



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



GABRIELA FONSECA ABREU

ESTUDO DA PRODUTIVIDADE DE TRATORES D11T CD NO MÉTODO DE LAVRA  
POR TIRAS VARIANDO OS ÂNGULOS DO PIT EM UMA MINA DE BAUXITA

OURO PRETO

2017

GABRIELA FONSECA ABREU

ESTUDO DA PRODUTIVIDADE DE TRATORES D11T CD NO MÉTODO DE LAVRA  
POR TIRAS VARIANDO OS ÂNGULOS DO PIT EM UMA MINA DE BAUXITA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Lavra de mina

Orientador: Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa

OURO PRETO

2017

A162e

Abreu, Gabriela Fonseca.

Estudo da produtividade de tratores D11T CD no método de lavra por tiras variando os ângulos do pit em uma mina de bauxita [manuscrito] / Gabriela Fonseca Abreu. - 2017.

52f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Minas e mineração - Equipamentos e acessórios. 2. Lavra a céu aberto - Método open pit. I. Sousa, Wilson Trigueiro de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.015

Catálogo: [ficha@sisbin.ufop.br](mailto:ficha@sisbin.ufop.br)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

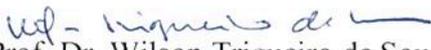
Aos 09 dias do mês de maio de 2017, às 16:00 horas, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa da monografia de final de curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, pela aluna **Gabriela Fonseca Abreu**, intitulado: “**ESTUDO DA PRODUTIVIDADE DE TRATORES DIIT CD NO MÉTODO DE LAVRA POR TIRAS VARIANDO OS ÂNGULOS DO PIT EM UMA MINA DE BAUXITA.**”, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa** (orientador), **Prof. Dr. Hernani Mota de Lima** e **Eng<sup>a</sup> de Minas Mariana Queiroz Pinho**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela *aprovação* da candidata, com a nota *10,0* concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

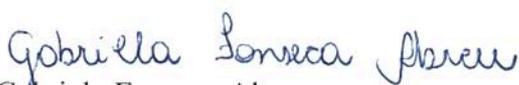
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pela discente.

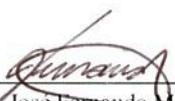
Ouro Preto, 09 de maio de 2017.

  
Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa  
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador

  
Prof. Dr. Hernani Mota de Lima  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Eng<sup>a</sup> de Minas Mariana Queiroz Pinho  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Gabriela Fonseca Abreu

  
Prof. Ms.C. José Fernando Miranda  
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

A Deus,  
aos meus pais Adriana e Francisco,  
ao meu irmão Francisco.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, minha fonte de força e esperança que me proporcionou a dádiva da vida, saúde, inteligência e capacidade para encerrar este ciclo.

Aos meus pais Adriana e Francisco, por sempre me apoiarem e acreditarem em minha capacidade. Meu agradecimento eterno pelos ensinamentos, amor, esforço e palavras de motivação que me fortaleceram ao longo de toda caminhada.

Ao meu irmão Francisco, por sempre me ajudar, me aconselhar e me manter otimista nos momentos em que mais precisei.

Às famílias Abreu e Fonseca por sempre torcerem por mim, em especial minha tia Patrícia, meu exemplo.

Aos meus amigos de Passos, Três Pontas e principalmente de Ouro Preto, pela cumplicidade e amizade ao longo desses cinco anos.

*“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.”*

**Leonardo da Vinci**

## RESUMO

Dentre os métodos de lavra a céu aberto, o mais aplicado para as jazidas de bauxita no Brasil é o método por tiras. A produção de bauxita no Estado do Pará representa aproximadamente 90% da produção nacional. A etapa de decapeamento da tira neste método é de suma importância por ser responsável pela exposição da camada de minério e, portanto, qualquer otimização nesta fase ocasiona em melhorias e ganhos no processo. Uma das principais máquinas que realizam a remoção do capeamento nas minas de bauxita do país são os tratores de esteira. Neste sentido, o presente trabalho desenvolveu um estudo referente à produtividade dos tratores de esteira do tipo D11T CD durante a etapa de decapeamento em uma mina de bauxita localizada no Estado do Pará, mais precisamente, na região Amazônica Oriental. O estudo buscou analisar algumas das variáveis envolvidas no processo, especificamente a variação dos ângulos de corte e de deposição utilizados pelos tratores durante a operação. A metodologia contou com simulações realizadas no *software* DozSim da Caterpillar®, análise dos ângulos do pit utilizados nas tiras da mina em questão e, por fim, execução de testes práticos em três tiras. De posse desses dados, concluiu-se que à medida que os ângulos de corte e deposição crescem a produtividade aumenta, entretanto, o ganho de produtividade é mais expressivo com o crescimento do ângulo de deposição. Com o levantamento dos ângulos do pit constatou-se o elevado desvio operacional em relação aos ângulos planejados.

**Palavras-chave:** Lavra de mina por tiras, trator de esteira, produtividade, ângulos do pit, bauxita, DozSim.

## ABSTRACT

The most applied method for bauxite deposits in Brazil is the stripping mining method. The production of bauxite in the State of Pará represents approximately 90% of the national production. The overburden removal step in this method is extremely important because it is responsible for the exposure of the ore layer and therefore any optimization at this stage leads to improvements and gains in the process. One of the main machines that perform the overburden removal in the bauxite mines of the country are the bulldozers. In this sense, the present work developed a study concerning the productivity of the bulldozers D11T CD during the overburden removal stage in a bauxite mine located in the State of Pará, more precisely, in the Eastern Amazon region. The study sought to analyze some of the variables involved in the process, specifically the variation of cutting and deposition angles used by the bulldozers during the operation. The methodology included simulations performed in the Caterpillar® DozSim software, analysis of the pit angles used in the strips of the mine in question and, finally, the execution of practical tests in three strips. With these data, it was concluded that as the cutting and deposition angles increase the productivity also increases. However, the productivity gain is more expressive with the growth of the deposition angle. With the pit angles survey, the high operational deviation was observed in relation to the planned angles.

**Keywords:** Stripping mining method, bulldozer, productivity, pit angles, bauxite, DozSim.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Lavra por tiras (stripping mining method) .....	14
Figura 2 – Operações que envolvem o método de lavra por tiras .....	15
Figura 3 – Remoção de estéril feita por trator de esteira.....	16
Figura 4 – Parte rodante do trator de esteira.....	20
Figura 5 – Trator de esteira com lâmina de corte .....	21
Figura 6 – Escarificadores .....	22
Figura 7 – Tratores de esteira de pequeno porte.....	23
Figura 8 – Tratores de esteira de médio porte .....	23
Figura 9 – Tratores de esteira de grande porte .....	23
Figura 10 – Lâminas utilizadas nos tratores D11T.....	24
Figura 11– Vista Frontal do trator D11T CD .....	25
Figura 12 – Perfil do trator D11T CD .....	25
Figura 13 – Geometria do pit.....	27
Figura 14 – Tela de inserção dos dados.....	27
Figura 15 – Tela de saída dos resultados.....	28
Figura 16 – Perfil típico de depósito de bauxita da Amazônia Oriental.....	32
Figura 17 – Imagem representativa da distância de recuo para um ângulo de corte de 17°.....	35
Figura 18 – Perfil de uma das tiras analisadas.....	35
Figura 19 – Fim da lavra .....	37
Figura 20 – Início decapeamento.....	37
Figura 21 – Enchimento da cava .....	38
Figura 22 – Início e subida do depósito.....	38
Figura 23 – Retorno ao ponto de corte .....	39
Figura 24 – Decapeamento finalizado .....	39
Figura 25 – Equipe de topografia e scanner a laser.....	40
Figura 26 – Imagem após escaneamento da tira B .....	40
Figura 27 – Gráfico da Produtividade <i>versus</i> Ângulo de corte .....	43
Figura 28 – Produtividade <i>versus</i> Ângulo de deposição .....	43
Figura 29 – Curvas de produtividade <i>versus</i> Ângulos do pit .....	44
Figura 30 – Produtividade <i>versus</i> Espessura de estéril.....	44
Figura 31 – Produtividade <i>versus</i> Espessura de minério.....	45
Figura 32 – Ângulos de corte das tiras analisadas.....	45
Figura 33 – Ângulos de deposição das tiras analisadas.....	46
Figura 34 – Ganhos e perdas de produtividade das tiras analisadas.....	48

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Comparação entre trator de esteira e de rodas .....	18
Tabela 2 – Especificações técnicas de tratores de esteira D11T CD.....	26
Tabela 3 – Minerais de alumínio e composição química da bauxita.....	31
Tabela 4 – Parâmetros fixos utilizados nas simulações.....	33
Tabela 5 – Resultado das simulações para diferentes ângulos de corte e deposição.....	42
Tabela 6 – Comparação entre a produtividade planejada x realizada .....	47
Tabela 7 – Dados dos testes práticos .....	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	12
2.1	OBJETIVO GERAL .....	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
3.1	O MÉTODO DE LAVRA POR TIRAS ( <i>STRIPPING MINING METHOD</i> ).....	13
3.2	GENERALIDADES SOBRE TRATORES.....	17
3.3	TRATORES DE ESTEIRA .....	19
3.3.1	Tratores de esteira disponíveis no mercado brasileiro.....	22
3.3.2	Trator de esteira D11 T CD .....	24
3.4	<i>SOFTWARE DOZSIM</i> .....	26
3.5	BAUXITA .....	28
3.5.1	Mineralogia.....	30
3.5.2	Mineração de Bauxita no Brasil .....	31
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	32
4.1	SIMULAÇÕES NO <i>SOFTWARE DOZSIM</i> .....	33
4.2	LEVANTAMENTO DOS ÂNGULOS DO PIT .....	34
4.3	TESTES EM CAMPO .....	36
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	42
5.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NO <i>DOZSIM</i> .....	42
5.2	RESULTADOS DO LEVANTAMENTO DOS ÂNGULOS DO PIT.....	45
5.3	RESULTADO DOS TESTES EM CAMPO .....	48
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	50
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	51

## 1 INTRODUÇÃO

O método de lavra por tiras (*Stripping mining*) é um dos métodos de lavra a céu aberto aplicado para depósitos do tipo tabular que se baseia na exploração de faixas com grande comprimento e pequena largura. A maioria das jazidas de bauxita apresentam as características necessárias para a aplicação deste método.

No Brasil, a produção de bauxita se concentra no Estado do Pará e utiliza o método de lavra por tiras que possui, geralmente, as seguintes etapas: supressão vegetal, decapeamento da camada de estéril, desmonte mecânico da bauxita, carregamento e transporte. Dentre estas fases se destaca a etapa de remoção do estéril que é responsável por expor a camada de minério e conseqüentemente é essencial no processo produtivo da bauxita. Por isso, os investimentos em equipamentos para a realização desta atividade são consideráveis.

Um dos equipamentos mais utilizados para executar a etapa de decapeamento são os tratores de esteira. Dentre os parâmetros que influenciam esta atividade pode-se citar: o tempo de decapeamento por tira, distâncias médias de transporte, ângulos de corte e deposição utilizados na operação, produtividade dos tratores de esteira, etc. Desta forma, o presente trabalho apresenta um estudo para avaliar a produtividade dos tratores de esteira D11T CD em relação aos ângulos de corte e de deposição, utilizando dados de uma mina de bauxita localizada no Estado do Pará.

O estudo objetivou a otimização da produtividade dos tratores D11T CD através de análises dos resultados de simulações feitas no *software* DozSim da Caterpillar®, realização de testes práticos e análise da operação desses equipamentos através do levantamento das tiras da mina de bauxita em questão.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo do presente trabalho foi o de analisar a relação entre a produtividade dos tratores de esteira (modelo D11T CD) e os ângulos de corte e deposição que definem o pit, utilizados durante a operação de decapeamento no método de lavra por tiras.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar simulações no *software* DozSim da Caterpillar® para encontrar uma relação teórica entre a produtividade dos tratores D11T CD e ângulos do pit;
- Levantar e analisar os ângulos das tiras de uma mina de bauxita;
- Realizar testes em campo para verificar a produtividade dos tratores, na etapa de decapeamento, em diferentes ângulos e analisar seus resultados.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O MÉTODO DE LAVRA POR TIRAS (*STRIPPING MINING METHOD*)

Os métodos tradicionais de lavra dividem-se em duas grandes categorias baseadas no local: superfície ou subterrâneo. A lavra a céu aberto, a qual ocorre em superfície, inclui métodos mecânicos, tais como lavra por bancadas e por tiras, e métodos hidráulicos, tais como lavra com soluções e de placers (HARTMAN, 1992).

De acordo com Hartman e Mutmansky (2002), o método de lavra por tiras é um método de lavra a céu aberto usado principalmente para carvão e outros depósitos tabulares e se assemelha às operações usadas na lavra por bancadas, diferenciando, entre outros aspectos, pelo fato de o capeamento não ser transportado para um bota-fora ou pilha de estéril, mas ser depositado diretamente nas áreas adjacentes já lavradas. Assim, o manuseio de material consiste na escavação e transporte, geralmente combinados em uma única operação e executados por um único equipamento, o que faz dele o método de mais alta produtividade e geralmente de menor custo unitário dentre os de ampla aplicação em lavra a céu aberto.

Não é somente pelo fato das operações de escavação e transporte estarem em uma única etapa que torna o método atrativo. O fato de permitir depositar o material estéril em áreas previamente mineradas significa que a operação de decapeamento propriamente dita, fica concentrada em uma área restrita. Além disso, a deposição de material estéril em seu destino final permite que seja feita a recomposição do terreno imediatamente após a lavra, como o corte fica aberto por pouco tempo têm-se ângulos de taludes maiores (HARTMAN e MUTMANSKY, 2002). A Figura 1 ilustra um arranjo da lavra a céu aberto sendo realizada por este método.

De acordo com Hartman e Mutmansky (2002), a chave para a produtividade no método de lavra por tiras está relacionada ao equipamento responsável pelo decapeamento. Utilizando as maiores máquinas do mundo, o número de frentes ativas na mina é reduzido e a produtividade é aumentada. Entretanto, tem-se como desvantagem a responsabilidade da produção total por um equipamento de lavra e a ocorrência de danos mecânicos pode gerar enormes prejuízos.

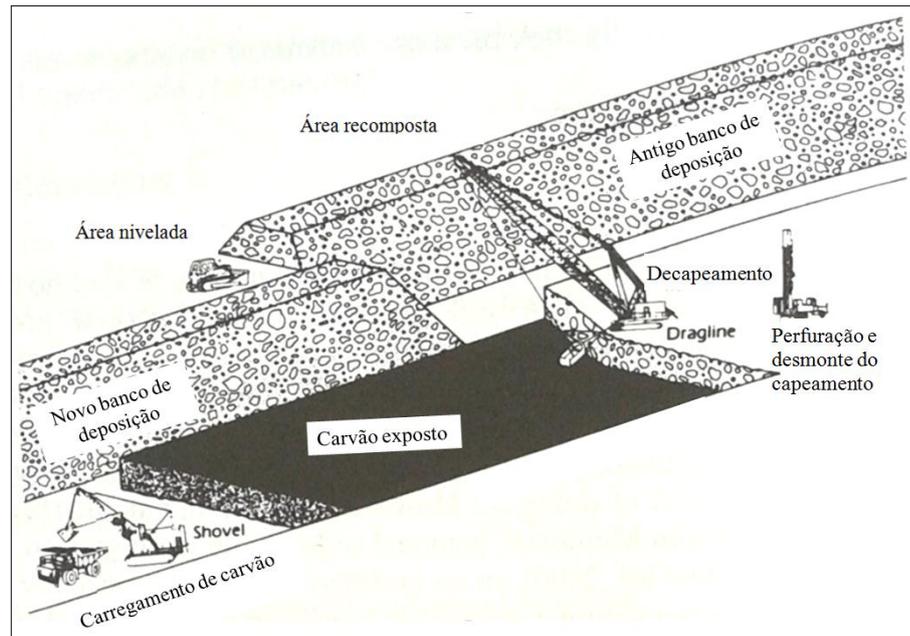


Figura 1 – Lavra por tiras (*stripping mining method*) (Adaptado de HARTMAN e MUTMANSKY, 2002)

As operações unitárias que envolvem a lavra por tiras de acordo com Hartman e Mutmansky (2002) são:

- Perfuração: equipamentos como trado, perfuratriz rotativa ou roto-percussiva são os mais usuais, a escolha irá depender da dureza da rocha;
- Detonação: utiliza ANFO ou lamas como explosivos que são carregados mecânica ou manualmente, detonação elétrica ou por cordel. Há também a alternativa de se utilizar o desmonte mecânico com o uso de escarificadores presentes nos tratores de esteira;
- Escavação: realizada por *draglines*, escavadeiras *shovel*, *buckets-wheel*, carregadeiras, tratores, *scrapers*;
- Transporte: caso for necessário é executado por caminhões, correias transportadoras, *scrapers*.

Além das operações unitárias citadas acima temos também, segundo Alcoa (2005): supressão vegetal e limpeza, remoção do solo orgânico e remoção do capeamento. As jazidas minerais que são propícias à lavra a céu aberto geralmente são recobertas por uma camada rochosa composta de material terroso, areia, cascalho, rochas, misturas destes materiais ou mesmo água, denominada capeamento. A etapa de remoção desta camada (decapeamento)

geralmente é realizada por máquinas básicas de terraplanagem, como tratores de esteira e *scrapers* (SILVA, 2005).

As operações auxiliares incluem a reabilitação ambiental da área, estabilidade dos taludes, construção e manutenção de acessos para os caminhões, manutenção mecânica, drenagem e bombeamento do pit, comunicação, distribuição de energia, controle de poeira, saúde e segurança (HARTMAN e MUTMANSKY, 2002). A Figura 2 ilustra alguma dessas etapas que envolvem o método.



Figura 2 – Operações que envolvem o método de lavra por tiras (RODOVALHO e TOMI, 2014)

A remoção de estéril e minério é realizada por cortes longos e paralelos que possuem alta relação comprimento/largura. A largura dos cortes a serem removidos em avanços sucessivos da mina é função do tamanho do equipamento. A direção de avanço da lavra e as dimensões dos cortes têm influência considerável sobre a quantidade de material a ser removido em um determinado momento e, portanto, sobre a economia da mina (HARTMAN, 1992). Segundo Alcoa (2005), a extração do capeamento (estéril) ocorre até que haja a exposição da camada de minério, com o volume de material movimentado em cada corte sendo depositado na tira anterior na qual a remoção do minério já foi concluída, como mostra a Figura 3.

A associação da etapa de lavra do minério com a de disposição de estéril tem como consequência a não ocupação de novas áreas da mina prevenindo-as de futuros impactos ambientais (ALCOA, 2005). A realização de um diagnóstico ambiental em toda vida útil da mina em sintonia com a sustentabilidade é de suma importância, principalmente para assegurar a preservação da área (SILVA, 2008).

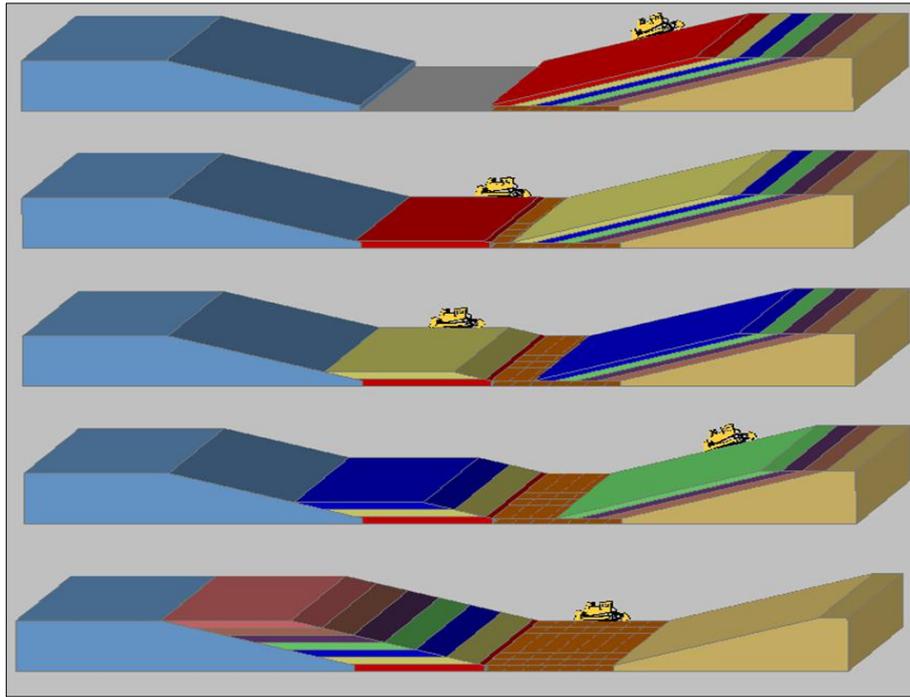


Figura 3 – Remoção de estéril feita por trator de esteira (RODOVALHO e TOMI, 2014)

De acordo com Hartman e Mutmanský (2002), as condições para aplicação deste método são:

- Resistência do minério e da rocha encaixante: qualquer;
- Forma do depósito: tabular ou em camadas;
- Mergulho do depósito: qualquer, preferencialmente horizontal ou de baixo mergulho;
- Tamanho do depósito: grande extensão lateral, contínuo e de espessura moderada;
- Teor do minério: pode ser baixo se outras condições forem favoráveis;
- Uniformidade do minério: uniforme ou quase uniforme;
- Profundidade: sub-superficial (raso).

Algumas vantagens da lavra por tiras são (HARTMAN e MUTMANSKY, 2002):

- Mais alta produtividade;

- Custo de lavra baixo (custo relativo = 10%);
- Uso de grandes equipamentos;
- Produção em larga escala;
- Período curto para start up (pouco desenvolvimento);
- Pouco intensivo em mão-de-obra;
- Cadência flexível;
- Baixo custo com desmonte (fornece várias faces livres para o desmonte);
- Desenvolvimento e acessos simples;
- Mão-de-obra não especializada, exceto alguns operadores chaves (perfuratriz, dragline, bucket-weel);
- Permite alta estabilidade dos taludes;
- Recuperação próxima de 100% (diluição muito baixa);
- Não transporta o capeamento;
- Segurança e higiene satisfatórias.

Entre as desvantagens pode-se citar:

- Limitado pela profundidade (geralmente até 90 m);
- Recuperação ambiental requerida extensa, o que gera grandes despesas;
- Sujeito a condições climáticas;
- Limites maiores para remanuseio;
- Limitado pela relação estéril/minério;
- Grande investimento de capital;
- Produção dependente de um só equipamento;
- Necessita de operações sincronizadas;
- Mais adequado a grandes jazidas.

### 3.2 GENERALIDADES SOBRE TRATORES

Segundo Ricardo e Catalani (2007), o trator é uma unidade de tração autônoma que realiza diversas atividades, algumas executadas pela introdução de acessórios, e é utilizado até mesmo para empurrar outras máquinas. Este equipamento, dependendo de seu fim, é colocado

sobre esteira ou pneumáticos, no primeiro caso o trator é denominado trator de esteira e no segundo, trator de rodas.

A comparação entre os tratores de esteira e de rodas é apresentada na Tabela 1. As definições das características contidas nesta tabela são (RICARDO e CATALANI, 2007):

- Esforço do trator: força contida na barra de tração ou nas rodas motrizes, presente nas esteiras e rodas, respectivamente, essencial para que o equipamento consiga realizar suas tarefas;
- Velocidade: velocidade que a máquina se desloca, é fortemente influenciada pelo dispositivo de montagem, sobre esteira ou sobre rodas;
- Aderência: está relacionada com a habilidade de o trator movimentar-se em diferentes terrenos ou superfícies revestidas não havendo o patinamento dos pneus ou da esteira sobre a região (solo ou revestimento) que o suporta;
- Flutuação: propriedade do trator que possibilita o deslocamento deste em regiões que possuem pequena capacidade de suporte, evitando o afundamento demasiado da esteira ou dos pneus no terreno. Pode ser otimizada com a utilização de esteiras largas, diminuindo a pressão de contato;
- Balanceamento: característica resultante de uma boa distribuição de massa e de um centro de gravidade a pequena altura do chão a qual o trator deve apresentar, proporcionando equilíbrio ao equipamento em diversas circunstâncias de trabalho.

Tabela 1 – Comparação entre trator de esteira e de rodas (RICARDO e CATALANI, 2007)

<b>Característica</b>	<b>Trator de esteira</b>	<b>Trator de rodas</b>
<b>Esforço do trator</b>	Elevado	Elevado limitado pela aderência
<b>Aderência</b>	Boa	Sofrível
<b>Flutuação</b>	Boa	Regular a má
<b>Balanceamento</b>	Bom	Bom
<b>Velocidade</b>	Baixa: máx. 10 km/h (maior desvantagem)	Alta: máx. 60-70 km/h (maior vantagem)

De acordo com Ricardo e Catalani (2007), devido às características dos tratores serem diferentes, os campos de aplicabilidade, obviamente, também serão. A escolha do trator dependerá de fatores como topografia local, capacidade de suporte dos terrenos, distância de deslocamento, etc.

### 3.3 TRATORES DE ESTEIRA

O fato de o trator possuir uma melhor aderência sobre a superfície está relacionado à sua unidade de locomoção ser projetada sobre uma esteira a qual é constituída por placas rígidas de diferentes dimensões e tipos, interligadas entre si. A boa adesão da esteira sobre as irregularidades do solo é devida à presença de um complemento chamado de garra que também possui diferentes tamanhos dependendo do trabalho a ser realizado, quanto maior for o tamanho da garra maior será sua aderência, entretanto, mais difícil será a manobra do trator. A baixa velocidade de locomoção dos tratores de esteira impossibilita o uso destes em trabalhos que envolvam grandes distâncias de percurso o que acarretaria em maiores tempos de ciclo e perdas na produtividade dessas máquinas. Uma das características a se destacar é a capacidade do trator de empurrar grandes quantidades de material sem ocorrer a patinação do mesmo. Em resumo, a aplicabilidade de tratores de esteira envolve tarefas que requerem grandes esforços, executadas em rampas de elevada declividade (topografia acidentada) ou em terrenos de baixa capacidade de suporte, não exigem alta velocidade, executadas em curtas distâncias (<100 m) (RICARDO E CATALANI, 2007).

De acordo com Ricardo e Catalani (2007) a parte rodante do trator de esteira é constituída pela esteira propriamente dita e por alguns componentes (Figura 4) citados a seguir:

- Rodas de guia: roda de superfície lisa que possui a finalidade de alinhar e oferecer a tensão suficiente às esteiras;
- Roda motriz: roda dentada que tem a função de transmitir o torque às esteiras propriamente ditas;
- Elos: peças individuais, justapostas duas a duas, interligadas por pinos articulados, de modo que dois elos consecutivos são articulados, movimentando-se livremente um em relação ao outro;

- Roletes inferiores: blocos de seção circular que giram em torno do seu eixo, apoiando-se sobre a parte superior dos elos;
- Rolete superior: funciona como suporte da porção superior da esteira;
- “Chassis” da esteira: componente que sustenta o peso próprio da superestrutura do trator e o transfere aos roletes inferiores;
- Mola tensora: mola de forma helicoidal que funciona sob tensão e sua finalidade é a de absorver os choques que a esteira enfrenta, afastando ou aproximando a roda de guia da roda motriz;
- Pinos: peças circulares de forma cilíndrica localizadas entre dois elos consecutivos articulados para permitir o movimento de um em relação ao outro;
- Buchas: possuem alta dureza e são constituídas de aço temperado, sua função é envolver o pino contra o desgaste produzido pelo seu contato com os dentes da roda motriz;
- Sapatas: placas individuais, parafusadas a dois elos, que são responsáveis pela distribuição do peso do trator sobre o terreno. Cada sapata contém uma saliência, chamada garra, que melhora a adesão das esteiras sobre o solo.

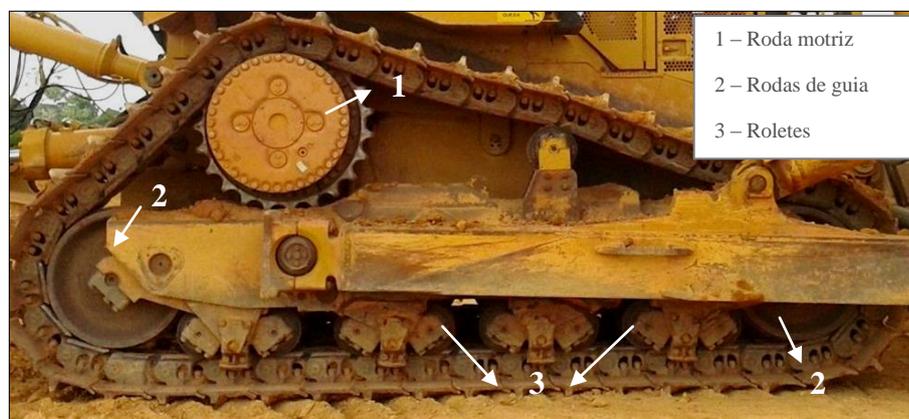


Figura 4 – Parte rodante do trator de esteira (Acervo pessoal)

O trator de esteira pode conter também um implemento chamado de lâmina e passa a ser chamado de trator de lâmina ou *bulldozer* (Figura 5), fato que o torna uma unidade escavo-empurradora capaz de escavar e empurrar o material. Quando provido de lâmina o trator possui alta versatilidade nos trabalhos de terraplanagem podendo realizar diversos tipos de serviços, como exemplo pode-se citar: corte em meia encosta, corte com o canto de lâmina,

corte em trincheiras, escarificação, espalhamento de terra em ponta de aterro, entre outros (RICARDO E CATALANI, 2007).

Segundo Celso (2014), no corte em meia encosta o trator aciona o modo *angle-dozer* que modifica a angulação da lâmina por meio da extensão de um dos cilindros e faz com que o corte e deposição do material se deem na direção do cilindro que não foi estendido. Durante a tarefa, o próprio trator constrói sua plataforma de trabalho e vai compactando o material depositado no aterro à medida que a esteira passa sobre ele. Outra aplicabilidade do trator é na construção de canais de drenagem nas frentes de serviço por meio do recurso canto de lâmina, o qual realiza o corte no centro do canal com a profundidade pretendida. O espalhamento de terra em ponta de aterro é uma das atividades mais relevantes realizadas pelo trator, pois ele empurra as pilhas de materiais depositados por caminhões basculantes ou *motorscrapers* a pequenas distâncias a fim de formar camadas de espessuras iguais que serão compactadas posteriormente.

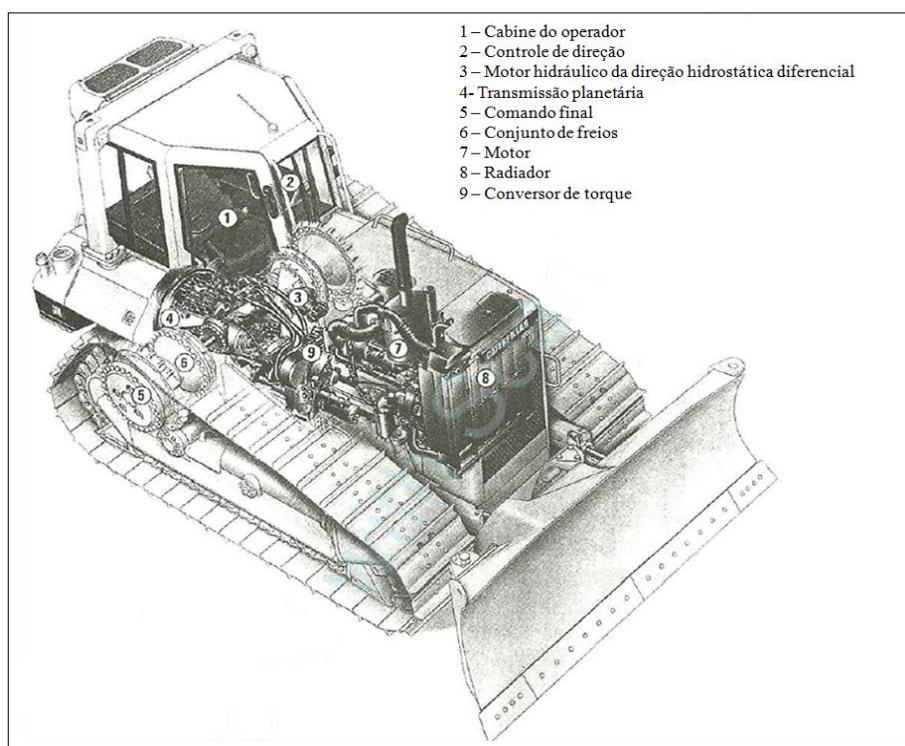


Figura 5 – Trator de esteira com lâmina de corte (RICARDO e CATALANI, 2007)

A escolha do tipo da lâmina que será acoplada no trator é um fator que interfere diretamente na produtividade deste e busca-se aquela que resulta em sua máxima produtividade, os aspectos que devem ser levados em conta nesta seleção são: tipo de serviço

que o trator irá realizar a maior parte do tempo, características do material a ser movimentado e fatores limitantes do trator (CATERPILLAR, 2009).

De acordo com Celso (2014), os tratores de esteira de grande porte podem ser aplicados em atividades de desmonte mecânico para evitar o uso de explosivos na etapa de fragmentação. Neste caso o material é escarificado através de dois componentes chamados de *ripper* e *shank* que se localizam na parte posterior do trator e se movimentam por meio de cilindros hidráulicos. O *ripper* ou escarificador (Figura 6) é a estrutura metálica que recebe e sustenta o *shank*, sendo este o elemento cortante em questão que fragmenta o material e possibilita o desmonte mecânico.



Figura 6 – Escarificadores (Acervo pessoal)

### 3.3.1 Tratores de esteira disponíveis no mercado brasileiro

De acordo com o tipo de serviço, existem no mercado brasileiro vários modelos de tratores de esteira de diferentes capacidades e tamanhos. Nas figuras 7, 8 e 9 são apresentados os principais modelos de pequeno, médio e grande porte, respectivamente.

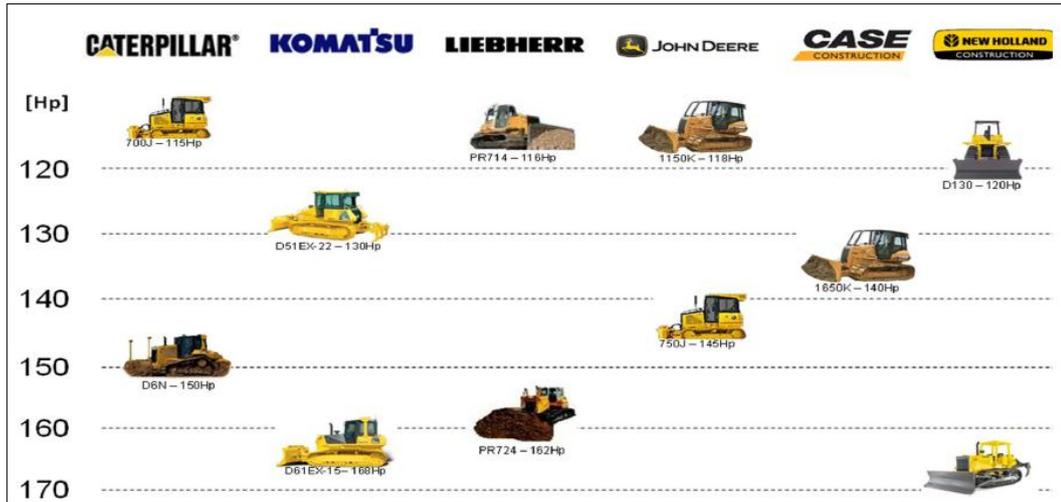


Figura 7 – Tratores de esteira de pequeno porte (VIEIRA, 2013)



Figura 8 – Tratores de esteira de médio porte (VIEIRA, 2013)

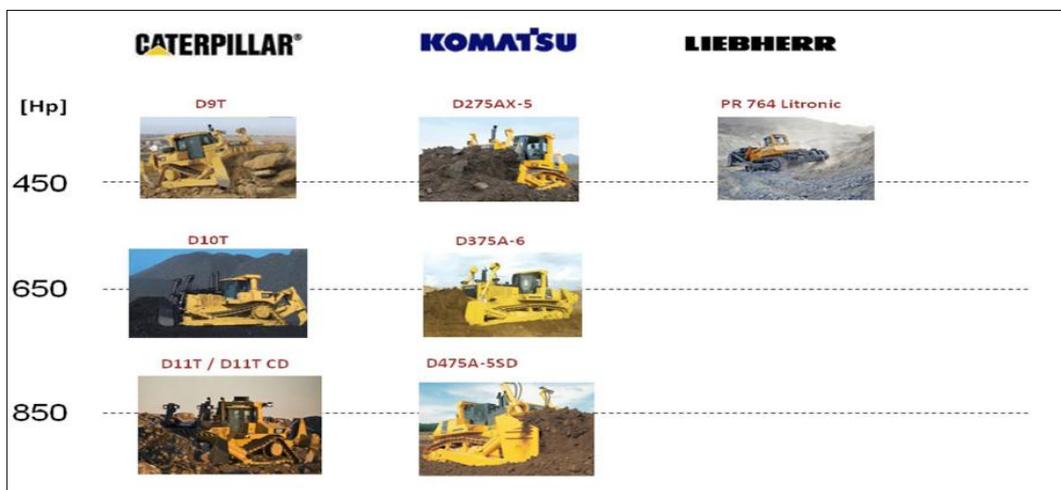


Figura 9 – Tratores de esteira de grande porte (VIEIRA, 2013)

### 3.3.2 Trator de esteira D11 T CD

Os tratores D11T da CaterPillar® podem possuir lâminas, oferecidas pela própria empresa, do tipo U (Universal), SU (Semi-Universal) e CD (CarryDoozer) (Figura 10).

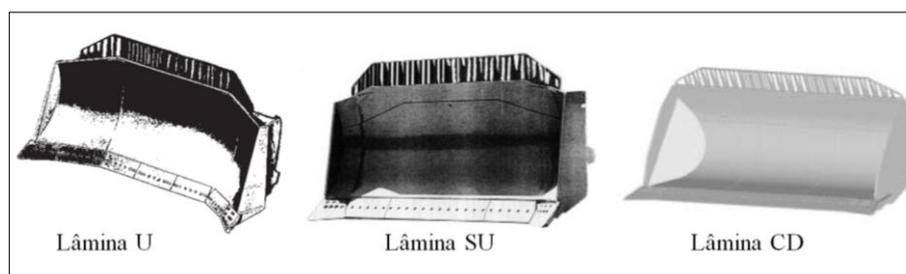


Figura 10 – Lâminas utilizadas nos tratores D11T (Adaptado de CATERPILLAR, 2009)

O modelo de lâmina U apresenta grandes asas laterais que contêm um canto e uma seção de borda cortante, no mínimo, sendo eficaz na movimentação de grande quantidade de material a longas distâncias como em trabalhos que envolvem recuperação de solos, empilhamento de materiais, empilhamento para carregadeiras, etc. A penetração não é seu foco e é ideal para materiais leves ou relativamente fáceis de se movimentar. O modelo de lâmina SU possui maior capacidade devido à adição de duas asas curtas que otimizam a capacidade de reter carga, conservam a capacidade de penetração e propiciam um carregamento mais rápido de materiais de alta compactação (CATERPILLAR, 2009).

Segundo CaterPillar (2009), a lâmina CD possui exclusiva forma de “caçamba” afim de proporcionar o transporte de alguns metros cúbicos de material na lâmina possibilitando maior empuxo de material por laminada se comparado ao D11T padrão. Entretanto este tipo de lâmina não é recomendável para materiais pouco explodidos e muito compactados e é mais propensa à retenção de materiais mais aderentes.

A lâmina utilizada pelo trator D11T no presente trabalho é a do tipo CD (CarryDoozer) e encontra-se disponível apenas para este modelo de trator. As Figuras 11 e 12 mostram a vista frontal do trator D11T CD como também seu perfil, respectivamente, e as especificações técnicas do equipamento encontram-se na Tabela 2.



Figura 11– Vista Frontal do trator D11T CD (Acervo pessoal)



Figura 12 – Perfil do trator D11T CD (Acervo pessoal)

Tabela 2 – Especificações técnicas de tratores de esteira D11T CD (CATERPILLAR, 2009)



MODELO	D11T CD	
Potência no volante	634 kW	850 hp
Peso operacional:*		
Freio da embreagem da servotransmissão	113.000 kg	248.600 lb
Modelo do motor	C32 ACERT	
RPM nominal do motor	1800	
Número de cilindros	12	
Diâmetro Interno	145 mm	5,71"
Curso	162 mm	6,38"
Cilindrada	32,1 L	1959 pol <sup>3</sup>
Roletes de esteira (cada lado)	8	
Largura de sapata padrão	915 mm	36"
Comprimento da esteira no solo (Roda-guia a Roda-guia)	4,44 m	14'7"
Área de contato com o solo (Com sapata padrão)	8,1 m <sup>2</sup>	12.581 pol <sup>2</sup>
Bitola do material rodante	2,89 m	9'6"
DIMENSÕES GERAIS:		
Altura (Topo sem acessório)**	3,64 m	11'11"
Altura (até o topo do toldo ROPS)	4,60 m	15'1"
Altura (até o topo da cabine ROPS)	4,29 m	14'1"
Comprimento total:		
(Com lâmina "SU" e Ripper) SS***	10,70 m	35'1"
(Sem lâmina e ripper)†	6,03 m	19'9"
Largura (sobre munhões)	4,38 m	14'4"
Largura (sem munhões — sapata padrão)	3,81 m	12'6"
Altura livre do solo††	574 mm	1'11"
Tipos e larguras de lâminas:		
Reta (Carrydozer)	6,71 m	22'0"
Universal		—
Semiuniversal		—
Capacidade do tanque de combustível	1609 L	425 gal EUA
Capacidade do tanque de combustível (Capacidade extra)	1987 L	505 gal EUA

### 3.4 SOFTWARE DOZSIM

O *software* DozSim da Caterpillar® tem como função estimar a produtividade de tratores em diversos cenários na etapa de decapeamento do método de lavra por tiras, é um programa simples, claro e de interface amigável. No início da simulação são inseridas informações relacionadas:

- Ao sistema de medidas e unidades;

- Ao trator: tipo e disponibilidade física;
- À operação: dificuldade de movimentação do material, visibilidade, fator de eficiência, habilidade do operador e utilização de explosivo;
- Ao material a ser movimentado: densidade e empolamento;
- À geometria do pit: largura entre o pé da rampa e a parede da cava, ângulo da parede da cava em relação ao solo, largura da tira ou faixa, ângulo de corte, ângulo de deposição, espessura de estéril e espessura de minério. A Figura 13 ilustra algumas dessas informações.

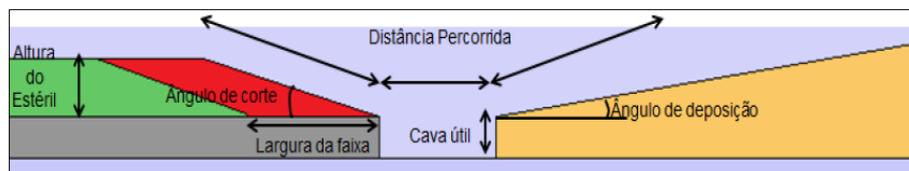


Figura 13 – Geometria do pit (SILVA, 2014)

O principal objetivo do programa é direcionar ações que deverão ser tomadas em campo e, por isso, deve-se buscar a introdução de maior número de informações possíveis. A Figura 14 apresenta a interface inicial do software.

Machine Properties	Material Properties	Input Values	Output Values
Select Machine: <b>D11RCD 9XF</b> Shoe Width: <b>914.4</b> mm Blade: <b>Other</b> Capacity - m <sup>3</sup> : <b>43.6</b> Dual Tilt: <input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No Forward Gear: <input type="radio"/> 1st Only <input type="radio"/> 2nd Only <input checked="" type="radio"/> System Select Reverse Gear: <input type="radio"/> 1st Only <input type="radio"/> 2nd Only <input checked="" type="radio"/> System Select %Avail: <b>80</b> % Weight: <b>112765</b> kg Cost/Hr: <b>\$250</b>	Clay - Dry Density / Swell: <b>1262</b> kg/LCM <b>1640</b> kg/BCM <b>30</b> % Dozability: <b>0.96</b> Derating Factors: Altitude: <b>152</b> Meters Visibility: <b>1</b> Job Efficiency: <b>83</b> Percent Skill Level: <b>0.75</b>	Average Push Distance: <b>30</b> m <b>457</b> m Meters <b>61</b> Average Push Slope: <b>14</b> % Volumes: Bank Moved <b>10000</b> m <sup>3</sup> Loose Moved <b>13,000</b> m <sup>3</sup> <input checked="" type="checkbox"/> Slot Dozing <b>Disclaimer</b> Due to the many variables involved and the consequent possibility of inadvertent errors or omissions in preparing reports of this character, neither Caterpillar Inc. nor the dealer can or does represent or warrant, expressly or implicitly, either the accuracy of this report or that the Caterpillar equipment referred to in the report will in fact achieve the performance indicated on the job to which the report relates. Caterpillar 2003 Caterpillar Inc. All Rights Reserved	Gear: Fwd <b>1</b> Rev <b>2</b> Productivity: Bank <b>394.6</b> m/hr <b>\$0.634</b> \$/m Loose <b>513.0</b> m/hr <b>\$0.487</b> \$/m Totals: Hours <b>25.34</b> Cost <b>\$6,335.75</b> Print Exit

Figura 14 – Tela de inserção dos dados (SOFTWARE DOZSIM)

Depois de todos os dados inseridos, o programa é rodado e, por fim, mostra um resumo da etapa de decapeamento fornecendo a quantidade total de material movimentado, produtividade em m<sup>3</sup>/h, distância média de transporte e custos (Figura 15).

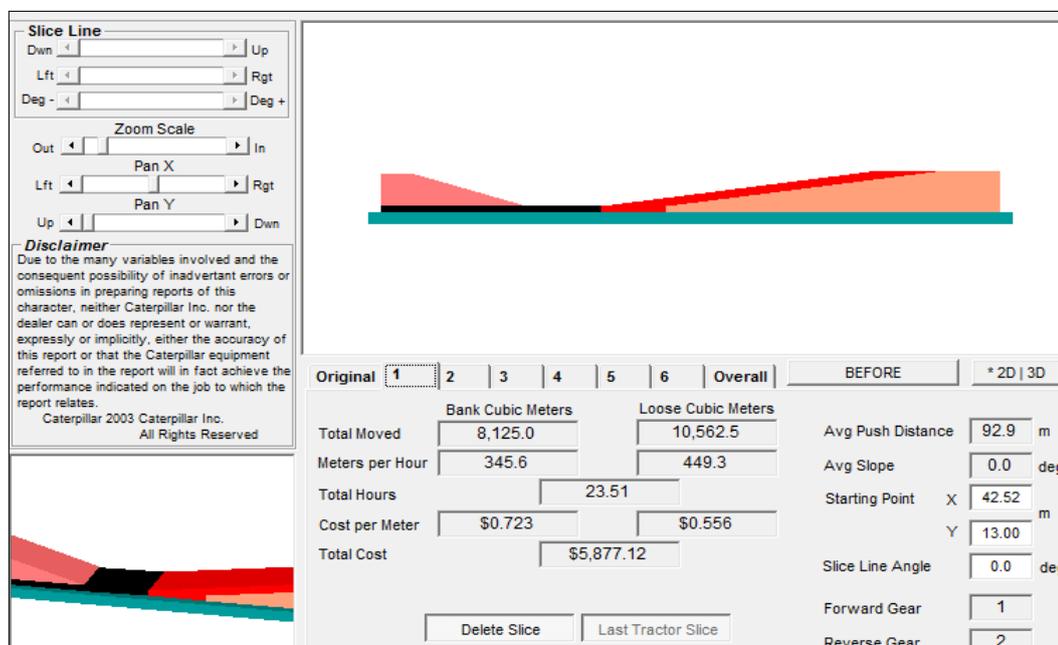


Figura 15 – Tela de saída dos resultados (SOFTWARE DOZSIM)

### 3.5 BAUXITA

A bauxita é uma rocha de cor avermelhada que contém mais de 40% de óxido de alumínio em sua composição. A coloração da rocha é estabelecida pela parcela de óxidos de ferro: enquanto a bauxita branca possui 2% a 4% de óxidos de ferro, a bauxita vermelha contém 25% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. O alumínio metálico é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, porém não é encontrado separadamente na natureza, mas sim, combinado com outros elementos, geralmente com o oxigênio, formando a alumina e tem como fonte natural a bauxita (SAMPAIO *et al.*, 2005).

Segundo Sampaio *et al.* (2005), antes do processo Hall-Héroult ser desenvolvido (1886), a bauxita era utilizada para fins não metalúrgicos e era empregada especialmente na indústria têxtil. Entretanto, o processo possibilitou a utilização da alumina para a produção de alumínio metálico, aumentando assim seu uso para este fim. Todavia houve a criação de um grupo para

o emprego da bauxita não metalúrgica que inclui abrasivos, refratários, produtos químicos, cimento de alta alumina, entre outros. Aproximadamente 95% da bauxita produzida é destinada para a obtenção de alumínio metálico através dos processos Bayer e Hall-Héroult, restando 5% para o uso não metalúrgico nas atividades que compõem o grupo citado anteriormente. Os principais produtores da bauxita não metalúrgica são Austrália, Brasil, China, Grécia, Guiana, Guiné e Suriname. A China domina o mercado de bauxita refratária e também o de bauxita para fins abrasivos, este último, juntamente com a Guiana e o Brasil.

As reservas mundiais de bauxita totalizam 28,1 bilhões de toneladas. As reservas localizadas na Guiné e na Austrália são as principais, a primeira com 7,4 bilhões de toneladas e a segunda com 6,5 bilhões de toneladas. O Brasil ocupa o terceiro lugar com 2,6 bilhões de toneladas e suas reservas se concentram na região Amazônica. O quarto e quinto lugar são ocupados pela Jamaica (2 bilhões de toneladas) e Indonésia (1 bilhão de toneladas), respectivamente (USGS, 2015).

Segundo Ichihara (2015), as regiões que possuem clima tropical e subtropical representam 90% da produção mundial de bauxita. O Brasil e a Austrália tiveram suas reservas ampliadas no ano de 2014 (USGS, 2015).

De acordo com Sampaio *et al.* (2005), a bauxita se forma essencialmente em regiões de clima tropical com temperatura média anual superior a 20°C e o fato de ocorrer alternância entre estações secas e úmidas contribui para o processo de lixiviação. Desse modo, ocorre a decomposição de silicatos e argilominerais havendo a retirada de sílica e a concentração de óxidos de alumínio e ferro. Os fatores que contribuem para a formação de depósitos de bauxita são:

- Porosidade da rocha elevada;
- Cobertura vegetal com atividade bacteriológica apropriada;
- Topografia mais plana possível a fim de permitir mínima erosão;
- Período longo de estabilidade e alterações climáticas entre estações secas e úmidas.

Os métodos de lavra para a extração da bauxita estão ligados à natureza dos corpos mineralizados. Geralmente, a exploração é realizada a céu aberto pelo método de lavra por tiras (*stripping mining*). Os métodos de lavra subterrânea na extração deste minério

representam menos que 20% da produção mundial. O grau de mecanização presente na lavra é variado, indo desde técnicas manuais até as mais modernas que utilizam diferentes equipamentos de mineração (SAMPAIO *et al.*, 2005).

### 3.5.1 Mineralogia

A bauxita é uma rocha composta de minerais de alumínio mais impurezas, os principais minerais são gibbsita ( $\gamma\text{-Al(OH)}_3$ ), diásporo ( $\alpha\text{-AlO(OH)}$ ) e boehmita ( $\gamma\text{-AlO(OH)}$ ), os quais são considerados oxi-hidróxidos de alumínio. De acordo com o depósito, o tipo e a quantidade de minerais de alumínio variam bastante, isso acontece também com as impurezas, como óxidos de ferro, argila, sílica, dióxido de titânio, entre outras (SAMPAIO *et al.*, 2005).

Segundo Sampaio *et al.* (2005), dentre os minerais presentes na bauxita, a gibbsita, a boehmita e o diásporo possuem maior importância, entretanto, minerais como caulinita, quartzo, hematita, goethita, rutilo e anastásio são minerais indesejáveis e contêm impurezas em sua composição. A Tabela 3 apresenta as principais características dos minerais de alumínio como também a composição química da bauxita para fins metalúrgicos e não metalúrgicos. Vale ressaltar que a grande diferença entre as bauxitas está no teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o qual é menor para a bauxita refratária que, a priori, deve possuir uma quantidade menor de impurezas e maior de alumina.

Tabela 3 – Minerais de alumínio e composição química da bauxita (SAMPAIO *et al.*, 2005)

<b>Propriedades</b>	<b>Gibbsita</b>	<b>Boehmita</b>	<b>Diásporo</b>
Fórmula química	Al(OH) <sub>3</sub> - $\gamma$	AlOOH - $\gamma$	AlOOH - $\alpha$
Sistema cristalino	Monoclínico	Ortorrômbico	Ortorrômbico
Dureza Morh	2,5 - 3,5	3,5 - 4,0	6,5 - 7,0
Densidade	2,42	3,01	3,44
Índice de refração	1,568	1,649	1,702
Temperatura (°C) de desidratação	150	350	450
Produto de desidratação	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - $\chi$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - $\gamma$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - $\alpha$
Solubilidade (g Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /L) (*)	128	54	Insolúvel
(*) Em solução de Na <sub>2</sub> O a 100 g/L, a 125 °C.			
<b>Bauxita Não Metalúrgica</b>		<b>Bauxita Metalúrgica</b>	
Constituintes	(%)	Constituintes	(%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5 (máx.)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11 – 12
SiO <sub>2</sub>	5 – 7	SiO <sub>2</sub>	< 4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	> 48
Densidade aparente > 3		Alumina aproveitável pelo processo Bayer	

### 3.5.2 Mineração de Bauxita no Brasil

A produção nacional de bauxita chegou a 35,4 milhões de toneladas no ano de 2014, sofrendo um aumento de 1,6 milhões de toneladas em relação a 2013. Porém, com a estagnação do preço, aumento dos custos e alta inflação houve uma nova crise, que acarretou na diminuição dos lucros e em grandes prejuízos. Em 2014, a produção de bauxita no Estado do Pará, correspondeu a aproximadamente 91% (32,2 Mt) da produção nacional (ICHIHARA, 2015). Os depósitos dessa região são do tipo *blanket* e possuem formação *in situ*, através de processos de intemperismo, sobre rochas sedimentares clásticas em clima tropical úmido. Geralmente contam com grandes variações laterais de teores de Al, Si e Fe (ALCOA, 2005). A Figura 16 apresenta um perfil típico dos depósitos de bauxita encontrados nesta região.

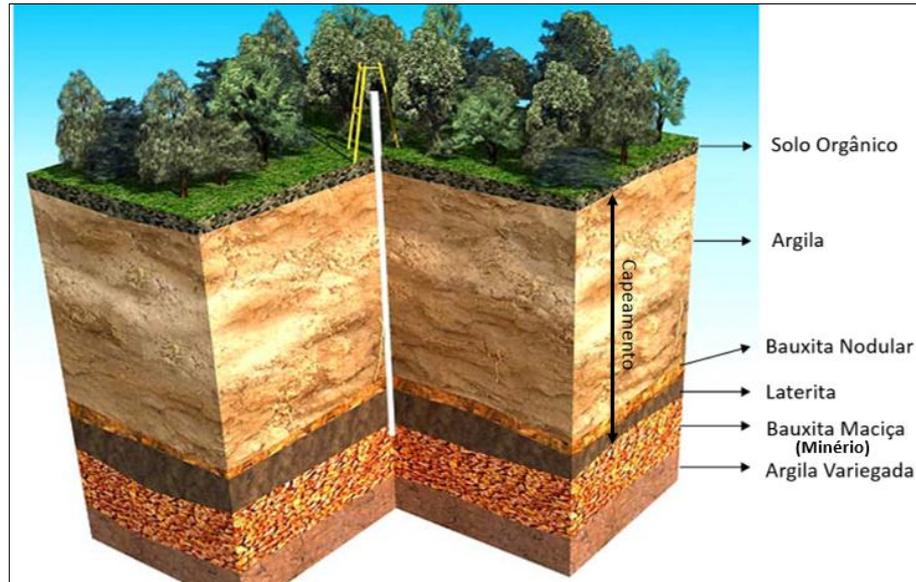


Figura 16 – Perfil típico de depósito de bauxita da Amazônia Oriental (Adaptado de ALCOA, 2005)

Segundo Quaresma (2009), as reservas brasileiras possuem potencial para assegurar o crescimento da produção de bauxita projetada. Tal projeção é feita afim do país alcançar o nível de produção de alumínio correspondente ao patamar de consumo do metal de países desenvolvidos.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho envolveu as seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica sobre os principais assuntos abordados;
- Determinação da relação existente entre a produtividade dos tratores D11T CD e ângulos do pit através de simulações no *software* DozSim da Caterpillar®;
- Levantamento dos ângulos das tiras de uma mina de bauxita localizada no Estado do Pará;
- Realização de testes em campo.

#### 4.1 SIMULAÇÕES NO SOFTWARE DOZSIM

As simulações foram realizadas com o auxílio do *software* DozSim, o qual possibilitou a criação de vários cenários na intenção de otimizar a produtividade dos tratores. Primeiramente foram inseridos os parâmetros fixos contidos na Tabela 4. As informações referentes à disponibilidade física, ao material e à geometria do pit foram fornecidas pela mineradora, já os dados da operação foram sugeridos por funcionários da Caterpillar que já conheciam as características da mina em questão. O espaço de 3 m deixados entre o pé da rampa e parede da cava é necessário para a realização da amostragem do minério, executada pela equipe de geologia.

Tabela 4 – Parâmetros fixos utilizados nas simulações

<b>Propriedades do trator</b>		<b>Propriedades da operação</b>	
Tipo	D11TCD	Dificuldade de movimentação	0,96
Largura da sapata	914,4	Visibilidade	1
Capacidade da lâmina	44 m <sup>3</sup>	Fator de eficiência	0,83
Marchas	System Select	Habilidade do operador	0,75
Peso	112.765 kg	<b>Geometria do pit</b>	
Disponibilidade física (DF)	0,8	Largura entre pé da rampa e parede da cava	3 m
<b>Propriedades do material a ser movimentado</b>		Ângulo da parede da cava em relação ao solo	90°
Densidade " <i>in situ</i> "	1640 kg/m <sup>3</sup>	Comprimento do bloco	25 m
Empolamento	30%	Ângulo de deposição	medido a partir do topo da cava

As espessuras de minério e capeamento escolhidas para as simulações foram de 2,5 m e 12 m, respectivamente, tais valores representam a média aritmética das espessuras contidas no banco de dados da mina e foram fornecidas pela equipe de topografia.

O ângulo de corte padrão, utilizado pelos tratores durante a operação, é de 17° enquanto que o de deposição é de 8°. As simulações relacionadas ao corte tiveram seus ângulos variando de 7° a 24° (limite máximo recomendado pelo Manual da Caterpillar) mantendo constantes o ângulo de deposição padrão (8°) e todos os outros parâmetros citados. O mesmo

ocorreu para as simulações referentes aos ângulos de deposição, os quais variaram de 6° a 18° fixando o ângulo de corte de 17°.

Como as espessuras do estéril e minério nas tiras escolhidas para os testes em campo não foram constantes, realizou-se também simulações variando estas espessuras para encontrar a relação com a produtividade dos tratores e assim se fazer uma correção dos resultados destes testes. As alturas de minério utilizadas nas simulações foram de 0,5 m a 4,5 m enquanto que as de estéril variaram de 4 m a 18 m. Esses limites foram escolhidos retirando-se do banco de dados da mina as alturas de maior e menor valor. Utilizaram-se os ângulos de deposição e de corte padrões em todas as simulações, como também, os parâmetros fixos da Tabela 4.

#### 4.2 LEVANTAMENTO DOS ÂNGULOS DO PIT

O levantamento dos ângulos do pit das tiras na mina de bauxita, foi necessário afim de verificar se a operação estava ou não cumprindo a angulação do pit planejada (ângulo de corte de 17° e de deposição de 8°), como também avaliar ganhos e perdas operacionais caso não ocorresse conforme o programado. No total foram analisadas 59 tiras lavradas pela operação no período de julho a agosto de 2015. Para isso, utilizou-se o programa AutoCAD e dados topográficos do levantamento do topo do minério pelo scanner a laser. Tal levantamento é feito após a etapa de decapeamento, pela equipe de topografia, e tem o intuito de calcular o volume de minério presente em cada tira realizando, ao fim da retirada do minério, o levantamento do fundo da cava e posteriormente a diferença destas medições no programa I-Site.

Primeiramente, foi retirado o perfil médio de cada tira, através do levantamento do topo de minério. Como a tira possui 25 m, o perfil médio foi aquele que se encontrava a 12,5 m da origem desta. Logo depois, o arquivo foi transformado em um formato suportado pelo programa AutoCAD e então as medições foram realizadas.

Para se fazer as medições dos ângulos das tiras foi necessário saber o ponto inicial da rampa de corte. Este ponto é marcado em campo pela equipe da topografia utilizando a distância média de recuo do trator (DMR), calculada pela Equação 1, e medida

horizontalmente a partir do início da rampa da tira anterior, como ilustra a Figura 17. Nas medições, a DMR de cada tira foi calculada utilizando a espessura do estéril desta e ângulo de corte de 17°.

$$DMR = \frac{\text{Espessura estéril}}{\text{tangente do } \theta \text{ corte}} \quad (1)$$

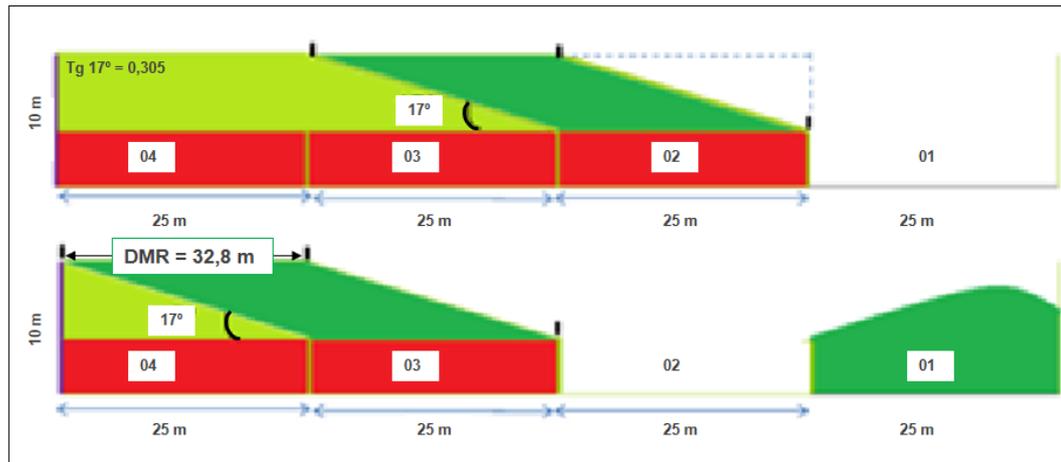


Figura 17 – Imagem representativa da distância de recuo para um ângulo de corte de 17°  
(Acervo Pessoal)

Depois de medida a espessura da argila (estéril) e marcada a distância média de recuo, o ângulo de corte e o ângulo de deposição foram aferidos no programa AutoCAD, como mostra a Figura 18. Os ângulos em verde representam os planejados e os em branco, os executados.



Figura 18 – Perfil de uma das tiras analisadas (AUTOCAD)

Os ganhos/perdas de produtividade pela não realização do planejamento foram encontrados utilizando os dados do levantamento e também as linhas de tendência (LT's) resultantes das simulações que variaram a espessura de estéril e os ângulos de corte e deposição. As produtividades planejadas e realizadas de cada tira foram calculadas como mostram as Equações 2 e 3.

$$Prod. Plan. = \left[ 1 + \left( \frac{LTee - LTee(pad\tilde{r}\tilde{a}o)}{LTee(pad\tilde{r}\tilde{a}o)} \right) \right] \times Prod. Padr\tilde{a}o \quad (2)$$

$$Prod. Real. = \left[ 1 + \left( \frac{LTee - LTee(pad\tilde{r}\tilde{a}o)}{LTee(pad\tilde{r}\tilde{a}o)} \right) \right] \times LTac \times \left[ 1 + \left( \frac{LTad - LTad(pad\tilde{r}\tilde{a}o)}{LTad(pad\tilde{r}\tilde{a}o)} \right) \right] \quad (3)$$

Onde:

LTee: representa a expressão da LT da simulação que variou a espessura de estéril utilizando a espessura medida na tira;

LTee (padrão): representa a expressão da LT resultante da simulação que variou a espessura de estéril utilizando a espessura padrão de 12 m;

Prod. Padrão: representa a produtividade simulada que utilizou ângulo de corte de 17° e ângulo de deposição de 8°, possui valor constante de 478,5 m<sup>3</sup>/h;

LTac: representa a expressão da LT da simulação que variou o ângulo de corte utilizando o ângulo de corte medido na tira;

LTad: representa a expressão da LT resultante da simulação que variou o ângulo de deposição utilizando o ângulo de deposição medido na tira;

LTad (padrão): representa a expressão da LT resultante da simulação que variou o ângulo de deposição utilizando o ângulo de deposição padrão de 8°.

Com o cálculo das produtividades, foi possível encontrar a porcentagem de ganho/perda de cada tira. Posteriormente calculou-se a média aritmética dessas porcentagens afim de avaliar o volume de material movimentado e o consumo de diesel. Para isso, a porcentagem média encontrada foi multiplicada pelo volume total de estéril movimentado em 2015 de 12.526.649 m<sup>3</sup> e o produto desta multiplicação foi aplicado no consumo médio de diesel dos tratores (0,26 L/m<sup>3</sup>) neste mesmo ano, tais valores foram fornecidos pela empresa.

#### 4.3 TESTES EM CAMPO

Os testes em campo foram realizados em três tiras (A, B e C), sendo o primeiro realizado em novembro de 2015 e os outros dois em abril de 2016. As tiras dividem-se em trincheiras, que são faixas de menor largura onde se trabalha apenas um trator. A execução destes testes

teve a finalidade de medir a produtividade dos tratores na etapa de decapeamento a qual conta com os seguintes estágios:

- Início do corte do material após a lavra da tira anterior;
- Enchimento da cava;
- Início e subida do depósito;
- Retorno ao ponto de corte.

Este ciclo se repete até que o capeamento seja removido completamente. As Figuras 19 a 24 ilustram os estágios citados.



Figura 19 – Fim da lavra (Acervo Pessoal)



Figura 20 – Início decapeamento (Acervo Pessoal)



Figura 21 – Enchimento da cava (Acervo Pessoal)



Figura 22 – Início e subida do depósito (Acervo Pessoal)



Figura 23 – Retorno ao ponto de corte (Acervo Pessoal)



Figura 24 – Decapeamento finalizado (Acervo Pessoal)

A produtividade dos tratores D11T CD foi calculada utilizando a Equação 4.

$$Produtividade = \frac{\text{Volume de estéril movimentado (m}^3\text{)}}{\text{Horas produtivas (h)}} \quad (4)$$

O volume de estéril movimentado foi calculado pela diferença do volume da área antes e depois do teste através do escaneamento desta e contou com o auxílio da equipe de topografia, que utilizou o scanner a laser (Figura 25) e o programa I-Site. A Figura 26 mostra a imagem gerada pelo escaneamento da tira B ao fim do teste, ou seja, após a etapa de decapeamento.



Figura 25 – Equipe de topografia e scanner a laser (Acervo Pessoal)

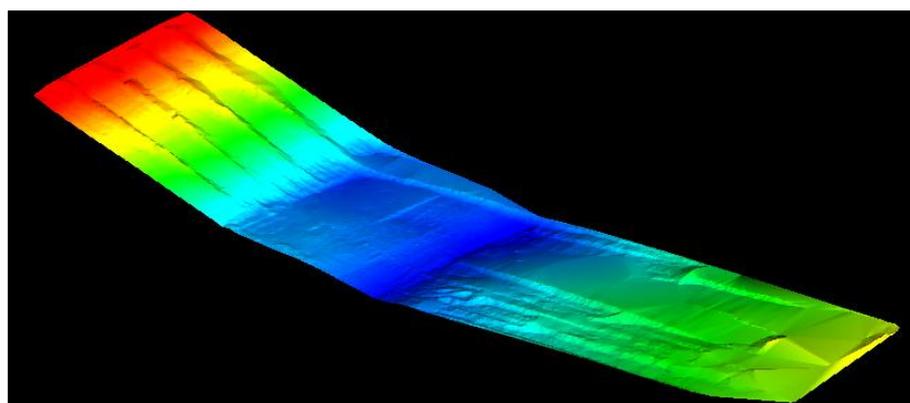


Figura 26 – Imagem após escaneamento da tira B (I-SITE)

As horas produtivas dos tratores D11T CD foram fornecidas pela empresa através de relatórios feitos pelos operadores dessas máquinas os quais descrevem os tempos de paradas, produção, abastecimento, entre outros.

As espessuras de bauxita foram aferidas pela equipe de geologia durante a realização da amostragem do minério. Já as alturas de estéril e os ângulos do pit foram medidos no programa AutoCAD, através dos perfis médios das tiras testadas, do mesmo modo que foi feito o levantamento dos ângulos citado na seção anterior.

Como as espessuras de estéril e minério não foram iguais nas tiras analisadas houve a necessidade de corrigir os valores das produtividades resultantes dos testes, para isso as

porcentagens de ganhos ou perdas por essas espessuras foram calculados utilizando as expressões das LT's encontradas pelas simulações, como mostra as Equações 5 e 6 abaixo.

$$\text{Ganho/Perda de prod. pela esp. estéril(\%)} = \left[ \frac{(\text{LTee (padrão)} - \text{LTee})}{\text{LTee (padrão)}} \right] \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Ganho/Perda de prod. pela esp. minério(\%)} = \left[ \frac{(\text{LTem (padrão)} - \text{LTem})}{\text{LTem (padrão)}} \right] \times 100 \quad (6)$$

Onde:

LTee (padrão): representa a expressão da LT resultante da simulação que variou a espessura de estéril utilizando a espessura padrão de 12 m;

LTee: representa a expressão da LT da simulação que variou a espessura de estéril utilizando a espessura medida na tira;

LTem (padrão): representa a expressão da LT resultante da simulação que variou a espessura de minério utilizando a espessura padrão de 2,5 m;

LTem: representa a expressão da LT da simulação que variou a espessura de minério utilizando a espessura medida na tira.

Já o cálculo do ganho/perda de produtividade total foi feito com a Equação 7:

$$\text{Ganho/Perda de produtividade total (\%)} = \{[(1 + E) * (1 + M)] - 1\} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

E: representa o ganho/perda de produtividade pela espessura do estéril calculado pela Equação 5;

M: representa o ganho/perda de produtividade pela espessura do minério calculado pela Equação 6.

Depois de calculada a porcentagem de ganho/perda de produtividade total de cada tira, esta foi multiplicada pelo valor da produtividade encontrada no teste resultando na produtividade corrigida em m<sup>3</sup>/h.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NO DOZSIM

As simulações que envolveram a variação dos ângulos de corte e de deposição têm seus resultados de produtividade do trator D11T CD contidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado das simulações para diferentes ângulos de corte e deposição

<b>Simulações <math>\Theta</math> corte</b>			<b>Simulações <math>\Theta</math> deposição</b>		
$\theta$ de corte ( $^{\circ}$ )	$\theta$ de subida ( $^{\circ}$ )	Produtividade ( $m^3/h$ )	$\theta$ de corte ( $^{\circ}$ )	$\theta$ de subida ( $^{\circ}$ )	Produtividade ( $m^3/h$ )
7	8	365,4	17	6	419,9
8	8	384,7	17	7	451,5
9	8	401	17	8	478,5
10	8	415,3	17	9	501,8
11	8	427,7	17	10	522,3
12	8	438,6	17	11	540,3
13	8	448,4	17	12	556,2
14	8	457,1	17	13	570,6
15	8	464,9	17	14	583,5
16	8	472	17	15	595,2
17	8	478,5	17	16	605,8
18	8	484,4	17	17	615,5
19	8	489,9	17	18	624,5
20	8	494,9			
21	8	499,6			
22	8	503,9			
23	8	507,9			
24	8	511,7			

Analisando a Tabela 5 observa-se que a produtividade que utilizou os ângulos de operação padrão foi de 478,5  $m^3/h$ . A fim de facilitar a visualização e análise dos resultados são apresentados os gráficos das Figuras 27 e 28 que mostram as porcentagens de ganhos e perdas de produtividade em relação aos ângulos padrões (17° para corte e 8° para deposição), como também as linhas de tendência que expressam a relação existente entre as variáveis. O  $R^2$  representa o coeficiente de determinação que indica o quanto a expressão consegue explicar os valores observados, variando entre 0 e 1: quanto maior for, melhor é o ajuste.

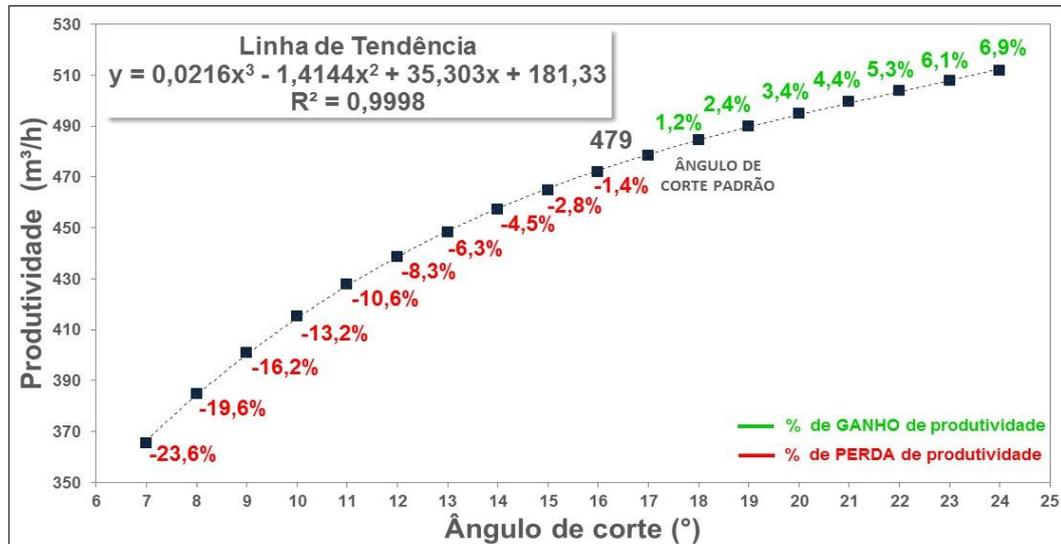


Figura 27 – Gráfico da Produtividade *versus* Ângulo de corte

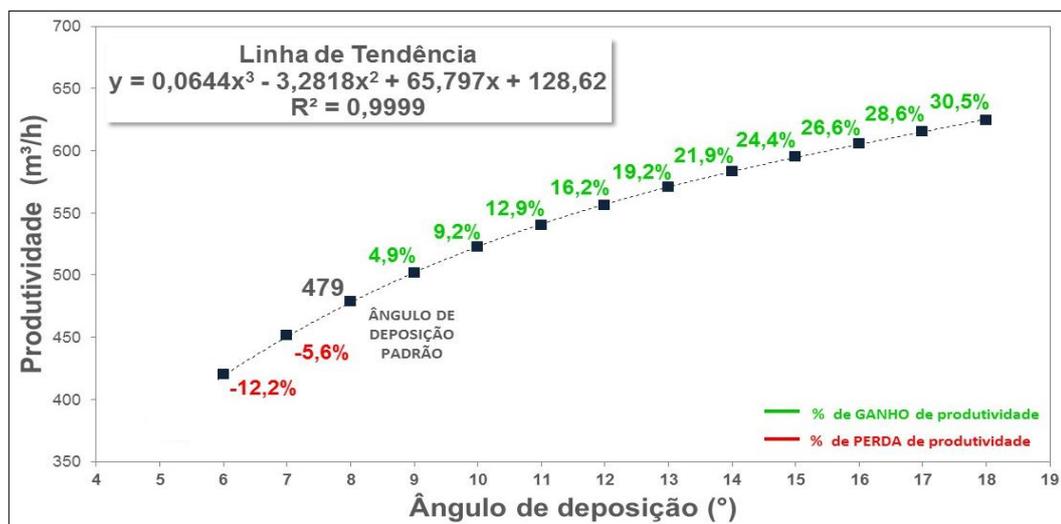


Figura 28 – Produtividade *versus* Ângulo de deposição

Observa-se nas Figuras 27 e 28 que a produtividade cresce à medida que os ângulos de corte e deposição aumentam. Vale ressaltar que o acréscimo de 1° no ângulo de deposição proporciona um ganho de produtividade de aproximadamente 5%, tal ganho é equivalente a um aumento de 5° no ângulo de corte. Portanto, a variação da produtividade é mais expressiva quando alteramos o ângulo de deposição em relação ao de corte, isso fica evidente na Figura 29, que compara as duas curvas de produtividade.

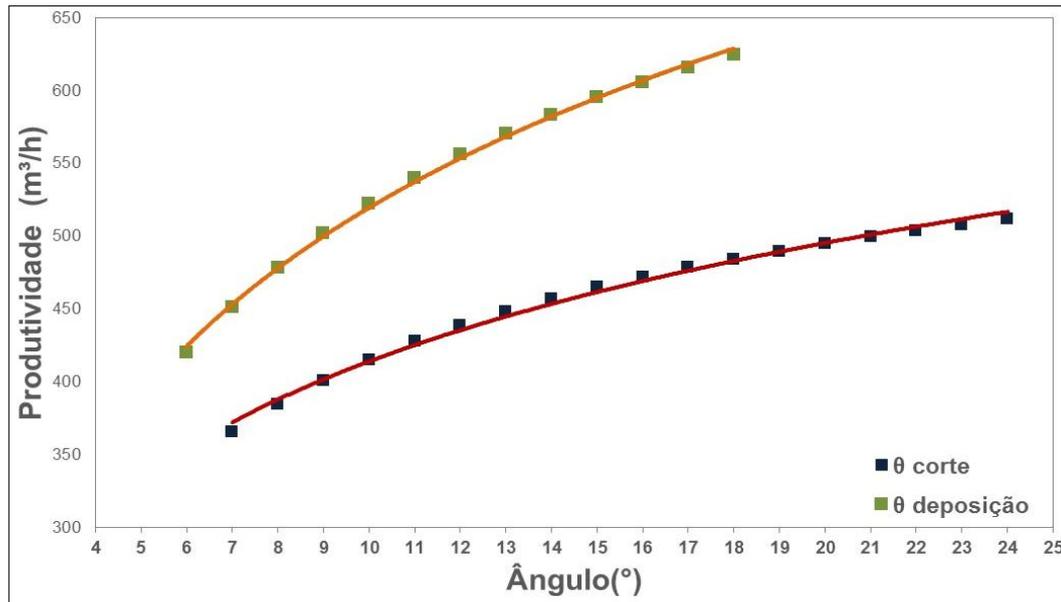


Figura 29 – Curvas de produtividade *versus* Ângulos do pit

Os resultados das simulações que variaram as espessuras de estéril e minério são expostos nos gráficos das Figuras 30 e 31 que indicam as linhas de tendência e as porcentagens de ganhos e perdas de produtividade em relação às espessuras médias (2,5 m para o minério e 12 m para o estéril).

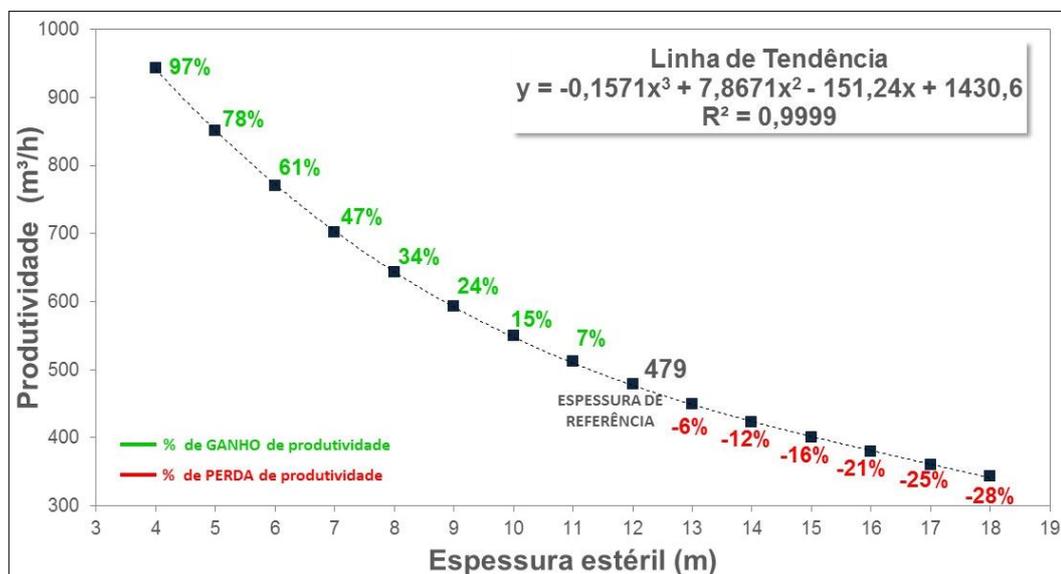


Figura 30 – Produtividade *versus* Espessura de estéril

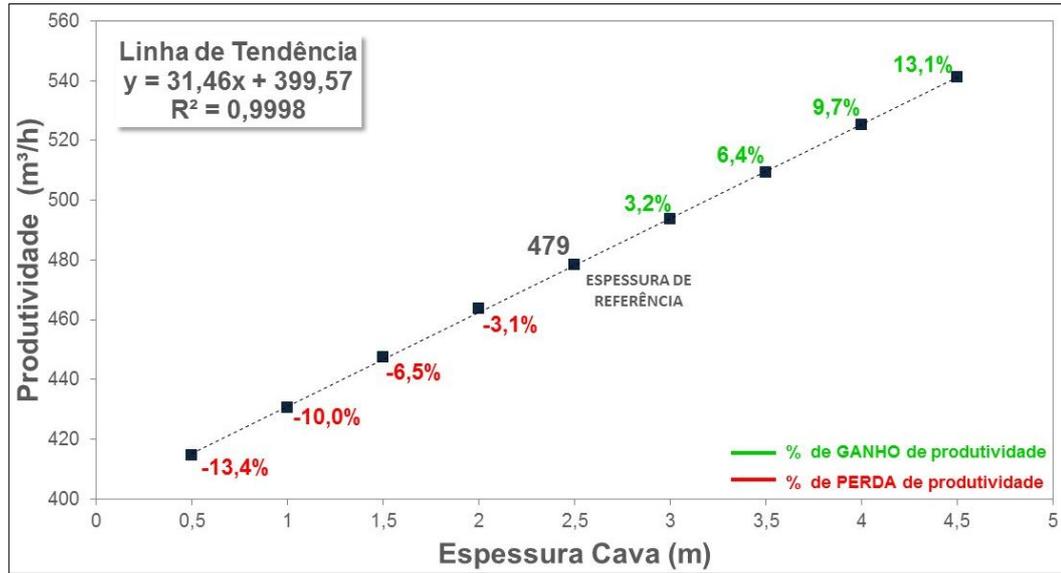


Figura 31 – Produtividade *versus* Espessura de minério

## 5.2 RESULTADOS DO LEVANTAMENTO DOS ÂNGULOS DO PIT

As Figuras 32 e 33 apresentam os ângulos de corte e deposição que foram medidos nas 59 tiras.

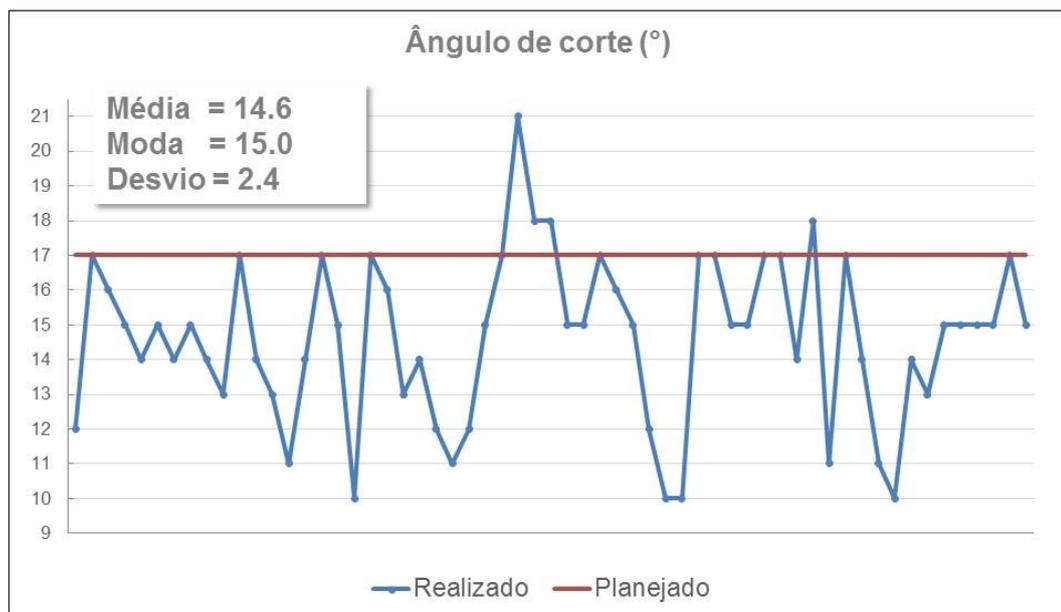


Figura 32 – Ângulos de corte das tiras analisadas

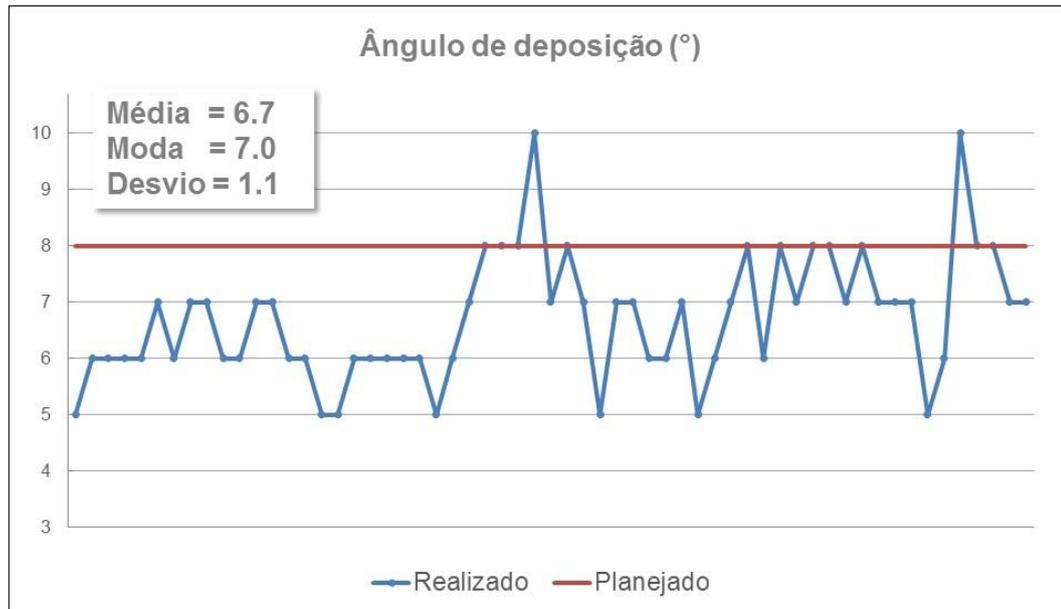


Figura 33 – Ângulos de deposição das tiras analisadas

Analisando os gráficos, percebe-se uma elevada variação entre os ângulos utilizados pela operação. Algumas das causas para este fato são: falta de paralelismo entre as laminadas do trator durante a atividade de decapeamento, variação da espessura de minério ao longo da tira, falta de inclinômetro de alguns tratores, entre outras.

Os valores das produtividades (planejada e realizada) e as porcentagens de ganhos/perdas pelo não cumprimento do programado em cada tira são apresentados na Tabela 6. A Figura 34 mostra as porcentagens graficamente, como também a média aritmética destas.

Tabela 6 – Comparação entre a produtividade planejada x realizada

Tira	Dados Levantamento			Produtividade planejada (m <sup>3</sup> /h)	Produtividade Realizada (m <sup>3</sup> /h)	Ganho/Perda de Produtividade
	Altura estéril (m)	Ângulo corte (°)	Ângulo subida (°)			
1	6,05	12	5	771,00	567,26	-26%
2	8,85	17	6	601,14	527,60	-12%
3	7,88	16	6	652,35	565,04	-13%
4	8,92	15	6	597,73	510,03	-15%
5	9,34	14	6	577,98	484,79	-16%
6	10,23	15	7	540,10	495,29	-8%
7	9,84	14	6	556,07	466,41	-16%
8	10,27	15	7	538,52	493,83	-8%
9	11,24	14	7	502,94	453,37	-10%
10	11,52	13	6	493,61	405,95	-18%
11	12,34	17	6	468,42	411,12	-12%
12	14,4	14	7	416,17	375,15	-10%
13	12,67	13	7	459,09	405,76	-12%
14	10,8	11	6	518,43	406,00	-22%
15	10,18	14	6	542,10	454,69	-16%
16	11,15	17	5	506,03	406,45	-20%
17	9,46	15	5	572,57	447,12	-22%
18	10,2	10	6	541,30	411,26	-24%
19	8,5	17	6	618,77	543,07	-12%
20	9,07	16	6	590,53	511,50	-13%
21	8,87	13	6	600,16	493,58	-18%
22	9,66	14	6	563,76	472,87	-16%
23	9,46	12	5	572,57	421,26	-26%
24	10,07	11	6	546,54	428,02	-22%
25	10,55	12	7	527,70	455,93	-14%
26	15,51	15	8	392,36	381,73	-3%
27	15,35	17	8	395,68	395,96	0%
28	14,89	21	8	405,41	422,76	4%
29	16,34	18	10	375,53	415,93	11%
30	16,41	18	7	374,12	357,05	-5%
31	15,93	15	8	383,78	373,38	-3%
32	15,22	15	7	398,40	365,34	-8%
33	14,51	17	5	413,72	332,30	-20%
34	12,9	16	7	452,84	421,53	-7%
35	11,72	15	7	487,19	446,76	-8%
36	11,53	12	6	493,29	396,57	-20%
37	11,07	10	6	508,80	386,57	-24%
38	10,59	10	7	526,19	429,65	-18%
39	10,72	17	5	521,36	418,76	-20%
40	10,35	17	6	535,38	469,89	-12%
41	12,02	15	7	477,89	438,24	-8%
42	12,44	15	8	465,55	452,93	-3%
43	12,25	17	6	471,04	413,42	-12%
44	13,03	17	8	449,38	449,70	0%
45	12,8	14	7	455,53	410,63	-10%
46	13,06	18	8	448,60	454,21	1%
47	13,14	11	8	446,51	398,71	-11%
48	11,12	17	7	507,06	478,28	-6%
49	12,05	14	8	476,99	456,17	-4%
50	10,65	11	7	523,95	440,98	-16%
51	11,25	10	7	502,60	410,39	-18%
52	11,26	14	7	502,26	452,75	-10%
53	10,04	13	5	547,76	412,27	-25%
54	11,18	15	6	504,99	430,90	-15%
55	14,37	15	10	416,85	443,63	6%
56	13,45	15	8	438,62	426,74	-3%
57	13,18	15	8	445,48	433,41	-3%
58	11,35	17	7	499,23	470,89	-6%
59	10,79	15	7	518,79	475,74	-8%



Figura 34 – Ganhos e perdas de produtividade das tiras analisadas

Observa-se pelo gráfico acima que apenas duas tiras cumpriram o planejado, ou seja, tiveram 0% de ganhos ou perdas. A média das porcentagens foi de -11,57% e caso o planejado fosse realizado haveria uma economia anual de 1.449.333 m<sup>3</sup> de estéril que deixariam de ser movimentados e um ganho de consumo de diesel de 376.827 l, sendo o preço do litro igual a R\$ 2,12, resultaria num ganho anual R\$ 832.787,00.

### 5.3 RESULTADO DOS TESTES EM CAMPO

Os resultados dos testes em campo, realizados nas tiras A, B e C, são apresentados na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Dados dos testes práticos

<b>Tira</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Ângulo de Corte (°)	16,3	16,4	17
Ângulo Depósito (°)	6,3	6	10
Espessura de estéril (m)	11,47	8,67	10,47
Espessura do minério/cava (m)	3,35	2,51	2,70
Volume movimentado (m <sup>3</sup> )	22.358,41	8.685,66	6.778,33
Horas produtivas	33,70	11,60	9,30
Produtividade (m <sup>3</sup> /h)	663,45	748,76	728,85
Ganho/Perda de Produtividade pela Espessura Estéril	4%	28%	11%
Ganho/Perda de Produtividade pela Espessura Minério	6%	0%	1%
Ganho/Perda de Produtividade Total	9%	28%	12%
Produtividade Corrigida (m <sup>3</sup> /h)	602	542	639

Analisando os valores da produtividade corrigida observa-se que houve um ganho com o aumento do ângulo de subida e de corte. A tira C, que utilizou os maiores ângulos, possuiu maior produtividade (639 m<sup>3</sup>/h). Vale ressaltar que nenhum teste utilizou os ângulos do pit planejados, o que comprova os desvios operacionais.

## 6 CONCLUSÃO

Ao analisar as simulações do *software* DozSim conclui-se que o aumento dos ângulos do pit resulta em ganhos na produtividade dos tratores D11T CD e que o aumento do ângulo de deposição proporciona um ganho maior se comparado com o ângulo de corte.

Com os resultados do levantamento pode-se perceber a elevada variação entre os ângulos do pit utilizados na etapa de decapeamento ocasionada pela falta de paralelismo entre as laminadas do trator durante a atividade de decapeamento, por variações da espessura de minério ao longo da tira, pela falta de inclinômetro de alguns tratores, etc. A instalação do inclinômetro nos dois tratores D11T CD que não o possuem ficaria em torno de R\$100.000,00 (estimativa de preço fornecida pelo fabricante), valor que representa 12% do total de prejuízos com diesel, estimados pelo não cumprimento do planejado. A alta variação dos ângulos do pit tem como consequência a geração de prejuízos que estão relacionados não só com o consumo de diesel, mas também com fatores como a quantidade de material movimentado, horas a mais trabalhadas, gasto com pessoal, entre outros, o que reforça a importância do controle e acompanhamento desta atividade.

Os testes em campo comprovaram os resultados das simulações, ou seja, o ganho de produtividade com o aumento dos ângulos de corte e deposição utilizados pelos tratores durante operação. Entretanto recomenda-se a realização de mais testes afim de se encontrar os ângulos do pit que maximizarão a produtividade dos tratores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUMINIUM COMPANY OF AMERICAN - ALCOA. *Plano Integrado de Aproveitamento Econômico*. Projeto Juruti, 2005.

CATTERPILLAR, INC. *Manual de Produção Caterpillar®*. 39a ed., Peorla, EUA, 2009, p. 13-74.

CELSO, T. B. *Estudo Comparativo entre os Métodos de Decapeamento Tradicional e Wave com auxílio do SOFTWARE DOZSIM®*. (Trabalho de conclusão de curso). Universidade do Sul e do Sudeste do Pará. Marabá, 2014.

HARTMAN, H *et al.* *SME Mining Engineering Handbook*. 2ª ed – Vol. 1 e 2. Society for Mining, Metallurgy and Exploration. Inc.: Ann Arbor, MI, USA, 1992.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. *Introductory mining engineering*. 2ª ed. New Jersey, EUA: Jonh Wiley & Sons, Inc., 2002, p. 197-208.

ICHIHARA, A. H. *Alumínio*. Sumário Mineral, DNPM, 2015.

QUARESMA, L. F. *Relatório Técnico 22, Perfil da Mineração de Bauxita*. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2009, 40 p.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. *Manual prático de escavação: terraplenagem e escavação de rocha*. 3ª ed. São Paulo: Pini, 2007.

RODOVALHO, E. C.; TOMI, G. *Relação entre aspectos geométricos do método de lavra por tiras e a produtividade das operações de decapeamento*. VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO. Rio de Janeiro, 2014.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B. *Bauxita*. In: Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações. CETEM. Rio de Janeiro, 2005, p. 279-304.

SILVA, A. M. P. *Sustentabilidade Operacional no Contexto da Indústria Mineral: caso da lavra de caulim no município de Cabo de Santo Agostinho/PE*. Dissertação de mestrado em Engenharia Mineral - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008, 84 p.

SILVA, E. L. *Análise da produtividade do trator de esteira D11 em função do ângulo de corte com software DOZSIM durante o decapeamento da camada de estéril da mina de bauxita da Mineração Paragominas S. A.* (Trabalho de conclusão de curso). Universidade do Sul e do Sudeste do Pará. Marabá, 2014, 64 p.

SILVA, S. R. C. *et al. Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico – Área de Proteção Ambiental Sul da região metropolitana de Belo Horizonte.* vol. 2. Belo Horizonte, 2005, 185 p.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Mineral Commodity Summaries 2015.* Washington, 2015, 196 p.

VIEIRA, J. C. *Determinação e quantificação de elementos de relevância em infraestrutura de mina.* Dissertação de mestrado em Engenharia de Minas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Parauapebas, 2013, 180 p.