

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

**ESTUDO COMPARATIVO SOBRE A OPERACIONALIZAÇÃO DA LAVRA EM
TIRAS PARA UM DEPÓSITO HIPOTÉTICO DE CARVÃO MINERAL**

Aluno: Vitor Moreira Campos

Orientador: Prof^a. Viviane Borges

Julho 2018

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho
aos meus pais, Edna e Duílio,
aos meus avós e tiavó, Cristina e Antônio, Luiza e Mário e Ester,
a toda minha família,
a todos que participaram e acreditaram nesta jornada.*

AGRADECIMENTOS

- À UFMG por todo o conhecimento adquirido.
- A minha família, por todo o suporte, educação e amor recebidos.
- Ao meu primo Rafael, por sempre ter sido um exemplo para mim.
- A minha namorada Flávyá por todo amor e companheirismo.
- A minha orientadora, Prof^ª. Viviane Borges, pela atenção.
- Aos amigos e amigas da MCB, por todo apoio e auxílio durante o desenvolvimento do trabalho.
- A Deswik, por fornecer a ferramenta que viabilizou a execução do estudo.
- Ao Engenheiro de Minas Bernardo Gomes.
- Aos amigos Luca, Matheus, Pedro e todos os integrantes da melhor sala (2012/2) que a UFMG já presenciou em sua história.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	MÉTODO DE LAVRA EM TIRAS	14
3.2	OPERAÇÕES UNITÁRIAS	16
3.2.1	LIMPEZA VEGETAL	16
3.2.2	DECAPEAMENTO	17
3.2.3	LAVRA	20
3.2.4	REABILITAÇÃO	24
3.3	MINERADOR DE SUPERFÍCIE	25
3.3.1	FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO	25
3.3.1.1	METODOLOGIA DE CORTE	28
3.3.1.2	METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE PRODUTIVIDADE	30
3.3.2	METODOLOGIAS DE LAVRA	32
3.3.2.1	MÉTODOS BASEADOS NO TIPO DE MOVIMENTAÇÃO	32
3.3.2.2	MÉTODOS BASEADOS NO TIPO DE CARREGAMENTO	35
3.3.2.3	IMPACTOS AMBIENTAIS DECORRENTES DA UTILIZAÇÃO DO MINERADOR DE SUPERFÍCIE	37
4	METODOLOGIA	40
4.1	SOFTWARE DESWIK	40
4.2	ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS	40
4.2.1	MODELO GEOLÓGICO	41
4.2.2	CUBAGEM DO DEPÓSITO	43
4.2.3	GEOMETRIA DAS TIRAS	44
4.2.4	DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS	45
4.2.4.1	MÉTODO COMBINADO	46
4.2.4.2	MÉTODO PERFURAÇÃO E DESMONTE	47
4.2.5	FUNÇÃO BENEFÍCIO	48
4.3	SEQUENCIAMENTO	49
4.3.1	PREMISSAS	50
4.3.2	DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54

5.1	COMPARATIVO DE CENÁRIOS	54
5.1.1	COMPARATIVO FÍSICO	54
5.1.2	COMPARATIVO ECONÔMICO	58
6	CONCLUSÕES	63
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS.....	65
	APÊNDICE 1 – EQUAÇÕES DA FUNÇÃO BENEFÍCIO	66
	APÊNDICE 2 - DETALHAMENTO ECONÔMICO	67

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMATIZAÇÃO DE UMA LAVRA EM TIRAS (SEIB,2014)	15
FIGURA 2: LIMPEZA DE VEGETAÇÃO	16
FIGURA 3: EXEMPLO DE CAST BLASTING	18
FIGURA 4: UTILIZAÇÃO DE TRATORES DE ESTEIRA PARA TERRAPLANAGEM	19
FIGURA 5: DIAGRAMA DE OPERAÇÃO DO DRAGLINE (ADAPTADO MEA)	19
FIGURA 6: CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS SEGUNDO DIFERENTES SITUAÇÕES DE DECAPEAMENTO (KENNEDY, 1990 APUD OTTONI, 2017)	20
FIGURA 7: EXEMPLIFICAÇÃO DE LAVRA DE CARVÃO COM ESCAVADEIRAS	21
FIGURA 8: MINERADOR DE SUPERFÍCIE – DIRECT LOADING	22
FIGURA 9: MINERADOR DE SUPERFÍCIE WIRTGEN (WIRTGEN)	25
FIGURA 10: DISPOSIÇÃO E MOVIMENTAÇÃO DAS ESTEIRAS ROLANTES (WIRTGEN)	26
FIGURA 11: DISPOSIÇÃO DO TAMBOR DE CORTE (WIRTGEN)	27
FIGURA 12: PROCESSO DE CORTE E TRANSPORTE EM CORREIA (SEIB,2014)	27
FIGURA 13: MINERADORES DE SUPERFÍCIE COM E SEM ESTEIRA INTERNA (WIRTGEN)	28
FIGURA 14: SUMPING (ONEDERRA,2014)	29
FIGURA 15: SHEARING (ONEDERRA,2014)	29
FIGURA 16: ESQUEMATIZAÇÃO DE OPERAÇÃO DO TAMBOR DE CORTE (WIRTGEN)	30
FIGURA 17: DISCO DE CORTE DE UM MINERADOR DE SUPERFÍCIE (WIRTGEN)	30
FIGURA 18: ESQUEMATIZAÇÃO DO MÉTODO TRAVEL BACK (SEIB, 2014)	33
FIGURA 19: ESQUEMATIZAÇÃO DO MÉTODO TURN BACK (SEIB, 2014)	34
FIGURA 20: ESQUEMATIZAÇÃO DO MÉTODO CONTÍNUO (SEIB, 2014)	34
FIGURA 21: DIMENSÕES DE UM MINERADOR DE SUPERFÍCIE	35
FIGURA 22: ESQUEMATIZAÇÃO DIRECT LOADING	36
FIGURA 23: ESQUEMATIZAÇÃO SIDE CASTING	36
FIGURA 24: ESQUEMATIZAÇÃO WINDROWING	37
FIGURA 25: ETAPAS SUBSTITUÍVEIS PELO MINERADOR DE SUPERFÍCIE	38
FIGURA 26: SUPERFÍCIES TRANSLADADAS	41
FIGURA 27: ESTRATIGRAFIA DO DEPÓSITO	42
FIGURA 28: VISÃO ISOMÉTRICA DE PARTE DO DEPÓSITO	43
FIGURA 29: CUBAGEM DO DEPÓSITO	44
FIGURA 30: DIMENSÕES DAS TIRAS DE LAVRA	45
FIGURA 31: DEPÓSITO DE CARVÃO – CENÁRIO MÉTODO COMBINADO	46
FIGURA 32: CUBAGEM DEPÓSITO – CENÁRIO MÉTODO COMBINADO	47
FIGURA 33: DEPÓSITO DE CARVÃO – CENÁRIO MÉTODO PERFURAÇÃO E DESMONTE	48
FIGURA 34: CUBAGEM DEPÓSITO – CENÁRIO MÉTODO PERFURAÇÃO E DESMONTE	48
FIGURA 35: CUSTOS DOS CENÁRIOS E PREÇO DE VENDA	49
FIGURA 36: METAS DE SEQUENCIAMENTO	50
FIGURA 37: MINERADOR DE SUPERFÍCIE WIRTGEN 2200	51
FIGURA 38: ESCAVADEIRA CATERPILLAR 374	51
FIGURA 39: CUSTOS DE AQUISIÇÃO DE EQUIPAMENTOS	52
FIGURA 40: PRODUTIVIDADE E QUANTIDADE DE EQUIPAMENTOS	53
FIGURA 41: DIFERENÇAS ESTRATIGRÁFICAS ENTRE OS CENÁRIOS	55
FIGURA 42: COMPARATIVO FÍSICO	56
FIGURA 43: GRÁFICO DE PODER CALORÍFICO	57

FIGURA 44: GRÁFICO DE CARBONO FIXO.....	57
FIGURA 45: GRÁFICO DE MASSA DE PRODUTO.....	57
FIGURA 46: GRÁFICO DE COMPARATIVO ECONÔMICO	59
FIGURA 47: GRÁFICO DE COMPARATIVO DE CUSTOS	60
FIGURA 48: CAPEX TOTAL PARA OS CENÁRIOS	60
FIGURA 49: VPL DO CENÁRIO DO MÉTODO COMBINADO	61
FIGURA 50: VPL DO CENÁRIO DO MÉTODO PERFURAÇÃO E DESMONTE	62
FIGURA 51: DETALHAMENTO ECONÔMICO DO MÉTODO COMBINADO.....	67
FIGURA 52: DETALHAMENTO ECONÔMICO DO MÉTODO PERFURAÇÃO E DESMONTE	68

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DO MINERADOR DE SUPERFÍCIE (ELABORAÇÃO DO PRÓPRIO AUTOR).....	23
TABELA 2: COMPARATIVO DE EQUIPAMENTOS (ADAPTADO AYKUL ET AL, 2007)	24
TABELA 3: DETERMINAÇÃO DO CUTTABILITY INDEX (ORIGLIASSO ET AL, 2013)	31
TABELA 4: CLASSIFICAÇÃO DE CI (ADAPTADO ORIGLIASSO ET AL, 2013)	32

RESUMO

O método de lavra em tiras é geralmente aplicado a depósitos tabulares planos ou com suave mergulho. Este tipo de metodologia engloba operações unitárias tais como: limpeza vegetal, decapeamento, lavra e reabilitação e é principalmente empregada para commodities como carvão mineral, bauxita e em algumas situações para calcário. Diversos equipamentos são utilizados durante a execução de cada uma destas operações unitárias, dentre os mais comuns estão os Draglines, tratores de esteira (dozers), escavadeiras hidráulicas ou a cabo, perfuratrizes e equipamentos de transporte. Os mineradores de superfície são equipamentos que também podem ser empregados nas operações de lavra em tiras. São equipamentos que possuem como principal característica e vantagem a seletividade de lavra que proporcionam. Com o intuito de comparar a eficiência da utilização dos mineradores de superfície com as técnicas tradicionais de perfuração e desmonte, desenvolveu-se um estudo considerando uma base de dados hipotética de um depósito de carvão mineral. O depósito apresenta em sua composição uma massa total de minério de 12,72 milhões de toneladas e uma massa de estéril de 56,9 milhões de toneladas de estéril se alternando em camadas. O depósito foi dividido em um total de 30 tiras com dimensões de 100 metros de largura por 200 metros de comprimento. Durante a comparação dos cenários de método combinado (que utiliza o minerador de superfície para a lavra do minério e camadas pouco espessas de de estéril, e operações de perfuração e desmonte para camadas espessas de estéril) e de método de perfuração e desmonte (aplicado para todas as camadas do depósito) foi possível perceber que devido à maior seletividade obtida durante a lavra do minério, as operações do cenário do método combinado resultaram em uma produção de produto de carvão de 0,77 milhões de toneladas a mais em relação ao outro cenário. Além disso a utilização do método combinado resultou em um valor presente líquido (VPL) para o projeto de US\$ 45.003.919,90, enquanto o cenário do método de perfuração e desmonte inviabilizou as operações com um valor de VPL negativo. Dessa forma foi possível perceber que a seletividade fornecida pela utilização do minerador de superfície nas operações de lavra foi vital para a viabilização do empreendimento.

Palavras-chave: lavra em tiras, carvão, mineradores contínuos, decapeamento.

ABSTRACT

The strip mining method is generally applied to flat tabular deposits or with gentle dip. This type of methodology encompasses unit operations such as: pre-stripping, Overburden removal, mining and rehabilitation and is mainly used for commodities such as coal, bauxite and in some situations for limestone. Various equipments are used during the execution of each one of these unit operations, among the most common are Draglines, dozers, hydraulic or cable excavators, drills and transport equipment. Surface miners are equipment that can also be used in strip mining operations. They are equipments that have as main characteristic and advantage the selectivity of mining that they provide. In order to compare the efficiency of using of surface miners with the traditional techniques of drill and blast, a study was developed considering a hypothetical database of a deposit of mineral coal. The deposit has a total ore mass of 12.72 million tons and a mass of waste of 56.9 million tons. The deposit was divided into a total of 30 strips with dimensions of 100 meters wide by 200 meters long. During the comparison of the combined method scenarios (using surface mining for ore mining and thin layers of waste, drill and blast operations for thick layers of waste) and drill and blast method (applied for all layers of the deposit), it was possible to notice that due to the greater selectivity obtained during the mining of the ore, the operations of the combined method scenario resulted in a production of coal product of 0.77 million tons more than the other scenario. In addition, the use of the combined method resulted in a NPV for the project of US \$ 45,003,919.90, while the scenario of drill and blast resulted in an unfeasible solution for the operations due to a negative value of NPV obtained. As a result, it was possible to notice that the selectivity provided by the use of the surface miner in the mining operations was vital for the viability of the project.

Key-words: strip mining , coal, surface miners, overburden removal

1 INTRODUÇÃO

A metodologia de lavra a céu aberto aplicada para depósitos de carvão, bauxita e, em algumas situações, para calcário, geralmente é a lavra em tiras. Esta metodologia de exploração mineral é aplicada principalmente devido às características geométricas dos depósitos das commodities citadas, que em sua grande maioria ocorrem de forma tabular (planas ou com baixos gradientes de inclinação) e com grandes extensões. No caso dos depósitos de carvão, por serem de origem sedimentar, apresentam camadas de minério muitas vezes intercaladas com camadas de rocha estéril, tais como: arenitos, siltitos e argilitos. Dessa forma o processo de lavra ocorre em sua grande maioria em etapas de alternância de remoção de estéril e minério, onde a seletividade do processo de lavra é vital para a otimização dos processos de beneficiamento mineral e rentabilidade do empreendimento.

Segundo Dyer e Hill (2011), o processo de lavra em tiras engloba atividades cíclicas que compreendem as etapas de remoção da superfície vegetal e camada de solo com estocagem destes materiais, decapeamento de estéril, empilhamento do material estéril, lavra alternada (entre as camadas de estéril e minério), recomposição da topografia original e reposição do solo e vegetação natural da área. Usualmente os principais tipos de equipamento de infraestrutura e carga empregados nestes processos são respectivamente: os tratores de esteira (“Dozers”), draglines e escavadeiras, porém, a metodologia de lavra descrita também possibilita a utilização de mineradores contínuos de superfícies (os chamados “Surface Miners”) como alternativa para obtenção de uma maior seletividade durante as operações de lavra.

O presente trabalho foi desenvolvido com a utilização do software Deswik. Este software por possuir origem australiana é dotado de ferramentas específicas e eficientes para lidar com o processo de planejamento de lavra (nos âmbitos de longo, médio e curto prazo) de lavras em tira para depósitos de carvão. O estudo de caso presente no corpo do trabalho foi baseado em uma base de dados hipotética, criada especialmente para a presente análise, e para a construção da base mencionada foram utilizadas referências dos mais diversos depósitos de carvão mineral presentes especialmente na região de Queensland, Austrália e aqueles localizados na região sul do Brasil.

2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é apresentar as principais etapas envolvidas no processo de lavra em tiras para um depósito de carvão mineral e principalmente evidenciar, as vantagens no emprego dos mineradores de superfície frente às convencionais metodologias de uso de explosivos e escavadeiras nas etapas de lavra por meio de um estudo de caso comparativo. Além disso, este trabalho visa propiciar uma fonte acessível de informações para alunos e empresas do ramo que possuam interesse na aplicação da tecnologia dos mineradores de superfície.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MÉTODO DE LAVRA EM TIRAS

O processo de determinação do método de lavra a ser utilizado dentro de um empreendimento mineiro leva em consideração uma série de fatores tais como: aspectos geométricos do corpo mineral, materiais contidos dentro da reserva estabelecida, propriedades mecânicas das rochas consideradas, investimentos capitais disponíveis, aspectos socioambientais, equipamentos disponíveis, teores estimados dentro da reserva, análises de segurança, entre outros (NELSON, 2011). De acordo com informações contidas no livro *Surface Strip Coal Mining Handbook* (SACMA) 2005, os principais passos a serem seguidos no processo de determinação da metodologia de lavra a ser aplicada são:

- I. Identificação dos limites de área licenciada e mapeamento dos direitos minerários;
- II. Detalhamento dos recursos geológicos contendo extensão do corpo, profundidade, quantificação de estéril e minério, características geotécnicas e mecânicas, teores e contaminantes e mapeamento de estruturas geológicas (tais como falhas, fraturas, etc);
- III. Análise de infraestrutura existente no local (estradas de acesso, recursos hídricos, áreas residenciais, distribuição de energia, regiões de proteção ambiental entre outras);
- IV. Equipamentos, tecnologia e procedimentos de gestão disponíveis;
- V. Estimativas de custos de processamento e lavra;
- VI. Análise e identificação de riscos associados às atividades humanas;

De acordo Dyer e Hill (2011), o método de lavra em tiras possui grande adequação para depósitos com geometria tabular, que possuem estruturas dispostas em camadas horizontais ou com pequenos gradientes de inclinação e que não estejam dispostos em grandes profundidades. Ainda segundo os autores, a aplicação desta metodologia engloba commodities tais como fosfato, bauxita, areias betuminosas, manganês e principalmente carvão mineral.

Otoni (2017) pontua em seu trabalho que a principal diferença existente entre a metodologia de lavra em tiras e a lavra a céu aberto convencional (com utilização de bancadas) é a forma de como os métodos lidam com o material estéril removido durante as operações. O autor especifica que diferentemente do processo que ocorre nas operações de lavra a céu aberto por bancadas, o estéril removido com o método em tiras é, majoritariamente, depositado nas áreas adjacentes (tiras) previamente lavradas evitando assim que o material seja disposto em pilhas de estéril fora da região de lavra. Esse fato faz com que o impacto socioambiental do método de lavra em tiras seja menor em comparação aos demais métodos a céu aberto.

O método de lavra em tiras é considerado como um método de alta produtividade onde geralmente é possível obter grandes valores anuais de movimentação de material. Nos processos de lavra geralmente têm-se a remoção da primeira camada de estéril, denominada “*Overburden*”, com utilização de maquinários de alta produtividade, tais como “*Draglines*” e técnicas de desmonte com explosivos que projetam o material (*Cast Blasting* ou *Throw Blasting*). O método trabalha com angulações de faces produtivas (*Highwall*) variando entre 60° e 70° conforme a competência da rocha, e ângulos de pilhas de estéril variando entre 35° a 50° (SEIB, 2014). A Figura 1 abaixo ilustra de forma simplificada a esquematização de uma lavra em tiras convencional de carvão.



FIGURA 1: Esquematização de uma lavra em tiras (SEIB,2014)

3.2 OPERAÇÕES UNITÁRIAS

Os procedimentos sequenciais de execução de uma lavra em tiras são pontuados por Hartman e Mutmansky (2002) como sendo: limpeza vegetal, decapeamento, lavra e reabilitação.

3.2.1 LIMPEZA VEGETAL

Em grande parte dos casos, as regiões de lavra são recobertas com vegetações com variados portes. Previamente às atividades de lavra se iniciarem é necessário que toda a camada vegetal seja removida de forma a expor o solo orgânico que será também removido, juntamente com as camadas de estéril (*Overburden*) durante o processo de decapeamento.

Para a realização dos processos de limpeza vegetal, são utilizados tratores de esteira (*Dozers*), escavadeiras e em situações de difícil acesso para equipamentos de grande porte, a mão de obra humana é utilizada por meio de serras elétricas. A Figura 2 abaixo ilustra o processo de remoção da vegetação.



FIGURA 2: Limpeza de vegetação

Durante a realização dessas atividades, é de grande importância que espécies de plantas presentes na região sejam estocadas de forma a possibilitar uma futura reintrodução das mesmas na região, durante a etapa de reabilitação.

3.2.2 DECAPEAMENTO

O início dos procedimentos de decapeamento começam logo após a remoção da camada vegetal, com a retirada da camada de solo orgânico. Durante os processos de remoção de solo, equipamentos escarificadores, como escavadeiras e tratores de esteira, são utilizados. De acordo com Dyer e Hill (2011), geralmente as camadas de solo orgânico são estocadas em pilhas especiais de forma a não entrar em contato com os demais materiais estéreis. Este procedimento é realizado principalmente visando manter as características originais do material orgânico para que os processos de reabilitação sejam facilitados, reduzindo assim os impactos ambientais decorrentes da atividade mineradora. Os autores ainda ressaltam que em algumas situações, onde as diferentes etapas de execução da lavra em tiras ocorrem em paralelo (como ilustrado na Figura 1), é possível transportar a camada de solo orgânico, retirada de uma região que ainda será lavrada, diretamente para uma área da mina onde os processos de reabilitação já se iniciaram. Este processo potencializa a capacidade de reabilitação da área uma vez que o material orgânico é repostado “fresco”, ou seja, com suas propriedades originais pouco alteradas.

As etapas seguintes do decapeamento consistem na remoção do material estéril presente na camada acima do minério (*Overburden*). De acordo com SACMA (2005) as operações de remoção da camada de “*Overburden*” correspondem a uma das mais importantes do processo de execução da lavra em tiras. Esse fato se deve principalmente ao tempo gasto e aos custos associados a este processo. A grande quantidade de massa que deve ser removida, juntamente com o custo associado à necessidade de utilização de equipamentos de grande porte específicos para este tipo de carregamento (tais como “*Draglines*” ou Dragas de araste, “*Bucket Wheel excavators*” e etc) fazem com que os processos de decapeamento sejam responsáveis por uma parte considerável dos custos capitais e operacionais (CAPEX e OPEX), fato que é salientado por Ottoni (2017) em seu trabalho de conclusão de curso.

O processo de remoção do “*Overburden*” com utilização de “*Draglines*” geralmente segue um fluxo de atividades que são:

- I. Utilização de técnicas de perfuração e desmonte para fragmentar o material a ser removido e facilitar o processo de movimentação do material pelos equipamentos de carga. Uma das técnicas utilizadas para otimizar o tempo gasto na etapa de decapeamento é a utilização da técnica do “*Cast Blasting*” onde os furos de desmonte e o material explosivo (usualmente ANFO ou emulsões) são dispostos de tal forma a “projetar” uma fração considerável do “*Overburden*” em direção à área desejada para disposição do material (Seib, 2014) Esse procedimento reduz consideravelmente a quantidade de material a ser movimentado pelos equipamentos de carga resultando em uma diminuição do chamado “*Rehandle*”, que é a necessidade de movimentar uma mesma porção do material mais de uma vez para se atingir a posição desejada. De acordo com Dyer e Hill (2011), a utilização desta técnica de desmonte pode direcionar cerca de 30% ou mais do material a ser removido diretamente para a posição final. A Figura 3 ilustra a metodologia “*Cast Blasting*”.



FIGURA 3: Exemplo de cast blasting

- II. Utilização de tratores de esteira (*Dozers*) para realizar a terraplanagem do material desmontado a fim de propiciar um assoalho adequado para que a “*Dragline*” possa se posicionar para realizar a movimentação restante do material estéril. A Figura 4 abaixo ilustra o procedimento de terraplanagem.



FIGURA 4: Utilização de tratores de esteira para terraplanagem

- III. Utilização da “*Dragline*” para dispor o material desmontado em pilhas localizadas na tira que foi previamente lavrada. Neste processo o equipamento de carga assume diferentes posições a fim de possibilitar a movimentação do material para o destino correto.

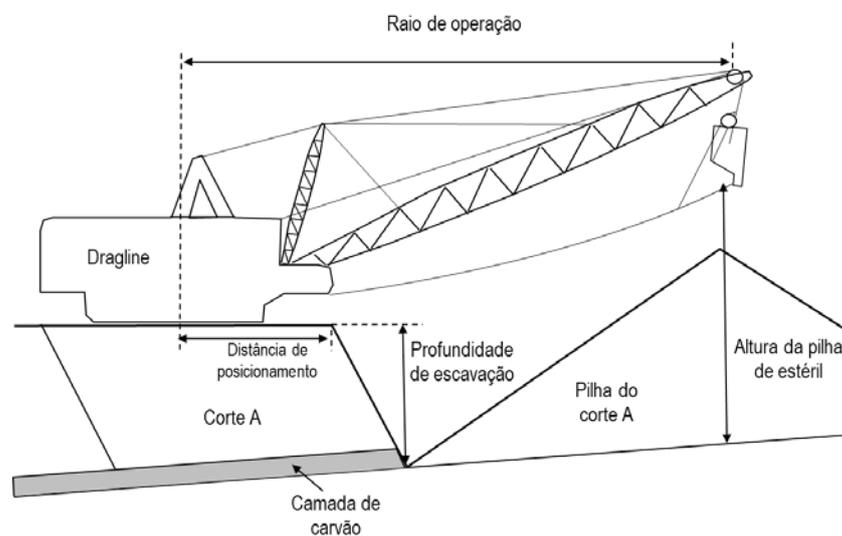


FIGURA 5: Diagrama de operação do dragline (ADAPTADO MEA)

É importante salientar que os procedimentos descritos são cabíveis de alterações de acordo com as condições da reserva, dureza das rochas, condições topográficas e os equipamentos a serem utilizados. A Figura 6 abaixo ilustra os principais tipos de

equipamentos utilizados nos processos de decapeamento bem como suas aplicabilidades dependendo das características da reserva.

		Draga de Arrastre	Escavadeira	Escavadeira + Caminhão	Carregadeira Frontal	Trator	Carregadeira Frontal e Caminhão	Bucket Wheel Excavator
Espessura de capeamento (m)	0 a 10	2	1	1	1	1	1	1
	10 a 20	1	1	1	2	2	2	1
	20 a 30	1	1	1	3	3	3	2
	> 30	1	2	2	-	4	-	3
Características	Compacto	2	1	1	3	1	3	-
	Moderadamente compacto	1	1	1	2	1	2	-
	Pouco compacto	1	1	1	1	1	1	3
	Inconsolidado	1	1	1	1	1	1	1
Distância de Transporte (m)	15 a 45	1	3	-	1	1	-	3
	45 a 90	1	-	2	1	1	-	1
	90 a 150	2	-	1	2	2	3	2
	150 a 300	-	-	1	-	-	1	-
Características do suporte da camada de minério	Bom (Rocha dura)	1	1	1	1	1	1	1
	Moderado	1	2	2	1	1	1	1
	Ruim	1	4	4	2	1	2	2
Capacidade de segregação	-	C	A	A	A	A	A	A
Capacidade de produção		A	A	A	A	A	A	A
Flexibilidade sob condições do terreno	Boa	A	A	A	A	A	A	B
	Média	A	B	B	B	A	A	B
	Ruim	A	C	C	C	B	B	C
Mobilidade		C	A	A	A	A	A	C
1	Deve ser considerado							
2	Pode ser considerado							
3	Pode ser considerado sob certas condições							
4	Pode ser considerado em situações especiais							
A	Alto							
B	Média							
C	Baixa							

FIGURA 6: Classificação dos equipamentos segundo diferentes situações de decapeamento (KENNEDY, 1990 APUD OTTONI, 2017)

3.2.3 LAVRA

Uma vez concluída a etapa de remoção do capeamento, inicia-se o processo de lavra das camadas de carvão e das camadas de estéril que ocorrem intercaladas com as camadas do minério (*Interburden*). Segundo SACMA (2015) características tais como: dureza do material, dimensões geométricas da tira, níveis de diluição aceitáveis, entre outros, são vitais para a determinação dos equipamentos a serem utilizados na lavra. Para o processo de lavra do carvão, podem-se citar os métodos que utilizam escavadeiras e também os métodos mais seletivos que utilizam os mineradores de superfície. Para a lavra com a utilização de escavadeiras, dependendo das condições de dureza do carvão, o desmonte pode ser feito apenas por processos de escarificação mecânica. Em situações que as camadas de carvão apresentam uma maior resistência, o desmonte é feito por meio de explosivos, tais como ANFO ou emulsões encartuchadas (Dyer e Hill, 2011). De acordo com Ottoni (2017), os

procedimentos de lavra a serem seguidos considerando a utilização de técnicas de desmonte e carregamento por escavadeiras são:

- I. Limpeza de praça de trabalho;
- II. Definição da malha de desmonte e perfuração (dispensável nos desmontes mecânicos);
- III. Desmonte através da utilização de explosivos (dispensável nos desmontes mecânicos);
- IV. Carregamento do material desmontado com a utilização de escavadeiras (elétricas ou hidráulicas);
- V. Transporte do material até sua destinação através da utilização de caminhões ou correias transportadoras.



FIGURA 7: Exemplificação de lavra de carvão com escavadeiras

Já para métodos que possuem foco na seletividade do minério, os mineradores de superfície são empregados. Estes equipamentos, que serão detalhados nas próximas seções deste trabalho, utilizam processos de escarificação de alto desempenho para a remoção das camadas de minério e de *interburden*, fazendo com que o uso de explosivos seja desnecessário. Este fato principal faz com que a porcentagem de diluição durante a lavra seja reduzida quase em sua totalidade. O processo seguido

para a utilização do minerador de superfície na lavra pode ser descrito da seguinte forma:

- I. Limpeza de praça de trabalho;
- II. Aplicação do minerador contínuo para a lavra;
- III. Carregamento simultâneo em caminhões (*Direct Loading*), ou empilhamento do material lavrado no formato de “leiras” para posterior carregamento (*Side Casting*);
- IV. Considerando a metodologia “*Side Casting*”, o material depositado pelo minerador de superfície é então carregado em caminhões através do uso de pás-carregadeiras.



FIGURA 8: Minerador de superfície – direct loading

Apesar de oferecerem uma maior seletividade na remoção do material, as operações de lavra com utilização do minerador contínuo podem resultar em uma produtividade menor quando comparada às operações convencionais de perfuração e desmonte, para certas geometrias e dimensões de tira. Esse fato se deve principalmente à flexibilidade limitada apresentada pelo minerador de superfície, quando comparado com escavadeiras elétricas ou hidráulicas. Adicionalmente, a lavra com utilização do minerador de superfície possui um custo unitário de lavra por tonelada ligeiramente mais elevado para camadas espessas. Entretanto, o cenário de custos se inverte quando considerada camadas com menores espessuras, fazendo com que o custo de

lavra unitário seja menor com a utilização do minerador de superfície (Aykul *et al*,2007).

A utilização dos mineradores de superfície auxilia na mitigação de diversos problemas relacionados com o processo de desmonte de rochas. Dentre as adversidades que podem ocorrer durante o processo de desmonte com explosivos têm-se: projeção de rochas, *Airblast*, geração de vibrações e ruídos (SACMA, 2015).

Seib (2013) pontua as principais vantagens e desvantagens da utilização dos mineradores de superfície frente ao uso de escavadeiras. Estes pontos podem ser visualizados na Tabela 1 abaixo.

TABELA 1: Vantagens e desvantagens do uso do minerador de superfície (elaboração do próprio autor)

Utilização de Mineradores contínuos	
Vantagens	Desvantagens
Controle de fragmentação	Baixa flexibilidade operacional
Redução em custos de britagem primária	Alta variação de produtividade com variação do UCS das rochas
Alta seletividade	Dificuldade de lidar com rochas com umidade elevada
Redução de emissões de particulados, ruídos e vibrações	Baixa produtividade em regiões de curva
Redução de diluição	Elevado CAPEX
Lavra de forma contínua	Número limitado de equipamentos operando simultaneamente

O processo de tomada de decisão em relação ao tipo de maquinário e metodologia a ser empregada nos processos de lavra em tira devem ser analisados em cenários comparativos de forma a se obter as opções mais adequadas à situação considerada. Segundo Aykul *et al* (2007), os fatores mais importantes a serem considerados no processo de seleção de equipamentos são:

- I. Parâmetros geométricos e geológicos do depósito;
- II. Adaptabilidade do método e flexibilidade para mudanças;
- III. Performances de produtividade;
- IV. Vida útil do maquinário
- V. Capacidade dos operários em conduzir os equipamentos;
- VI. Considerações financeiras;
- VII. Necessidade de estação elétrica;
- VIII. Nível de automação dos equipamentos;
- IX. Nível de segurança oferecida;

Em seu estudo de caso a respeito das metodologias para seleção de equipamentos considerando a obtenção de alta seletividade, Aykul *et al* (2007) ilustram a capacidade de adaptação tanto de mineradores de superfície quanto de escavadeiras hidráulicas (atuando sem o auxílio de desmonte por explosivos). A Tabela 2 abaixo ilustra esse comparativo. A atribuição de notas foi dada de 0 a 5 sendo o valor 0 igual a “insuficiente”, valor 1 igual a “Muito Ruim”, 2 igual a “Ruim”, 3 igual a “Moderado”, 4 igual a “Bom” e 5 igual a “Muito Bom”.

TABELA 2: Comparativo de equipamentos (adaptado aykul et al, 2007)

Parâmetros	Prioridade dos parâmetros (%)	Equipamentos	
		Minerador de superfície	Escavadeira Hidráulica
Habilidade de lavra seletiva	0.45	5	4
Performance de produtividade em depósitos horizontais	0.20	5	4
CAPEX e OPEX	0.15	3	5
Vantagens operacionais em zonas de falha geológica	0.05	3	5
Capacidade de alterar condições de assoalho	0.02	4	5
Vantagens em fragmentação de material	0.02	5	3
Flexibilidade	0.05	3	5
Capacidade de ser adaptável aos operadores	0.02	2	5
Manutenção	0.04	2	5
Média (\sum PP x nota dos equipamentos)	-	4.30	4.31
Classificação	-	Muito bom	Muito bom

3.2.4 REABILITAÇÃO

O processo de reabilitação de uma área de lavra é determinado por leis ambientais. Os empreendimentos mineiros devem realizar uma análise dos possíveis impactos ambientais através de um estudo denominado Estudo de Impacto ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA).

O processo de reabilitação se inicia com a utilização de tratores de esteira nas etapas de terraplanagem do material estéril depositado sobre as tiras já lavradas. O material é nivelado e compactado de forma a reestruturar a estabilidade e possibilitar que novos empreendimentos possam se instalar na região. Após o nivelamento do material, as camadas de solo orgânico que foram estocadas no início das atividades, ou que estão sendo simultaneamente removidas nas etapas de preparação de tiras a serem lavradas, são depositadas sobre as tiras em reabilitação de forma a tentar se aproximar das condições originais da região. Por fim, as espécies nativas da região podem ser reintroduzidas.

3.3 MINERADOR DE SUPERFÍCIE

Considerando a proposta do presente trabalho que é demonstrar os benefícios que podem ser obtidos através da utilização dos mineradores de superfície em operações de lavra de carvão em tiras, o funcionamento e metodologias de aplicação do equipamento serão descritas de forma mais detalhada nesta seção. De acordo com Kishore e Rao (2017), os mineradores de superfície são equipamentos designados e preparados para trabalhar em um processo contínuo de lavra de forma a remover continuamente camadas de material com desejadas espessuras e uniformidade de granulometria e carregar diretamente o material lavrado. Ainda segundo os autores, os mineradores de superfície, em geral conseguem lidar com materiais que apresentam “Unconfined Compressível Strength” (UCS) de até 50Mpa. A Figura 9 abaixo ilustra um modelo de minerador contínuo da empresa Wirtgen.



FIGURA 9: Minerador de superfície wirtgen (WIRTGEN)

3.3.1 FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO

Os mineradores de superfície foram desenvolvidos com o objetivo de atuar de forma eficiente na extração contínua de rochas e solo no processo de lavra. De acordo com os manuais de operação dos mineradores de superfície, pertencentes à empresa Wirtgen (2017), os equipamentos são dotados de quatro esteiras que os possibilitam se mover tanto para frente quanto para trás. Estas esteiras rolantes são dispostas na

parte frontal e na parte traseira do equipamento e possuem capacidade parcial de giro de forma a possibilitar manobras ao minerador de superfície. A Figura 10 abaixo ilustra de forma esquemática a disposição das esteiras.

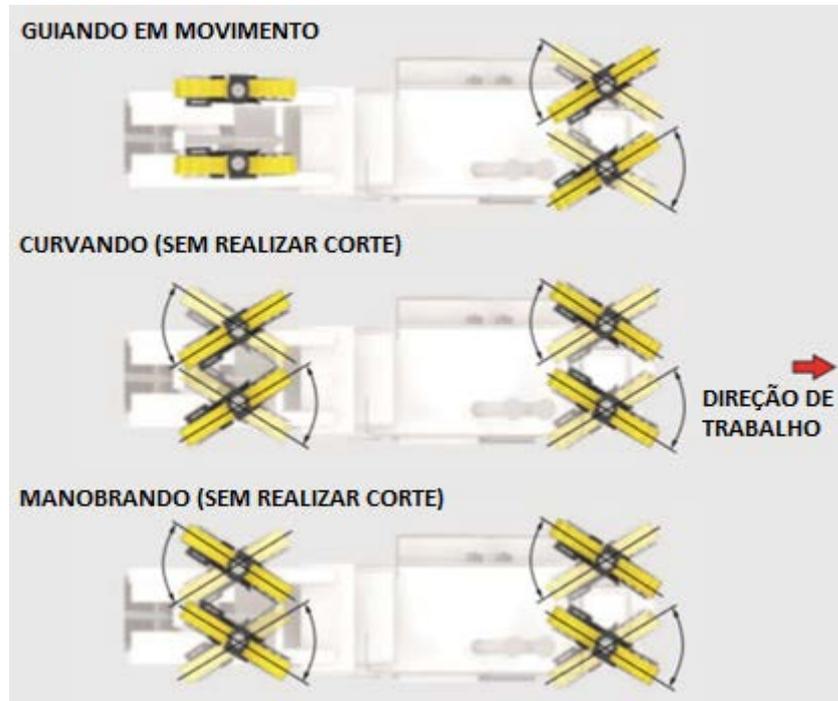


FIGURA 10: Disposição e movimentação das esteiras rolantes (WIRTGEN)

Localizado geralmente na parte central inferior dos mineradores de superfície (entre os conjuntos de esteiras dianteiras e traseiras) está o tambor de corte. Este dispositivo é responsável pelo processo de corte e fragmentação da rocha. O tambor de corte é dotado de uma série de ponteiros de corte (*bits* ou *point attack picks*) dispostas em geral de forma helicoidal que são giradas através de uma correia de transmissão que transfere a rotação do motor a diesel para o tambor (WIRTGEN, 2017).



FIGURA 11: Disposição do tambor de corte (WIRTGEN)

A disposição das ponteiros de corte tem por finalidade direcionar o material cortado para uma correia do próprio equipamento. Essa correia tem por objetivo depositar o material na posição desejada, seja diretamente na caçamba de um caminhão se deslocando em paralelo ao minerador de superfície (método *Direct Loading*) ou no próprio assoalho da região de lavra de forma a formar leiras de material empilhado (método *Side Casting*). Em algumas situações, o minerador de superfície não é equipado com o sistema de correias. Assim, a medida que o material é extraído, ele é depositado diretamente no assoalho (método *Windrowing*) (SEIB, 2014). As Figuras 12 e 13 abaixo ilustram o processo de extração e transporte do material pela correia interna, bem como esquematizações dos equipamentos com e sem a presença das esteiras internas.

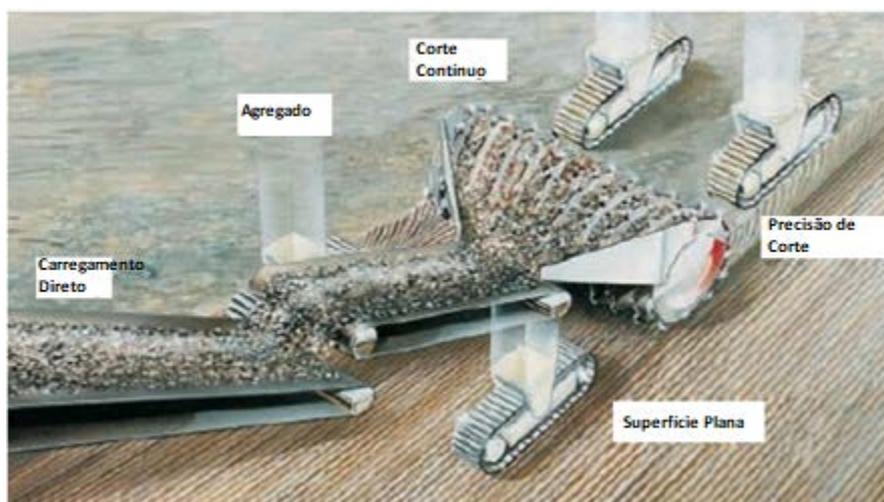


FIGURA 12: Processo de corte e transporte em correia (SEIB,2014)

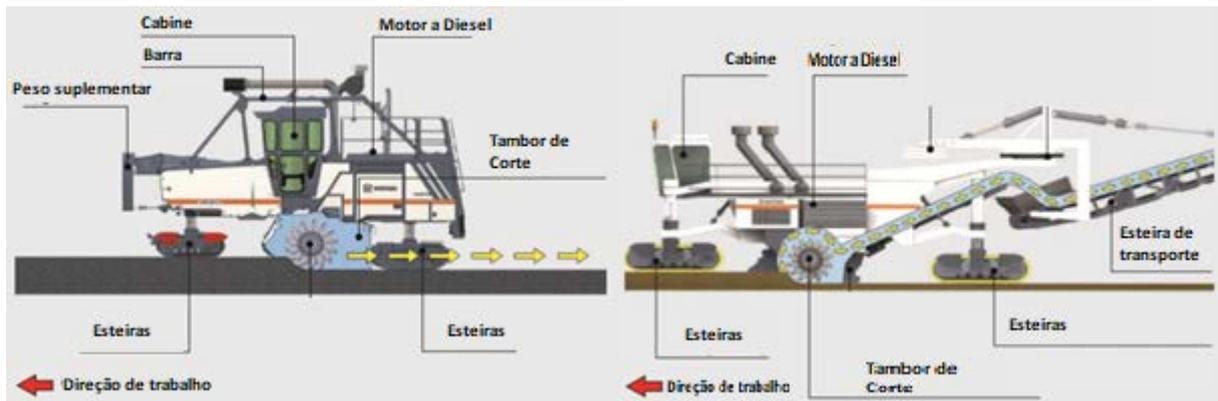


FIGURA 13: Mineradores de superfície com e sem esteira interna (WIRTGEN)

3.3.1.1 METODOLOGIA DE CORTE

De acordo com Onederra (2014), em geral as rochas possuem um comportamento frágil e tendem a sofrer falhas em situações de tensões de tração. Rostami (2011), salienta no capítulo “*Mechanical Rock Breaking*” do livro “*SME Mining Engineering Handbook*” que o processo de desmonte mecânico de rochas envolve a utilização de ferramentas e dispositivos de forma a criar elevados níveis de estresse nas rochas, em pequenas porções de áreas, causando assim sua falha e desintegração. O autor ainda pontua que a medida que as ferramentas aplicam forças sobre as rochas, ocorre o processo de penetração, que é denominado endentação.

Onederra (2014), descreve dois processos principais no processo de fragmentação de rochas com a utilização de tambores de corte, que são: “*Sumping*” e “*Shearing*”. Durante o processo de “*Sumping*” têm-se:

- I. Maior valor de ângulo de contato entre tambor e rocha;
- II. Maior número de ponteiros de corte em contato com a rocha;
- III. Menor força aplicado a cada uma das ponteiros;
- IV. Taxa de avanço dependente da força normal aplicada no tambor de corte.

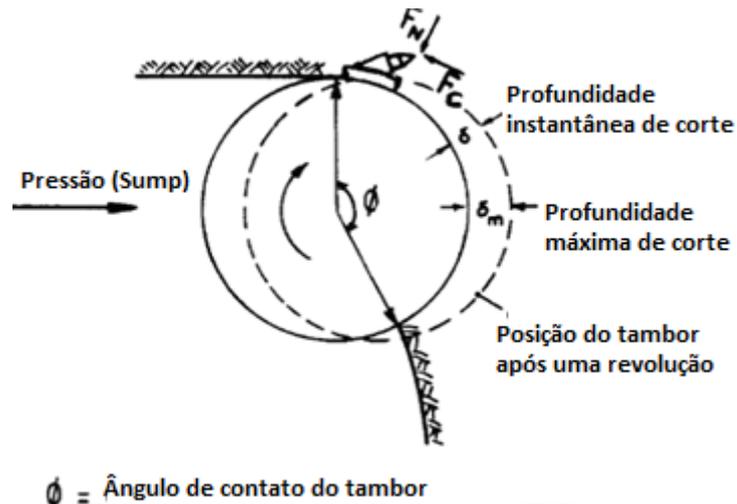


FIGURA 14: Sumping (ONEDERRA,2014)

Durante o processo de “*Shearing*”, têm-se:

- I. Ângulo de contato do tambor com a rocha menor que 50%;
- II. Menor número de ponteiros de corte em contato com a rocha;
- III. Taxa de corte depende da força de corte aplicada sobre o tambor.

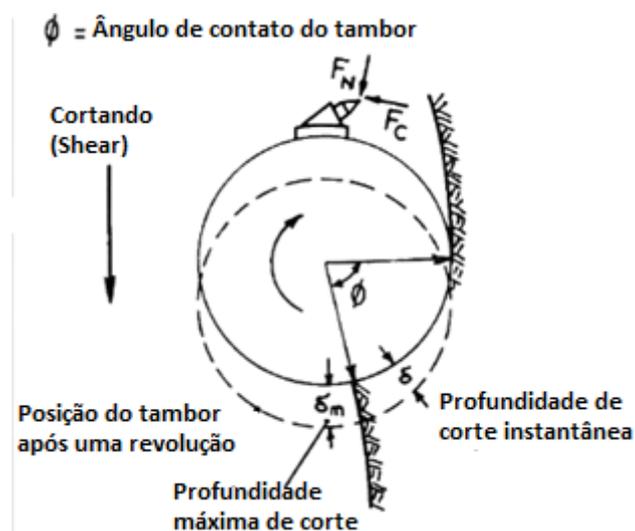


FIGURA 15: Shearing (ONEDERRA,2014)

Os dispositivos de corte acoplados nos mineradores de superfície possuem ponteiros de corte capazes de aplicar forças concentradas de forma a propiciar endentação nas rochas causando assim a sua fratura. Durante a operação dos mineradores de superfície, o processo de fragmentação de rochas ocorre principalmente devido ao

“*Sumping*”, onde a força normal aplicada é decorrente do próprio deslocamento do equipamento. Porém, como mencionado anteriormente, a correia de transmissão acoplada no tambor de corte fornece energia de rotação para o mesmo fazendo com que o processo de “*Shearing*” ocorra. Outro fator que contribui para o processo de fragmentação da rocha é o próprio peso do minerador de superfície que atua exercendo uma força normal de cima para baixo, resultando em uma maior facilidade de penetração das ponteiros na rocha.

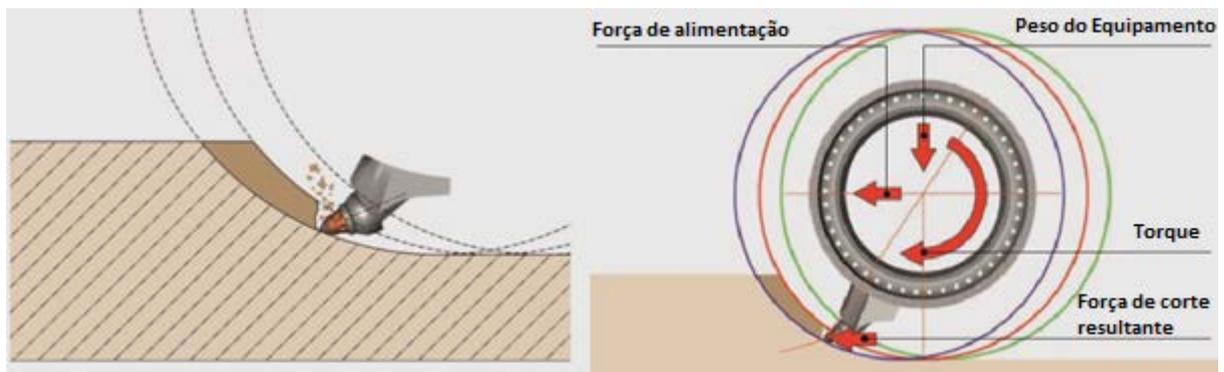


FIGURA 16: Esquematização de operação do tambor de corte (WIRTGEN)



FIGURA 17: Disco de corte de um minerador de superfície (WIRTGEN)

3.3.1.2 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE PRODUTIVIDADE

O processo para estimar a produtividade de um minerador de superfície pode ser feito através de equações empíricas ou determinísticas. Em geral, as equações descritas na literatura são baseadas em parâmetros similares, tais como: condições da rocha a ser lavrada (dureza, abrasividade, umidade entre outros), taxa de desempenho do

equipamento a ser utilizado, condições e formato dos dispositivos de corte presentes nos tambores entre outros fatores. De acordo com Origliasso *et al* (2013), uma das equações mais recentes desenvolvidas para tal finalidade é:

$$L^* = \left(1 - \frac{CI}{100}\right) \times kM_c \quad (1)$$

onde têm-se L^* como o valor de produtividade a ser obtido (m^3/h) CI , sendo o valor do chamado “*Cuttability Index*”, k é um fator que leva em consideração a influência das ponteiros de corte na produtividade e M_c sendo a capacidade nominal do equipamento (m^3/h). Ainda segundo os autores, o cálculo de CI leva em consideração uma série de fatores tais como: Fator de carregamento pontual (*point load strength index*, I_s), contagem volumétrica de contatos (*volumetric joint count*, J_v), abrasividade da rocha (*rock abrasivity*, A_w), direção de corte da máquina considerando a direção dos contatos (*machine cutting direction with respect to the joint Direction*, J_s) e a potência de corte da máquina (*engine power of the cutting machine*, M). Os fatores descritos podem ser classificados em classes de acordo com os valores que possuem. A Tabela 3 abaixo ilustra a classificação dos fatores.

Tabela 3: Determinação do *Cuttability Index* (origliasso et al, 2013)

Class	I	II	III	IV	V
Point load index (I_s)	< 0.5	0.5 – 1.5	1.5 – 2.0	2.0 – 3.5	> 3.5
Rating (I_s)	5	10	15	20	25
Volumetric joint count (no/ m^3)	> 30	30– 10	10 – 3	3 – 1	1
Rating (J_v)	5	10	15	20	25
Abrasivity	< 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	2.0 – 3.0	> 3.0
Rating (A_w)	3	6	9	12	15
Direction of cutting respect to major joint direction	$72^0 - 90^0$	$54^0 - 72^0$	$36^0 - 54^0$	$18^0 - 36^0$	$0^0 - 18^0$
Rating (J_s)	3	6	9	12	15
Machine power (kW)	> 1000	800 – 1000	600 – 800	400 – 600	< 400
Rating (M)	4	8	12	16	20

Dessa forma é possível obter o valor do CI através da soma dos fatores mencionados:

$$CI = I_s + J_v + A_w + J_s + M \quad (2)$$

Por fim, a partir dos valores calculados de CI, Origliasso *et al* (2013) estabelecem uma classificação para as condições de escavação com a utilização do minerador de superfície. A Tabela 4 abaixo ilustra esta classificação.

Tabela 4: Classificação de ci (Adaptado Origliasso et al, 2013)

Cuttability Index	Possibilidade de Corte
50 > CI	Escavação muito fácil
50 < CI < 60	Escavação fácil
60 < CI < 70	Escavação econômica
70 < CI < 80	Escavação difícil, talvez não seja viável
CI > 80	Mineradores de superfície não devem ser utilizados

3.3.2 METODOLOGIAS DE LAVRA

A metodologia de utilização do minerador de superfície pode variar dependendo das condições, premissas e objetivos das atividades de lavra em que o mesmo é empregado. Segundo Kishore e Rao (2017), as metodologias de lavra com minerador de superfície podem ser classificadas segundo o tipo de movimentação do mesmo e segundo o tipo de carregamento.

Os métodos baseados no tipo de movimentação são: *“Travel Back Method”*, *“Turn Back Method”* e *“Continuous mining method”*. Já dentre os métodos baseados no tipo de carregamento podem-se citar: *Direct Loading*, *Side Casting* e *Windrowing*.

3.3.2.1 MÉTODOS BASEADOS NO TIPO DE MOVIMENTAÇÃO

- MÉTODO TRAVEL BACK

Neste método de lavra, o minerador de superfície somente executa a lavra durante sua movimentação para frente. Ao chegar à posição final da tira de lavra, o equipamento recolhe o tambor de corte e retorna de ré à posição inicial, sem executar corte do material, onde o tambor de corte é novamente abaixado, propiciando um novo ciclo de lavra do equipamento. A Figura 18 abaixo ilustra de forma esquemática o método *“Travel Back”*.

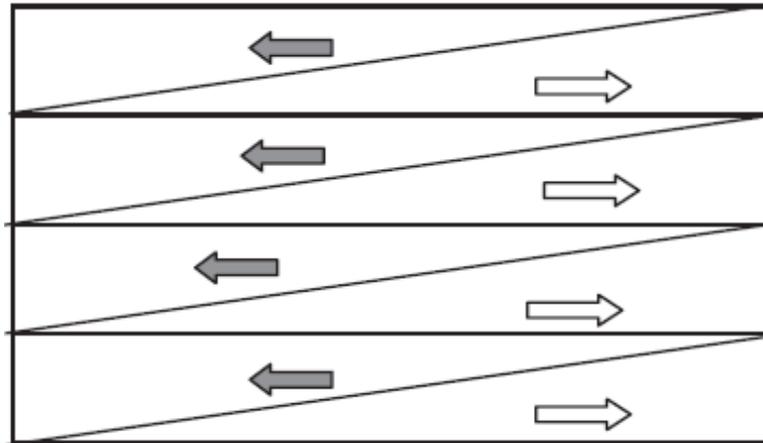


FIGURA 18: Esquemática do método travel back (SEIB, 2014)

Kishore e Rao (2017) salientam a respeito desta metodologia: “O método é mais comumente aplicado quando as condições geométricas das porções finais das tiras são ruins e não possibilitam a manobra do minerador de superfície”. Os autores ainda salientam que este método possui baixa produtividade em comparação às demais metodologias.

- MÉTODO TURN BACK

Considerado um dos métodos mais utilizados em operações com mineradores de superfície, o método *turn back* possui produtividade variando de média a alta (de acordo com as condições do material e da tira) e se adequa melhor para situações onde o comprimento da tira é maior do que 200 m (SEIB, 2014). O método funciona em um processo semi contínuo de lavra onde o minerador de superfície se desloca por toda a extensão da tira lavrando o material. Ao chegar ao fim da extensão da tira, o equipamento executa uma curva de 180 ° e retorna, paralelamente a primeira direção de movimentação, lavrando o material.

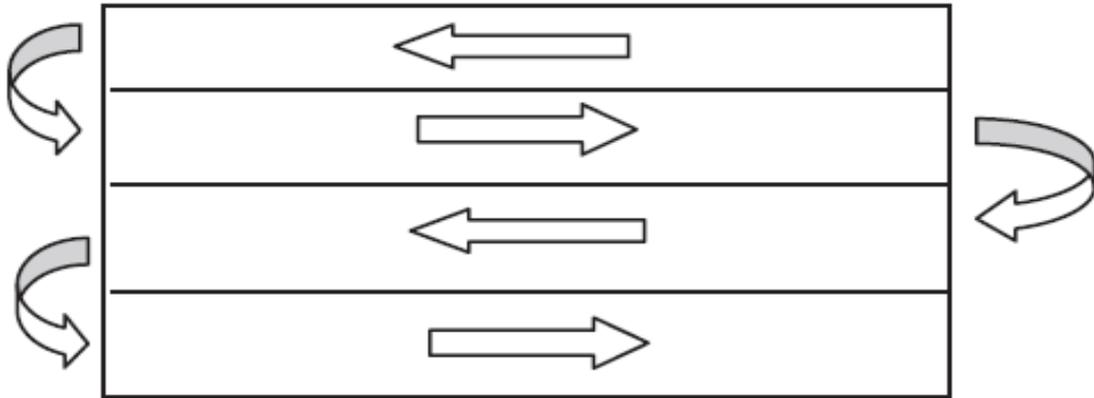


FIGURA 19: Esquemática do método turn back (SEIB, 2014)

- MÉTODO CONTÍNUO

Considerado como a metodologia de movimentação mais eficiente para o minerador de superfície devido ao fato de que o processo de lavra ocorre de forma contínua em quase sua totalidade, fazendo com que não ocorram atrasos de lavra e a utilização do equipamento seja otimizada. Neste método de lavra, o minerador de superfície executa curvas suaves, de forma a completar movimentos elípticos, sem interromper o processo de corte. Dessa forma o método é mais adequado para regiões de lavra com grande área de operação.

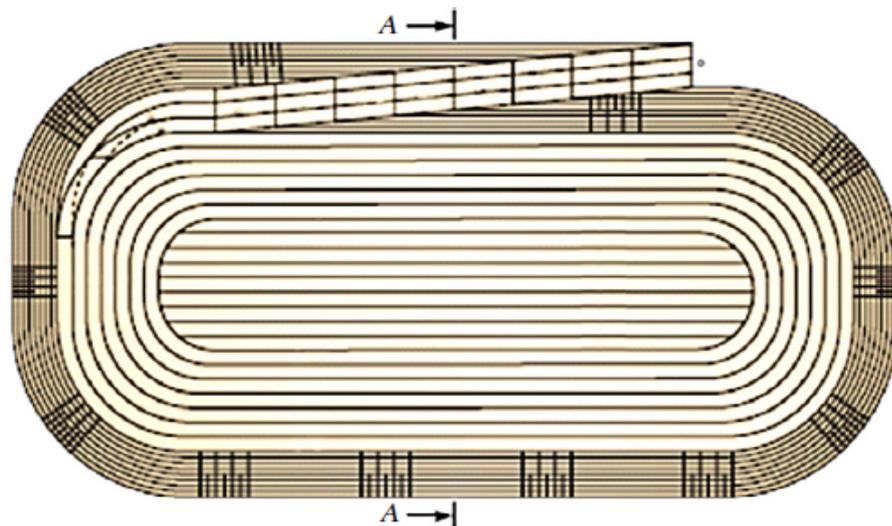


FIGURA 20: Esquemática do método contínuo (SEIB, 2014)

3.3.2.2 MÉTODOS BASEADOS NO TIPO DE CARREGAMENTO

- DIRECT LOADING

Como mencionado anteriormente, os mineradores de superfície podem ser equipados com esteiras que tem a função de direcionar o material lavrado. A Figura 21 abaixo ilustra um exemplo de minerador de superfície dotado de uma esteira, e os raios de alcance da mesma.

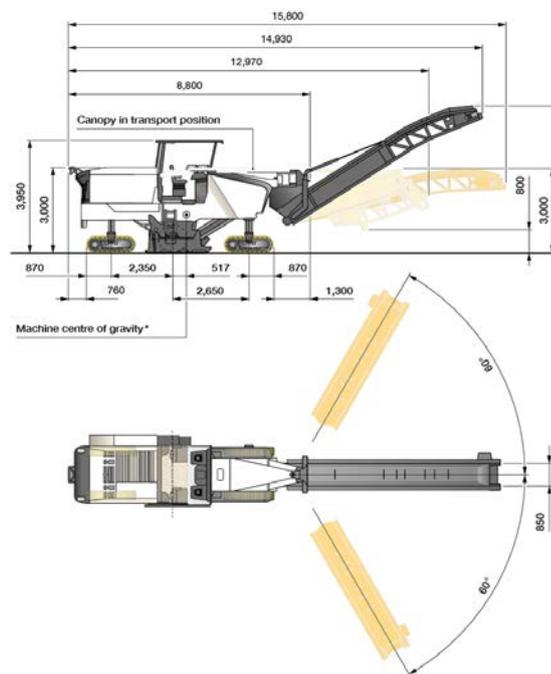


FIGURA 21: Dimensões de um minerador de superfície

No método *Direct Loading* o minerador de superfície se desloca juntamente com caminhões se posicionando dentro do raio de alcance da esteira de forma que a medida que o material é extraído, ele é diretamente carregado na caçamba dos caminhões. Quando o caminhão é completamente carregado, o minerador de superfície interrompe seu deslocamento até que o próximo caminhão se posicione dentro do raio de operação do minerador.

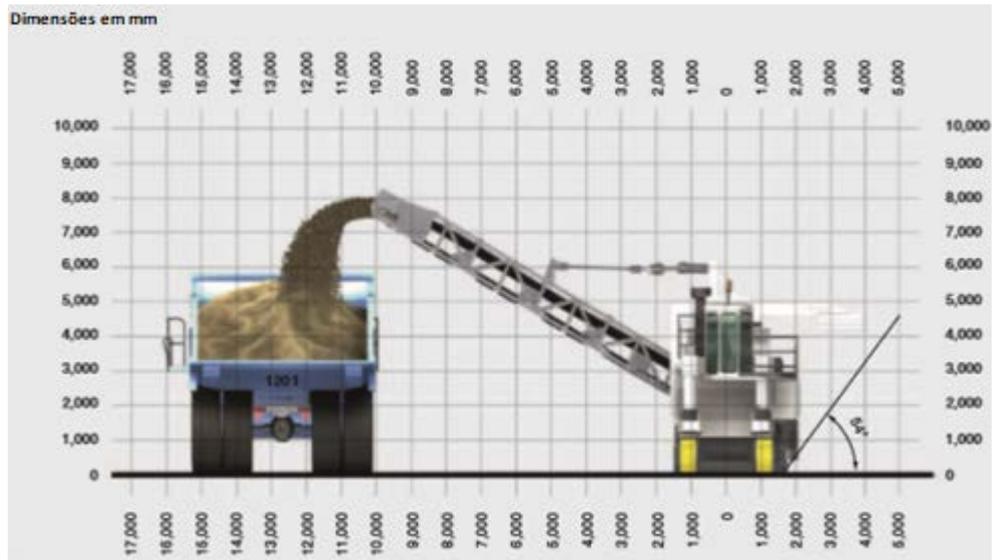


FIGURA 22: Esquemática direct loading

- SIDE CASTING

Outro método cabível de ser aplicado na lavra com mineradores de superfície é o *Side Casting*. Nesta metodologia, o material cortado é transportado pela correia acoplada ao equipamento e é depositado no assoalho da região de lavra para a formar “leiras”. Este material é posteriormente carregado através de pás carregadoras nos equipamentos de transporte. Devido ao fato de o minerador de superfície depositar o material diretamente no assoalho, nesta metodologia, o mesmo pode apresentar uma maior produtividade. Porém gastos posteriores com removimentação do material irão existir e a produtividade global das operações será menor.

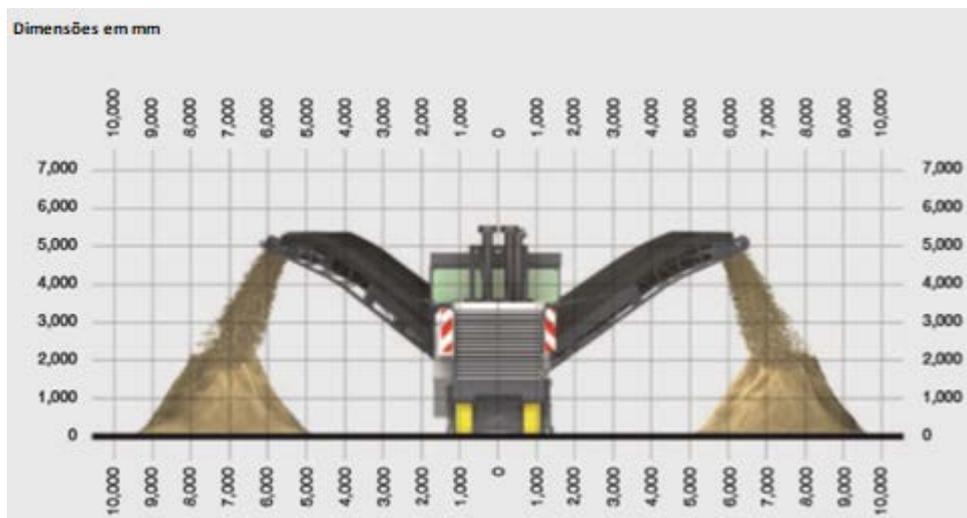


FIGURA 23: Esquemática side casting

- WINDROWING

Este método é aplicado em situações onde o minerador de superfície não é equipado com a esteira. Dessa forma a medida que o mesmo executa a lavra, ele deixa o material cortado para trás. Esse método também faz com que o minerador de superfície apresente uma alta produtividade, contudo, da mesma forma que ocorre na metodologia *Side Casting*, a removimentação do material é necessária por meio de pás carregadeiras.



FIGURA 24: Esquematização windrowing

3.3.2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DECORRENTES DA UTILIZAÇÃO DO MINERADOR DE SUPERFÍCIE

Como toda atividade de extração mineral, o processo de lavra por meio da utilização dos mineradores de superfície também resulta em impactos ambientais. Porém, a utilização deste tipo de equipamento pode resultar em impactos ambientais menos severos em comparação a metodologias convencionais, tais como desmonte por meio da utilização de explosivos.

De acordo com os manuais da Wirtgen, a utilização dos mineradores de superfície pode, em certas ocasiões, substituir até quatro processos da cadeia produtiva convencional de mineração. Com o uso do minerador de superfície etapas como:

perfuração, desmonte, carregamento, e até britagem primária, podem ser completamente executadas pelo equipamento.



FIGURA 25: Etapas substituíveis pelo minerador de superfície

Com base nessas premissas é possível numerar alguns impactos ambientais negativos que a utilização do minerador de superfície pode mitigar. Estes impactos são:

- Emissão de material particulado: A não utilização de etapas de perfuração e desmonte com explosivos e britagem primária pode reduzir a emissão de material particulado na atmosfera.
- Emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x): Devido a não utilização de explosivos, os perigos relacionados à produção de óxidos de nitrogênio (que ocorre em situações onde as proporções de combustíveis na preparação do desmonte é feita de forma subestimada)
- Ultralaçamento de rochas: A não utilização de processos de desmonte reduz qualquer possibilidade de ultralaçamento de rochas.
- Emissão de vibrações: A não utilização de processos de desmonte e de britagem primária pode reduzir quase em totalidade a emissão de vibrações.
- Emissão de CO_2 : A alta seletividade obtida nas operações de lavra com o minerador de superfície reduz a diluição do minério. Dessa forma de acordo

com Väli (2010) as operações dentro das caldeiras ocorre de forma mais eficiente devido à baixa concentração de contaminantes (tais como calcário) fazendo com que ocorra uma redução de até 20% na emissão de CO₂.

4 METODOLOGIA

4.1 SOFTWARE DESWIK

O Deswik é uma ferramenta de planejamento e sequenciamento de lavra integrada que permite a integração dos horizontes de Planejamento de Lavra: Longo, Médio e Curto Prazos.

No Deswik é possível realizar simulações de diversos cenários de maneira interativa e com o total controle de engenharia, permitindo também o sequenciamento das pilhas (estéril e estoque) e dimensionamento de frota de transporte integrado ao sequenciamento da lavra provendo um significativo ganho de produtividade na elaboração dos planos.

O Deswik permite também a avaliação do planejamento operacional na forma de Gráficos de Gantt onde há total interação entre a interface gráfica e o sequenciador no qual qualquer mudança no calendário, quebra de máquina, etc, é ajustado dinamicamente na interface gráfica, permitindo um controle total de engenharia.

4.2 ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS

O presente trabalho foi realizado com base em um estudo comparativo entre operações de lavra, em tiras para carvão, com a utilização do minerador de superfície e técnicas de lavra com perfuração e desmonte e uso de escavadeiras. Para tal fim, uma base de dados hipotética foi elaborada de forma a possibilitar análises de seletividade na lavra, taxas de produtividade, viabilidade do empreendimento entre outros fatores. A base de dados foi construída com o auxílio do software Deswik e todo os processos de análises citados foram desenvolvidos com a utilização do mesmo e do software Microsoft Excel.

As seções seguintes deste capítulo irão descrever os principais pontos desenvolvidos para o estabelecimento dos cenários utilizados no comparativo. Será descrito o processo de criação da base geológica, cubagem da reserva, determinação da geometria das tiras, cenários a serem comparados, elaboração de uma função

benefício para o processo de análise de viabilidade da reserva e por fim as premissas do sequenciamento produtivo dos cenários.

4.2.1 MODELO GEOLÓGICO

Nas etapas preliminares do estudo, foi necessário a elaboração de um modelo geológico hipotético de corpos tabulares de carvão dispostos em camadas intercaladas com materiais estéreis. A criação do depósito de carvão utilizado neste trabalho foi feita baseada principalmente em depósitos reais existentes na região nordeste do estado australiano de Queensland e também em ocorrências da commodity na região sul do Brasil. Durante a criação do depósito, procurou-se dispor camadas pouco espessas de carvão com espessuras variadas (entre 0,70 e 1,32 m) intercaladas com camadas de arenito, siltito e argilito com espessuras variando entre aproximadamente 0,70 e 17,60 metros de espessura.

A metodologia de criação das camadas de minério e estéril presentes no depósito foi desenvolvida no software Deswik a partir da utilização de uma superfície topográfica aleatória e da transposição da mesma diversas vezes de forma a criar limites físicos das camadas dos materiais citados anteriormente. A Figura 26 abaixo ilustra as superfícies utilizadas. As dimensões das superfícies utilizadas foram de 500 metros de largura e 1200 metros de comprimento.

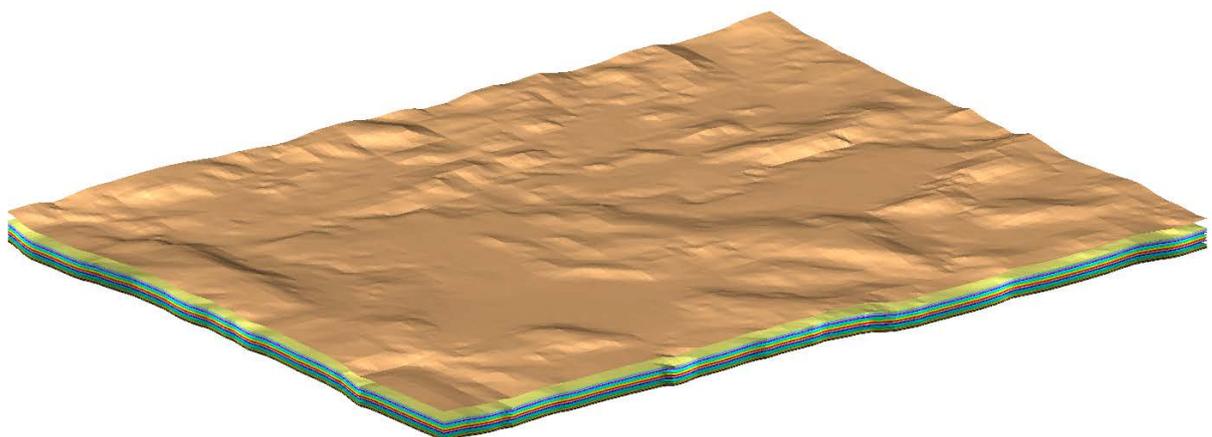


FIGURA 26: Superfícies transladadas

A partir das superfícies mencionadas, cortou-se um sólido com as mesmas de forma a gerar as camadas estratigráficas do depósito. A ordenação da estratigrafia destas camadas foi baseada na geologia das regiões anteriormente citadas nesta seção. Ao todo totalizou-se 24 camadas sendo 12 de material estéril e 12 de carvão. Na figura 27 abaixo é possível visualizar a coluna estratigráfica do depósito. As siglas dos materiais representadas significam:

- OB = *Overburden* de arenito
- CO = Carvão mineral
- SI = Siltito
- SA = Arenito
- CL = Argilito

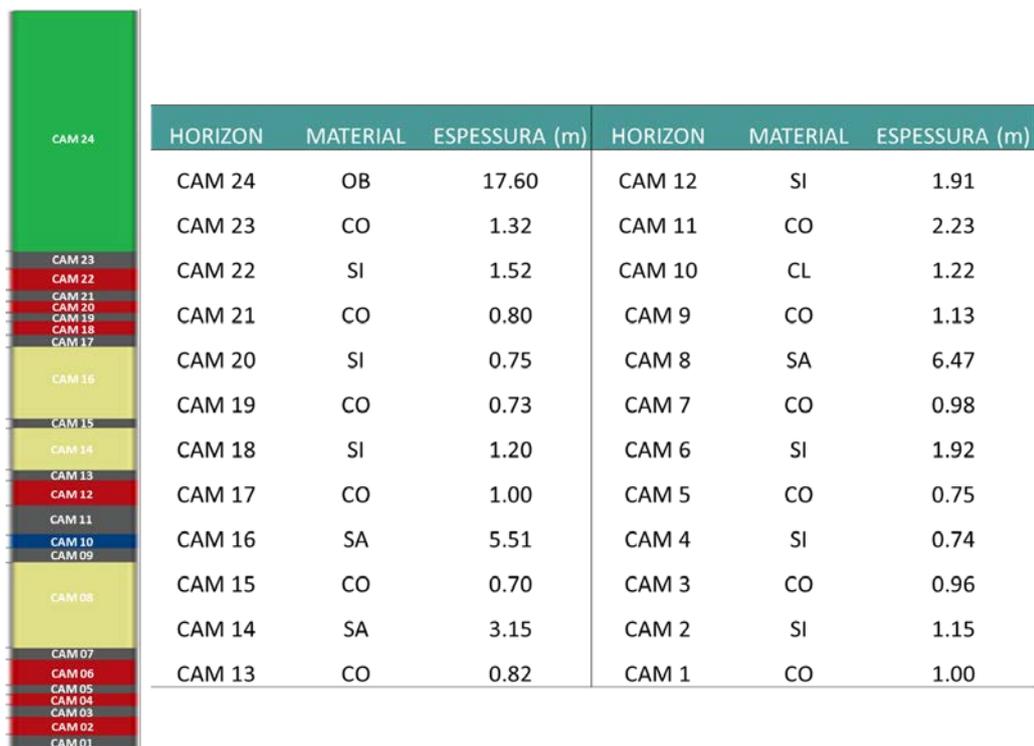


FIGURA 27: Estratigrafia do depósito

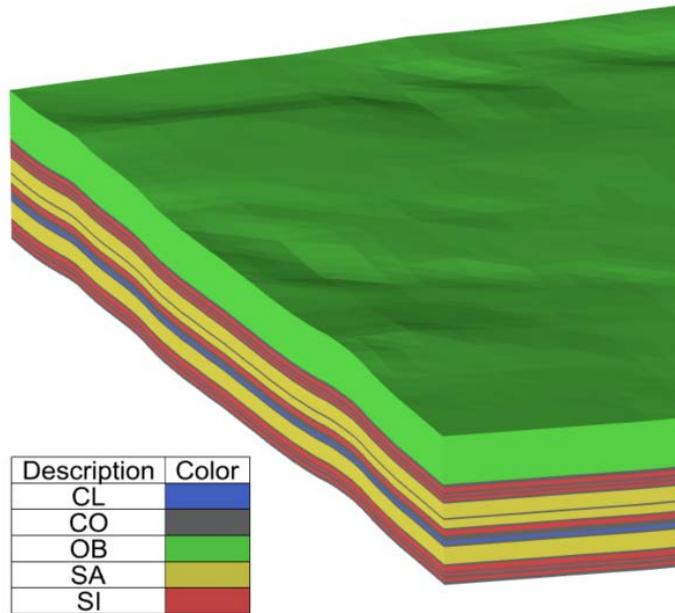


FIGURA 28: Visão isométrica de parte do depósito

Além da determinação dos tipos de material e espessuras de cada uma das camadas, utilizando como base a literatura e exemplos reais de depósitos de carvão, definiu-se qualidades e contaminantes para cada uma das camadas criadas. Dentre as qualidades e contaminantes atribuídos às camadas podem-se citar o teor de cinza (AS), carbono fixo (CA), densidade (DD), teor de enxofre (EX), umidade (UM), dureza (DU) e rendimento (*Yield*). É importante salientar que os valores de rendimento aplicados para cada uma das camadas foram determinados de forma a ser diretamente proporcional à porcentagem de carbono fixo presente nas mesmas, bem como as quantidades de contaminantes.

4.2.2 CUBAGEM DO DEPÓSITO

A partir dos sólidos das camadas construídos foi possível realizar uma cubagem geral do depósito de forma a obter valores correspondentes à tonelagem e volume totais, porcentagens de qualidades e contaminantes presentes em cada uma das camadas e valores médios dos mesmo para o depósito. A partir da cubagem, constatou-se que a massa e volume total presentes são de aproximadamente 70 milhões de toneladas e 13 milhões de metros cúbicos respectivamente.

HORIZON	MATERIAL	Volume	Tonelagem	AS	CA	DD	DU	EX	UM	YIELD
CAM 24	OB	10,800,148.81	23,760,327.37	85.00	5.00	2.20	30.00	35.00	35.00	0.00
CAM 23	CO	779,824.67	1,247,782.92	39.40	29.70	1.60	21.00	4.71	9.90	45.00
CAM 22	SI	960,250.96	2,112,552.12	84.00	6.00	2.20	31.00	34.00	44.00	0.00
CAM 21	CO	539,903.27	896,317.38	51.00	22.70	1.66	21.00	1.85	9.60	34.40
CAM 20	SI	480,331.65	1,056,729.62	83.00	7.00	2.20	32.00	33.00	33.00	0.00
CAM 19	CO	419,697.43	742,867.58	62.00	15.80	1.77	21.00	0.88	7.50	25.00
CAM 18	SI	600,032.02	1,320,070.44	82.00	8.00	2.20	32.00	32.00	32.00	0.00
CAM 17	CO	540,258.89	918,438.40	47.50	24.50	1.70	21.00	1.56	9.40	37.10
CAM 16	SA	3,239,754.04	7,127,458.88	81.00	9.00	2.20	33.00	31.00	31.00	0.00
CAM 15	CO	419,900.86	713,830.11	49.90	21.90	1.70	21.00	1.54	7.50	33.20
CAM 14	SA	1,860,185.33	4,092,407.72	80.00	10.00	2.20	34.00	30.00	30.00	0.00
CAM 13	CO	479,911.58	806,241.99	48.10	26.50	1.68	21.00	0.70	7.00	40.20
CAM 12	SI	1,139,979.70	2,507,955.35	79.00	11.00	2.20	35.00	29.00	29.00	0.00
CAM 11	CO	1,320,132.33	2,468,789.04	53.60	21.00	1.87	21.00	3.04	5.70	31.80
CAM 10	CL	600,021.26	1,320,046.76	78.00	12.00	2.20	35.00	28.00	28.00	0.00
CAM 09	CO	659,997.85	1,102,181.04	56.30	17.60	1.67	21.00	0.95	5.70	26.70
CAM 08	SA	3,840,001.32	8,448,002.91	77.00	13.00	2.20	36.00	27.00	27.00	0.00
CAM 07	CO	539,793.42	879,902.85	51.00	22.00	1.63	21.00	0.71	6.90	33.30
CAM 06	SI	1,140,031.64	2,508,069.60	76.00	14.00	2.20	37.00	26.00	26.00	0.00
CAM 05	CO	420,079.31	730,932.20	45.80	26.10	1.74	21.00	1.27	6.50	39.50
CAM 04	SI	479,861.82	1,055,696.01	75.00	15.00	2.20	38.00	25.00	25.00	0.00
CAM 03	CO	599,981.63	1,025,914.87	44.00	24.70	1.71	21.00	2.35	7.20	37.40
CAM 02	SI	720,101.27	1,584,222.79	74.00	16.00	2.20	40.00	24.00	24.00	0.00
CAM 01	CO	719,977.42	1,188,014.16	46.20	24.10	1.65	21.00	9.85	7.10	36.50
Total Estéril			56,893,539.58							
Total Carvão			12,721,212.53	49.66	22.98	1.71	21.00	2.79	7.32	34.87
Total Material			69,614,752.12							

FIGURA 29: Cubagem do depósito

4.2.3 GEOMETRIA DAS TIRAS

Após a determinação das características físicas e geométricas do depósito, o segundo passo da construção do estudo de caso foi relacionado com o processo de determinação das dimensões geométricas das tiras. Considerando as medidas de largura e comprimento do depósito e também baseado em algumas operações de lavra em tira para carvão ao redor do mundo, foi possível determinar o comprimento e largura de cada uma das tiras.

Para o estudo comparativo entre as operações de lavra com utilização do minerador de superfície e as operações com utilização de perfuração e desmonte, definiu-se um total de 30 tiras de lavra com dimensões de 100 metros de largura por 200 metros de comprimento.

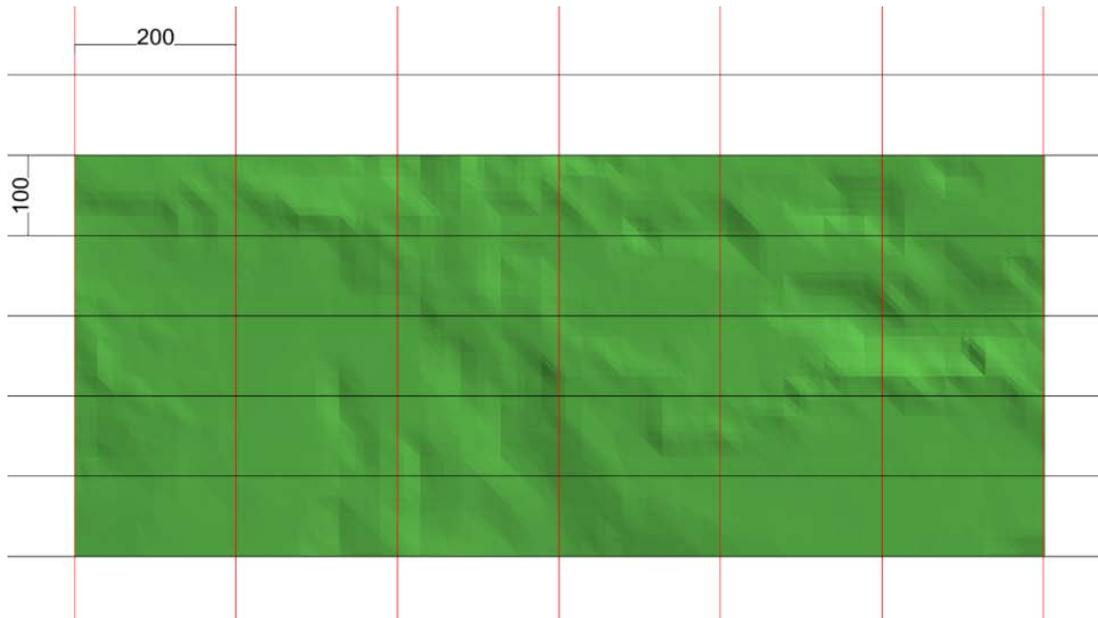


FIGURA 30: Dimensões das tiras de lavra

4.2.4 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

Conforme mencionado anteriormente o objetivo principal deste estudo é fazer um comparativo entre cenários de operações de lavra em tiras para carvão com a utilização combinada do minerador de superfície (para a lavra do minério e camadas pouco espessas de estéril) e perfuração e desmonte com carregamento feito por escavadeiras (para as camadas mais espessas de estéril) e operações onde somente é utilizada as atividades de perfuração e desmonte e uso de escavadeiras (tanto para o minério quanto para o estéril). As comparações serão feitas principalmente baseadas na seletividade que cada um dos cenários pode resultar, além de serem baseadas também em um breve e simplificado comparativo de custos.

Para a realização da comparação dos cenários, é importante salientar que a mesma foi realizada considerando o processo inicial de decapeamento como um custo fixo. Esta decisão foi tomada considerando que em ambos os cenários, a quantidade de material estéril a ser removido previamente seria a mesma. Logo, nas etapas de sequenciamento a serem descritas nas próximas seções, o *overburden* não foi incluído no sequenciamento. Apesar disso, como mencionado anteriormente, seu custo foi contabilizado em ambos os cenários para a realização do comparativo de valor presente líquido (VPL).

4.2.4.1 MÉTODO COMBINADO

O cenário do método combinado foi conduzido com a utilização do minerador de superfície para todas as camadas de minério, independente da espessura das mesmas, e para as camadas de estéril com espessura menor do que 1,25 metros. Para as demais camadas, a lavra foi executada através da utilização de operações de perfuração e desmonte e uso de escavadeiras.

A premissa utilizada para a definição da espessura mínima para a aplicação das duas diferentes estratégias de lavra foi o fato assumido de que para camadas de minério ou de estéril com espessuras inferiores a 1,25 metros, a utilização da metodologia de perfuração e desmonte resultaria em uma diluição elevada da camada a ser lavrada com a camada diretamente abaixo da mesma, de forma a inviabilizar a lavra.

Apesar do fato de que os mineradores de superfície apresentam alta seletividade de lavra em camadas com espessuras de até 25 centímetros, para o cenário do método combinado ainda foi assumido uma diluição total de 1% e uma perda total de 1%. Esse fato se deve principalmente a regiões de proximidade do *highwall*, onde o minerador de superfície possui limitações geométricas de lavra e também devido a possíveis erros cometidos por operadores no processo de lavra. A Figura 31 abaixo ilustra a configuração do depósito, onde a cor vermelha representa as camadas de minério e a cor cinza as camadas de estéril.



FIGURA 31: Depósito de carvão – cenário método combinado

A Figura 32 abaixo ilustra a cubagem de minério e estéril do depósito considerado no cenário do método combinado bem como a quantidade de produto resultante da lavra completa do mesmo. Para o cálculo do produto, multiplicou-se a tonelagem de minério do depósito pelo rendimento das camadas e pelas porcentagens de diluição e perdas.

	Massa (t)	Volume (m3)	Massa produto (t)
MINÉRIO	12,721,212.53	7,439,458.66	4,347,522.05
ESTÉRIL	33,133,212.210	15,060,551.004	-
TOTAL	45,854,424.74	22,500,009.662	4,347,522.05

FIGURA 32: cubagem depósito – cenário método combinado

4.2.4.2 MÉTODO PERFURAÇÃO E DESMONTE

No cenário do método de perfuração e desmonte e utilização de escavadeira, considerou-se que todas as camadas do depósito foram lavradas com a utilização destes procedimentos. Dessa forma considerando que na estratigrafia inicial do depósito, muitas camadas de estéril e minério possuíam espessuras menores que 1,25 metros, algumas alterações tiveram de ser feitas.

Para todas as camadas com espessura menor ao valor citado, foi necessário realizar o processo de agregação das mesmas com a camada inferior de forma que a camada resultante atingisse um valor superior ao mínimo determinado. Após agregar as camadas necessárias, foi feita uma análise das qualidades e contaminantes resultante da diluição e posteriormente o valor de rendimento para a camada resultante foi recalculado. Após este processo, para todas as camadas em que o valor resultante de rendimento foi menor que 10 %, foi atribuído a categorização de camada de estéril para as mesmas.

As Figuras 33 e 34 abaixo ilustram a nova configuração do depósito de carvão para o método descrito e a cubagem do mesmo.

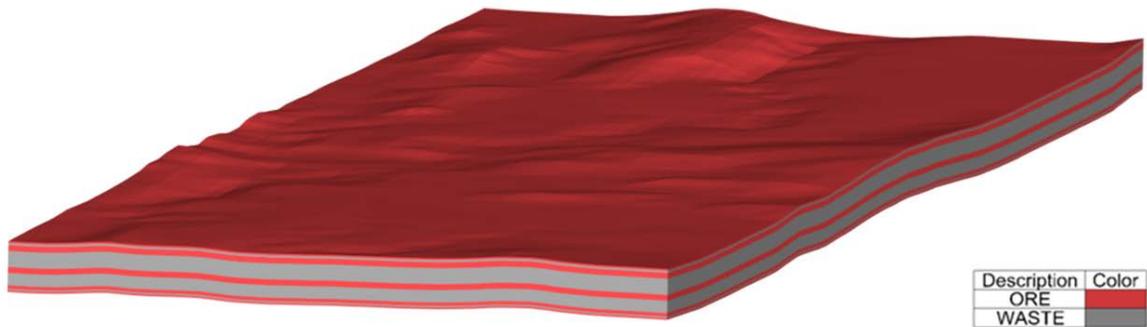


FIGURA 33: Depósito de carvão – cenário método perfuração e desmonte

	Massa (t)	Volume (m3)	Massa (t) produto
MINÉRIO	15,073,780.43	8,160,099.55	3,581,685.836
ESTÉRIL	30,780,644.32	14,339,910.12	-
TOTAL	45,854,424.74	22,500,009.66	3,581,685.836

FIGURA 34: cubagem depósito – cenário método perfuração e desmonte

4.2.5 FUNÇÃO BENEFÍCIO

Para realizar o processo de definição de reserva através da atribuição de valores para cada uma das camadas, primeiramente custos aproximados de lavra, processamento mineral e de transporte foram estimados para ambos os cenários. A determinação dos custos de lavra com utilização de perfuração e desmonte, dos custos de processamento e de transporte, foram baseadas na literatura e em dados obtidos de empreendimentos semelhantes. Já os custos de lavra com a utilização do minerador de superfície, tanto para o minério quanto para o estéril, foram obtidos através de pesquisas diretas com fabricantes de mineradores de superfície. Estes custos em especial levaram em consideração as características físicas do minério e estéril, bem como as dimensões de tira determinadas.

Além dos custos, determinou-se o preço de venda do carvão termal através de informações do site indexmundi relativas ao mês de abril de 2018. Os custos utilizados em ambos os cenários do estudo comparativo podem ser visualizados na Figura 35 abaixo.

CUSTOS		
LAVRA	Perfuração e Desmonte	Minerador de Superfície
MINÉRIO	\$0.45	\$1.07
ESTÉRIL	\$0.45	\$1.95
PROCESSO		
MINÉRIO		\$17.00
TRANSPORTE		
MINÉRIO/ESTÉRIL		\$1.50
PREÇO DE VENDA		
		\$94.00

FIGURA 35: Custos dos cenários e preço de venda

A partir dos valores citados, foi possível estabelecer a função benefício para os cenários. No cenário do método combinado aplicou-se o custo de lavra por minerador de superfície para todas as camadas com espessura inferior a 1,25 metros e o custo de perfuração e desmonte para as demais camadas. Já no cenário perfuração e desmonte o único custo de lavra utilizado foi o que é referente ao método utilizado. O custo de processo foi aplicado somente ao material classificado como minério e o custo de transporte foi aplicado da mesma forma para ambos os cenários. Por fim o preço de venda foi aplicado somente para a massa de produto produzido por cada um dos cenários. As equações utilizadas na montagem da função benefício podem ser visualizadas no Apêndice 1.

4.3 SEQUENCIAMENTO

Após a atribuição de valores não descontados à reserva de cada um dos cenários, foi realizado um sequenciamento básico de forma a possibilitar uma análise comparativa de valor presente líquido retornado por cada um dos cenários. Para tal, foi necessário determinar uma meta de produção anual a ser seguida nos dois cenários da análise, os tipos de equipamento de carga a serem utilizados com suas respectivas taxas de produtividade e a quantidade de cada um destes equipamentos necessários para atingir a meta.

4.3.1 PREMISSAS

As principais premissas para execução do sequenciamento produtivo dos cenários propostos foram:

- Meta de produção anual de produto (a partir deste valor obteve-se também as metas de produção de minério e estéril para cada um dos cenários).
- Taxa de desconto anual a ser aplicada.
- Custo fixo de decapeamento.
- Equipamentos selecionados e taxas de produtividade.
- Custos de CAPEX dos equipamentos.

A meta de produção de produto estabelecida para a o presente estudo foi de 800.000 toneladas. Dessa forma, levando-se em consideração a massa de produto e a relação estéril minério de cada um dos cenários foi possível determinar a massa de minério e estéril a ser lavrada por ano em cada um dos cenários. A Figura 36 abaixo ilustra os valores citados acima.

Cenário	Meta Produto (t)	N° de tiras para atingir a meta
Método Combinado	800,000.00	5.41 = 6
Perfuração e Desmonte		6.7 = 7
Cenário	Meta Minério (t)	Meta estéril (t)
Método Combinado	2,300,000.00	8,300,000.00
Perfuração e Desmonte	3,520,000.00	10,250,000.00

FIGURA 36: Metas de sequenciamento

A taxa de desconto anual definida para o estudo foi de 10%. Além disso, conforme mencionado nas seções anteriores deste estudo, o decapeamento foi considerado como custo fixo e seu sequenciamento não foi considerado durante o estudo. O custo médio de decapeamento determinado pela função benéfico para cada tira foi de US\$ 1.544.421,28, dessa forma considerando o total de 30 tiras, o valor total acumulado e não descontado de remoção decapeamento para os dois cenários foi de US\$46.332.638,40.

Como o sequenciamento das atividades de decapeamento foge do escopo deste trabalho, decidiu-se considerar que o valor total do decapeamento seria dividido ao longo de 5 anos. Dessa forma seria possível aplicar a taxa de desconto considerada

para este custo e não somente considera-lo como uma espécie de CAPEX a ser aplicado no início do empreendimento. Então, o valor aplicado anualmente pelo período mencionado foi de US\$ 9.266.527,68.

Os equipamentos selecionados para o estudo foram o minerador de superfície Wirtgen modelo 2200 e a escavadeira caterpillar 374.



FIGURA 37: Minerador de superfície Wirtgen 2200

O minerador de superfície Wirtgen 2200 é equipado com um tambor de corte de 1.115 milímetros contendo 76 ponteiros de corte. Este equipamento trabalha com velocidades de até 5 km/h e possui um peso de aproximadamente 49.000 kg.



FIGURA 38: Escavadeira Caterpillar 374

A escavadeira Caterpillar 374 apresenta um volume de concha de 3.8 m³ um alcance horizontal de aproximadamente 11 metros, profundidade de dragagem de 9,66 metros e um peso de aproximadamente 73,000 kg.

Os valores estimados para a aquisição destes equipamentos podem ser visualizados na Figura 39 abaixo.

Equipamento	CAPEX
Wirtgen 2200 SM	US\$ 2,050,000.00
Caterpillar 374	US\$ 700,000.00

FIGURA 39: Custos de aquisição de equipamentos

4.3.2 DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS

Para a determinação do número de equipamentos a serem utilizados em cada um dos cenários do estudo inicialmente obteve-se informações relativas à produtividade de ambos quando lidando com minério e estéril. Estas informações foram obtidas através de manuais da Caterpillar e aproximações realizadas a partir de informações cedidas pela Wirtgen.

Para o cálculo da produtividade e produção anual da escavadeira Caterpillar 374 foi considerado um tempo de ciclo de 40 segundos, uma disponibilidade física de 75%, utilização de 85%, resultando em um total de horas trabalhadas no ano de 5584.5. Dessa forma, de acordo com as características de cada tipo de material, foi possível obter as taxas de produtividade e produção anual.

Os cálculos de produtividade do minerador de superfície, conforme mencionado anteriormente foram realizados e cedidos por empresas do ramo. Para o cálculo de produção anual foi considerado que o equipamento trabalha cerca de 5000 horas por ano.

Para o dimensionamento dos equipamentos, utilizou-se os valores de metas anuais de estéril e minério para ambos os cenários. A imagem abaixo ilustra os valores de produtividade, o tipo de equipamento que foram utilizados para cada um dos cenários e a quantidade dos mesmos.

Cenários	Equipamentos	Taxa - minério	Taxa – Estéril	Qnt
Método Combinado	Minerador de superfície	389 t/h	270 t/h	2
	Escavadeira	-	480 t/h	2
Método Perfuração e Desmonte	Escavadeira	380 t/h	480 t/h	5

FIGURA 40: Produtividade e quantidade de equipamentos

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o estabelecimento de todos os parâmetros e premissas de cada um dos cenários do estudo, foi possível realizar os comparativos e analisar cada um dos resultados. As análises foram feitas nos âmbitos físicos e econômicos, onde buscou-se analisar o impacto da seletividade, produtividade, tipo e quantidade dos equipamentos.

5.1 COMPARATIVO DE CENÁRIOS

5.1.1 COMPARATIVO FÍSICO

O comparativo físico teve como objetivo principal a análise dos impactos que as diferentes seletividades obtidas entre os métodos estudados resultam na configuração do depósito. Como mencionado anteriormente, foi considerado que para camadas com espessura inferior a 1,25 metros, o método de perfuração e desmonte não poderia ser utilizado, sendo, portanto, necessário a agregação desta camada com a camada inferior. Dessa forma conforme pode ser observado na Figura 41 abaixo, é possível perceber que no cenário onde utiliza-se o método de perfuração e desmonte, algumas camadas de carvão se perderam devido à elevada diluição. Além disso algumas camadas de carvão sofreram um aumento de massa devido ao fato de serem agregadas com camadas de estéril, porém as mesmas foram diluídas, reduzindo assim seus rendimentos.

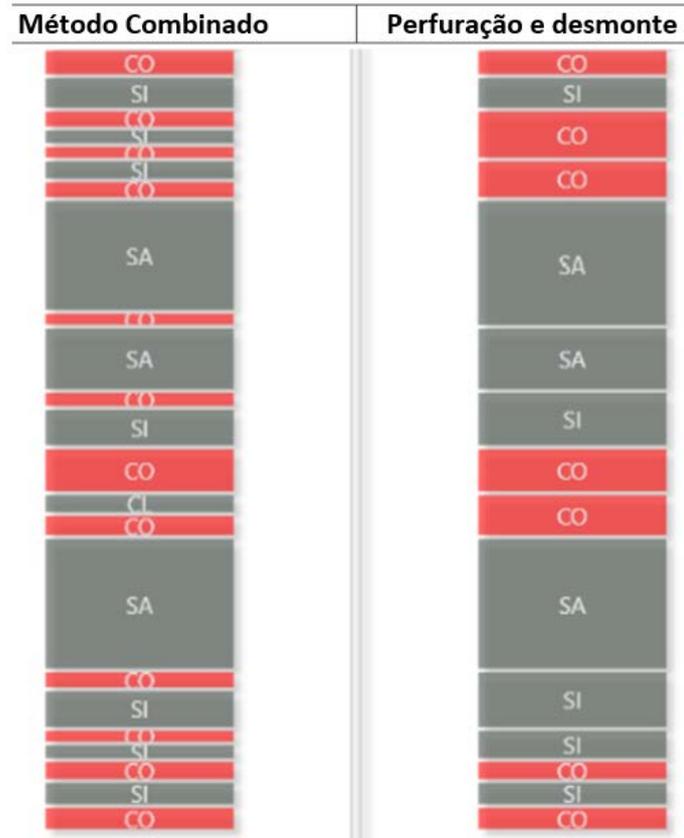


FIGURA 41: Diferenças estratigráficas entre os cenários

Devido a estas alterações mencionadas, as massas de minério, estéril e produto resultante de cada um dos cenários apresentaram variações. O gráfico da Figura 42 ilustra estas diferenças.

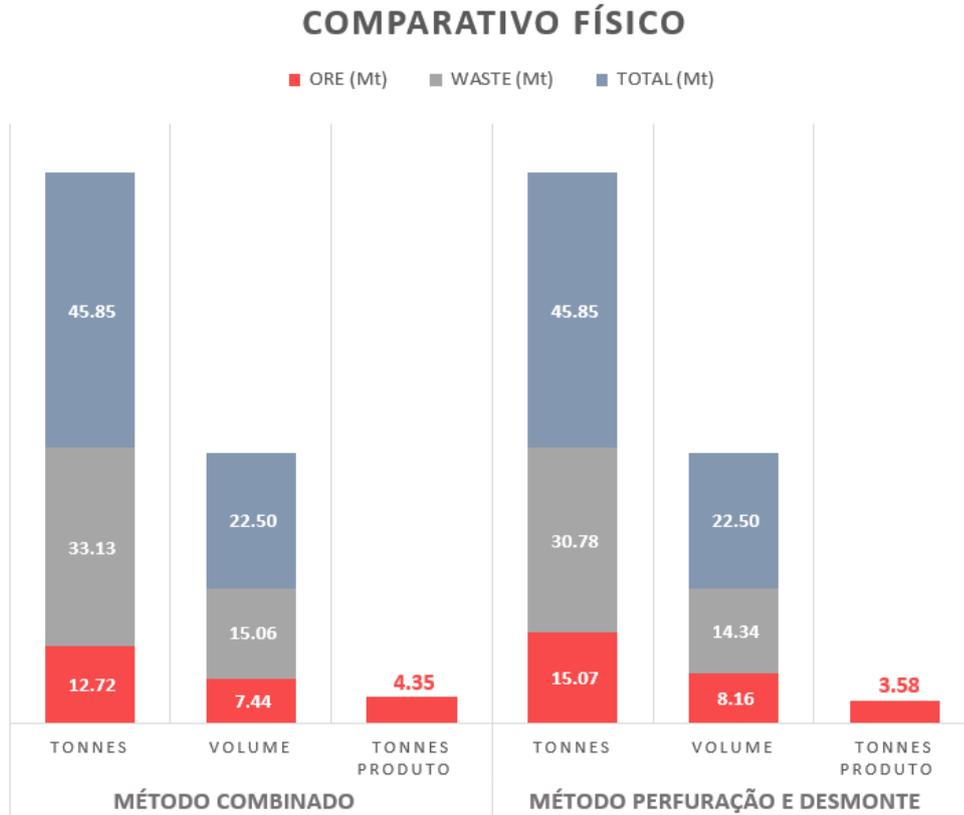


FIGURA 42: Comparativo físico

É possível perceber que devido à necessidade de agregar algumas camadas no cenário do método perfuração e desmonte, a massa de minério resultante neste cenário foi aproximadamente 18% superior à massa de minério do cenário do método combinado, ou seja, agregou-se um total de 2,35 milhões de toneladas de um cenário para o outro. Além disso, a variação de massa de estéril entre os cenários foi de aproximadamente 7%, resultando em uma redução de 2,35 milhões de toneladas de estéril do cenário do método combinado para o do método perfuração e desmonte. Por fim, apesar da massa de minério ser superior no cenário do método perfuração e desmonte, devido à maior diluição e conseqüente redução do rendimento do material, a massa de produto resultante neste cenário foi de aproximadamente 18% menor em relação ao cenário do método combinado.

Após a obtenção do sequenciamento, foi possível também fazer uma análise da variação dos valores de carbono fixo, poder calorífico e também da massa de produto obtida por ano. Os gráficos das Figuras 43, 44 e 45 abaixo ilustram estas variações para os dois métodos considerados.

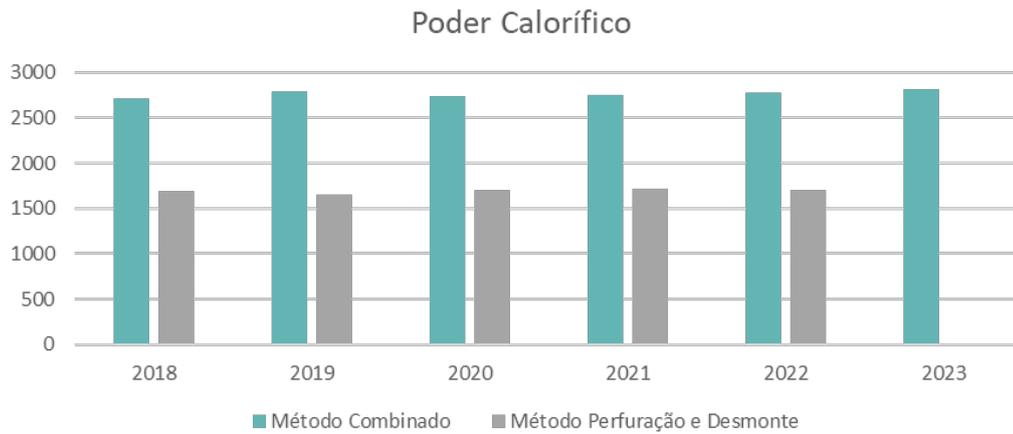


FIGURA 43: Gráfico de poder calorífico

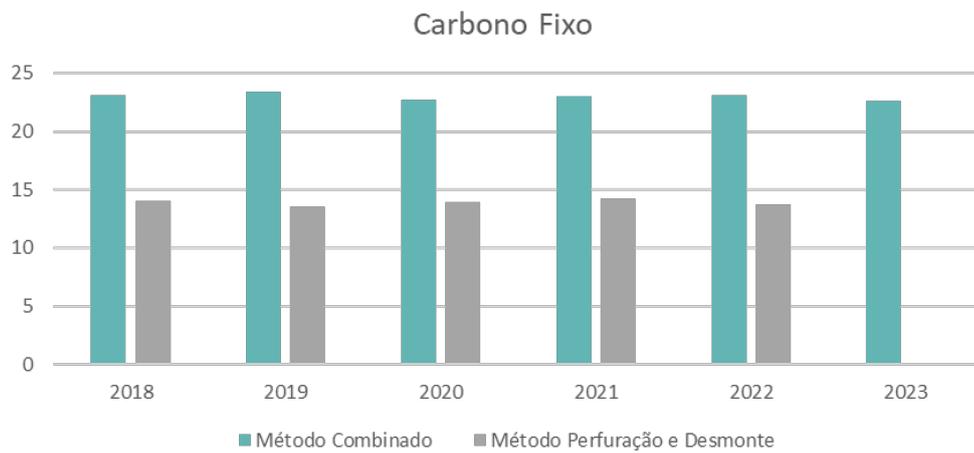


FIGURA 44: Gráfico de Carbono fixo

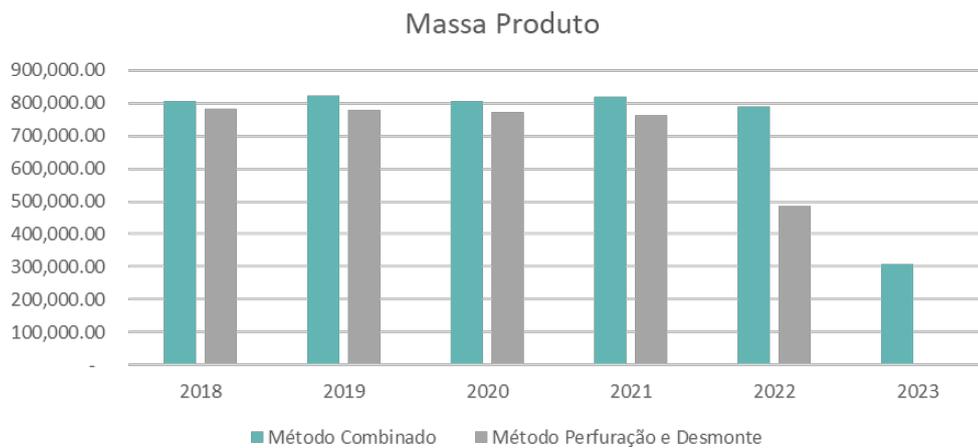


FIGURA 45: Gráfico de massa de produto

5.1.2 COMPARATIVO ECONÔMICO

O comparativo econômico foi realizado em duas etapas. Primeiramente foi feita uma análise utilizando como base os valores não descontados atribuídos a cada uma das camadas pela aplicação da função benefício. Dentro desta análise comparou-se o custo total para se lavrar as 30 tiras em ambos os cenários e a receita total obtida em cada um dos casos. Além disso foi feita uma análise discreta de uma das tiras para os dois cenários com o intuito de se obter uma maior percepção dos resultados totais. A segunda etapa do comparativo foi feita com base nos valores retornados após a realização de um sequenciamento produtivo básico para os cenários. Nesta análise adicionou-se os custos capitais de aquisição dos equipamentos e também o custo de decapeamento. Logo, a base deste segundo comparativo foi a análise dos valores de VPL obtidos para os dois cenários do estudo.

Após a aplicação da função benefício obteve-se para a reserva do cenário do método combinado um custo total de US\$ 322.910.709,84 sendo um custo médio por tira de US\$ 10.763.690,33. Esse valor retornou uma média de 7,04 dólares por tonelada. A receita total obtida para as 30 tiras deste cenário foi de US\$ 436.925.966,24, tendo o valor médio de receita por tira de US\$ 14.564.198,87. Por fim obteve-se um lucro total de US\$ 114.015.256,40 e um lucro por tonelada de US\$ 2,49. Os custos e receitas discretizados por tira podem ser vistos no apêndice 2.

Para o cenário do método de perfuração e desmonte obteve-se um custo total de US\$ 345.670.395,52 sendo um custo médio por tira de US\$ 11.522.346,52, retornando um valor médio de 7,54 dólares por tonelada. A receita total obtida para o cenário foi de US\$ 359.959.426,52, tendo o valor médio de receita por tira de US\$ 11.998.647,55. Por fim obteve-se um lucro total de US\$ 14.289.031,00 e um lucro por tonelada de US\$ 0,31. Os custos detalhados por tira deste cenário podem ser visualizados no apêndice 1.

O gráfico da Figura 46 abaixo ilustra de forma resumida os valores descritos acima.

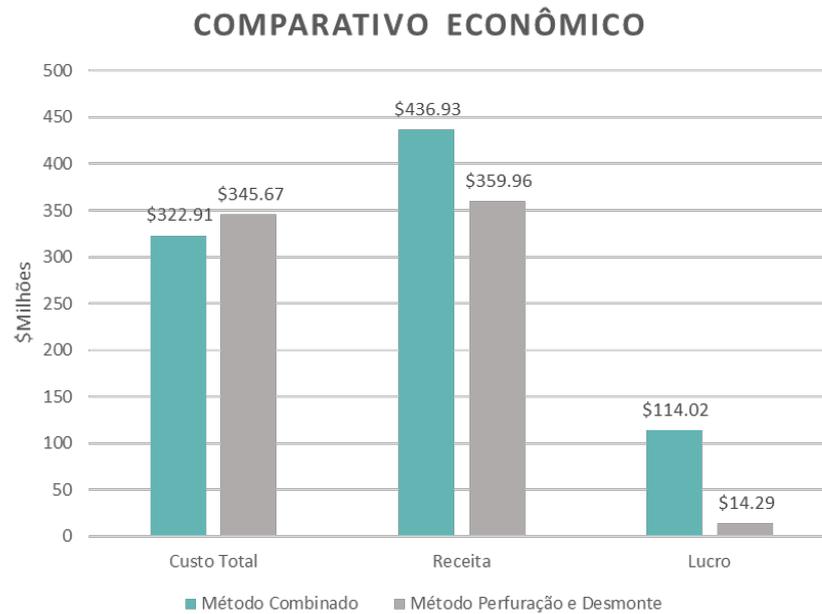


FIGURA 46: Gráfico de comparativo econômico

Como mencionado anteriormente uma análise um pouco mais discreta foi feita tomando-se como exemplo a tira de número 1 dos dois diferentes cenários. Nesta análise comparou-se o custo total para se lidar com o minério, ou seja, para lavar e beneficiar todo o material classificado como minério da tira número 1 (denominado no gráfico como “Custo total Minério”). Além disso, comparou-se o custo total para somente lavar todo o material da tira 1, sendo ele minério e estéril (denominado no gráfico como “Custo total de lavra”) e também foi feito um comparativo entre o custo total das tiras número 1 dos dois cenários. Neste último comparativo foi computado o custo total para se lidar com o minério (lavra e beneficiamento do mesmo) com o custo de lavra do estéril (denominado no gráfico como “Custo total”). A Figura 47 abaixo apresenta o gráfico com os comparativos.

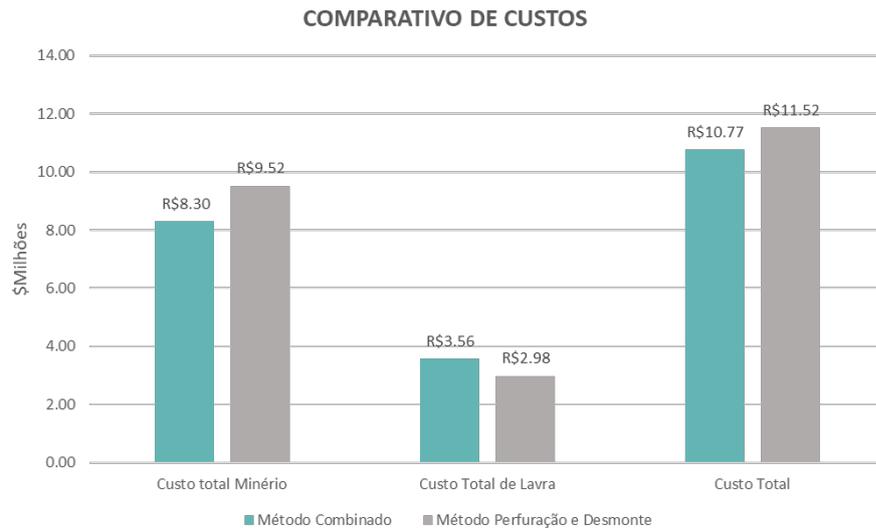


FIGURA 47: Gráfico de comparativo de custos

A partir do gráfico acima é possível perceber que devido à maior massa de minério estar presente no cenário de perfuração e desmonte, o mesmo apresenta um maior custo para se lidar com este tipo de material. Já na análise de “Custo Total de Lavra” percebe-se que o cenário do método combinado apresenta um maior valor. Isso ocorre devido ao fato de que o custo unitário de lavra com o minerador de superfície é superior ao custo de lavra com a metodologia de perfuração e desmonte e uso de escavadeira. Já em relação ao custo total, o mesmo é maior para o cenário de perfuração e desmonte principalmente pelo fato do mesmo ter de beneficiar uma maior massa de minério (com alta diluição) para tentar se aproximar da produção de produto obtida no cenário do método combinado.

Antes de partir para a análise de sequenciamento, calculou-se o investimento capital total para aquisição do número de equipamentos necessários para cada um dos cenários. A Figura 48 abaixo demonstra estes valores.

Cenário	Equipamento	Número	Total CAPEX
Método Combinado	Wirtgen 2200 SM	2	US\$ 5,500,000.00
	Caterpillar 374	2	
Método Perfuração e Desmonte	Caterpillar 374	5	US\$ 3,500,000.00

FIGURA 48: Capex total para os cenários

Considerou-se que todos estes equipamentos seriam comprados no ano de início das atividades de lavra.

Após a execução do sequenciamento produtivo dos dois cenários considerados na análise foi possível obter os valores descontados ano a ano e por fim obter uma aproximação dos valores presente líquido (VPL) de cada um dos empreendimentos e novamente realizar uma comparação de métodos. É importante salientar novamente que a taxa anual de desconto utilizada para este estudo em ambos os cenários foi de 10%.

Para o cenário do método combinado o empreendimento se estendeu por um total de 6 anos (de 2018 a 2023) e foi possível obter um VPL de US\$ 45.003.919,90. A Figura 49 abaixo ilustra a variação dos valores obtidos a cada ano.

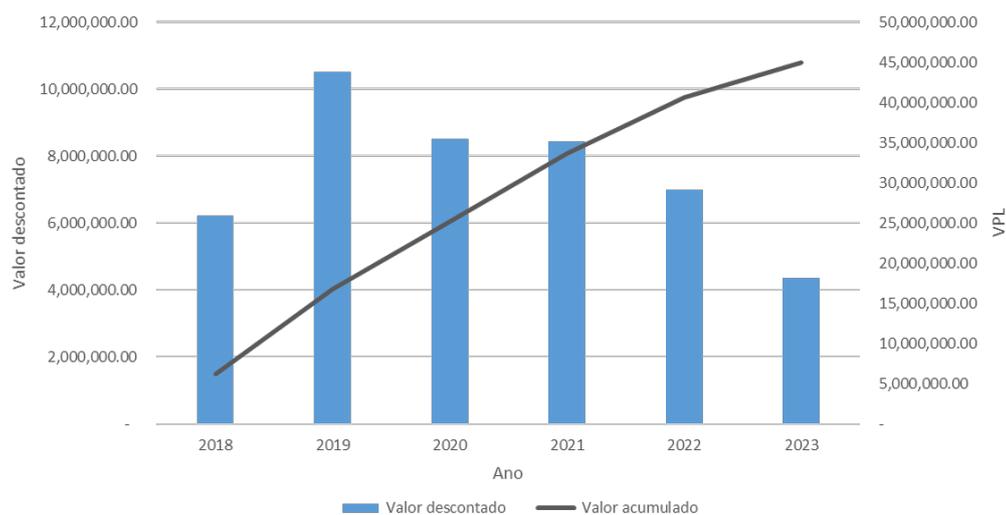


FIGURA 49: VPL do cenário do método combinado

Para o cenário do método de perfuração e desmonte o empreendimento se estendeu por um total de 5 anos (de 2018 a 2022) e resultou em um VPL de US\$-27,352,375.53. A Figura 50 abaixo ilustra a variação dos valores ao longo dos anos.

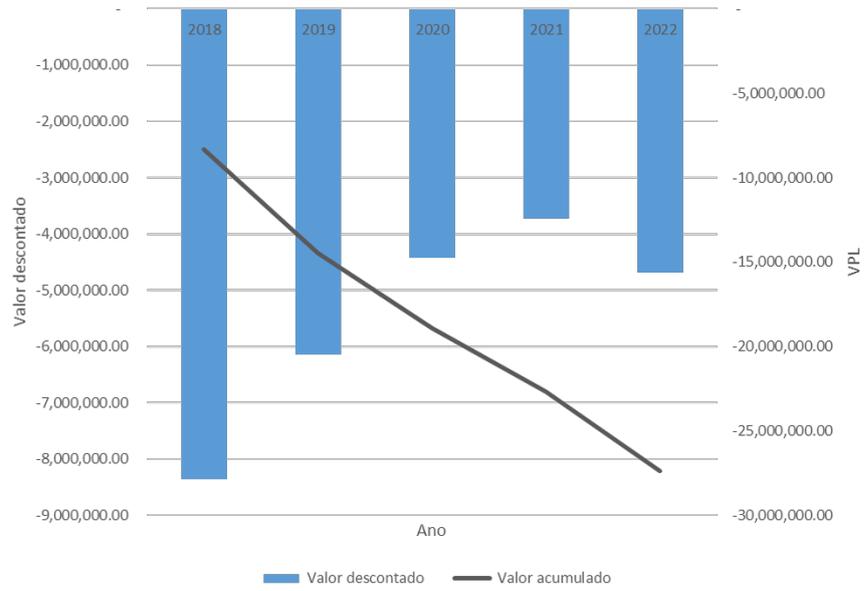


FIGURA 50: VPL do cenário do método PERFURAÇÃO E DESMONTE

6 CONCLUSÕES

Após a realização do estudo comparativo foi possível analisar os impactos físicos e econômicos causados por cada um dos métodos analisados. As análises demonstraram que a adoção do método combinado nas operações de lavra em tiras para o depósito de carvão hipotético considerado resultou em uma maior seletividade dos materiais e conseqüentemente uma menor diluição/perdas. Dessa forma a adoção do método combinado resultou em uma obtenção de 12,72 milhões de toneladas de minério, 33,13 milhões de toneladas de estéril e 4,35 milhões de toneladas de produto. As operações com a utilização deste método perduraram por um total de 6 anos e o VPL alcançado foi de US\$ 45.003.919,90. Já a adoção do método de perfuração e desmonte e uso de escavadeiras resultou em uma diluição e perdas muito maiores. As massas, em tonelada, obtidas após a lavra completa da reserva foram de 15,07 milhões, 30,78 milhões e 3,58 milhões de minério, estéril e produto respectivamente. O valor de VPL obtido foi de US\$-27,352,375.53 e as operações se estenderam por 5 anos.

Dessa forma é possível concluir que para o depósito proposto no estudo, a seletividade obtida com a utilização do método combinado foi o fator determinante para o melhor desempenho do método durante as análises físicas e econômicas. As vantagens proporcionadas pela utilização do minerador de superfície na lavra de camadas pouco espessas de material se mostraram muito eficientes frente à metodologia de lavra convencional que se utiliza da perfuração e desmonte. Ao estender a análise para o âmbito econômico, por mais simples que o estudo tenha sido feito, foi possível perceber que a utilização da metodologia de perfuração e desmonte inviabilizou as operações sendo, portanto não eficiente em certas situações. Logo, apesar do alto custo de aquisição dos mineradores de superfície em comparação ao custo das escavadeiras consideradas, é possível reafirmar a grande eficiência que os mineradores apresentam para lavra de corpos tabulares. Dessa forma empresas tanto do ramo da mineração de Carvão, Bauxita e até calcário deveriam considerar a utilização deste tipo de equipamento nos estudos de *trade-off* para otimizar suas operações.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, a análise econômica poderia ser mais bem detalhada de forma a considerar um maior número de fatores compreendidos em um empreendimento minero. Além disso sugere-se a realização de um estudo de sequenciamento para as operações de decapeamento uma vez que estas são consideradas vitais para operações de lavra em tiras. Por fim este tipo de estudo poderia ser estendido a operações de lavra de diferentes commodities tais como Bauxita e calcário.

REFERÊNCIAS

- Aykul, H., Yalcm, E., Ediz, I. G., Dixon-Hardy, D. W., & Akcakoca, H. (Março de 2007). Equipment selection for high selective excavation surface coal mining. (2017). *Caterpillar Performance Handbook*.
- Dyer, G., & Hill, K. (2011). Strip Mining. Em P. Darling, *SME Mining Engineering Handobook* (Vol. 3º, pp. 989 - 1012).
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). Surface Mining Mechanical Extraction Methods. Em *Introductory Mining Engineering* (Vol. 2º, pp. 197-208).
- Index Mundi*. (Abril de 2018). Fonte: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=coal-australian&months=60>
- Kishore, N., Rao, M., & Dipanjan, D. (Outubro de 2017). Planning of a Surface Miner in a Mega Opencast Project - A Case Study.
- Nelson, M. G. (2011). Evaluation of Mining Methods and Systems. Em P. Darling, *SME Mining Engineering Handbook* (Vol. 3º, pp. 341 - 348).
- Onederra, I. (2014). Lecture: Rock breakage with pick cutters. Brisbane, Austrália.
- Origliasso, C., Cardu, M., & Kecojevic, V. (Fevereiro de 2013). Surface Miners: Evaluation of the Production Rate and Cutting Performance Based on Rock Properties and Specific Energy.
- Otoni, D. (2017). *Estudo dos parâmetros de influência no planejamento do decapeamento por trator de esteiras no método de lavra em tiras*.
- Rostami, J. (2011). Mechanical Rock Breaking. Em P. Darling, *SME Mining Engineering Handbook* (pp. 417 - 434).
- Seib, W. (2014). Lecture: Strip Mining: Introduction and Principles. Brisbane, Austrália.
- South African Managers Association (SACMA). (2005). *Surface Strip Coal Mining Handbook*. Johannesburg, Africa do Sul.
- VÄLI, E. (2010). Best Available Technology for the Environmentally Friendly Mining with Surface Miner.
- Wirtgen Group Company. (2017). *Wirtgen Surface Mining Manual - Applications and Planning Guide*.

APÊNDICE 1 – EQUAÇÕES DA FUNÇÃO BENEFÍCIO

$$\text{Massa de Produto} = \text{Tonelagem total} * \left(\frac{\text{YIELD}}{100}\right) * \text{Recuperação metalúrgica} * \text{Diluição operacional}$$

$$\text{Custo de Lavra para minério (Método combinado)} = \text{Tonelagem de minério} * 2.75$$

$$\begin{aligned} \text{Custo de Lavra para minério (Método Perfuração e Desmonte)} \\ = \text{Tonelagem de minério} * 1.95 \end{aligned}$$

$$\text{Custo de Processamento} = \text{Tonelagem de minério} * 17$$

$$\text{Custo de lavra (Espessura > 1.3)} = \text{Tonelagem de estéril} * 1.95$$

$$\text{Custo de lavra (Espessura < 1.3)} = \text{Tonelagem de estéril} * 3.45$$

$$\text{Receita} = \text{Tonelagem de produto} * 94$$

APÊNDICE 2 - DETALHAMENTO ECONÔMICO

MÉTODO COMBINADO			
TIRA	CUSTO	CUSTO/t	RECEITA
1	10,768,239.64	7.05	14,562,922.24
2	10,769,415.66	7.05	14,564,822.52
3	10,768,235.79	7.05	14,562,970.09
4	10,771,314.87	7.05	14,568,704.37
5	10,765,006.95	7.04	14,560,378.55
6	10,767,886.08	7.04	14,561,268.64
7	10,765,900.61	7.04	14,557,915.92
8	10,767,895.21	7.05	14,561,582.71
9	10,770,175.66	7.05	14,567,096.10
10	10,768,766.12	7.05	14,564,522.88
11	10,771,289.07	7.05	14,568,680.30
12	10,769,977.00	7.05	14,565,411.35
13	10,767,546.01	7.05	14,562,364.46
14	10,766,328.71	7.05	14,559,117.04
15	10,768,653.62	7.05	14,563,162.53
16	10,771,618.02	7.05	14,569,572.01
17	10,762,802.70	7.04	14,551,484.64
18	10,767,200.26	7.05	14,560,982.82
19	10,768,004.26	7.05	14,563,121.34
20	10,769,582.05	7.05	14,564,910.37
21	10,770,580.33	7.05	14,567,399.51
22	10,770,108.36	7.05	14,566,126.92
23	10,768,919.78	7.05	14,563,775.60
24	10,767,791.56	7.05	14,562,877.09
25	10,689,911.10	6.99	14,564,035.83
26	10,771,124.65	7.05	14,567,915.70
27	10,767,692.04	7.05	14,561,945.03
28	10,772,566.38	7.05	14,570,866.52
29	10,688,917.32	6.99	14,561,956.55
30	10,777,260.02	7.05	14,578,076.61
TOTAL	322,910,709.84	7.04	436,925,966.24
LUCRO			114,015,256.40
LUCRO/t			2.49

FIGURA 51: Detalhamento econômico do método combinado

MÉTODO PERFURAÇÃO E DESMONTE			
TIRA	CUSTO	CUSTO/t	RECEITA
1	11,523,570.75	7.54	11,998,514.76
2	11,521,723.51	7.54	12,000,473.35
3	11,520,849.15	7.54	11,996,975.67
4	11,522,940.79	7.54	12,000,355.98
5	11,519,759.97	7.54	11,997,277.75
6	11,526,338.73	7.54	12,003,811.95
7	11,520,807.88	7.54	11,994,705.13
8	11,523,020.07	7.54	11,997,978.63
9	11,522,299.79	7.54	11,999,990.65
10	11,521,096.43	7.54	11,995,463.80
11	11,524,337.26	7.54	12,006,959.15
12	11,521,911.47	7.54	11,998,618.33
13	11,519,677.86	7.54	11,996,544.15
14	11,520,510.36	7.54	11,994,185.06
15	11,522,587.43	7.54	11,998,316.02
16	11,522,456.63	7.54	12,002,054.07
17	11,518,439.16	7.54	11,985,959.03
18	11,520,828.21	7.54	11,995,816.04
19	11,520,105.75	7.54	11,997,653.96
20	11,522,715.73	7.54	11,998,777.38
21	11,521,899.30	7.54	11,996,531.95
22	11,523,022.54	7.54	11,999,501.84
23	11,524,872.93	7.54	11,999,393.63
24	11,521,359.39	7.54	11,998,385.19
25	11,522,512.15	7.54	11,998,531.88
26	11,524,167.85	7.54	12,001,704.59
27	11,521,889.59	7.54	11,998,464.57
28	11,523,292.02	7.54	12,001,932.56
29	11,521,669.54	7.54	11,996,280.53
30	11,529,733.29	7.54	12,008,268.93
TOTAL	345,670,395.52	7.54	359,959,426.52
LUCRO			14,289,031.00
LUCRO/t			0.31

FIGURA 52: Detalhamento econômico do método perfuração e desmonte

