média de transporte, em metros;

V_{retorno} : velocidade de retorno vazio, em metros/minutos.

Substituindo os devidos valores:

$$t_{rv} = \frac{720}{\frac{40 \times 1000}{60}}$$

$$t_{rv} = 1,08 \text{ min}$$

Retornado à frente de lavra o equipamento de transporte deve posicionar-se para um novo carregamento. O tempo de posicionamento para condições de operação médias é considerado 0,3 minutos (RICARDO; CATALANI, 2007).

Uma vez determinados todos os tempos do ciclo da operação de transporte pode-se obter o tempo total da operação:

$$t_{\text{total}} = t_{\text{carga}} + t_{tc} + t_{md} + t_{rv} + t_{pc} \quad (23)$$

$$t_{\text{total}} = 3,33 + 1,44 + 1,3 + 1,08 + 0,3 = 7,45 \text{ min}$$

- Determinação da Produtividade de uma unidade de transporte

A produção de uma unidade de transporte é determinada de acordo com a equação (18). Porém, para a unidade de transporte, o volume real transportado corresponde ao volume de material transportado pela carregadeira:

$$Q = \frac{60 \times (n \times c \times f) \times \varphi \times E}{T_c} \quad (24)$$

Onde:

n: número de ciclos da escavadeira;

c: capacidade da caçamba

f: fator de carga da caçamba;

φ : fator de empolamento do material;

E: fator de eficiência da unidade de transporte;

T_c : tempo de ciclo da unidade de transporte, em minutos.

Já que o caminhão transportará material empolado, o empolamento não foi utilizado para obtenção da produção da frota, estando embutido neste valor mesmo. Desta forma:

$$Q = \frac{60 \times (n \times c \times f) \times \varphi \times E}{T_c}$$

$$Q = \frac{60 \times (8 \times 1,74 \times 1,1) \times \frac{50}{60}}{7,45}$$

$$Q = 102,72 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Determinação do número de unidades transportadoras

Deste modo, deve-se determinar o número de unidades de transporte obedecendo a condição de sincronismo. Este valor pode ser determinado, de acordo com a equação (25) ou (26):

$$N = \frac{T_c}{t_{\text{carga}}} \quad (25)$$

Onde:

T_c : tempo de ciclo de uma unidade de transporte, em minutos;

t_{carga} : tempo de carga da unidade de transporte, em minutos;

$$N = \frac{Q}{q} \quad (26)$$

Onde:

Q: produção da carregadeira, em m³/h;

q: produção de uma unidade de transporte, em m³/h.

Por consequência determina-se o número de caminhões:

$$N = \frac{7,45}{3,33}$$

Ou

$$N = \frac{229,68}{102,72}$$

$$N = 2,24$$

Assumiu-se então 2 unidades transportadoras para o transporte do estéril da cobertura.

- Determinação da Produtividade da frota de transporte

A produtividade da frota de transporte é resultante do produto do número de unidades de transporte pela produtividade de uma unidade:

$$Q_{\text{total}} = Q \times N \quad (27)$$

Onde:

Q_{total}: produtividade total da frota de transporte, em m³/h;

Q: produtividade de uma unidade de transporte, em m³/h;

N: número de unidades de transporte.

$$Q_{\text{total}} = 102,72 \times 2$$

$$Q_{\text{total}} = 205,44 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{\text{total}} = 205,44 \times 200$$

$$Q_{\text{total}} = 41.087,66 \text{ m}^3/\text{mês}$$

- Determinação do número de viagens e distâncias percorridas

O conhecimento do número de viagens e distâncias é importante para determinação dos custos do transporte. O número de viagens pode ser obtido de duas formas conforme mostram as equações (28) e (29):

$$n = \frac{N \times t_{\text{efetivo}}}{t_{\text{transporte}}} \quad (28)$$

Onde:

t_{efetivo} : tempo efetivo trabalhado, em minutos;

$t_{\text{transporte}}$: tempo do ciclo do transporte, em minutos;

N : número de unidades transportadoras.

$$n = \frac{Q_{\text{frota}}}{C_{\text{caminhão}}} = \frac{Q_{\text{frota}}}{n_2 \times c \times f} \quad (29)$$

Onde:

Q_{frota} : produtividade da frota, em m^3/h ;

$C_{\text{caminhão}}$: capacidade da caçamba de uma unidade transportadora, em m^3/h .

c : capacidade da caçamba da carregadeira, em m^3 ;

f : fator de carga da caçamba;

n_2 : número de ciclos da carregadeira.

Substituindo-se os devidos valores tem-se o seguinte:

$$n = \frac{2 \times 50}{7,45}$$

Ou

$$n = \frac{205,44}{8 \times 1,74 \times 1,1}$$

$$n = 13,42 \text{ viagens/h}$$

$$n = 7 \frac{\frac{\text{viagens}}{\text{h}}}{\text{caminhão}}$$

O número de viagens a ser realizado por hora para os 2 caminhões é 14. Assim cada caminhão realiza 7 viagens por hora.

Uma vez que a DMT (distância média de transporte) é de 720 metros e cada caminhão realiza 7 viagens por hora, obtém-se a distância percorrida por hora e por mês de cada unidade de transporte:

$$\frac{DMT}{h} = 7 \times 720$$

$$\frac{DMT}{h} = 5040 \text{ m}$$

$$\frac{DMT}{\text{mês}} = 5040 \times 200$$

$$\frac{DMT}{\text{mês}} = 1.008.000 \text{ m}$$

7.5.2.2 Decapeamento no método de lavra *Strip Mining*

Na operação de descobertura realizada utilizando o método de lavra *Strip Mining* o desmonte do material estéril, o seu carregamento e o transporte são realizados com um único equipamento. Para este projeto admitiu-se o uso de uma Escavadeira com lança de arrasto ou *Dragline* para executar esta tarefa. Deste modo, o tópico seguinte trata do dimensionamento e escolha deste equipamento, tendo como base as equações do Manual Prático de Escavação de Ricardo e Catalani (2007) e fórmulas encontradas em Souza (2001).

7.5.2.2.1 Desmonte mecânico, Carregamento e Transporte

Para o dimensionamento da *Dragline* utilizou-se os mesmo parâmetros técnicos de mineração e regime de trabalho adotados no dimensionamento dos equipamentos da *Terrace Mining*. Assim a equação (18) foi utilizada para determinação do tamanho da caçamba da *Dragline*. O tempo de ciclo da escavadeira de arrasto assumido foi de 60 segundos ou 1 minutos. A produção horária a ser praticada pelo equipamento e obtida no sequenciamento de lavra foi de 222 m³/h. O fator de enchimento da caçamba foi estimado em 90%, pois durante o ciclo da máquina há queda de material da caçamba. Tem-se então:

$$C = \frac{222 \times 60}{60 \times 60 \times 0,9 \times \frac{50}{60}}$$

$$C = 4,93 \text{ m}^3$$

O peso específico do material de capeamento da gipsita é de $1,42 \text{ t/m}^3$. Assim:

$$C = 4,93 \times 1,42$$

$$C = 7 \text{ t}$$

A Liebherr é uma marca que produz *Draglines* de pequeno porte e, por este motivo adotou-se um equipamento desta marca. Uma vez que as capacidades de caçamba das escavadeiras nos seus catálogos estão em toneladas, calculou-se a capacidade de caçamba necessária para a lavra da descobertura em toneladas (7 t). À vista disso, escolheu-se o equipamento HS 895 HD com capacidade de caçamba de 7,5 t. A Figura 42 ilustra este equipamento.

Figura 42- *Dragline* modelo HS 895 HD marca LIEBHERR.



Fonte: LIEBHERR (2011).

De acordo com as especificações da máquina, para uma capacidade de caçamba de 7,5 toneladas, o raio de giro do equipamento é de 45 metros e a altura da lança é de 36,9 metros para um ângulo de inclinação de 40° .

A produtividade deste equipamento pode ser então calculada, conforme a equação (18):

$$Q = \frac{60 \times 60 \times 7,5 \times 0,9 \times \frac{50}{60}}{60}$$

$$Q = 337,50 \text{ t/h}$$

Convertendo este valor para m³/h, obtém-se:

$$Q = \frac{337,50}{1,42}$$

$$Q = 237,68 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q = 237,68 \times 200$$

$$Q = 47.535,21 \text{ m}^3/\text{mês}$$

Outra variável que deve ser determinada quando se trabalha com *Draglines* é a altura de despejo do equipamento. A altura de despejo corresponde a diferença entre a altura do aterro produzido pelo equipamento e a altura do estéril mais minério. A equação utilizada para determinar a altura de despejo é a seguinte (30):

$$h_d = H_0 \times K_1 + \frac{(r \times \tan \varphi)}{4} - (p + H_0) \quad (30)$$

Onde:

h_d : altura de despejo, em m;

H_0 : altura de estéril, em m;

K_1 : empolamento do estéril, em m;

r : largura da tira, em m;

φ : ângulo de repouso do aterro, em graus;

p : espessura do minério, em m.

Atribuindo-se os devidos valores, tem-se:

$$h_d = 20 \times 1,4 + \frac{(30 \times \tan 45)}{4} - (15 + 20)$$

$$h_d = 0,5 \text{ m}$$

7.6 LAYOUT TÍPICO DE OPERAÇÃO E ASPECTOS GEOMÉTRICOS DA MINA

A diferença fundamental entre os métodos de lavra em estudo e potenciais para a lavra de gipsita, *Strip Mining* e *Terrace Mining*, diz respeito especialmente a forma de realização da operação de descobertura, visto que o método de desmonte da gipsita é idêntico. Em ambos os métodos de lavra, os cortes são realizados perpendicularmente aos acessos e paralelos à área prevista para deposição do estéril através do método *backfilling* para o *Terrace Mining* e lançamento direto (*direct casting*) para o *Strip Mining*.

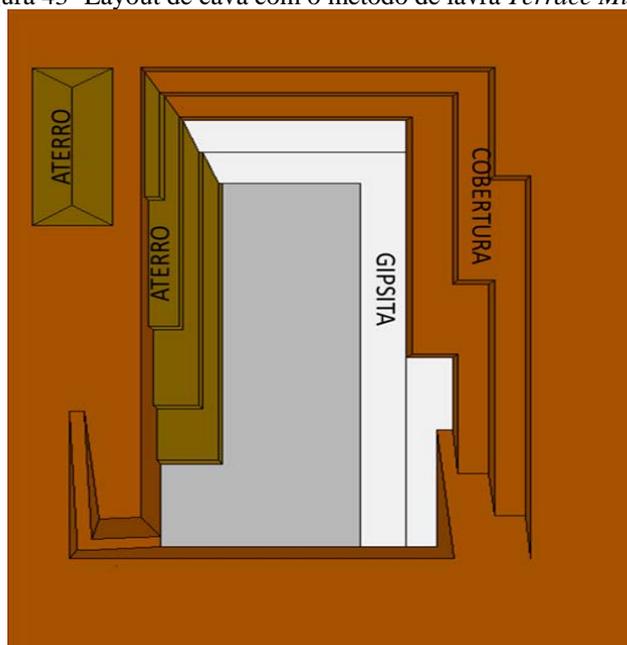
Também são encontradas diferenças em relação à geometria da cava e as vias de transporte de estéril e de minério, que no *Terrace Mining* são separadas, ao passo que na *Strip Mining* os acessos são usados apenas para o transporte de minério. No *Terrace Mining* são necessários acessos independentes para movimentação de estéril e minério, dispostos no limite final da cava, ligando a frente de descobertura com o aterro de estéril, que é feito em uma área previamente minerada, e a frente de lavra de gipsita ao ambiente externo a cava (Figura 43) através de rampas. Na *Strip Mining* os acessos são também dispostos na borda final da cava e independentes, porém em lados opostos da cava uma vez que ora a frente de lavra pode estar mais próxima de um lado e ora do outro da cava. Para o estéril é necessário apenas um pequeno acesso para descida da máquina de escavação da descobertura, não havendo, portanto, necessidade de um acesso definitivo, uma vez que a deposição do material da descobertura ocorre por *direct casting*.

A operação da descobertura é bastante simplificada para ambos os métodos uma vez que não é necessária a construção e operação de um bota-fora para disposição do estéril, diminuindo o tráfego nas vias de acesso externas, as distâncias de transporte de estéril da descobertura e favorecendo o processo de recuperação ambiental da área minerada. Também são encontrados benefícios econômicos devido a menor necessidade de caminhões para transporte de estéril e diminuição das distâncias de transporte.

A Figura 44 e a Figura 46 apresentam os aspectos geométricos da mineração utilizando os métodos de lavra *Terrace Mining* e *Strip Mining*, definidos de acordo com as características da geologia local, compatíveis com as dimensões dos equipamentos dimensionados e com base nos aspectos geométricos da mineração visitada, a Mina Ponta da Serra.

A Figura 43 mostra o layout padrão de mineração para o método de lavra *Terrace Mining*, onde se notam acessos, bancadas de descobertura e minério de gipsita, aterros e praça da mina.

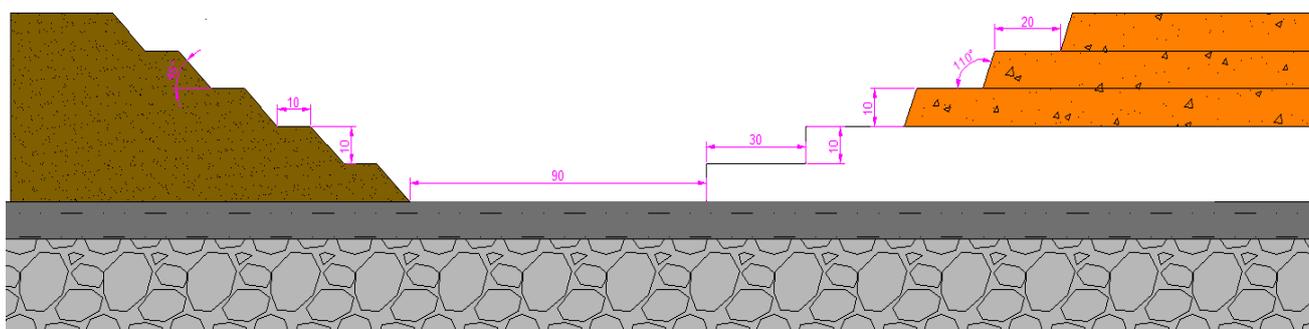
Figura 43- Layout de cava com o método de lavra *Terrace Mining*.



Fonte: AUTOR (2018).

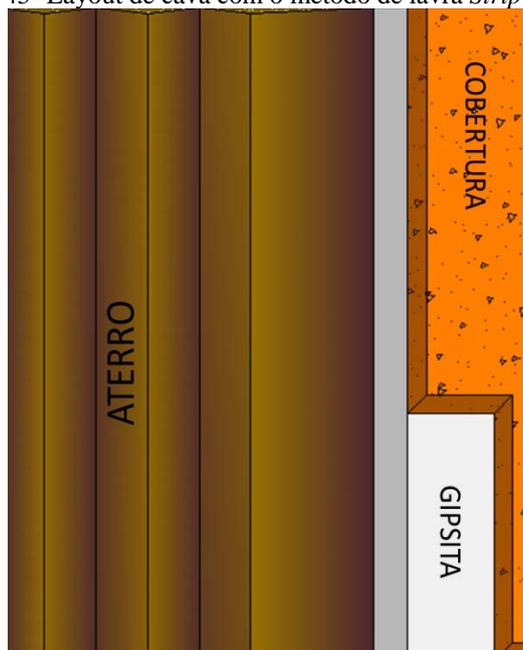
A Figura 44 apresenta os aspectos geométricos das bancadas projetadas para descobertura, lavra de gipsita e aterro de estéril dentro da cava para o método de lavra *Terrace Mining*.

Figura 44- Aspectos geométricos da lavra com *Terrace Mining*.



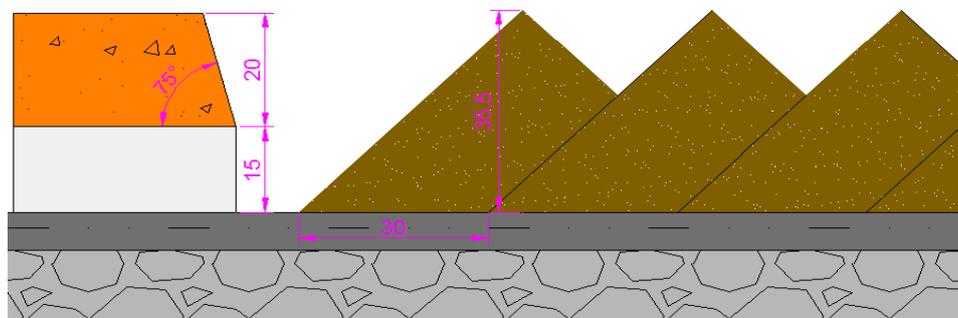
Fonte: AUTOR (2018).

A Figura 45 mostra o layout padrão de mineração para o método de lavra *Strip Mining*, onde se notam a bancada na qual a *Dragline* realizará a operação de descobertura, bancada de minério de gipsita, aterro da área já minerada e praça da mina.

Figura 45- Layout de cava com o método de lavra *Strip Mining*.

Fonte: AUTOR (2018).

A Figura 46 apresenta os aspectos geométricos das bancadas projetadas para descobertura, lavra de gipsita e aterro de estéril dentro da cava, para o método de lavra *Strip Mining*.

Figura 46- Aspectos geométricos da lavra com *Strip Mining*.

Fonte: AUTOR (2018).

7.7 CUSTOS DE AQUISIÇÃO E OPERAÇÃO NOS MÉTODOS *TERRACE* E *STRIP MINING*

Neste projeto foram estudados os custos de lavra para os dois métodos: *Terrace Mining* e *Strip Mining*. Deste modo, já que foram dimensionados os equipamentos para a lavra, determinaram-se os custos de aquisição de equipamentos e custos de operação. A Tabela 17 e a Tabela 18 apresentam os custos de aquisição dos equipamentos utilizados na lavra com o método de lavra *Terrace Mining* e *Strip Mining*, respectivamente.

Tabela 17- Custos de aquisição dos equipamentos da *Terrace Mining*.

Equipamentos	Qnt.	Preço Unit. (R\$)	Preço (R\$)	Preço (US\$)
Carreta de Perfuração PWH-5000	1	R\$ 150.000,00	R\$ 150.000,00	\$ 46.296,30
Perfuratriz pneumática PWHP-126LS	1	R\$ 25.000,00	R\$ 25.000,00	\$ 7.716,05
Compressor XAS 770, Atlas Copco	1	R\$ 80.000,00	R\$ 80.000,00	\$ 24.691,36
Rompedor hidráulico H160ES	1	R\$ 480.000,00	R\$ 480.000,00	\$ 148.148,15
Escavadeira hidráulica modelo 336D2 L	1	R\$ 870.000,00	R\$ 870.000,00	\$ 268.518,52
Carregadeira modelo 1021 1F Z-Bar	1	R\$ 851.000,00	R\$ 851.000,00	\$ 262.654,32
Escavadeira hidráulica R320LC-9S	1	R\$ 600.000,00	R\$ 600.000,00	\$ 185.185,19
Caminhão Axor 3344	2	R\$ 496.000,00	R\$ 992.000,00	\$ 306.172,84
			R\$ 4.048.000,00	\$ 1.249.382,72

Fonte: AUTOR (2018).

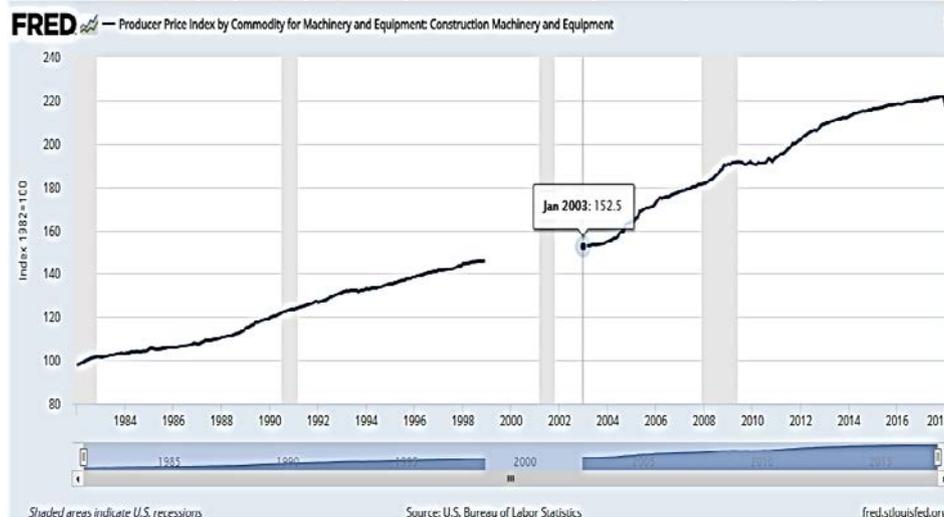
Tabela 18- Custos de aquisição dos equipamentos da *Strip Mining*.

Equipamentos	Qnt.	Preço Unit. (R\$)	Preço (R\$)	Preço (US\$)
Carreta de Perfuração PWH-5000	1	R\$ 150.000,00	R\$ 150.000,00	\$ 46.296,30
Perfuratriz pneumática PWHP-126LS	1	R\$ 25.000,00	R\$ 25.000,00	\$ 7.716,05
Compressor XAS 770, Atlas Copco	1	R\$ 80.000,00	R\$ 80.000,00	\$ 24.691,36
Rompedor hidráulico H160ES	1	R\$ 480.000,00	R\$ 480.000,00	\$ 148.148,15
Escavadeira hidráulica modelo 336D2 L	1	R\$ 870.000,00	R\$ 870.000,00	\$ 268.518,52
Carregadeira modelo 1021 1F Z-Bar	1	R\$ 851.000,00	R\$ 851.000,00	\$ 262.654,32
Dragline modelo HS 895 HD	1	R\$ 7.800.000,00	R\$ 7.800.000,00	\$ 2.407.407,41
			R\$ 10.256.000,00	\$ 3.165.432,10

Fonte: AUTOR (2018).

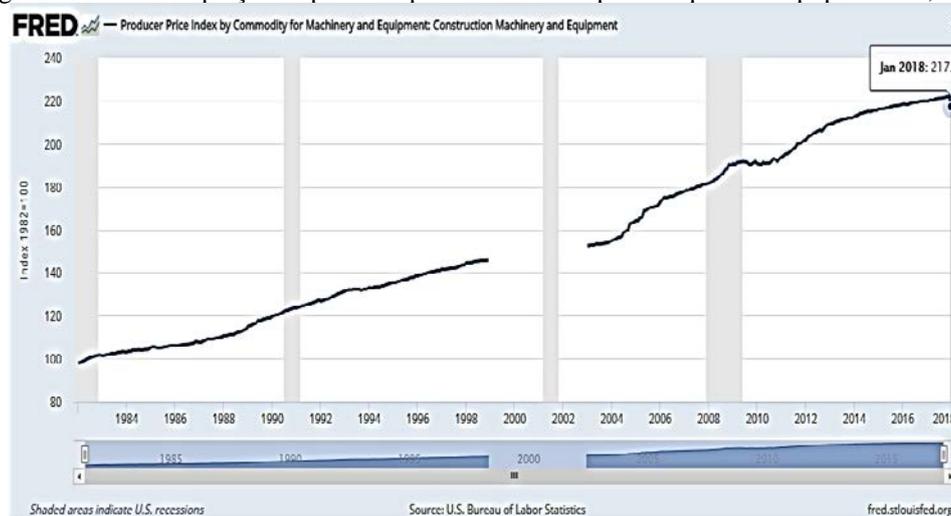
Os custos de operação dos equipamentos para ambos os métodos de lavra foram estimados com base no Catálogo da Western Mine Engineering Inc. (2003). Como este Catálogo contém valores de 2003, a atualização destes foi feita através do Índice de Preços ao Produtor para commodities de Máquinas e Equipamentos de Construção (FRED, 2018). A Figura 47 e a Figura 48 mostram os valores de índices em início de 2003 e início de 2018.

Figura 47- Índice de preços ao produtor por commodities para máquinas e equipamentos; 2003.



Fonte: FRED (2018).

Figura 48- Índice de preços ao produtor por commodities para máquinas e equipamentos; 2018.



Fonte: FRED (2018).

Os valores dos índices de 2018 e 2003 encontrados foram divididos resultando no valor de conversão de 1,42, que foi usado para atualização dos custos operacionais dos equipamentos, conforme mostra a Tabela 19.

Tabela 19- Índice de atualização do custo de operação dos equipamentos.

Ano	Índice
2018	217,1
2003	152,5
2018/2003	1,42

Fonte: AUTOR (2018).

Desse modo, escolheram-se equipamentos similares aos adotados neste projeto em termos potência, capacidade de caçamba, peso, entre outras características e

determinaram-se os custos horários de produção e por tonelada de material escavado. A Tabela 20 e a Tabela 21 apresentam os custos de produção horário e unitário dos equipamentos, onde já estão incluídos custos com revisão, manutenção, combustível, energia, lubrificantes, pneus e etc, para ambos os métodos de lavra *Terrace* e *Strip Mining*, respectivamente.

Tabela 20- Custos de produção horário e unitário dos equipamentos da *Terrace Mining*.

TERRACE MINING	
Lavra do minério	
Equipamento	Total
Conjunto Perfuração PWH-5000/PWHP-126LS	\$ 42,01
Compressor XAS 770, Atlas Copco	\$ 23,77
Rompedor hidráulico H160ES	\$ 33,53
Escavadeira hidráulica modelo 336D2 L	\$ 48,77
Carregadeira modelo 1021 1F Z-Bar	\$ 77,89
US\$/h	\$ 225,97
US\$/t	\$ 0,79
Decapeamento	
Escavadeira hidráulica R320LC-9S	\$ 48,77
Caminhão Axor 3344	\$ 43,19
US\$/h	\$ 91,96
US\$/t	\$ 0,41

Fonte: AUTOR (2018).

Tabela 21- Custos de produção horário e unitário dos equipamentos da *Strip Mining*.

STRIP MINING	
Lavra do minério	
Equipamento	Total
Conjunto Perfuração PWH-5000/PWHP-126LS	\$ 42,01
Compressor XAS 770, Atlas Copco	\$ 23,77
Rompedor hidráulico H160ES	\$ 33,53
Escavadeira hidráulica modelo 336D2 L	\$ 48,77
Carregadeira modelo 1021 1F Z-Bar	\$ 77,89
US\$/h	\$ 225,97
US\$/t	\$ 0,79
Decapeamento	
Dragline modelo HS 895 HD	\$ 78,50
US\$/h	\$ 78,50
US\$/t	\$ 0,35

Fonte: AUTOR (2018).

Como já dito, a lavra do minério ocorre de forma similar para ambos os métodos de lavra. Desta maneira, os custos de lavra do minério são iguais para ambos os métodos.

A Tabela 22 apresenta os custos anuais com explosivos e acessórios de detonação cujos consumos foram obtidos a partir do plano de fogo. O custo desses materiais foi obtido junto à empresa Elephant Indústria Química Ltda.

Tabela 22- Custos com explosivos e acessórios.

	Quant.	Custo Unit. (R\$)	Custo Anual (US\$)
Consumo explosivo (kg/ano)	165.000	R\$ 6,09	\$ 310.138,89
Boosters	2.300	R\$ 10,68	\$ 7.581,48
Espoleta+Estopim	100	R\$ 3,90	\$ 120,37
Tubo de choque de fundo	2.304	R\$ 14,18	\$ 10.083,56
Tubo de choque de ligação	2.208	R\$ 11,03	\$ 7.516,74
		R\$ 45,88	\$ 335.441,04

Fonte: ELEPHANT INDÚSTRIA QUÍMICA LTDA (2018).

Em virtude de já terem sido calculadas as quantidades de acessórios de perfuração e, tendo-se os custos unitários, determinaram-se os custos anuais com acessórios de perfuração conforme mostra a Tabela 23. Os custos desses materiais foram obtidos junto à Pedreira Vitória Ltda.

Tabela 23- Custos com acessórios de perfuração.

componente	consumo/ano	Custo Unitário (R\$)	Custo Anual (US\$)
hastes	100	R\$ 1.050	\$ 32.407,40
luvas	100	R\$ 200	\$ 6.172,83
punhos	30	R\$ 400	\$ 3.703,70
coroas	300	R\$ 100	\$ 9.259,25
			\$ 51.543,20

Fonte: PEDREIRA VITÓRIA LTDA (2018).

O número de funcionários adotados para este projeto segue o modelo de organização atualmente utilizado na Mineração Ponta da Serra Ltda. A Tabela 24 apresenta o número de empregados para cada ocupação nas duas opções de lavra, *Terrace Mining* ou *Strip Mining*, os custos anuais com cada ocupação e o custo total com mão-de-obra.

Tabela 24- Custos anuais com mão-de-obra.

	TM	SM	Salário	TM	SM
Ocupação	Quantidade		(R\$)	Custo Anual (US\$)	Custo Anual (US\$)
Auxiliar de escritório	2	2	R\$ 1.465,09	\$ 10.852,52	\$ 10.852,52
Blaster	1	1	R\$ 2.875,77	\$ 10.651,00	\$ 10.651,00
Engenheiro de Minas	1	1	R\$ 9.866,48	\$ 36.542,52	\$ 36.542,52
Gerente de Produção	1	1	R\$ 7.299,14	\$ 27.033,85	\$ 27.033,85
Encarregado de produção	1	1	R\$ 3.623,03	\$ 13.418,63	\$ 13.418,63
Operador da perfuratriz	1	1	R\$ 1.927,26	\$ 7.138,00	\$ 7.138,00
Auxiliar de operação da perfuratriz	1	1	R\$ 1.200,00	\$ 4.444,44	\$ 4.444,44
Operador de martelo hidráulico	1	1	R\$ 2.712,02	\$ 10.044,52	\$ 10.044,52
Operador de Carregadeira	1	1	R\$ 2.375,05	\$ 8.796,48	\$ 8.796,48
Operador de escavadeira hidráulica	1	0	R\$ 2.712,02	\$ 10.044,52	-
Motorista de caminhão	2	0	R\$ 2.079,34	\$ 15.402,52	-
Operador da <i>Dragline</i>	0	1	R\$ 2.437,90	\$ -	\$ 9.029,26
Mecânico	1	1	R\$ 2.322,60	\$ 8.602,22	\$ 8.602,22
Auxiliar de mecânico	1	1	R\$ 1.443,52	\$ 5.346,37	\$ 5.346,37
Almoxarife	1	1	R\$ 1.648,52	\$ 6.105,63	\$ 6.105,63
Cozinheiro	1	1	R\$ 1.827,04	\$ 6.766,81	\$ 6.766,81
Vigilante	2	2	R\$ 1.625,45	\$ 12.040,37	\$ 12.040,37
Assessor contábil	1	1	R\$ 4.773,41	\$ 17.679,30	\$ 17.679,30
Total	20	18		\$ 210.909,70	\$ 194.491,93

Fonte: AUTOR (2018).¹

Os custos anuais com alimentação das equipes também foram estimados com base no número de empregados e, portanto, é descrito na Tabela 25.

Tabela 25- Custos anuais com alimentação da equipe.

		Terrace Mining	Strip Mining
Refeições	Custo unitário (R\$)	Custo Anual (\$)	Custo Anual (\$)
Café	R\$ 3,00	\$ 5.555,56	\$ 5.000,00
Almoço	R\$ 10,00	\$ 18.518,52	\$ 16.666,67
Total		\$ 24.074,07	\$ 21.666,67

Fonte: AUTOR (2018).

¹ Observação: TM – *Terrace Mining* e SM – *Strip Mining*.

7.8 ANÁLISE ECONÔMICA COMPARATIVA ENTRE *STRIP* E *TERRACE MINING*

Para a análise econômica foram elaborados dois fluxos de caixa, um para a *Terrace Mining* e outro para a *Strip Mining*, cujos dados são embasados nas informações já definidas neste trabalho como: toneladas de minério e volumes de estéril anuais obtidos a partir do sequenciamento de lavra, custos de produção horário e unitário dos equipamentos, custos com explosivos e acessórios, custos com acessórios de perfuração e custos com as equipes de acordo com o método de lavra adotado.

Entretanto apenas estas informações não são suficientes para composição do fluxo de caixa sendo necessário, portanto, outros dados que aqui são descritos.

O preço do minério de gipsita é um fator que influencia nas receitas, estando hoje sendo vendido no valor de 33,48 R\$/t. Uma vez que, neste trabalho adotaram-se valores em dólar, sendo este cotado na data da realização da pesquisa em R\$ 3,24; a gipsita é vendida a 10,33 dólares, conforme a Tabela 26.

Tabela 26- Preço atual da gipsita.

Unidade	Valor
(R\$/t)	R\$ 33,48
US\$	\$ 3,24
(US\$/t)	\$ 10,33

Fonte: AUTOR (2018).

Outros fatores que influenciam no fluxo de caixa são os impostos. A Tabela 27 mostra os impostos que são aplicados para as minerações no Brasil e suas respectivas alíquotas.

Tabela 27- Percentual cobrado por cada imposto.

Impostos	Porcentagem
ICMS	18% do Faturamento Bruto
PIS	0,65% do Faturamento Bruto
COFINS	3% do Faturamento Bruto
CFEM	2% do Faturamento Líquido
IR	15% do Lucro Tributável
CS	12% do Lucro Tributável

Fonte: AUTOR (2018).

Além disso, a depreciação dos equipamentos também deve ser levada em conta no fluxo de caixa. A depreciação, segundo a Receita Federal (2018), para máquinas e equipamentos é de 10% ao ano para um período de 10 anos. A depreciação anual de cada equipamento e a depreciação total podem ser observadas na Tabela 28 e na Tabela 29 para ambos os métodos de lavra, respectivamente.

Tabela 28- Depreciação anual dos equipamentos usados na *Terrace Mining*.

Equipamentos Terrace Mining	Preço (US\$)	Vida útil (anos)	Depreciação (%)	Depreciação (US\$)
Carreta de Perfuração PWH-5000	\$ 46.296,30	10	10	\$ 4.629,63
Perfuratriz pneumática PWH-126LS	\$ 7.716,05	10	10	\$ 771,60
Compressor XAS 770, Atlas Copco	\$ 24.691,36	10	10	\$ 2.469,14
Rompedor hidráulico H160ES	\$ 148.148,15	10	10	\$ 14.814,81
Escavadeira hidráulica modelo 336D2 L	\$ 268.518,52	10	10	\$ 26.851,85
Carregadeira modelo 1021 1F Z-Bar	\$ 262.654,32	10	10	\$ 26.265,43
Escavadeira hidráulica R320LC-9S	\$ 185.185,19	10	10	\$ 18.518,52
Caminhão Axor 3344	\$ 306.172,84	10	10	\$ 30.617,28
				\$ 124.938,27

Fonte: AUTOR (2018).

Tabela 29- Depreciação anual dos equipamentos usados na *Strip Mining*.

Equipamentos Strip Mining	Preço (US\$)	Vida útil (anos)	Depreciação (%)	Depreciação (US\$)
Carreta de Perfuração PWH-5000	\$ 46.296,30	10	10	\$ 4.629,63
Perfuratriz pneumática PWH-126LS	\$ 7.716,05	10	10	\$ 771,60
Compressor XAS 770, Atlas Copco	\$ 24.691,36	10	10	\$ 2.469,14
Rompedor hidráulico H160ES	\$ 148.148,15	10	10	\$ 14.814,81
Escavadeira hidráulica modelo 336D2 L	\$ 268.518,52	10	10	\$ 26.851,85
Carregadeira modelo 1021 1F Z-Bar	\$ 262.654,32	10	10	\$ 26.265,43
Dragline modelo HS 895 HD	\$ 2.407.407,41	10	10	\$ 240.740,74
				\$ 316.543,21

Fonte: AUTOR (2018).

Uma vez reunidas todas estas informações, pode-se então deduzir os fluxos de caixa para os dois métodos de lavra, e que são mostrados nas Tabelas de 30 a 33.

Tabela 30- Fluxo de caixa para a Terrace Mining (Ano 0 ao Ano 9).

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
CAPEX	\$ 1.249.382,72									
Receita										
Receita Operacional		\$ 7.017.519,50	\$ 7.171.160,54	\$ 6.737.609,24	\$ 7.537.264,17	\$ 6.861.102,51	\$ 7.233.799,73	\$ 7.281.060,70	\$ 7.427.550,11	\$ 7.710.163,11
ICMS (18%)		\$ 1.263.153,51	\$ 1.290.808,90	\$ 1.212.769,66	\$ 1.356.707,55	\$ 1.234.998,45	\$ 1.302.083,95	\$ 1.310.590,93	\$ 1.336.959,02	\$ 1.387.829,36
PIS (0,65%)		\$ 45.613,88	\$ 46.612,54	\$ 43.794,46	\$ 48.992,22	\$ 44.597,17	\$ 47.019,70	\$ 47.326,89	\$ 48.279,08	\$ 50.116,06
COFINS (3%)		\$ 210.525,58	\$ 215.134,82	\$ 202.128,28	\$ 226.117,93	\$ 205.833,08	\$ 217.013,99	\$ 218.431,82	\$ 222.826,50	\$ 231.304,89
Base de Cálculo da CFEM		\$ 5.498.226,53	\$ 5.618.604,28	\$ 5.278.916,84	\$ 5.905.446,48	\$ 5.375.673,81	\$ 5.667.682,09	\$ 5.704.711,06	\$ 5.819.485,51	\$ 6.040.912,80
CFEM (2%)		\$ 109.964,53	\$ 112.372,09	\$ 105.578,34	\$ 118.108,93	\$ 107.513,48	\$ 113.353,64	\$ 114.094,22	\$ 116.389,71	\$ 120.818,26
Receita Operacional Líquida		\$ 5.388.262,00	\$ 5.506.232,20	\$ 5.173.338,51	\$ 5.787.337,55	\$ 5.268.160,34	\$ 5.554.328,45	\$ 5.590.616,83	\$ 5.703.095,80	\$ 5.920.094,54
Receita Total		\$ 5.388.262,00	\$ 5.506.232,20	\$ 5.173.338,51	\$ 5.787.337,55	\$ 5.268.160,34	\$ 5.554.328,45	\$ 5.590.616,83	\$ 5.703.095,80	\$ 5.920.094,54
OPEX										
Custo Lavra Minério		\$ 533.770,21	\$ 545.456,54	\$ 512.479,54	\$ 573.303,30	\$ 521.872,74	\$ 550.221,03	\$ 553.815,82	\$ 564.958,18	\$ 586.454,43
Custo Lavra Estéril		\$ 275.866,10	\$ 207.971,00	\$ 155.338,07	\$ 192.966,14	\$ 186.058,29	\$ 263.593,85	\$ 292.473,27	\$ 224.423,31	\$ 264.628,42
Outros Custos Operacionais										
Explosivos e acessórios		\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04
Acessórios de perfuração		\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21
Mão-de-obra		\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78
Custo Total Lavra		\$ 1.431.604,34	\$ 1.375.395,56	\$ 1.289.785,63	\$ 1.388.237,47	\$ 1.329.899,06	\$ 1.435.782,91	\$ 1.468.257,12	\$ 1.411.349,51	\$ 1.473.050,88
Despesas Administrativas		\$ 214.740,65	\$ 206.309,33	\$ 193.467,84	\$ 208.235,62	\$ 199.484,86	\$ 215.367,44	\$ 220.238,57	\$ 211.702,43	\$ 220.957,63
Custo Total		\$ 1.646.344,99	\$ 1.581.704,90	\$ 1.483.253,48	\$ 1.596.473,09	\$ 1.529.383,92	\$ 1.651.150,35	\$ 1.688.495,69	\$ 1.623.051,93	\$ 1.694.008,51
Encargos de Capital										
Depreciação		\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62
Lucro Tributável		\$ 3.641.966,38	\$ 3.824.576,68	\$ 3.590.134,41	\$ 4.090.913,85	\$ 3.638.825,80	\$ 3.803.227,48	\$ 3.802.170,53	\$ 3.980.093,25	\$ 4.126.135,41
CS (12%)		\$ 437.035,97	\$ 458.949,20	\$ 430.816,13	\$ 490.909,66	\$ 436.659,10	\$ 456.387,30	\$ 456.260,46	\$ 477.611,19	\$ 495.136,25
IR (15%)		\$ 837.528,79	\$ 879.894,38	\$ 825.503,78	\$ 941.684,60	\$ 836.800,18	\$ 874.941,37	\$ 874.696,15	\$ 915.974,23	\$ 949.856,01
Lucro Líquido		\$ 2.467.352,24	\$ 2.585.683,71	\$ 2.433.765,12	\$ 2.758.270,20	\$ 2.465.317,15	\$ 2.571.849,43	\$ 2.571.164,53	\$ 2.686.458,45	\$ 2.781.093,77
Reposições equipamentos		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Valor Residual (20%)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Fluxo de Caixa Líquido Anual	\$ -1.249.382,72	\$ 2.467.352,24	\$ 2.585.683,71	\$ 2.433.765,12	\$ 2.758.270,20	\$ 2.465.317,15	\$ 2.571.849,43	\$ 2.571.164,53	\$ 2.686.458,45	\$ 2.781.093,77

Fonte: AUTOR (2018).

Tabela 31- Fluxo de caixa para a Terrace Mining (Ano 10 ao Ano 20).

Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
\$ 6.806.489,80	\$ 8.141.453,48	\$ 7.439.914,72	\$ 6.920.946,74	\$ 4.240.625,02	\$ 6.841.265,42	\$ 7.058.856,86	\$ 7.978.381,11	\$ 7.624.914,69	\$ 7.023.190,22	\$ 6.730.754,46
\$ 1.225.168,16	\$ 1.465.461,63	\$ 1.339.184,65	\$ 1.245.770,41	\$ 763.312,50	\$ 1.231.427,78	\$ 1.270.594,23	\$ 1.436.108,60	\$ 1.372.484,64	\$ 1.264.174,24	\$ 1.211.535,80
\$ 44.242,18	\$ 52.919,45	\$ 48.359,45	\$ 44.986,15	\$ 27.564,06	\$ 44.468,23	\$ 45.882,57	\$ 51.859,48	\$ 49.561,95	\$ 45.650,74	\$ 43.749,90
\$ 204.194,69	\$ 244.243,60	\$ 223.197,44	\$ 207.628,40	\$ 127.218,75	\$ 205.237,96	\$ 211.765,71	\$ 239.351,43	\$ 228.747,44	\$ 210.695,71	\$ 201.922,63
\$ 5.332.884,76	\$ 6.378.828,80	\$ 5.829.173,18	\$ 5.422.561,77	\$ 3.322.529,70	\$ 5.360.131,46	\$ 5.530.614,35	\$ 6.251.061,60	\$ 5.974.120,66	\$ 5.502.669,54	\$ 5.273.546,12
\$ 106.657,70	\$ 127.576,58	\$ 116.583,46	\$ 108.451,24	\$ 66.450,59	\$ 107.202,63	\$ 110.612,29	\$ 125.021,23	\$ 119.482,41	\$ 110.053,39	\$ 105.470,92
\$ 5.226.227,06	\$ 6.251.252,23	\$ 5.712.589,72	\$ 5.314.110,53	\$ 3.256.079,11	\$ 5.252.928,83	\$ 5.420.002,06	\$ 6.126.040,37	\$ 5.854.638,25	\$ 5.392.616,15	\$ 5.168.075,20
\$ 5.226.227,06	\$ 6.251.252,23	\$ 5.712.589,72	\$ 5.314.110,53	\$ 3.256.079,11	\$ 5.252.928,83	\$ 5.420.002,06	\$ 6.126.040,37	\$ 5.854.638,25	\$ 5.392.616,15	\$ 5.168.075,20
\$ 517.718,76	\$ 619.259,47	\$ 565.898,66	\$ 526.424,65	\$ 322.552,62	\$ 520.363,89	\$ 536.914,44	\$ 606.855,77	\$ 579.970,22	\$ 534.201,54	\$ 511.958,14
\$ 148.574,53	\$ 215.982,78	\$ 188.644,92	\$ 125.458,92	\$ 197.263,91	\$ 153.493,78	\$ 184.102,78	\$ 205.482,22	\$ 198.898,05	\$ 196.401,16	\$ 199.418,27
\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04
\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21
\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78	\$ 234.983,78
\$ 1.288.261,32	\$ 1.457.210,27	\$ 1.376.511,60	\$ 1.273.851,59	\$ 1.141.784,56	\$ 1.295.825,69	\$ 1.342.985,25	\$ 1.434.306,02	\$ 1.400.836,30	\$ 1.352.570,73	\$ 1.333.344,43
\$ 193.239,20	\$ 218.581,54	\$ 206.476,74	\$ 191.077,74	\$ 171.267,68	\$ 194.373,85	\$ 201.447,79	\$ 215.145,90	\$ 210.125,44	\$ 202.885,61	\$ 200.001,67
\$ 1.481.500,52	\$ 1.675.791,81	\$ 1.582.988,34	\$ 1.464.929,33	\$ 1.313.052,24	\$ 1.490.199,54	\$ 1.544.433,04	\$ 1.649.451,92	\$ 1.610.961,74	\$ 1.555.456,33	\$ 1.533.346,10
\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62	\$ 99.950,62
\$ 3.644.775,92	\$ 4.475.509,80	\$ 4.029.650,76	\$ 3.749.230,59	\$ 1.843.076,25	\$ 3.662.778,67	\$ 3.775.618,41	\$ 4.376.637,83	\$ 4.143.725,89	\$ 3.737.209,20	\$ 3.534.778,48
\$ 437.373,11	\$ 537.061,18	\$ 483.558,09	\$ 449.907,67	\$ 221.169,15	\$ 439.533,44	\$ 453.074,21	\$ 525.196,54	\$ 497.247,11	\$ 448.465,10	\$ 424.173,42
\$ 838.180,61	\$ 1.030.910,87	\$ 927.471,57	\$ 862.414,09	\$ 420.186,28	\$ 842.357,24	\$ 868.536,06	\$ 1.007.972,57	\$ 953.937,00	\$ 859.625,13	\$ 812.661,20
\$ 2.469.172,82	\$ 3.007.488,38	\$ 2.718.571,72	\$ 2.536.859,45	\$ 1.301.671,43	\$ 2.480.838,60	\$ 2.553.958,75	\$ 2.943.419,34	\$ 2.792.492,40	\$ 2.529.069,58	\$ 2.397.894,48
\$ -	\$ 1.249.382,72	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 249.876,54	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 249.876,54
\$ 2.719.049,37	\$ 1.758.105,66	\$ 2.718.571,72	\$ 2.536.859,45	\$ 1.301.671,43	\$ 2.480.838,60	\$ 2.553.958,75	\$ 2.943.419,34	\$ 2.792.492,40	\$ 2.529.069,58	\$ 2.647.771,02

Fonte: AUTOR (2018).

Tabela 32- Fluxo de caixa para a *Strip Mining* (Ano 0 ao Ano 9).

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
CAPEX	\$ 3.165.432,10									
Receita										
Receita Operacional		\$ 7.017.519,50	\$ 7.171.160,54	\$ 6.737.609,24	\$ 7.537.264,17	\$ 6.861.102,51	\$ 7.233.799,73	\$ 7.281.060,70	\$ 7.427.550,11	\$ 7.710.163,11
ICMS (18%)		\$ 1.263.153,51	\$ 1.290.808,90	\$ 1.212.769,66	\$ 1.356.707,55	\$ 1.234.998,45	\$ 1.302.083,95	\$ 1.310.590,93	\$ 1.336.959,02	\$ 1.387.829,36
PIS (0,65%)		\$ 45.613,88	\$ 46.612,54	\$ 43.794,46	\$ 48.992,22	\$ 44.597,17	\$ 47.019,70	\$ 47.326,89	\$ 48.279,08	\$ 50.116,06
COFINS (3%)		\$ 210.525,58	\$ 215.134,82	\$ 202.128,28	\$ 226.117,93	\$ 205.833,08	\$ 217.013,99	\$ 218.431,82	\$ 222.826,50	\$ 231.304,89
Base de Cálculo da CFEM		\$ 5.498.226,53	\$ 5.618.604,28	\$ 5.278.916,84	\$ 5.905.446,48	\$ 5.375.673,81	\$ 5.667.682,09	\$ 5.704.711,06	\$ 5.819.485,51	\$ 6.040.912,80
CFEM (2%)		\$ 109.964,53	\$ 112.372,09	\$ 105.578,34	\$ 118.108,93	\$ 107.513,48	\$ 113.353,64	\$ 114.094,22	\$ 116.389,71	\$ 120.818,26
Receita Operacional Líquida		\$ 5.388.262,00	\$ 5.506.232,20	\$ 5.173.338,51	\$ 5.787.337,55	\$ 5.268.160,34	\$ 5.554.328,45	\$ 5.590.616,83	\$ 5.703.095,80	\$ 5.920.094,54
Receita Total		\$ 5.388.262,00	\$ 5.506.232,20	\$ 5.173.338,51	\$ 5.787.337,55	\$ 5.268.160,34	\$ 5.554.328,45	\$ 5.590.616,83	\$ 5.703.095,80	\$ 5.920.094,54
OPEX										
Custo Lavra Minério		\$ 533.770,21	\$ 545.456,54	\$ 512.479,54	\$ 573.303,30	\$ 521.872,74	\$ 550.221,03	\$ 553.815,82	\$ 564.958,18	\$ 586.454,43
Custo Lavra Estéril		\$ 235.468,37	\$ 177.515,80	\$ 132.590,42	\$ 164.708,25	\$ 158.811,98	\$ 224.993,27	\$ 249.643,60	\$ 191.558,84	\$ 225.876,33
Outros Custos Operacionais										
Explosivos e acessórios		\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04
Acessórios de perfuração		\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21
Mão-de-obra		\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59
Custo Total Lavra		\$ 1.372.381,43	\$ 1.326.115,18	\$ 1.248.212,80	\$ 1.341.154,39	\$ 1.283.827,57	\$ 1.378.357,14	\$ 1.406.602,26	\$ 1.359.659,86	\$ 1.415.473,60
Despesas Administrativas		\$ 205.857,21	\$ 198.917,28	\$ 187.231,92	\$ 201.173,16	\$ 192.574,13	\$ 206.753,57	\$ 210.990,34	\$ 203.948,98	\$ 212.321,04
Custo Total		\$ 1.578.238,64	\$ 1.525.032,46	\$ 1.435.444,72	\$ 1.542.327,55	\$ 1.476.401,70	\$ 1.585.110,71	\$ 1.617.592,60	\$ 1.563.608,84	\$ 1.627.794,65
Encargos de Capital										
Depreciação		\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27
Lucro Tributável		\$ 3.653.085,08	\$ 3.824.261,47	\$ 3.580.955,52	\$ 4.088.071,73	\$ 3.634.820,37	\$ 3.812.279,46	\$ 3.816.085,97	\$ 3.982.548,69	\$ 4.135.361,62
CS		\$ 438.370,21	\$ 458.911,38	\$ 429.714,66	\$ 490.568,61	\$ 436.178,44	\$ 457.473,54	\$ 457.930,32	\$ 477.905,84	\$ 496.243,39
IR		\$ 840.108,33	\$ 879.821,25	\$ 823.374,27	\$ 941.025,23	\$ 835.870,92	\$ 877.041,43	\$ 877.924,54	\$ 916.543,89	\$ 951.996,49
Lucro Líquido		\$ 2.531.544,81	\$ 2.642.467,11	\$ 2.484.804,85	\$ 2.813.416,16	\$ 2.519.709,28	\$ 2.634.702,77	\$ 2.637.169,38	\$ 2.745.037,23	\$ 2.844.060,01
Reposições equipamentos		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Valor Residual (20%)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Fluxo de Caixa Líquido Anual	\$ -3.165.432,10	\$ 2.531.544,81	\$ 2.642.467,11	\$ 2.484.804,85	\$ 2.813.416,16	\$ 2.519.709,28	\$ 2.634.702,77	\$ 2.637.169,38	\$ 2.745.037,23	\$ 2.844.060,01

Fonte: AUTOR (2018).

Tabela 33- Fluxo de caixa para a *Strip Mining* (Ano 10 ao Ano 20).

Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
\$ 6.806.489,80	\$ 8.141.453,48	\$ 7.439.914,72	\$ 6.920.946,74	\$ 4.240.625,02	\$ 6.841.265,42	\$ 7.058.856,86	\$ 7.978.381,11	\$ 7.624.914,69	\$ 7.023.190,22	\$ 6.730.754,46
\$ 1.225.168,16	\$ 1.465.461,63	\$ 1.339.184,65	\$ 1.245.770,41	\$ 763.312,50	\$ 1.231.427,78	\$ 1.270.594,23	\$ 1.436.108,60	\$ 1.372.484,64	\$ 1.264.174,24	\$ 1.211.535,80
\$ 44.242,18	\$ 52.919,45	\$ 48.359,45	\$ 44.986,15	\$ 27.564,06	\$ 44.468,23	\$ 45.882,57	\$ 51.859,48	\$ 49.561,95	\$ 45.650,74	\$ 43.749,90
\$ 204.194,69	\$ 244.243,60	\$ 223.197,44	\$ 207.628,40	\$ 127.218,75	\$ 205.237,96	\$ 211.765,71	\$ 239.351,43	\$ 228.747,44	\$ 210.695,71	\$ 201.922,63
\$ 5.332.884,76	\$ 6.378.828,80	\$ 5.829.173,18	\$ 5.422.561,77	\$ 3.322.529,70	\$ 5.360.131,46	\$ 5.530.614,35	\$ 6.251.061,60	\$ 5.974.120,66	\$ 5.502.669,54	\$ 5.273.546,12
\$ 106.657,70	\$ 127.576,58	\$ 116.583,46	\$ 108.451,24	\$ 66.450,59	\$ 107.202,63	\$ 110.612,29	\$ 125.021,23	\$ 119.482,41	\$ 110.053,39	\$ 105.470,92
\$ 5.226.227,06	\$ 6.251.252,23	\$ 5.712.589,72	\$ 5.314.110,53	\$ 3.256.079,11	\$ 5.252.928,83	\$ 5.420.002,06	\$ 6.126.040,37	\$ 5.854.638,25	\$ 5.392.616,15	\$ 5.168.075,20
\$ 5.226.227,06	\$ 6.251.252,23	\$ 5.712.589,72	\$ 5.314.110,53	\$ 3.256.079,11	\$ 5.252.928,83	\$ 5.420.002,06	\$ 6.126.040,37	\$ 5.854.638,25	\$ 5.392.616,15	\$ 5.168.075,20
\$ 517.718,76	\$ 619.259,47	\$ 565.898,66	\$ 526.424,65	\$ 322.552,62	\$ 520.363,89	\$ 536.914,44	\$ 606.855,77	\$ 579.970,22	\$ 534.201,54	\$ 511.958,14
\$ 126.817,33	\$ 184.354,34	\$ 161.019,83	\$ 107.086,76	\$ 168.376,66	\$ 131.016,21	\$ 157.142,84	\$ 175.391,48	\$ 169.771,49	\$ 167.640,24	\$ 170.215,53
\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04	\$ 335.441,04
\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21	\$ 51.543,21
\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59	\$ 216.158,59
\$ 1.247.678,94	\$ 1.406.756,64	\$ 1.330.061,33	\$ 1.236.654,25	\$ 1.094.072,12	\$ 1.254.522,93	\$ 1.297.200,12	\$ 1.385.390,09	\$ 1.352.884,56	\$ 1.304.984,63	\$ 1.285.316,51
\$ 187.151,84	\$ 211.013,50	\$ 199.509,20	\$ 185.498,14	\$ 164.110,82	\$ 188.178,44	\$ 194.580,02	\$ 207.808,51	\$ 202.932,68	\$ 195.747,69	\$ 192.797,48
\$ 1.434.830,78	\$ 1.617.770,14	\$ 1.529.570,52	\$ 1.422.152,38	\$ 1.258.182,94	\$ 1.442.701,37	\$ 1.491.780,14	\$ 1.593.198,60	\$ 1.555.817,24	\$ 1.500.732,32	\$ 1.478.113,99
\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27	\$ 156.938,27
\$ 3.634.458,01	\$ 4.476.543,81	\$ 4.026.080,92	\$ 3.735.019,88	\$ 1.840.957,90	\$ 3.653.289,19	\$ 3.771.283,65	\$ 4.375.903,49	\$ 4.141.882,73	\$ 3.734.945,56	\$ 3.533.022,94
\$ 436.134,96	\$ 537.185,26	\$ 483.129,71	\$ 448.202,39	\$ 220.914,95	\$ 438.394,70	\$ 452.554,04	\$ 525.108,42	\$ 497.025,93	\$ 448.193,47	\$ 423.962,75
\$ 835.786,85	\$ 1.031.150,76	\$ 926.643,37	\$ 859.117,20	\$ 419.694,82	\$ 840.155,68	\$ 867.530,40	\$ 1.007.802,20	\$ 953.509,39	\$ 859.099,96	\$ 812.253,91
\$ 2.519.474,47	\$ 3.065.146,07	\$ 2.773.246,12	\$ 2.584.638,56	\$ 1.357.286,40	\$ 2.531.677,07	\$ 2.608.137,49	\$ 2.999.931,14	\$ 2.848.285,69	\$ 2.584.590,40	\$ 2.453.744,54
\$ -	\$ 758.024,69	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 151.604,94	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 633.086,42
\$ 2.671.079,41	\$ 2.307.121,38	\$ 2.773.246,12	\$ 2.584.638,56	\$ 1.357.286,40	\$ 2.531.677,07	\$ 2.608.137,49	\$ 2.999.931,14	\$ 2.848.285,69	\$ 2.584.590,40	\$ 3.086.830,96

Fonte: AUTOR (2018).

A partir do fluxo de caixa foram obtidos os critérios de decisão econômicos: VPL (valor presente líquido), TIR (taxa interna de retorno) e o IL (índice de lucratividade). A Tabela 34 e a Tabela 35 apresentam os resultados do cálculo desses critérios para cada um dos métodos de lavra.

Tabela 34- Parâmetros econômicos da *Terrace Mining*.

VPL (tma de 18% a.a.)	\$ 10.418.870,57
TIR (% a.a.)	200,00%
IL (lucro líquido / receita)	35,48%

Fonte: AUTOR (2018).

Tabela 35- Parâmetros econômicos da *Strip Mining*.

VPL (tma de 18% a.a.)	\$ 9.119.883,25
TIR (% a.a.)	81,49%
IL (lucro líquido / receita)	36,82%

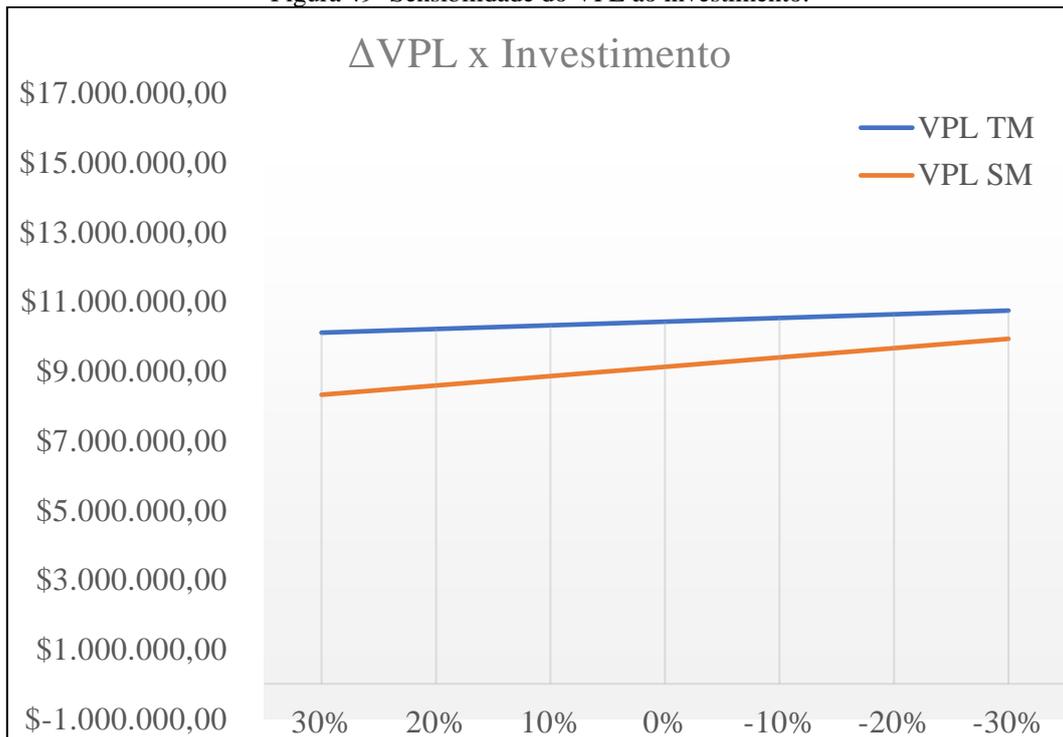
Fonte: AUTOR (2018).

7.8.1 Análise de sensibilidade

Estudou-se também a sensibilidade do VPL frente à variação nos principais parâmetros do fluxo de caixa, que são: Investimento ou CAPEX, Receita, e Custo operacional ou OPEX. As figuras 49, 50 e 51 apresentam o estudo de sensibilidade do valor presente líquido das alternativas frente a variações nesses parâmetros do fluxo de caixa em um intervalo de -30% a 30% dos seus valores. Nas figuras, as linhas em azul representam a sensibilidade do VPL para o método de lavra *Terrace Mining* ao passo que as linhas em alaranjado representam a sensibilidade para a alternativa *Strip Mining*.

A Figura 49 apresenta a variação do valor presente líquido das alternativas em relação à variação do parâmetro investimento. Esse gráfico indica que a alternativa *Strip Mining* é mais sensível à variação no investimento do que a alternativa *Terrace Mining*.

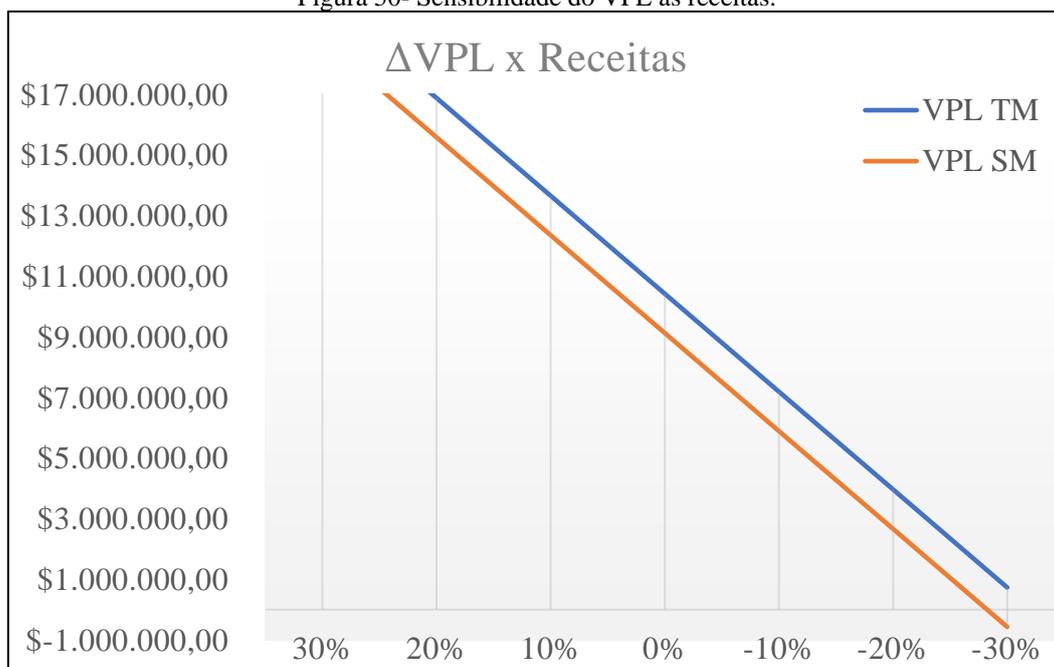
Figura 49- Sensibilidade do VPL ao investimento.



Fonte: AUTOR (2018).

A Figura 50 apresenta a variação do valor presente líquido das alternativas em relação à variação do parâmetro receitas. Esse gráfico indica que ambas as alternativas possuem sensibilidade semelhante em relação a esse parâmetro.

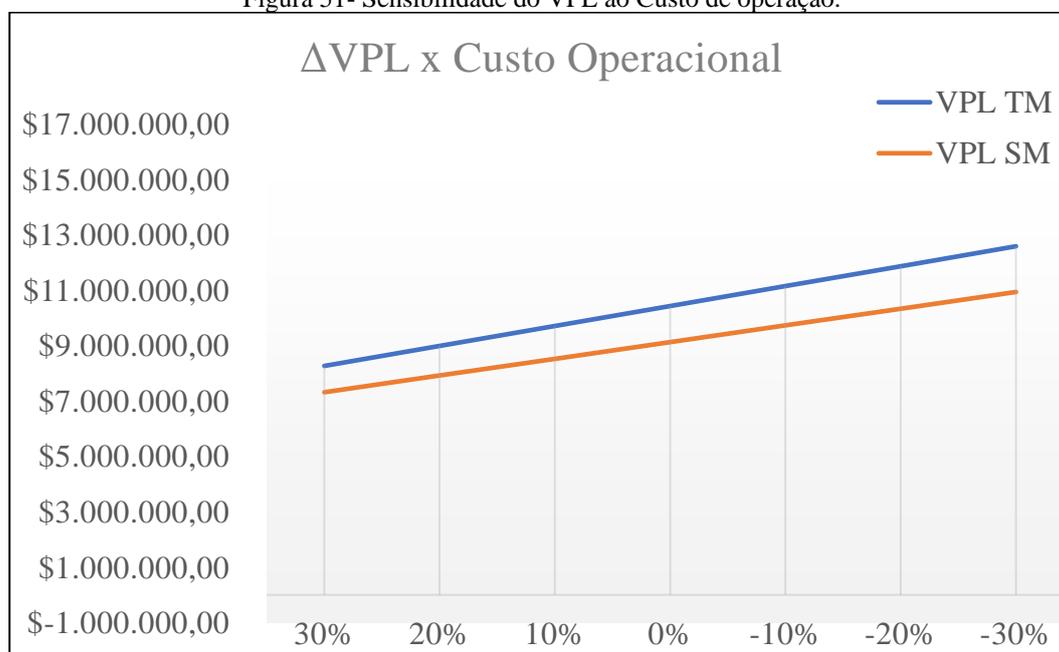
Figura 50- Sensibilidade do VPL as receitas.



Fonte: AUTOR (2018).

A Figura 51 apresenta a variação do valor presente líquido das alternativas em relação à variação do parâmetro custo de operação. Esse gráfico indica que ambas as alternativas possuem sensibilidade semelhante em relação a esse parâmetro.

Figura 51- Sensibilidade do VPL ao Custo de operação.



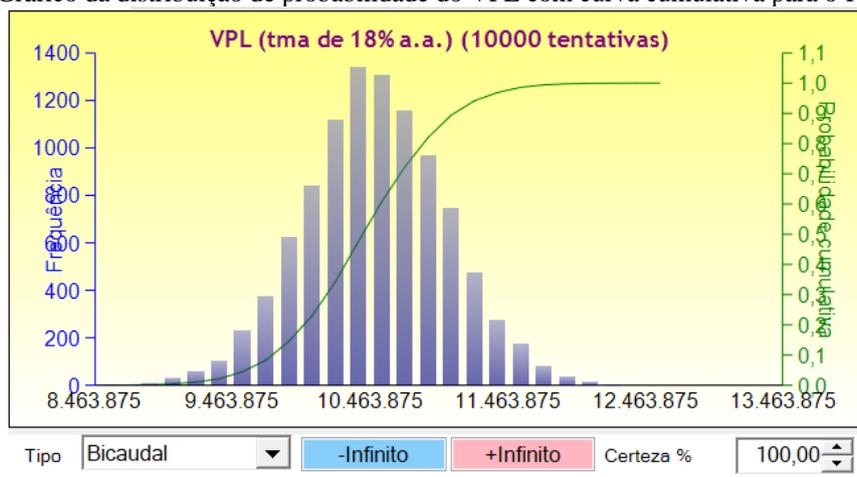
Fonte: AUTOR (2018).

Através dos gráficos pode-se perceber que ambas as alternativas possuem pequena sensibilidade na rentabilidade em relação a variações no investimento e custos operacionais ao passo que mostram grande sensibilidade frente a variações nas receitas.

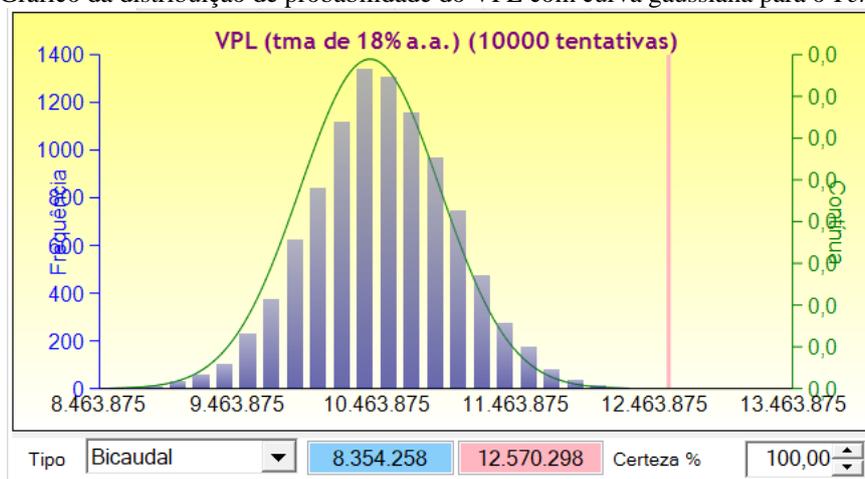
7.8.2 Análise de risco através da Técnica de Monte Carlo

A Técnica de Monte Carlo foi utilizada com o fim de determinar o risco de prejuízo de cada alternativa em relação aos valores possíveis dos parâmetros econômicos do fluxo de caixa, caracterizados por distribuições de probabilidade que são apresentadas nas figuras seguintes. Os parâmetros econômicos analisados foram: CAPEX ou Investimento, Receita Operacional, Custo de lavra do minério, Custo de lavra do estéril, Custo com mão-de-obra, Custo com acessórios de perfuração, Custos com explosivos e acessórios e Despesas administrativas. O software utilizado para esta análise foi o *Risk Simulator*.

Os resultados da análise de risco para o *Terrace Mining* são apresentados na Figura 52 e na Figura 53 e a respectiva estatística na Tabela 36.

Figura 52- Gráfico da distribuição de probabilidade do VPL com curva cumulativa para o *Terrace Mining*.

Fonte: AUTOR (2018).

Figura 53- Gráfico da distribuição de probabilidade do VPL com curva gaussiana para o *Terrace Mining*.

Fonte: AUTOR (2018).

Tabela 36- Estatística do resultado da simulação de Monte Carlo para o *Terrace Mining*.

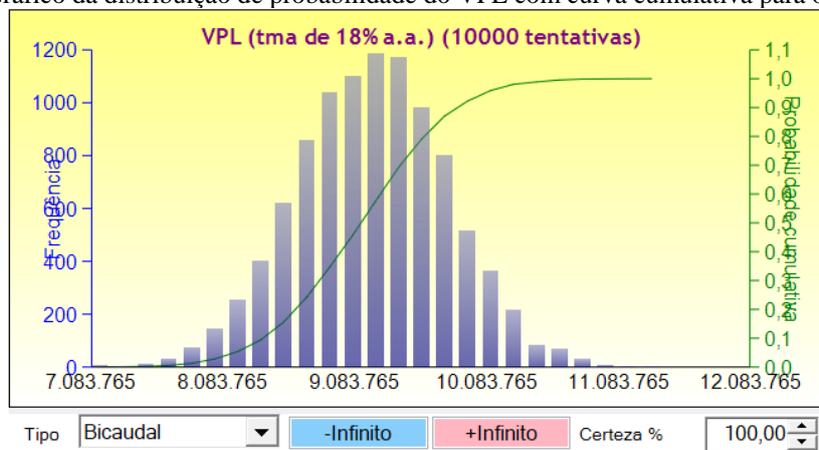
Estatísticas	Resultado
Número de tentativas	10000
Média	10.414.728,7645
Mediana	10.408.609,9606
Desvio padrão	516.445,3678
Variância	266.715.817.970,0030
Coefficiente de variação	0,0496
Máximo	12.570.298,4775
Mínimo	8.354.258,2049
Faixa	4.216.040,2726
Obliquidade	-0,0098
Curtose	0,1330
25% percentil	10.078.681,4631
75% percentil	10.758.808,8591
Percentual de precisão de erro a 95% de confiança	0,0972%

Fonte: AUTOR (2018).

Esses resultados indicam que a distribuição de probabilidade do valor presente líquido gerada na simulação de Monte Carlo da alternativa *Terrace Mining* permanece positiva o que indica que, independente da variação nos parâmetros econômicos determinados no fluxo de caixa, a alternativa permanece lucrativa.

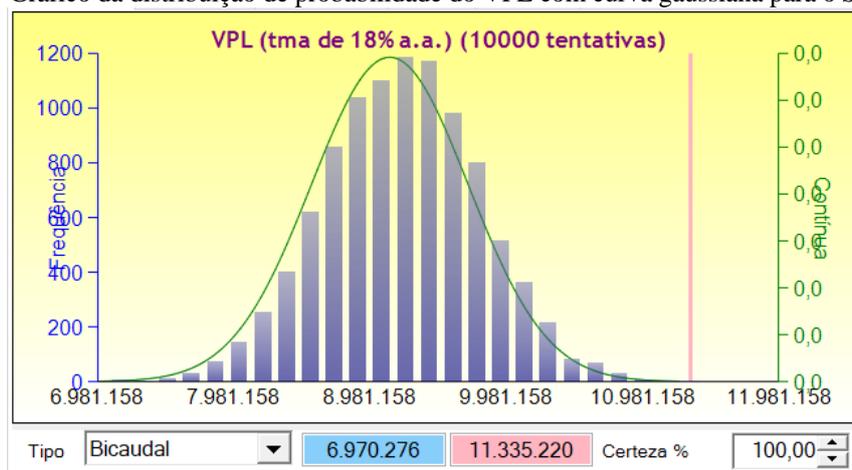
Os resultados da análise de risco para a alternativa *Strip Mining* são apresentados na Figura 54 e na Figura 55 e a respectiva estatística na Tabela 37.

Figura 54- Gráfico da distribuição de probabilidade do VPL com curva cumulativa para o *Strip Mining*.



Fonte: AUTOR (2018).

Figura 55- Gráfico da distribuição de probabilidade do VPL com curva gaussiana para o *Strip Mining*.



Fonte: AUTOR (2018).

Tabela 37- Estatística do resultado da simulação de Monte Carlo para o *Strip Mining*.

Estatísticas	Resultado
Número de tentativas	10000
Média	9.125.319,9652
Mediana	9.130.565,1106
Desvio padrão	574.827,0560
Variância	330.426.144.273,5730
Coefficiente de variação	0,0630
Máximo	11.335.219,9486
Mínimo	6.970.276,0496
Faixa	4.364.943,8990
Obliquidade	-0,0127
Curtose	0,0244
25% percentil	8.733.639,0156
75% percentil	9.516.825,4555
Percentual de precisão de erro a 95% de confiança	0,1235%

Fonte: AUTOR (2018).

Da mesma forma que na alternativa anterior os resultados indicam que a distribuição de probabilidade do valor presente líquido gerada na simulação de Monte Carlo da alternativa *Strip Mining* permanece positiva o que indica que, independente da variação nos parâmetros econômicos determinados no fluxo de caixa, a alternativa permanece lucrativa.

8 CONCLUSÕES

A presente dissertação evidenciou os benefícios associados à adoção de dois métodos de lavra para a extração de gipsita, *Terrace Mining* e *Strip Mining*, tendo como referência as jazidas e minas da região do Araripe, numa abordagem de planejamento de longo e médio prazo.

No Polo Gesseiro do Araripe, o método de lavra *Open Pit Mining* é utilizado pela quase totalidade das minas da Região. É o método de lavra mais utilizado no mundo em minas à céu aberto, se adapta bem aos depósitos do Araripe, é adequado, porém tem como fator negativo a geração de pilhas de estéril. Devido ao fato das jazidas da região serem tabulares, os métodos de lavra *Terrace* e *Strip Mining* são também adequados para os depósitos do Araripe, tendo como vantagem a possibilidade de deposição do material de cobertura dentro da cava, o que resulta em redução de custos e impactos ambientais, a custo zero, caso a mineradora já esteja trabalhando com o método de lavra *Open Pit Mining* e deseje migrar para a lavra com *Terrace Mining* e com bons resultados caso a mineradora almeje iniciar a lavra de um bem mineral com o método de lavra *Strip Mining*.

Os métodos de lavra *Terrace* e *Strip Mining*: permitem a redução ou anulação da DMT (distância média de transporte), dependendo do equipamento que realiza a operação de descobertura e redução dos custos com transporte, dispensam a necessidade de aquisição de áreas para deposição do estéril em forma de pilhas, evitam o ônus com manutenção de pilhas de estéril e possibilitam a recuperação da área degradada pela mineração concomitantemente a lavra; têm como desvantagens a rigidez de ambos os métodos de lavra, que dificultaria a lavra em zonas desejadas (zonas ricas, por exemplo), fato que pode ser bem gerido no método de lavra *Open Pit Mining*.

A análise do fluxo de caixa de operação e a análise de risco indicam a viabilidade econômica de ambas as alternativas, apontando para a *Terrace Mining* como método de lavra mais rentável para a mineração de gipsita na região do Polo Gesseiro do Araripe, nestas circunstâncias. A simulação de Monte Carlo mostra que a distribuição de probabilidades do Valor Presente Líquido das alternativas estudadas mantém-se positiva em toda sua integralidade, indicando a lucratividade de ambas independentemente da variação nos parâmetros econômicos do fluxo de caixa num intervalo entre +30% a -30%.

Conforme já demonstrado em estudos anteriores, o método de lavra *Terrace Mining* é mais vantajoso do que o método *Open Pit Mining*. Levando em consideração os resultados do presente trabalho pode-se concluir que a *Terrace Mining*, considerando os

parâmetros técnicos e econômicos estimados, é a melhor alternativa para a mineração de gipsita no Polo Gesseiro do Araripe.

9 RECOMENDAÇÕES

Mediante a impossibilidade de contemplar todas as variações possíveis em parâmetros de lavra, de fluxo de caixa e de análise de risco, faz-se necessária a recomendação de estudos posteriores para melhor compreensão dos aspectos técnicos, econômicos e ambientais na lavra de gipsita:

1. Caracterização química e mineralógica dos testemunhos de sondagens a fim de quantificar as variedades mineralógicas de gipsita e identificar as zonas mais ricas da jazida, permitindo desta forma um planejamento melhor estrategicamente da lavra, e agregação de valor ao minério através da criação de subprodutos provenientes da combinação de variedades ou destas isoladas (e de acordo com a concentração de sulfato).
2. Modificação em parâmetros de lavra como, largura das tiras, produção, porte dos equipamentos e tipos de equipamentos.
3. Avaliação das espécies vegetais potenciais para recuperação da área degradada pela mineração, e quantificação de custos desta recuperação.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. Q. **Sequenciamento de programação de lavra com alocação de equipamentos de carga.** 2014. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Sistemas Logísticos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ARAI, M. Chapadas: relict of mid-Cretaceous interior seas in Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 436-438, 2006.

ARAÚJO, F. C. **Planejamento Operacional de Lavra com Alocação Dinâmica de Caminhões: Abordagens Exata e Heurística.** 2008. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

ARAÚJO, S. M.; MARTINS, L. A. A indústria extrativa mineral do Pólo Gesseiro do Araripe e seus impactos sócio-ambientais. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 29, n. 1, 2012.

ASSINE, M. L. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 3, p. 289-300, 1992.

ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, p. 371-389, 2007.

BALTAR, C. A.; BASTOS, F.; LUZ, A. B. **Rochas e Minerais Industriais: uso e Especificações.** Rio de Janeiro: 2005. 726. ISBN 85-7227-217-8.

BASTOS, F. **Aplicação da "TERRACE MINING" como alternativa para lavra de gipsita na região do Araripe - Pernambuco.** 2013. 112. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

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.

DE CARLI, C. **Análise de projetos limite: Lavra à Céu Aberto VS Lavra Subterrânea.** 2013. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CARVALHO, M. **Estratégia ambiental pró-ativa: sequenciamento de lavra concomitante com a disposição de estéril dentro da mina.** 2009. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CASE CONSTRUCTION. **1021F Full Size Wheel Loader.** USA, 2015. Disponível em: <<https://d3u1quraki94yp.cloudfront.net/casece/nafta/assets/Brochures/Products/Wheel-Loaders/Full-Size-Wheel-Loaders/1021F/Wheel-Loader-1021F-Specs.pdf>>. Acesso em: 09/03/2018.

CATERPILLAR. **Manual de Produção da Caterpillar.** Peoria, USA: CAT 2000.

CATERPILLAR. **Cat Hammers.** 2013. Disponível em: <<http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C842898>>. Acesso em: 09/03/2018

CATERPILLAR. **336D2/D2 L Hydraulic Excavator.** 2015. Disponível em: <<http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10050227>>. Acesso em: 09/03/2018.

CR EQUIPAMENTOS. **Compressor XAS 770, Atlas Copco.** São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.crcompressores.com.br/detalhes.php?prod=495&friurl=-XAS-770---771-pcm-a-7-bar---Compressor-Portatil-Atlas-Copco-&kb=35#.WqLrAmrwaUk>>. Acesso em: 09/03/2018.

DNPM. **Sumário Mineral.** p. 146, 2015. ISSN 0101-2053. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2015>>.

ESTRAZIONE GESSO. **Cava San Pietro – Prato Nuovo Itália.** 2017. Disponível em: <<http://www.estrazionecesso.com/home>>. Acesso em: 03/07/2017.

FRED. **Producer Price Index by Commodity for Machinery and Equipment: Construction Machinery and Equipment.** St Louis, 2018. Disponível em: <<https://fred.stlouisfed.org/series/WPS112>>. Acesso em: 11/03/2018.

FREITAS, S. B. **Planejamento de lavra em complexos mineiros: Aplicação do Whittle Multi-Mine em Modelos Simulados na mina do Sossego.** 2009. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará, Marabá.

FURTADO, L. L. **Implantação de melhoria no retaludamento das minas de ferro de Carajás, Parauapebas, Pará.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará, Marabá.

GOOGLE. **Google Earth.** Versão 7.3.0.3832. 2017. Gergelim, Araripina, Pernambuco. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 17/01/2018.

GOOGLEMAPS. **Mina Grootegeluk.** 2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Grootegeluk+Mine+-+Exxaro+Coal/@-23.6631859,27.5228753,9508m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x1eb9a26b6e60516d:0x1795a65050e9029e!8m2!3d-23.6583383!4d27.5682129?hl=en>>. Acesso em: 17/01/2018.

HARTMAN, H.; MUTMANSKY, J. **Introductory Mining Engineering.** 2ed. USA: 2002. ISBN 0-471-34851-1.

HYUNDAI. **Escavadeira R330LC-9S.** Coreia, 2012. Disponível em: <http://www.hhib.com.br/conteudo/categoria_produtos/manual/R330LC-9S.pdf>. Acesso em: 09/03/2018.

LAMGHARI, A.; DIMITRAKOPOULOS, R.; FERLAND, J. A. A hybrid method based on linear programming and variable neighborhood descent for scheduling production in open-pit mines. **J Glob Optim**, v. 63, p. 555-582, 2015.

LAVA MINING AND QUARRYING CO. **Gypsum Quarry (Altsi).** Paiania-Attica, 2017. Disponível em: <<http://www.lava.gr/en/whoweare/facilities/mine-plaster-Altsi/>>. Acesso em: 03/07/2017.

LIEBHERR. **Technical data Hydraulic crawler crane HS895 HD.** Áustria, 2011. Disponível em: <<https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/248720/liebherr-HS-895-technical-data-sheet-specifications-english.pdf>>. Disponível em: 11/03/2018.

MACÊDO, G.; ALFONSO, P.; SOUZA, J. C. Lavra em Tiras – Uma alternativa econômica e ambiental na mineração de gipsita no Pólo Gesseiro do Araripe. **Congresso Brasileiro de Mina à Céu Aberto.** Belo Horizonte, 2012.

MANSO, C. L. C.; HESSEL, M. H. Novos equinoides (Echinodermata: Echinoidea) do Albiano da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 187-197, 2012.

MERCEDES-BENZ. **AXOR 3344 6x4 Basculante**. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.mercedes-benz.com.br/resources/files/documentos/caminhoes/axor/dados-tecnicos/v4_Axor-3344-6x4-Basculante-Fora-de-Estrada-B09916615.pdf>. Acesso em: 09/03/2018.

MINERAÇÃO UNIBH BLOGSPOT. **Tecnologia em Mineração**. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<http://mineracaounibh.blogspot.com.br/2015/11/>>. Acesso em: 03/07/2017.

OLOFSSON, S. **Applied Explosives Technology**. Suécia: APPEX, 2002. ISBN 91-7970-634-7.

PERONI, R. L. **Lavra à Céu Aberto - Teoria e Prática**. Porto Alegre, p.34. 2007. (Apostila).

PHATUB. **Nakhon Sawan Gypsum Mining**. Tailândia, 2016. Disponível em: <<http://phatub.com/portfolio/nakhon-sawan-gypsum-mining/?lang=en>>. Acesso em: 30/06/2017.

PW HIDROPNEUMÁTICA. **Perfuratriz PWHP-121LS / 126LS / 131LS / 135LS**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.pwhidro.com.br/produtos/perfuratrizes/pwhp-121ls-126ls-131ls-135ls/>>. Acesso em: 09/03/2018.

PW HIDROPNEUMÁTICA. **PWH-5000 Carreta de Perfuração Standard e com Rotator**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.pwhidro.com.br/produtos/carretas/carreta-de-perfuracao-pwh-5000-standard-e-pwh-5000-com-rotator/>>. Acesso em: 09/03/2018.

RECEITA FEDERAL. **Depreciação de bens**. 2018. Disponível em: <<http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/anexoOutros.action?idArquivoBinario=36085>>. Acesso em: 11/03/2018.

RICARDO, H.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação - Terraplenagem e Escavação de Rocha**. 3ed. São Paulo: 2007. ISBN 978-85-7266-195-9.

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**, v. 42, n. 2, p. 281-292, 2012.

ROCHA, L. C. **Desenvolvimento de Lavra à Céu Aberto e Subterrânea-Operações Unitárias na Mineração**. 2017. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/224374398/3-E-4-AULA-OPERACOES-UNITARIAS-NA-MINERACAO-ACESSO-ppt?irgwc=1&content=123201&campaign=adgoal%20GmbH&ad_group=at105298_a151464_m12_p6472_cBR&keyword=&source=impactradius&medium=affiliate>.

Acesso em: 04/07/2017.

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**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.

ROCHA, S. S. **Análise Comparativa dos Benefícios Econômicos Operacionais e Ambientais do Método Terrace Mining na Mineração de Gipsita do Polo Gesseiro do Araripe**. 2017. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SHISHVAN, M. S.; SATTARVAND, J. Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 211, p. 184-197, 2015.

SILVA, N. C. **Metodologia de Planejamento Estratégico de Lavra incorporando Riscos e Incertezas para a obtenção de Resultados Operacionais**. 2008. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, R. A. **Estudo comparativo de duas alternativas de decapeamento para lavra de gipsita na região do Araripe - PE**. 2013. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SINDUSGESSO. **Simpósio do Pólo Gesseiro do Araripe: Potencialidades, Problemas e Soluções.** Recife, 2014. Disponível em: <<http://www.ipa.br/publicacoes/Relat%C3%B3rio%20apresenta%C3%A7%C3%B5es.pdf>>. Acesso em: 30/06/2017.

SLIDEPLAYER. **MINERAL Resources.** Disponível em: <<http://slideplayer.com/slide/4145964/>>. Acesso em: 13 julho 2017.

SME. **Surface Mining.** 2ed. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, 1990. ISBN 0873351029.

SOUZA, J. C. **Métodos de lavra à céu aberto.** Recife, 2001. (Apostila).

SOUZA, J. C. **Aula Ciclo Básico de Mineração à Céu Aberto.** Recife, 2007. (Material Didático).

SOUZA, J. C; SILVA, R. A. **Análise de Risco Aplicada a Avaliação de Projetos de Mineração.** 2014. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências (Material Didático).

VATROSLAWSKI, W. **Largest Gypsum Mine in Russia and Europe.** 2015. Disponível em: <<https://www.slavorum.org/largest-gypsum-mine-in-russia-and-europe/>>. Acesso em: 03/07/2017.

Western Mine Engineering, Inc. **Mine and Mill Equipment Costs - An Estimator's Guide.** USA, 2003. ISSN 1536-7282.

APÊNDICES

APÊNDICE A - FUROS DE SONDAgens

FURO	ZONA	COORDENADAS UTM			ESTÉRIL MINÉRIO	
		ESTE	NORTE	COTA	ARGILA	GIPSITA
F01	24M	335695.0667	9139995.0534	547.046	9	16.5
F02	24M	335694.1667	9139850.8303	548.54	20	0
F03	24M	335687.9206	9139670.9753	547.805	22.5	0
F04	24M	335541.8568	9139966.947	549.495	9	18
F05	24M	335409.5145	9139952.1009	553.763	15	18.5
F06	24M	335248.596	9139939.6993	558.167	13.5	18
F07	24M	335115.903	9139924.5487	561.373	14	11
F08	24M	335289.1189	9140095.2619	554.233	10.8	13
F09	24M	335321.7695	9140252.8624	550.633	13.5	8
F10	24M	335498.2128	9140121.1737	554.233	12.4	21
F11	24M	335429.8785	9140263.3918	554.172	12.4	16.1
F12	24M	335355.6976	9140403.816	550.731	15.5	3
F13	24M	335196.0867	9140350.7816	557.368	29.5	0
F14	24M	335121.1661	9140619.7072	548.576	26	0
F15	24M	335585.5375	9139810.4784	552.742	15	8.5
F16	24M	335575.7308	9139650.1221	556.959	8	18
F17	24M	335598.7653	9139492.1979	554.405	10	13.5
F18	24M	335637.929	9139333.5539	553.852	11	17
F19	24M	335675.1175	9139182.2092	556.001	33	0
F20	24M	335796.1732	9139017.4513	567.574	20	0
F21	24M	335826.7261	9139284.6587	557.502	27	0
F22	24M	335806.7544	9139488.9132	555.086	10	1
F23	24M	335816.9271	9139639.9876	554.025	20	0
F24	24M	335889.6465	9139835.0974	548.894	23	0
F25	24M	336135.676	9139823.0273	551.65	2.5	8.5
F26	24M	336276.4932	9139811.416	556.445	12	0
F27	24M	335428.6524	9139801.4485	554.785	20	13.5
F28	24M	335452.2256	9139629.9343	556.425	13	21
F29	24M	335471.9751	9139459.7545	559.493	27	17.4
F30	24M	335494.3375	9139286.8212	558.307	17.5	25
F31	24M	335552.2629	9139151.1574	556.523	15.6	3
F32	24M	335250.3827	9139780.3146	559.231	14.5	21.5
F33	24M	335259.8086	9139632.5277	557.011	21	22
F34	24M	335286.5707	9139474.7214	560.278	34	17
F35	24M	335295.8119	9139317.5576	563.044	45	0
F36	24M	335088.3458	9139766.8915	565.068	16	21
F37	24M	335112.8238	9139573.1197	558.072	22	22
F38	24M	335125.4602	9139413.1162	564.138	35	0
F39	24M	335230.7139	9139169.1626	562.404	33	21
F40	24M	335386.8402	9139120.2763	557.991	19.5	9
F41	24M	335138.8332	9140133.3292	556.408	12	12

**APÊNDICE B - ARQUIVOS COLLAR E GEOLOGY PARA ENTRADA NO
STUDIO 3**

BHID	XCOLLAR	YCOLLAR	ZCOLLAR
F01	335695,0667	9139995,0534	547,046
F02	335694,1667	9139850,8303	548,540
F03	335687,9206	9139670,9753	547,805
F04	335541,8568	9139966,9470	549,495
F05	335409,5145	9139952,1009	553,763
F06	335248,5960	9139939,6993	558,167
F07	335115,9030	9139924,5487	561,373
F08	335289,1189	9140095,2619	554,233
F09	335321,7695	9140252,8624	550,633
F10	335498,2128	9140121,1737	554,233
F11	335429,8785	9140263,3918	554,172
F12	335355,6976	9140403,8160	550,731
F13	335196,0867	9140350,7816	557,368
F14	335121,1661	9140619,7072	548,576
F15	335585,5375	9139810,4784	552,742
F16	335575,7308	9139650,1221	556,959
F17	335598,7653	9139492,1979	554,405
F18	335637,9290	9139333,5539	553,852
F19	335675,1175	9139182,2092	556,001
F20	335796,1732	9139017,4513	567,574
F21	335826,7261	9139284,6587	557,502
F22	335806,7544	9139488,9132	555,086
F23	335816,9271	9139639,9876	554,025
F24	335889,6465	9139835,0974	548,894
F25	336135,5760	9139823,0273	551,650
F26	336276,4932	9139811,4160	556,445
F27	335428,6524	9139801,4485	554,785
F28	335452,2256	9139629,9343	556,425
F29	335471,9751	9139459,7545	559,493
F30	335494,3375	9139286,8212	558,307
F31	335552,2629	9139151,1574	556,523
F32	335250,3827	9139780,3146	559,231
F33	335259,8086	9139632,5277	557,011
F34	335286,5707	9139474,7214	560,278
F35	335295,8119	9139317,5576	563,044
F36	335088,3458	9139766,8915	565,068
F37	335112,8238	9139573,1197	558,072
F38	335125,4602	9139413,1162	564,138
F39	335230,7139	9139169,1626	562,404
F40	335386,8402	9139120,2763	557,991
F41	335138,8332	9140133,3292	556,408

BHID	FROM	TO	ROCK	ESP
F01	0	9	1	0
F01	9	25.5	2	16.5
F01	25.5	35.5	3	0
F02	0	20	1	0
F02	20	30	3	0
F03	0	22.5	1	0
F03	22.5	32.5	3	0
F04	0	9	1	0
F04	9	27	2	18
F04	27	37	3	0
F05	0	15	1	0
F05	15	33.5	2	18.5
F05	33.5	43.5	3	0
F06	0	13.5	1	0
F06	13.5	31.5	2	18
F06	31.5	41.5	3	0
F07	0	14	1	0
F07	14	25	2	11
F07	25	35	3	0
F08	0	10.8	1	0
F08	10.8	23.8	2	13
F08	23.8	33.8	3	0
F09	0	13.5	1	0
F09	13.5	21.5	2	8
F09	21.5	31.5	3	0
F10	0	12.4	1	0
F10	12.4	33.4	2	21
F10	33.4	43.4	3	0
F11	0	12.4	1	0
F11	12.4	28.5	2	16.1
F11	28.5	38.5	3	0
F12	0	15.5	1	0
F12	15.5	18.5	2	3
F12	18.5	28.5	3	0
F13	0	29.5	1	0
F13	29.5	39.5	3	0
F14	0	26	1	0
F14	26	36	3	0
F15	0	15	1	0
F15	15	23.5	2	8.5
F15	23.5	33.5	3	0
F16	0	8	1	0
F16	8	26	2	18

F16	26	36	3	0
F17	0	10	1	0
F17	10	23.5	2	13.5
F17	23.5	33.5	3	0
F18	0	11	1	0
F18	11	28	2	17
F18	28	38	3	0
F19	0	33	1	0
F19	33	43	3	0
F20	0	20	1	0
F20	20	30	3	0
F21	0	27	1	0
F21	27	37	3	0
F22	0	10	1	0
F22	10	11	2	1
F22	11	21	3	0
F23	0	20	1	0
F23	20	30	3	0
F24	0	23	1	0
F24	23	33	3	0
F25	0	2.5	1	0
F25	2.5	11	2	8.5
F25	11	21	3	0
F26	0	12	1	0
F26	12	22	3	0
F27	0	20	1	0
F27	20	33.5	2	13.5
F27	33.5	43.5	3	0
F28	0	13	1	0
F28	13	34	2	21
F28	34	44	3	0
F29	0	27	1	0
F29	27	44.4	2	17.4
F29	44.4	54.4	3	0
F30	0	17.5	1	0
F30	17.5	42.5	2	25
F30	42.5	52.5	3	0
F31	0	15.6	1	0
F31	15.6	18.6	2	3
F31	18.6	28.6	3	0
F32	0	14.5	1	0
F32	14.5	36	2	21.5
F32	36	46	3	0
F33	0	21	1	0

F33	21	43	2	22
F33	43	53	3	0
F34	0	34	1	0
F34	34	51	2	17
F34	51	61	3	0
F35	0	45	1	0
F35	45	55	3	0
F36	0	16	1	0
F36	16	37	2	21
F36	37	47	3	0
F37	0	22	1	0
F37	22	44	2	22
F37	44	54	3	0
F38	0	35	1	0
F38	35	45	3	0
F39	0	33	1	0
F39	33	54	2	21
F39	54	64	3	0
F40	0	19.5	1	0
F40	19.5	28.5	2	9
F40	28.5	38.5	3	0
F41	0	12	1	0
F41	12	24	2	12
F41	24	34	3	0

ANEXO A - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO PLANIALTIMÉTRICO

