



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ  
*CAMPUS DE MARABÁ*  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS E MEIO AMBIENTE

THIAGO BENTES CELSO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE DECAPEAMENTO  
TRADICIONAL E *WAVE* COM AUXÍLIO DO *SOFTWARE* DOZSIM®

MARABÁ – PARÁ  
JULHO/2014

THIAGO BENTES CELSO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE DECAPEAMENTO  
TRADICIONAL E *WAVE* COM AUXÍLIO DO *SOFTWARE* DOZSIM®

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Engenharia de  
Minas e Meio Ambiente da Universidade  
Federal do Sul e Sudeste do Pará –  
Unifesspa, em cumprimento às exigências  
para obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Denilson Costa

MARABÁ – PARÁ

JULHO/2014

THIAGO BENTES CELSO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE DECAPEAMENTO  
TRADICIONAL E *WAVE* COM AUXÍLIO DO *SOFTWARE* DOZSIM®

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Engenharia de  
Minas e Meio Ambiente da Universidade  
Federal do Sul e Sudeste do Pará –  
Unifesspa, em cumprimento às exigências  
para obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Denilson Costa

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÃO DE MINA

DATA DE APROVAÇÃO: 16/07/2014

CONCEITO: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA:

ORIENTADOR: \_\_\_\_\_  
Professor Doutor Denilson da Silva Costa  
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

COORIENTADOR: \_\_\_\_\_  
Professor Doutorando Dennin Tomás Quispe Arapa  
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

EXAMINADOR: \_\_\_\_\_  
Professor Bel. Manoel Ferreira Nunes  
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

MARABÁ – PARÁ

JULHO/2014

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA**

---

Celso, Thiago Bentes

Estudo comparativo entre os métodos de decapeamento tradicional e *wave* com auxílio do *software* Dozsim® / Thiago Bentes Celso; orientador, Denilson da Silva Costa. — 2014.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Curso de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2014.

1. Minas e recursos minerais. 2. Bauxita - Minas e mineração - Juruti (PA). 3. Produtividade. 4. Engenharia de minas - Programas de computador. I. Costa, Denilson da Silva, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 553

---

A Deus que sempre olha por mim e me mostra o caminho, à meus pais Paulo Celso e Olga Bentes Celso e meus irmãos Thomáz e Thainá Bentes Celso por todo esforço e confiança aplicados em mim e à Natália Mello por todo apoio e paciência.

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço a Deus por mais este ciclo que está se fechando, sempre com o Seu apoio e presença em todos os momentos. Agradeço a Nossa Senhora de Nazaré, nossa mãe, por todo cuidado e zelo materno, sempre me protegendo com seu manto divino. Agradeço também a São Jorge, escudeiro e guardião fiel, que me protege em todos os momentos com seu escudo e sua lança.

Aos meus pais, Paulo e Olga por todo sacrifício, esforço e confiança depositadas em mim ao longo de toda minha vida. Essa vitória é de vocês! Aos meus irmãos, Thomáz e Thainá, fonte infinita de força pra continuar em frente todos os dias e para os quais sempre tive, e tenho o objetivo de me tornar o exemplo e a referência.

A Natália por todas as longas conversas, compreensão, conselhos e paciência incansáveis com os momentos de dúvidas e inseguranças. Pelo porto-seguro, pelo acompanhamento do meu amadurecimento e, além de tudo, todo amor e carinho dedicados a mim diariamente.

A minha família, em especial a minha madrinha Cristina e Vó Bastiana, montanhas de puro amor e bem-querer por mim. E também, a meus avós Gilberto e Olga e meu tio João Elias, que se fizeram presentes em um dos momentos que mais precisei de ajuda.

A Universidade Federal do Pará, em especial os professores Dr. Lucinewton Moura, Dr. Denilson Costa, Dra. Joana Luiza, Dr. Dennin Arapa e Bel. Manoel Nunes por todas as orientações, conselhos, disponibilidade e boa vontade durante todo o percurso. A Sec. Eumar Costa pelos auxílios imprescindíveis em todos os momentos.

A todos os colegas universitários e irmãos de batalha. Em especial, aos meus amigos Anderson Meireles, Hermeson Rodrigues, Izabella Vargens, Wendel Rodrigues e Lucas Bicelli pelo apoio e por todos os ensinamentos que trocamos durante esses cinco anos de curso, cada um do seu jeito e da sua forma.

A equipe da Alcoa, em especial Antônio Maria Coutinho, Caroline Zaparoli, Luiz Nunes, Dalrimar Bentes, Rhaymá do Carmo, Eduardo Rodrigues e Cleidiane Silva pelos ensinamentos, conselhos, cotidiano e ambiente de trabalho maravilhoso. Com todo carinho, a minha tutora Antônia Cunha por todo cuidado materno e atenção. A equipe da Sotreq, em especial Gileade Rodrigues, Ademar Amaral e Wanderley Nascimento.

Aos amigos estagiários, em especial aos irmãos de batalha que a vida me presenteou, Victor Bretas, Antônio Almeida, Felipe Brandão e Kaio Coutinho pelo apoio e ensinamentos trocados.

“A necessidade é a mãe da inovação”.

Platão

## RESUMO

O decapeamento é uma das atividades responsáveis por efetuar a liberação da camada litológica do minério de bauxita. A jazida de bauxita, do tipo tabular, apresenta variações em sua profundidade, espessura, inclinação, mergulho, etc., o que implica na mudança do ambiente a ser vencido pelo processo de decapeamento frequentemente. Dessa forma, para cada um destes ambientes, teoricamente, existe um método de decapeamento ideal ou mais indicado para aquela determinada realidade. Este estudo comparativo visa analisar alguns dos principais parâmetros com potencial influenciador nos resultados de produtividade e distância média de transporte no processo de decapeamento. Existem vários parâmetros, entre eles: ângulo de corte rampa *in-situ*, ângulo do depósito controlado de estéril (DCE), altura da camada de argila belterra, altura da cava recém aberta, chuva, etc. Foram realizados testes na mina de bauxita de Juruti, pertencente à *ALUMINIUM COMPANY OF AMERICAN – ALCOA*, e os dados obtidos foram comparados com os resultados provenientes de testes realizados em outra mina de bauxita na região oeste do estado do Pará. Além disso, de forma prévia foram efetuadas simulações das etapas de decapeamento através do *software* DozSim da Caterpillar® para posteriormente efetuar análises entre dados teóricos e práticos. Os resultados demonstraram que a altura de argila é inversamente proporcional à produtividade do trator de esteiras e que a altura da cava é diretamente proporcional à produtividade do trator de esteira. Pode-se notar também que para cada ambiente existe um método ideal. Quanto ao *software*, este atua como uma referência para os valores práticos, de forma a ser utilizado como fator de eficiência prática, ou seja, quanto mais próximo os valores práticos forem dos simulados mais eficiente é o procedimento.

Palavras-chave: Decapeamento, bauxita, método *wave*, produtividade, dozsim.

## ABSTRACT

The stripping is one of the activities responsible for making the release of the lithological layer of bauxite. The deposits of bauxite, in tabular type, shows variations in its depth, thickness, slope, diving, etc., which often implies the change of the scene to be won by the stripping process. Thus, for each of these scenes, theoretically, there is a method of stripping ideal or best suited for that particular reality. This comparative study aims to examine some of the key parameters influencing the results of productivity and average transport distance in the process of stripping. There are several parameters, including: cutting angle of clay's ramp in-situ, angle of controlled waste deposit (CWD), the height of Belterra clay layer, the height of the digs newly opened, rain, etc. Tests were conducted in Juruti bauxite mine, belonging to ALUMINIUM COMPANY OF AMERICAN - ALCOA, and the data obtained were compared with the results from tests on other bauxite mine in western Pará State. Furthermore, previously, simulations were performed of the steps of stripping through DozSim *software* Caterpillar ® to subsequently perform analyzes between theoretical and practical data. The results showed that the height of clay is inversely proportional to bulldozer's productivity and the height of the dig newly opened is directly proportional to bulldozer's productivity. Was possible also to be noted, that for each environment there is an ideal method. Regarding the *software*, it serves as a reference for practical values and can be used as a practical efficiency factor, in other words, as close the practical values are of the simulated values as more efficient is the procedure.

Keywords: stripping, bauxite, *wave* method, productivity, dozsim.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica do município de Juruti – PA. ....	18
Figura 2 – Perfil litológico típico dos platôs Capiroanga, Mauari e Guaraná – Juruti – PA.....	21
Figura 3 – Mapa da mina de bauxita de Juruti – PA. ....	22
Figura 4 – Esquema da operação de decapeamento com tratores de esteiras.....	26
Figura 5 – Esquema didático da operação de decapeamento através do método <i>wave</i> .....	28
Figura 6 – Primeira tela para <i>input</i> dos dados no <i>software</i> . ....	29
Figura 7 – Segunda tela para <i>input</i> dos dados do <i>pit</i> . ....	30
Figura 8 – Terceira tela com simulação da movimentação da primeira <i>slice</i> .....	30
Figura 9 – Quarta tela com simulação da movimentação da segunda <i>slice</i> . ....	31
Figura 10 – Quinta tela com simulação da movimentação da terceira <i>slice</i> .....	31
Figura 11 – Sexta tela com simulação geral do processo de decapeamento. ....	32
Figura 12 – Trator de esteiras CAT D11T realizando desmonte mecânico (escarificação).....	33
Figura 13 – Escavadeira hidráulica CAT 349D lavrando bauxita.....	34
Figura 14 – Caminhão basculante descarregando minério na moega do britador primário. ....	35
Figura 15 – Pá-carregadeira retomando minério da pilha pulmão. ....	35
Figura 16 – Usina de classificação e lavagem.....	36
Figura 17 – Vista externa do britador primário. ....	37
Figura 18 – Peneiramento primário, vista superior do primeiro <i>deck</i> . ....	38
Figura 19 – Bateria de hidrociclones atuando em cinco estágio. ....	39
Figura 20 – Trator de esteiras D11 executando decapeamento método tradicional.....	42
Figura 21 – Trator de esteiras D11 executando decapeamento através do método <i>wave</i> . ....	42
Figura 22 – Marcações topográficas de apoio aos operadores para realização dos testes.....	43
Figura 23 – Final da simulação do método tradicional com o <i>software</i> DozSim.....	45
Figura 24 – Resultados no final da simulação do método <i>wave</i> com o <i>software</i> DozSim.....	45
Figura 25 – Tela final da simulação realizada pelo <i>software</i> DozSim Caterpillar®.....	49
Figura 26 – Tela final da simulação realizada pelo <i>software</i> DozSim Caterpillar®.....	49

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produtividade dos testes tradicional e <i>wave</i> realizados na mina Alfa - PA. ....	46
Gráfico 2 – Comparativo entre os resultados DozSim e resultados dos teste práticos.....	47
Gráfico 3 – Pluviometria detalhada do mês de maio/2014 na mina de Juruti – PA.....	50
Gráfico 4 – Horas trabalhadas pelos tratores de esteiras utilizados nos testes.....	51
Gráfico 5 – Volume movimentado nos blocos de ambos os testes realizados. ....	51
Gráfico 6 – Produtividades gerais dos testes das metodologias tradicional e <i>wave</i> . ....	52
Gráfico 7 – Distância total percorrida pelo trator 6004 em ambos os testes. ....	52
Gráfico 8 – Quantidade de combustível em litros utilizada por cada trator nos testes.....	53
Gráfico 9 – Consumo específico em litros por metros cúbicos.....	54
Gráfico 10 – Consumo específico em litros por quilômetros.....	54
Gráfico 11 – Análise comparativa entre DozSim e testes práticos mina de Juruti - PA. ....	55
Gráfico 12 – Análise comparativa entre os dados simulados e reais.....	56

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
2	<b>OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>15</b>
3	<b>COMPANHIA ALCOA WORLD ALUMINA.....</b>	<b>16</b>
4	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
4.1	PROJETO JURUTI .....	17
4.2	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA.....	17
4.3	BAUXITA.....	18
4.4	GÊNESE.....	20
4.5	GEOMORFOLOGIA E GEOLOGIA LOCAL .....	20
4.6	MINA DE BAUXITA DE JURUTI.....	22
4.7	MÉTODO DE LAVRA EM TIRAS ( <i>STRIP MINING METHOD</i> ).....	23
4.8	SUPRESSÃO VEGETAL .....	24
4.9	DECAPEAMENTO .....	25
4.9.1	<b>Tratores de esteiras .....</b>	<b>27</b>
4.9.2	<b>Método <i>wave</i> de decapeamento .....</b>	<b>28</b>
4.9.3	<b><i>Software DozSim</i> da Caterpillar®.....</b>	<b>29</b>
4.10	DESMONTE MECÂNICO E TRANSPORTE MINÉRIO .....	32
4.11	BENEFICIAMENTO.....	36
4.11.1	<b>Britagem.....</b>	<b>37</b>
4.11.2	<b>Usina de classificação e lavagem .....</b>	<b>38</b>
4.11.3	<b>Rejeito.....</b>	<b>39</b>
4.12	CARREGAMENTO DE VAGÕES E NAVIOS .....	40
5	<b>METODOLOGIA DE ESTUDO .....</b>	<b>41</b>
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
6.1	MINA ALFA.....	44
6.1.1	<b>Simulações <i>DozSim</i> .....</b>	<b>44</b>
6.1.2	<b>Resultados dos testes práticos .....</b>	<b>46</b>
6.2	MINA JURUTI.....	48
6.2.1	<b>Simulações <i>DozSim</i> .....</b>	<b>48</b>
6.2.2	<b>Resultados dos testes práticos .....</b>	<b>49</b>
7	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>57</b>
8	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>59</b>
9	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mina de bauxita de Juruti, localizada na região oeste do estado do Pará, possui um minério de alta qualidade. De propriedade da Alcoa World Alumina Brasil LTDA, a lavra tem realidade operacional satisfatória, que pode ser justificada, em partes, pela litologia da região, a qual apresenta um contexto vantajoso quando comparado a outros projetos de lavra de bauxita. Dentre outros fatores que proporcionam essa vantagem operacional estão: a espessura de decapeamento relativamente baixa, a espessura de minério significativamente alta e um dos melhores teores de alumina do mundo.

As jazidas de bauxita geralmente apresentam-se do tipo tabular, que consiste em um volume mineralizado com duas dimensões extensas no plano horizontal, e uma terceira dimensão pouco extensa no plano vertical. Logo, para garantir um melhor aproveitamento do minério, um dos métodos mais utilizados na lavra de bauxita é o método por tiras (*Strip mining*), que consiste na lavra em faixas com significativo comprimento e pequena largura. Genericamente, as etapas deste processo são: supressão vegetal, decapeamento da camada de estéril, desmonte mecânico da bauxita, lavra e transporte.

Diversos equipamentos de grande porte são utilizados durante todas as fases produtivas. Dentre estes, se destaca o trator de esteiras Caterpillar D11T modelo *Carry Dozer*, responsável por grande parte do decapeamento das tiras, removendo as camadas litológicas de argila belterra, bauxita nodular (em alguns casos) e laterita. Uma pequena parte do decapeamento das tiras é de responsabilidade do conjunto escavadeiras hidráulicas e caminhões basculantes.

O decapeamento é uma etapa essencial no processo produtivo da bauxita. Por isso, os investimentos em equipamentos destinados a realizar esta etapa são consideráveis. Desta forma, variáveis como tempo de decapeamento por tira, distâncias médias de transporte e produtividade dos tratores de esteiras devem ser melhoradas constantemente para uma atividade financeiramente saudável. É importante levar em conta também que existem diversos métodos de decapeamento e que, teoricamente, cada um dos métodos apresenta melhor desempenho em determinada realidade litológica. Em geral, entre as metodologias de decapeamento destacam-se os métodos *full-pass*, *back-to-front* e *front-to-back*.

Um panorama negativo de decapeamento proporciona diversos problemas em cadeia. Por exemplo, o trator de esteiras D11T, responsável pelo desmonte mecânico do minério de bauxita, pode ter sua utilização afetada devido a não liberação de tiras para o início do

desmonte, o que, por sua vez, prejudica diretamente a quantidade de dias de reserva operacional de minério. Seguindo a cadeia, uma baixa reserva operacional de minério coloca em risco a principal obrigação da mina: a alimentação de minério com segurança para seu cliente imediato, o britador.

Dessa forma, este estudo tem como meta promover testes de decapeamento através das metodologias tradicional e *wave*, com o intuito de analisar os fatores que possuem influência nos resultados de produtividade e distância média de transporte dos tratores, além de comparar estes dados obtidos nos testes práticos com as simulações executadas previamente.

Portanto, este trabalho tem como meta a realização de um estudo comparativo entre os métodos de decapeamento tradicional (adaptação do *full pass*) e *wave (front to back)*, analisando os parâmetros geométricos que possuem potencial influenciador nos resultados de produtividade e distância média de transporte. Além disso, a pesquisa visa analisar as previsões geradas pelo *software* DozSim da Caterpillar®, através da comparação dos valores simulados pelo *software* com os valores colhidos nos testes práticos.

## 2 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo comparativo entre os métodos de decapeamento tradicional (adaptação do *full pass*) e *wave (front to back)*, analisando os parâmetros geométricos que possuem potencial influenciador nos resultados de produtividade e distância média de transporte. O trabalho visa também analisar as previsões geradas pelo *software* DozSim da Caterpillar®, através da comparação dos valores simulados pelo *software* com os valores colhidos nos testes práticos.

### 3 COMPANHIA ALCOA WORLD ALUMINA

A ALCOA Inc. é uma empresa fundada nos Estados Unidos por Charles Martin Hall em 1888, dois anos após o pesquisador patentear a nova forma de redução eletrolítica do alumínio, método que tornou sua fabricação economicamente viável.

A história da companhia se confunde com a história do próprio metal, atingindo todas as partes do mundo com seus produtos. Antes de 1888, o alumínio já existia e era produzido de forma complexa. Considerado um dos metais mais preciosos do mundo, avaliado em US\$ 1.200 / kg, era usado em adornos na realeza.

Desde 1988 a Alcoa é uma das líderes mundiais em fabricação de alumina, alumínio primário e fabricados.

A fábrica de Poços de Caldas (MG), fundada em 1965, foi a primeira unidade da Alcoa no país. Na ocasião, recebeu o nome de Alcominas. As atividades tiveram início em 1970 e, 10 anos depois, passou a se chamar Alcoa Alumínio S.A.

Atualmente, a unidade conta com cerca de mil funcionários e possui quatro áreas integradas de produção: mineração, refinaria, redução e pó de alumínio, onde são produzidas aluminas calcinadas e hidratadas, metal na forma líquida, tarugos, lingotes e alumínio em pó - fabricado apenas no Brasil, entre todas as unidades da Alcoa na América Latina.

Cerca de 52% da alumina fabricada é utilizada na produção do metal. Os outros 48%, na forma de hidrato e alumina, são direcionados às indústrias de sulfato de alumínio, papel, dióxido de titânio, polimento de lentes e metais, aluminatos de sódio, retardantes de chama, fabricação de vidros, pigmentos, produtos refratários, cerâmicos, abrasivos e eletrofusão, entre outros segmentos. O metal é comercializado nos mercados nacional e internacional.

O alumínio em pó (destinado aos setores de refratários, metalurgia e químicos) é comercializado no mercado interno e também exportado para o Japão, Europa, Estados Unidos e Mercosul. A unidade produz, ainda, o alumínio em pó fino, utilizado na fabricação de pigmentos para a indústria automotiva e de equipamentos eletrônicos. Em Poços de Caldas, também está localizado, desde 2005, o Global Business Services (GBS), onde a empresa centraliza serviços das áreas administrativas e financeiras.

Atualmente, a ALCOA apresenta diversas instalações em diversas regiões do Brasil. A companhia possui escritórios nos estados: PA, DF, MG e SP, além de unidades produtivas em: SP, PE, PA, MG, MA e SC.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 PROJETO JURUTI

Após alguns anos de prospecção mineral por toda a região de Juruti, no oeste do Pará, realizada entre 1972 e 1973 pela empresa francesa Pechiney, através de sua subsidiária brasileira SOMINAS Ltda; e posteriormente, entre 1975 e 1996, continuados pela empresa Reynolds Metals, a Alcoa decidiu adquirir, no ano de 2000, os direitos de pesquisa na região. Foi quando iniciaram os estudos aprofundados nos platôs Capiroanga, Guaraná e Mauari, localizados nos limites municipais de Juruti. Diante da decisão de investir na mineração de bauxita, a empresa estabeleceu o processo de licenciamento e construção do empreendimento de mineração.

A unidade da Alcoa Juruti, dedicada à mineração e beneficiamento primário de bauxita, opera desde setembro de 2009 sob uma reserva de cerca de 700 milhões de toneladas métricas de minério, um dos maiores depósitos de bauxita do mundo, fornecendo minério de alta qualidade.

A capacidade produtiva inicial de Juruti foi de 2,6 milhões de toneladas métricas anuais. Atualmente, a Mina de Bauxita de Juruti opera com capacidade de 4,48 milhões de toneladas métricas/ano. Além das frentes de lavra, outras instalações completam o empreendimento. As instalações da área de beneficiamento de bauxita são situadas a cerca de 60 quilômetros da cidade. A ferrovia construída pela empresa, de aproximadamente 55 quilômetros de extensão, opera com 42 vagões, cada um com capacidade para transportar aproximadamente 80 toneladas. O terminal portuário de Juruti, a dois quilômetros do centro da sede do município, às margens do rio Amazonas, tem capacidade para acomodar navios de até 75 mil toneladas, similares aos que navegam no Canal do Panamá (ALCOA).

### 4.2 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

O Projeto Juruti está localizado na margem direita do rio Amazonas, no município de Juruti, extremo oeste do Estado do Pará. A cidade de Santarém, centro econômico mais importante da região, denominada popularmente “Baixo Amazonas”, situa-se a 200 quilômetros, via rio Amazonas, da sede do município de Juruti. A mina e a planta de

beneficiamento, propriamente ditos, estão localizadas a, aproximadamente, 56 quilômetros do centro da cidade. O percurso é feito pela estrada rodoviária ou pela ferrovia. A Figura 1 ilustra a posição do município de Juruti em relação às demais regiões estado do Pará.



Figura 1 – Localização geográfica do município de Juruti – PA.  
Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Juruti>

#### 4.3 BAUXITA

Atualmente, um dos principais metais produzidos é o alumínio. Este não ocorre isolado na crosta terrestre, e sua obtenção em estado metálico depende da extração da bauxita pela mineração. A produção mundial e anual de bauxita é superior a 120 milhões de toneladas e cerca de 95% da produção é utilizada para a obtenção do alumínio metálico (SAMPAIO, 2005). Segundo o *International Aluminium Institute – IAI*, as reservas mundiais de bauxitas estão distribuídas nas regiões tropical (57%), mediterrânea (33%) e subtropicais (10%).

A bauxita foi descoberta em 1821 por Berthier, na localidade de *Les Baux*, no sul da França. Trata-se de uma rocha de coloração avermelhada, rica em alumínio, com mais de 40% de alumina ( $Al_2O_3$ ). A bauxita é a fonte natural do alumínio, o terceiro elemento em abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e do silício. Mesmo com sua elevada abundância, não há notícias acerca da ocorrência de alumínio metálico na natureza. Constata-

se sua maior ocorrência na forma combinada com outros elementos, principalmente o oxigênio, com o qual forma alumina (SAMPAIO, 2005).

A bauxita se forma em regiões tropicais e subtropicais, por ação do intemperismo sobre rochas aluminossilicáticas ou de resíduos de rochas calcárias argilosas modificadas. Apesar de ser frequentemente descrita como um minério de alumínio, a bauxita não é uma espécie mineral propriamente dita, mas um material heterogêneo formado de uma mistura de hidróxidos de alumínio hidratados ( $[AlO_x(OH)_{3-2x}]$ ,  $0 < x < 1$ ), contendo impurezas. Os principais constituintes deste material, de acordo com a tabela 1, são gibbsita,  $\gamma-Al(OH)_3$ , boehmita,  $\gamma-AlO(OH)$  e diásporo,  $\alpha-AlO(OH)$ , sendo que as proporções das três formas variam de acordo com a localização geográfica do minério (KIRK-OTHMER, 1992; ULLMANN, 1998). A maioria das bauxitas, economicamente aproveitáveis, possui um conteúdo de alumina ( $Al_2O_3$ ) entre 50 e 55% e o teor mínimo para que ela seja aproveitável é da ordem de 30% (ANJOS E SILVA, 1983; PAGIN et al., 1983).

Tabela 1 – Minerais de alumínio contidos na Bauxita.

<b>Propriedades</b>	<b>Gibbsita</b>	<b>Boehmita</b>	<b>Diásporo</b>
Fórmula química	$Al(OH)_3 - \gamma$	$AlOOH - \gamma$	$AlOOH - \alpha$
Sistema cristalino	Monoclínico	Ortorrômbico	Ortorrômbico
Dureza Mohr	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 ( $^{\circ}C$ ) de desidratação	150	350	450
Produto de desidratação	$Al_2O_3 - \chi$	$Al_2O_3 - \gamma$	$Al_2O_3 - \alpha$
Solubilidade (g $Al_2O_3/L$ ) (*)	128	54	Insolúvel
(*) Em solução de $Na_2O$ a 100 g/L, a 125 $^{\circ}C$ .			
<b>Bauxita não Metalúrgica</b>		<b>Bauxita Metalúrgica</b>	
Constituintes	(%)	Constituintes	(%)
$Fe_2O_3$	2,5 (máx.)	$Fe_2O_3$	11 – 12
$SiO_2$	5 – 7	$SiO_2$	< 4
$Al_2O_3$	50	$Al_2O_3$	> 48
Densidade aparente > 3		Alumina aproveitável pelo processo Bayer	

Fonte: CETEM, (2005).

As principais impurezas presentes na bauxita são compostos de ferro (hematita, óxidos/hidróxidos amorfos e goetita, entre outros), sílica, titânio e aluminossilicatos, em quantidades que variam com a região de origem, causando alterações no aspecto físico do

minério, que pode variar de um sólido marrom-escuro ferruginoso até um sólido de cor creme, duro e cristalino (CONSTANTINO et al., 2002).

A bauxita é comumente aplicada na cadeia produtiva do alumínio (alumina e alumínio primário), mas há também um grupo de aplicações para a bauxita não metalúrgica, no qual se incluem: refratários, abrasivos, produtos químicos, cimentos de alta alumina e fabricação do aço. A composição da bauxita “*in natura*” determinará as características do minério. Estas características definirão em qual dos grupos citados acima será empregado o material (SAMPAIO, 2005).

#### 4.4 GÊNESE

Os depósitos de bauxita da Amazônia Oriental caracterizam-se por apresentar espessura de ordem métrica de 10 metros e por apresentarem acentuadas variações laterais nos teores de Al, Si e Fe. Estes depósitos enquadram-se como do tipo “*blanket*”, formados “*in situ*” por processos de intemperismo sobre rochas sedimentares clásticas, em condições climáticas tropicais úmidas, de acordo com plano de aproveitamento econômico, PAE (2005).

Na macro área Juruti, os depósitos correspondentes aos platôs mineralizados: Central, Capiranga, Mauari e Guaraná, desenvolveram-se sobre a Formação Alter do Chão, gerando um perfil geológico bastante persistente, com horizontes de bauxita relativamente bem definidos e contínuos.

Assim como os depósitos da região, estes apresentam posicionados no topo da sequência um perfil de laterização no qual podem ser identificadas três zonas distintas: argila Belterra, zona de laterita concrecionária e zona saprolítica. A zona de laterita, por sua vez, pode ser subdividida em três subzonas: bauxita nodular, laterita e bauxita maciça.

#### 4.5 GEOMORFOLOGIA E GEOLOGIA LOCAL

A área do projeto de Juruti é caracterizada pela presença, na planície fluvial do rio Amazonas, de platôs com 100 a 160 m de altitude, em cujos topos se encontram os depósitos de Bauxita Laterítica, e por uma região intermediária formada por pequenas colinas, com altitudes de 35 a 90 m, que circunda estes platôs. A área das jazidas encontra-se dentro da

unidade de relevo denominada de Bacia Sedimentar Amazônica e, mais especificadamente, no planalto rebaixado da Amazônia – Médio Amazonas (IBGE, 1993).

Os depósitos de bauxita da Amazônia Oriental enquadram-se como tipo “*blanket*” (PATTERSON, 1967), formados “*in situ*” por processos de intemperismo sobre rochas sedimentares clásticas, em condições climáticas tropicais úmidas. Estes depósitos caracterizam-se por apresentar espessura de ordem métrica de 10 metros e acentuadas variações laterais de Al, Si e Fe. A unidade de relevo denominado Bacia Sedimentar Amazônica corresponde aos sedimentos da Formação Alter do Chão e pela Formação Barreiras. Os depósitos de bauxita da Amazônia Oriental foram formados por processo de intemperismos sobre rochas sedimentares da formação Alter do Chão.

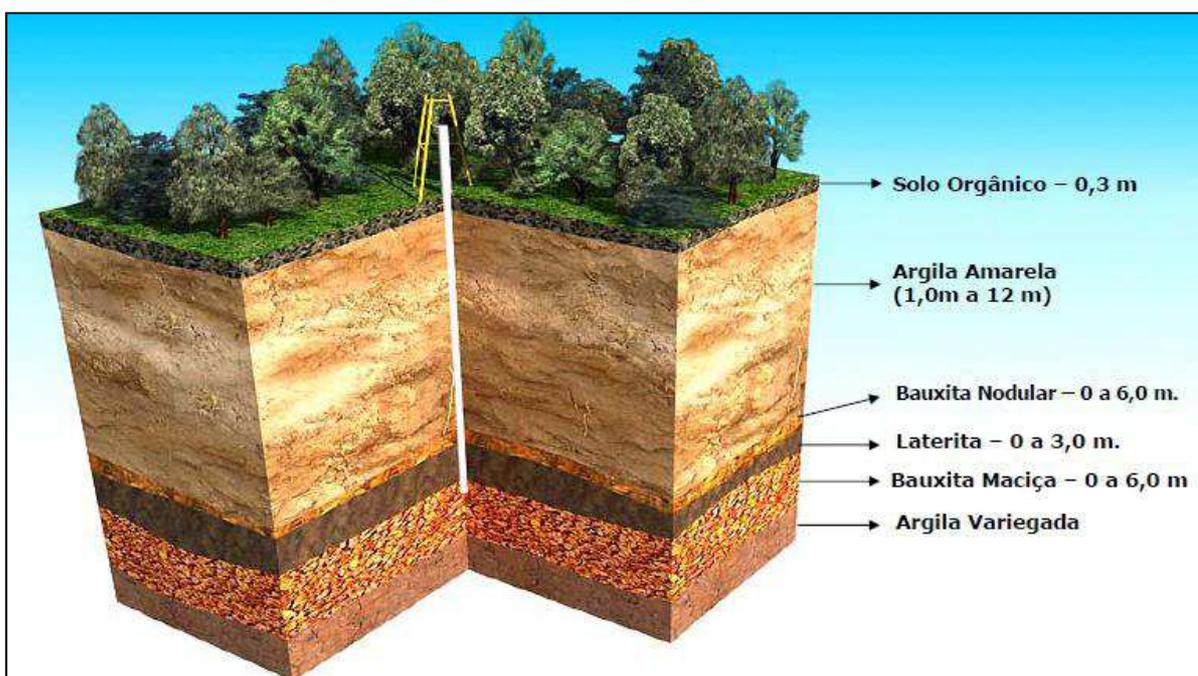


Figura 2 - Perfil litológico típico dos platôs Capiranga, Mauari e Guaraná – Juruti/PA.

Fonte: Alcoa

Na macro área Juruti, o depósito de bauxita, que até o momento corresponde aos platôs Mauari, Guaraná e Capiranga, situados na Formação Alter do Chão, de idade Neocretácia, apresenta um topo aplainado, com cotas da ordem de 130 a 140 metros, com encostas abruptas e bastante ravinadas, recortadas por inúmeras drenagens. O perfil geológico apresenta horizontes de bauxita relativamente bem definidos e contínuos (ALCOA, 2010).

Da mesma forma que os depósitos de Trombetas, os depósitos de Juruti correspondem a um horizonte laterítico posicionado no topo dessa sequência, o qual pode ser discretizado em três zonas distintas: argila Belterra, zona de laterita concrecionária e a zona saprolítica.

Por sua vez, a zona de laterita pode ser subdividida em três subzonas: bauxita nodular, laterita e bauxita maciça.

#### 4.6 MINA DE BAUXITA DE JURUTI

A mina de bauxita de Juruti possui quatro frentes de lavra atualmente, todas no platô Capiranga. Cada uma das frentes pode ser reconhecida por características peculiares, como teor de minerais, espessura de minério, resistência ao desmonte mecânico, espessura de estéril, etc. Também possuem acessos secundários, que ligam o acesso principal às tiras em operação de lavra.

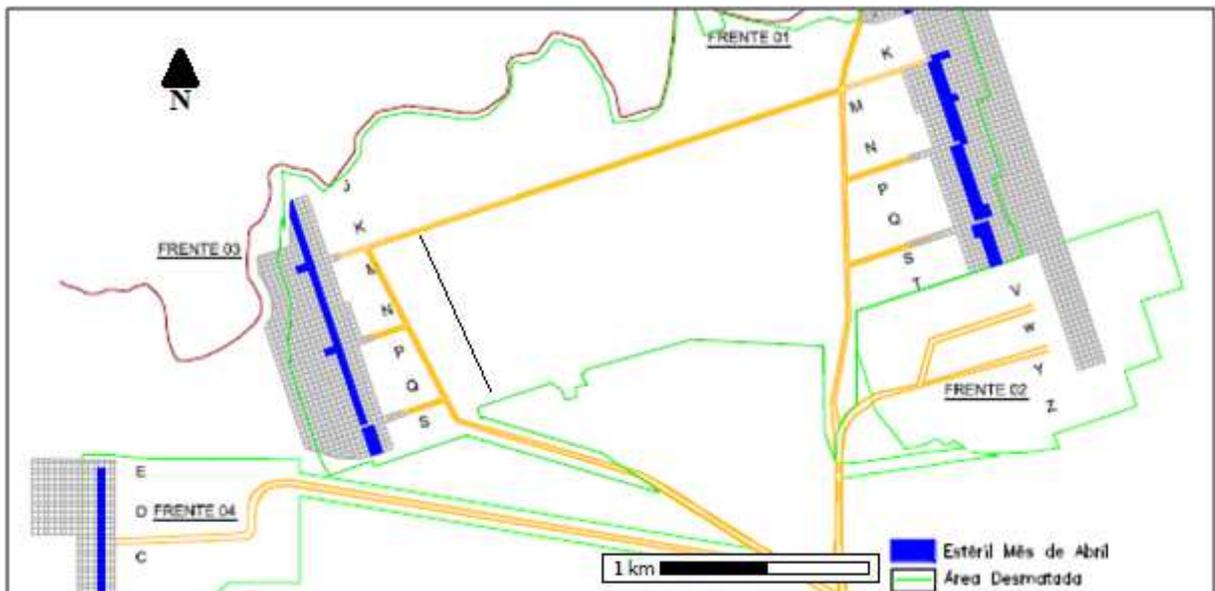


Figura 3 - Mapa da mina de bauxita de Juruti – PA.

Fonte: Alcoa

Quanto à disposição, as frentes de lavra 1, 2 e 3 na mina são mais integradas, pois se utilizam as mesmas estradas para acessá-las. No entanto, a frente 2 foi recentemente desativada, devido a construção da nova lagoa de deposição de rejeito (LD3). Já a frente 4 possui um acesso exclusivo, de acordo com a figura 3. Dessa forma, a mina de Juruti está operando com as frentes 1, 3 e 4, cada uma com um acesso principal. As frentes 1 e 3, além dos acessos principais, possuem acessos secundários que os ligam as tiras em operação.

#### 4.7 MÉTODO DE LAVRA EM TIRAS (*STRIP MINING METHOD*)

A lavra em tira (*strip mining*) é um método de lavra a céu aberto, utilizado principalmente para mineração de camadas pouco profundas, sub-horizontais e com grande extensão e volume (PIMENTEL, 2010). Dentre os minérios lavrados por este método destacam-se os empreendimentos de lavra de bauxita, carvão, etc.

As tecnologias de lavra a céu aberto podem ser classificadas de acordo com o uso de métodos mecânicos ou hidráulicos, (HARTMAN, 1987). Nos métodos mecânicos pode-se ter a lavra por bancadas com desmonte por explosivos ou desmonte mecânico, lavra por tiras, lavra de rochas ornamentais, etc. (SOUZA, 1994). Quando comparado com os métodos de lavra a céu aberto em bancadas, o método em tiras oferece diversas vantagens. A iniciar pelo ângulo de corte, já que o corte fica aberto por um tempo relativamente curto, permite-se trabalhar com um ângulo de talude maior. Além disso, a deposição do estéril na cava recém-aberta faz com que este método seja de alta produtividade e de custo mais baixo. Da mesma forma, o estéril que será depositado nas áreas escavadas fica por um curto período em espera, possibilitando também o trabalho com um ângulo maior do que o na lavra por bancadas.

A lavra a céu aberto por tiras é utilizada principalmente em jazidas com predominância de camadas horizontais (*stratabound*), com espessuras de minério menores em relação às grandes dimensões laterais. É semelhante à lavra por bancadas, diferindo num aspecto: o capeamento não é transportado para pilhas de estéril, mas depositado diretamente nas áreas adjacentes já lavradas. Às vezes a mesma máquina faz a escavação e o transporte do estéril, em uma operação unitária. Em alguns casos parte do estéril é transportado por caminhão para fora da mina, como a cobertura vegetal, para uso posterior na recuperação da área (SOUZA, 1994).

A extração de bauxita é realizada normalmente a céu aberto, pois pode ser encontrada próxima à superfície, em uma espessura média de 4,5 metros. O processo de formação da bauxita se dá por uma reação química natural, onde ela adquire uma nova constituição química através da infiltração de água em rochas alcalinas, que entram em decomposição (ANODIMINAS).

A lavra em tiras progride por meio de uma série de cortes paralelos, na forma de trincheiras profundas, denominadas tiras. A metodologia de escavação consiste na remoção dos materiais de cobertura e do minério através da execução de um corte ao longo de uma das dimensões do depósito. Outro corte paralelo ao primeiro é posteriormente escavado na direção oposta e a cobertura vegetal e de rocha estéril é depositada dentro do corte previamente

minerado. Com isso, tem-se uma minimização na distância de transporte do estéril e facilitação da exposição do minério. Esse ciclo é repetido até chegar-se aos limites da área de extração, (ALCOA, 2009).

As dimensões típicas de uma mina lavrada por tiras variam conforme a geometria das camadas de minério e do capeamento, as características geomecânicas, a produção desejada e equipamentos dimensionados. A lavra por tiras pode ser aplicada tanto para rochas coesas, que necessitam de desmonte de rocha por explosivo, quanto para rochas friáveis ou brandas, que podem ser escavadas diretamente. A sequência de operações unitárias é: supressão vegetal, decapeamento, desmonte de rocha (com ou sem explosivo), carregamento e transporte. (DNPM, MINEROPAR).

#### 4.8 SUPRESSÃO VEGETAL

Antes de qualquer processo produtivo é importante apresentar os aspectos ambientais respeitados e seguidos em Juruti. O processo é iniciado através da entrada de uma equipe de meio ambiente na área a ser futuramente explorada. Esta equipe tem o objetivo de construir um inventário de espécies considerando exemplares de flora e fauna.

As espécies de animais remanescentes, com auxílio da equipe de bombeiros civis, são capturadas e realocadas em áreas próximas que não irão ser exploradas, dessa forma os animais podem continuar em seu habitat natural em segurança. Já as espécies vegetais, todas estas são catalogadas. Em seguida são classificadas de acordo com sua categoria (1º ou 2º categoria). As espécies de 1º categoria (árvores de grande porte como: castanheiras, pequiazeiros, etc) são preservadas em forma de mudas, as quais serão replantadas nas futuras áreas de reflorestamento no interior da mina. A supressão vegetal abrange todas as atividades referentes à supressão e transporte das espécies vegetais, assim como a remoção e transporte do solo orgânico para as áreas de reflorestamento.

Inicialmente, por questões de segurança, procede-se ao corte seletivo individual das espécies vegetais de grande porte. Após esse processo utilizam-se tratores de esteiras e tratores destinados ao transporte de toras para a limpeza da área e remoção da vegetação de pequeno porte. Todo material vegetal gerado das atividades de supressão é posicionado em leiras para possibilitar o posterior transporte. A massa vegetal e o solo orgânico proveniente da supressão vegetal, exceto as toras, são carregados e transportados para as áreas de reflorestamento através do conjunto de escavadeiras hidráulicas e caminhões basculantes,

recebendo auxílio de tratores e máquinas de apoio e infraestrutura. A camada de solo orgânico, chamada de *topsoil*, varia de 15 cm a 1 m de espessura.

O método utilizado para o reflorestamento é o método de nucleação, o qual consiste genericamente na construção de núcleos (pilhas cônicas) de massa vegetal com espaçamento definido. O conjunto de núcleos é delimitado por leiras de solo orgânico, que possuem a finalidade de manter a água no interior da área que se deseja reflorestar. Posteriormente, através do processo natural de decomposição da matéria orgânica, as pilhas tendem a perder sua forma cônica, possibilitando a junção dos núcleos até então separados. Dessa forma, toda a área programada para o reflorestamento recebe a camada de solo fértil orgânico, o qual já recebeu previamente as mudas das espécies provenientes da etapa de supressão vegetal.

São classificados como toras os troncos com diâmetro, na altura do peito homem, superior a 30 cm. As toras são transportadas para depósitos específicos dentro de uma série de normas e padrões para seu armazenamento.

#### 4.9 DECAPEAMENTO

O decapeamento é uma etapa do método de lavra *Strip mining* que tem como objetivo a liberação da camada de bauxita que se encontra “in situ” abaixo da camada de estéril. Entende-se como estéril o conjunto litológico argila belterra e laterita. Em alguns casos especiais consideram-se como estéril as camadas litológicas argila belterra, bauxita nodular\* e laterita. As camadas movimentadas possuem diversas finalidades. A argila belterra, por exemplo, é utilizada na construção de leiras de proteção e dos depósitos de estéril, que são, na maioria dos casos, as futuras áreas de recuperação ambiental e/ou reflorestamento. A bauxita nodular e a laterita são utilizadas na construção de pavimentos seguros e aderentes nas estradas e rampas da mina. No entanto, em alguns casos especiais, esses materiais são incorporados ao produto.

O equipamento responsável por realizar a tarefa de remoção da camada de estéril posicionado sobre a camada de minério é o *bulldozer*. O processo de decapeamento na mina de Juruti (Figura 4) inicia com o trator de esteiras cortando em rampa a camada de argila belterra, com angulação pré-determinada. Tem como objetivo inicial o preenchimento da cava recém-lavrada. Após o fechamento da cava, com a deposição do estéril, inicia-se o processo de construção do depósito de estéril ou “depósito de estéril controlado”. Para confecção do depósito, o trator constrói seu próprio pavimento, à medida que transporta o material. Dessa

forma, o trator inicia uma leve subida no sentido contrário ao avançamento da mina, construindo de fato o depósito de estéril.

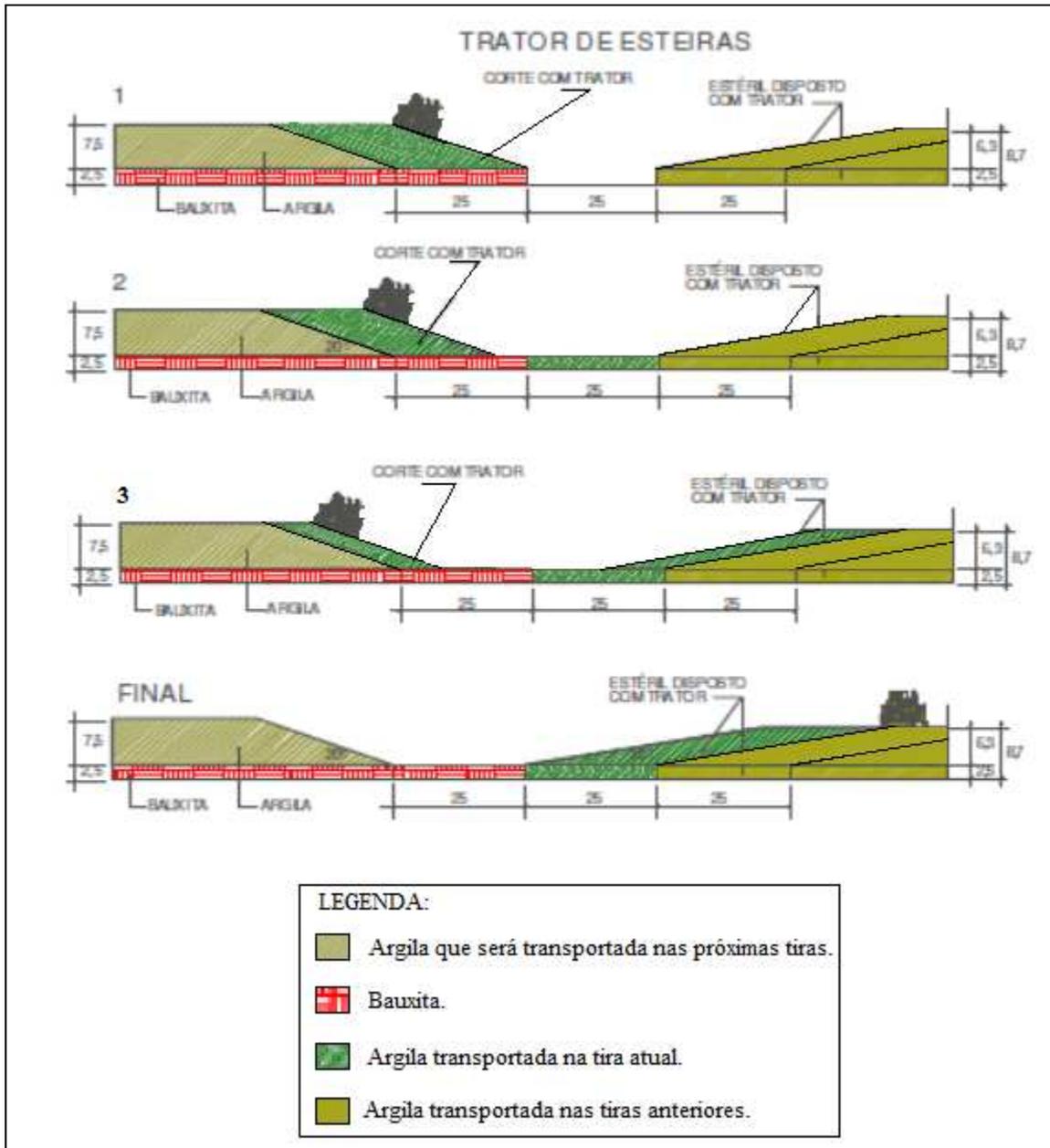


Figura 4 - Esquema da operação de decapeamento com tratores de esteiras.  
Fonte: PIAE – Alcoa (2009).

Após a remoção da argila belterra, em algumas frentes, temos a exposição da bauxita nodular. Em estudos recentes, a bauxita nodular vem sendo considerada minério. Deve-se levar em conta o fato de que a bauxita nodular é mais friável e susceptível a saturação de água que a bauxita maciça tradicional. Por isso, é importante que a lavra da bauxita nodular seja acompanhada de perto para que não cause ou proporcione problemas operacionais durante as

etapas de beneficiamento do minério, como agregar nas moegas e/ou obstruir os shuts das correias transportadoras. Em alguns casos, as características da bauxita nodular (espessura, teores, etc) não apresentam viabilidade econômica para exploração. Por isso, nestas situações são descartadas juntamente com a argila belterra.

Um recurso utilizado para a melhoria na produtividade é o corte/escavação em trincheiras. As trincheiras atuam como barreiras físicas que impedem a fuga de material pela lateral da lâmina do “*bulldozer*”, dessa forma o material se concentra na frente da lâmina e o processo tem sua produtividade melhorada em até 20%.

Os tratores de esteira de grande porte também são utilizados para escarificação de alguns materiais. O desmonte mecânico, em alguns casos, é utilizado para evitar a utilização de explosivos durante a fase de quebra da resistência dos materiais a serem transportados. Na parte posterior do trator de esteiras está posicionado um conjunto de shank e ripper, movimentados por um conjunto de cilindros hidráulicos. O ripper é a estrutura metálica que recebe e sustenta o shank. Este último, por sua vez, é a superfície cortante propriamente dita que promove o desmonte mecânico.

#### **4.9.1 Tratores de esteiras**

O trator de esteiras ou o de pneus, que é a máquina básica da terraplenagem, pode receber a adaptação de um implemento que o transforma numa unidade capaz de escavar e empurrar a terra, chamando-se por isso, unidade escavo-empurradoras. Esse implemento é chamado lâmina e o equipamento passa a chamar-se trator de lâmina ou “*bulldozer*” (RICARDO, 2007).

O trator de esteiras equipado com lâmina de corte, “*bulldozer*”, apresenta uma versatilidade considerável na execução de terraplenagem. O trator apresenta capacidade de executar os mais variados serviços, de acordo com a necessidade do projeto. Alguns destes são: corte em meia encosta, corte com o canto de lâmina, corte em trincheiras, escarificação, espalhamento de terra na ponta de aterro, etc. (RICARDO, 2007).

No corte em meia encosta, o trator utiliza o recurso “*angle-dozer*”, ou seja, altera a angulação da lâmina (um dos cilindros fica recolhido e o outro estendido), proporcionando o corte e deposição do material na direção do cilindro recolhido. Assim, a própria máquina vai fazendo a plataforma sobre a qual trabalha, compactando, com as sucessivas passadas da esteira, a terra já colocada no aterro. Na utilização deste recurso deve-se levar em conta a

criação de um componente oposto ao movimento, a qual, obviamente, dificulta a movimentação. Entretanto, além disso, promove a mudança constante da direção de corte e gera um desgaste incomum nos componentes do trator, principalmente devido à exposição do pistão estendido.

Os tratores também podem ser utilizados, por exemplo, para a confecção de canais de drenagem nas frentes de serviço, através da utilização do recurso canto de lâmina. As lâminas podem ser inclinadas lateralmente e o canto da lâmina fará o corte no centro do canal de drenagem com a profundidade desejada.

Uma das principais funções dos tratores de esteiras é, também, o espalhamento de terra em ponta de aterro. A terra transportada por caminhões basculantes ou “*motorscrapers*” é depositada em pilhas e os tratores de esteiras se encarregam de empurrar essas pilhas por distâncias curtas para a confecção de camadas com espessuras uniformes a serem compactadas.

#### 4.9.2 Método *wave* de decapeamento

O método *wave* de decapeamento é uma metodologia nova e, recentemente, vem sendo testada nos mais diversos empreendimentos de bauxita.

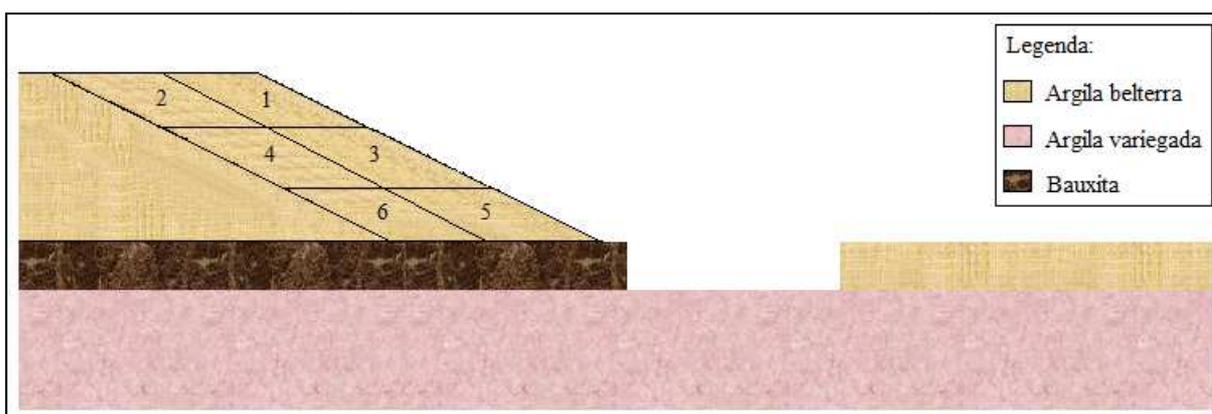


Figura 5 – Esquema didático da operação de decapeamento através do método *wave*.

Fonte: Arquivo pessoal.

Este método utiliza os mesmos equipamentos utilizados na metodologia tradicional. No entanto, é fiel ao mecanismo de decapeamento *front-to-back* diferentemente do método tradicional, o qual é uma adaptação ao mecanismo *full-pass*.

A metodologia *wave* se apresenta com a proposta de melhoria considerável em variáveis como: produtividade e distância média de transporte. Tais otimizações são provenientes de algumas alterações, dentre estas a mudança do ângulo de corte (figura 5).

#### 4.9.3 Software DozSim da Caterpillar®

O *software* DozSim da Caterpillar® é responsável pela simulação de desempenho de tratores de esteiras nos mais diversos contextos. É um programa com interface amigável que permite o *input* das mais diversas informações. Inicialmente, devem-se inserir informações como: sistema de medidas, unidade para angulações, unidade para quantidade de material, densidade do material a ser movimentado, etc.

The screenshot displays the DozSim software interface for data input. The main window is titled '1 D11T-CD'. Below the title bar, there are buttons for 'Add', 'Delete', and 'Compare'. The interface is divided into several sections:

- Study Information:** Study Name: 'Teste Wave Juruti', Description: (empty).
- Units of Measure:** Metric (selected), English, Measure Slope In: Degrees (selected), Percent, Production Measured by: Weight, Volume (selected).
- Material Type:** Argila. Parameters: kilos per BCM: 1,700, kilos per LCM: 1,300, Percent Swell: 31. A 'Select Material' button is present.
- Material Quantity:** Bank CM, Loose CM (input fields).
- Dozability:** Medium (selected), 1.00.
- Altitude:** 0 meters.
- Visibility:** Excellent (selected), 1.00.
- Operator Skill Level:** Fair (selected), 0.70.
- Job Efficiency:** 60 Min per Hour, 100.0 %.
- Average Push Distance:** (input field) meters.
- Average Slope:** 0.0 Deg.

On the right side, there is a detailed parameter section:

- Identifier: (input field)
- Shoe Width: 91 mm
- Blade: Other
- Capacity: 43.58 CM
- Forward Gear: System Select
- Reverse Gear: System Select
- Dual Tilt:  Slot Dozing:
- Availability: 100.00 %
- Weight: 112,763 kilos
- Cost per Hour: 135.00 \$
- Carry COT: 0.58 Override: (input field)

At the bottom right, there is an 'Output Values' section with input fields for Forward, Reverse, Bank, Loose, CM per Hour, \$ per CM, Total Hours, and Total \$.

Figura 6 - Primeira tela para *input* dos dados no *software*.

Fonte: Arquivo pessoal.

Em seguida, devem ser inseridas outras informações como: medidas geométricas do *pit*, tipo de material, grau de habilidade do operador, etc. A inserção dessas informações é feita no início da simulação conforme figura 6.

Pit Design	
<b>Over Burden</b>	
Height (meters)	14.07
Highwall Slope (Deg.)	17.00
<b>Coal</b>	
Thickness (meters)	2.57
Bench (meters)	3.00
Coal Angle (Deg.)	90.00
<b>Pit</b>	
Length (meters)	25.00
Width (meters)	25.00
Spoil Angle (Deg.)	10.00
Spoil Base	Coal Top

Figura 7 – Segunda tela para *input* dos dados do *pit*.  
Fonte: Arquivo pessoal.

Na figura 8 podemos notar que o ângulo de corte do trator é 0 grau, indicando que se trata da simulação da metodologia *wave*. Levando em conta o ângulo de repouso do material (33°), o programa oferece na forma de *output* informações como: quantidade total de material movimentado, produtividade em m<sup>3</sup>/h, distância média de transporte.

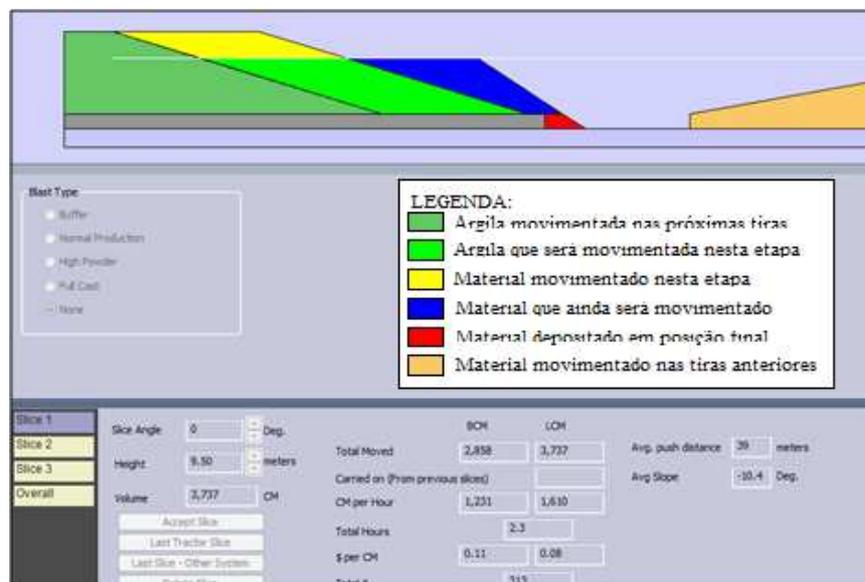


Figura 8 – Terceira tela com simulação da movimentação da primeira *slice*.  
Fonte: Arquivo pessoal.

A figura 9 demonstra a movimentação da segunda fatia, do inglês *slice*, do processo de decapeamento. O material em amarelo é o material movimentado nesta fatia; o material em azul é o material que deverá ser movimentado novamente na próxima fatia; e o material em vermelho é o material depositado em sua posição final.

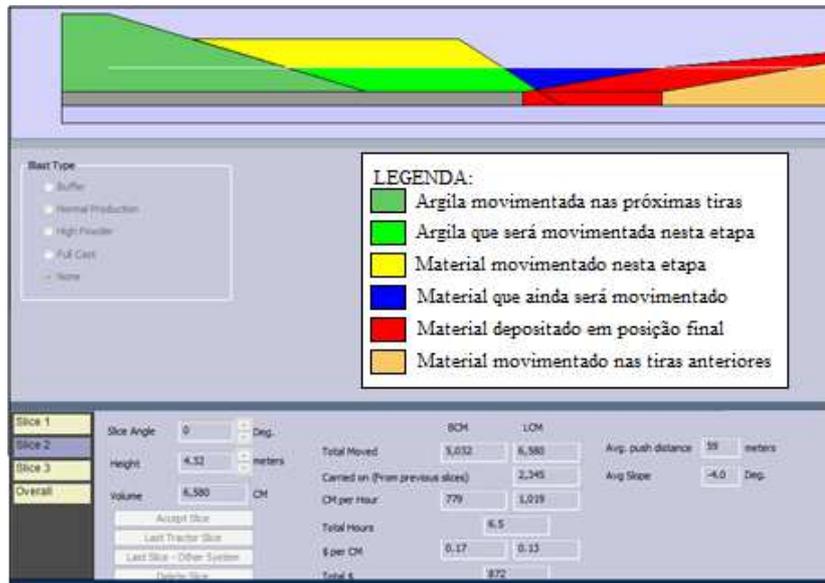


Figura 9 – Quarta tela com simulação da movimentação da segunda *slice*.  
Fonte: Arquivo pessoal.

A figura 10 demonstra a terceira e última fatia deste processo de decapeamento. Novamente o *software* oferece dados como: quantidade total movimentada em metros cúbicos, distância média de transporte, etc. É interessante notar que a distância média de transporte aumenta conforme as fatias.

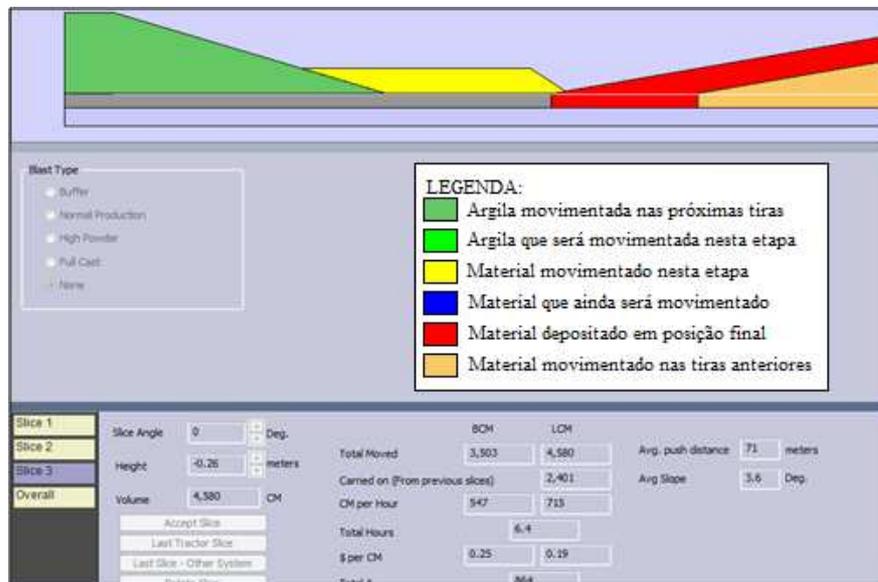


Figura 10 – Quinta tela com simulação da movimentação da terceira *slice*.  
Fonte: Arquivo pessoal.

Por fim, o programa oferece um balanço final sobre todas as etapas do decapeamento, demonstrando o total movimentado em metros cúbicos desagregados e a produtividade do

processo em metros cúbicos por hora. Na figura 11, por exemplo, a produtividade do processo foi de 981 m<sup>3</sup>/h.

Slice 1	Blast Totals				
Slice 2	Total Moved	8,794	BCM	11,500	LCM
Slice 3	Avg \$ per CM	1.000	BCM	0.765	LCM
Overall	Total \$	8,794			
	Dozing Totals				
	Total Moved			14,897	LCM
	Carried On			4,746	LCM
	Avg CM per Hour			981	LCM
	Total Hours	15			
	Avg \$ per CM	135			
	Total \$	2,049			

Figura 11 – Sexta tela com simulação geral do processo de decapeamento.

Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.10 DESMONTE MECÂNICO E TRANSPORTE DE MINÉRIO

Para possibilitar a escavação e extração da bauxita maciça, é necessário o desmonte mecânico prévio da camada mineralizada de bauxita, através do processo de escarificação. Este processo é um procedimento que tem por objetivo a quebra da resistência do minério *in-situ*. A partir da quebra da resistência do minério torna-se possível a continuidade do ciclo produtivo. A escarificação ocorre através da utilização de tratores de esteiras de grande porte dotados de ripper e shank, os quais são acessórios instalados na parte traseira do trator. O ripper é a estrutura metálica que recebe o shank. Este, por sua vez, é a estrutura metálica que entra em contato com a rocha para fragmentá-la. Na mina de bauxita de Juruti, não se utiliza explosivos para esta finalidade.

O desmonte mecânico é realizado através da utilização do trator de esteiras CAT D11T, mais especificamente com o auxílio do acessório escarificador unidente. O processo ocorre através da inserção do shank no minério de bauxita maciça e em seguida o trator entra em movimento com o acessório cortante inserido na massa de bauxita, promovendo a escarificação. Na mina de bauxita de Juruti utiliza-se o método conhecido como “espinha de peixe” para executar o desmonte mecânico. O shank ou acessório cortante tem comprimento

aproximado de 1m, por isso o processo de escarificação é feito em camadas, já que existem tiras com mais de 5m de bauxita a serem escarificadas.

Uma tira tem em média 8 blocos de bauxita, sendo que o processo de escarificação ocorre de dois em dois blocos. O tempo de escarificação por faixa flutua de acordo com a espessura e resistência do minério. Durante o período do inverno, a etapa de escarificação se torna ainda mais especial, pois empiricamente se sabe que não se deve proceder a escarificação de tiras de minério enquanto estiver chovendo. A chuva, teoricamente, não causa maiores danos a estrutura mínima necessária para a etapa de carregamento da bauxita, desde que a faixa esteja impermeabilizada, pois a água pluviométrica escoar sobre a faixa em direção as drenagens e infiltra muito pouco. A impermeabilização ocorre através da movimentação de equipamentos pesados sobre a faixa de minério desmontada. No entanto, caso proceda-se a escarificação durante a chuva, a impermeabilização se torna inviável causando sérios danos à estabilidade da faixa, promovendo um pavimento inseguro e instável para os caminhões basculantes carregados com bauxita, ou seja, impossibilitando a faixa de bauxita a ser lavrada a curto prazo.



Figura 12 – Trator de esteiras CAT D11T realizando desmonte mecânico (escarificação).  
Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 13 – Escavadeira hidráulica CAT 349D lavrando bauxita.  
Fonte: Arquivo pessoal.

Para o carregamento de bauxita utilizam-se escavadeiras hidráulicas em conjunto com caminhões basculantes. As escavadeiras ficam posicionadas sobre a camada de bauxita a ser lavrada, buscando sempre o minério a uma cota inferior do equipamento. Devido à largura da faixa e demais normas e procedimentos da Alcoa, só uma escavadeira pode trabalhar por faixa, evitando assim possíveis incidentes envolvendo estes equipamentos móveis.

Quando os caminhões basculantes 8x4, com capacidade 37 ton, chegam à frente de lavra e aguardam em posição segura até que a escavadeira esteja livre para o seu carregamento, em seguida executam manobra e se posicionam em marcha ré. Após o carregamento, percorrem os acessos com o objetivo de transportar o minério de bauxita das frentes de lavra até o pátio do britador, depositando o minério na moega do britador primário, conforme figura 14.

A moega é o recipiente que recebe o minério encaminhando-o para o alimentador de sapatas, que por sua vez alimenta, efetivamente, o britador primário. Em alguns casos especiais, os caminhões descarregam o minério no pavimento do pátio do britador, em área pré-determinada, com o objetivo da criação da chamada pilha pulmão. Posteriormente, quando a cadeia produtiva retorna à normalidade, o minério é novamente carregado através de pás-carregadeiras até a moega do britador primário, como demonstrado na figura 15.



Figura 14 – Caminhão basculante descarregando minério na moega do britador primário.  
Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 15 – Pá-carregadeira retomando minério da pilha pulmão.  
Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.11 BENEFICIAMENTO

O circuito de beneficiamento da bauxita na mina de Bauxita de Juruti é iniciado com a britagem do minério proveniente da lavra. Em seguida o material reduzido pode seguir dois circuitos distintos: circuito *online* ou circuito pilha de britado. Nota-se que as operações de beneficiamento do minério são de natureza física e têm como objetivo adequá-lo as especificações exigidas para as operações subsequentes na produção de alumina e alumínio metálico.

No circuito *online*, o minério que acabou de passar pelo processo de britagem alimenta diretamente a usina de classificação e lavagem. Após a saída da usina, o minério passa pela torre de amostragem, sendo, em seguida, empilhado no lavado para aguardar o posterior carregamento aos vagões do trem executado por um conjunto de pás carregadeiras. Em contrapartida, o projeto apresenta também a alternativa de fazer com que o minério siga pelo circuito pilha de britado, ou seja, após passar pela etapa de britagem, segue através das correias transportadoras para a pilha de britado. Em seguida é retomado por carregadeiras e, através de correias transportadoras, alimenta a usina de lavagem e classificação. Posteriormente, segue para a torre de amostragem, sendo finalmente empilhado na pilha do lavado para aguardar o carregamento dos vagões do trem.



Figura 16 – Usina de classificação e lavagem.  
Fonte: Alcoa.

#### 4.11.1 Britagem

A britagem da mina de bauxita de Juruti tem como objetivo a redução da granulometria do minério ROM (*Run of Mine*), além de proporcionar sua homogeneização prévia. O setor é composto por britagem primária e secundária, ambas compostas por britadores de rolos dentados. O britador primário, figura 17, possui uma abertura que recebe blocos de bauxita de até 1,2 m de diâmetro, reduzindo-os para diâmetros inferiores a 38 cm. A alimentação do britador secundário vem diretamente do britador primário e, por sua vez, executa a redução dos blocos, resultando em produtos britados inferiores a 13 cm. Após a britagem secundária, o minério é despejado no conjunto de correias transportadoras e passa por um detector de metais, evitando que possíveis partes desprendidas de equipamentos sigam no circuito, dessa forma o minério continua em frente no processo produtivo.



Figura 17 – Vista externa do britador primário.  
Fonte: Alcoa.

#### 4.11.2 Usina de classificação e lavagem

A usina de beneficiamento da mina de bauxita de Juruti tem como objetivo executar a lavagem e seleção granulométrica do minério proveniente do britador, de acordo com as especificações necessárias para as etapas sucessivas ao processo produtivo.

O processo da planta de beneficiamento é dividido em duas partes, ou seja, o circuito de finos e o circuito de grossos. Tudo se inicia com o circuito de grossos quando as duas linhas de correias transportadoras alimentam os dois *trommel – scrubber*, localizados na parte superior da planta, os quais são responsáveis pela adição de água ao minério, criando uma polpa com 55% de sólidos e seleção granulométrica. O material passante (*under flow*) no *trommel*, inferior a 76 mm, alimenta o peneiramento primário de dois *decks* com seleção final de 8 mm, conforme figura 18. Já o material retido (*over flow*) no *trommel*, superior a 76 mm, é direcionado ao rebitador, o qual é também de rolos duplos dentados, porém de menor porte. No peneiramento secundário, também constituído por dois *decks*, a seleção final é de 1,2 mm. Os produtos retidos (*over flow*) no peneiramento primário, secundário e no peneiramento após a rebitagem formam o produto que será transportado e empilhado na pilha do lavado.

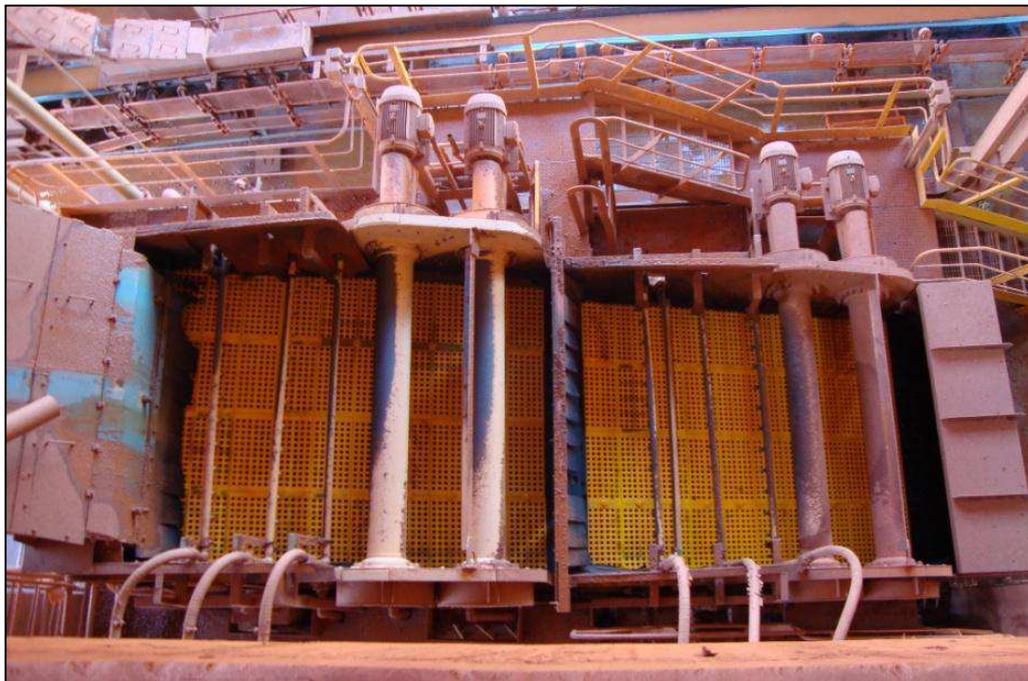


Figura 18 – Peneiramento primário, vista superior do primeiro *deck*.  
Fonte: Alcoa.



Figura 19 – Bateria de hidrociclones atuando em cinco estágios.  
Fonte: Alcoa.

O material fino ou *under size* no peneiramento secundário e peneiramento após o rebritador é enviado ao circuito de hidrociclones os quais operam em cinco estágios, conforme figura 19. Os dois primeiros estágios geram o produto denominado fino, com seleção de 0,08 mm com ciclones de 26'', enquanto que os três últimos estágios geram outro produto denominado superfino com seleção de 0,03 mm, em ciclones de 10''. Os dois produtos gerados da ciclonagem são incorporados ao granulado gerado no primeiro circuito, formando uma pilha de minério lavado de acordo com as especificações, ou seja, 70% de granulado e 30% de finos.

#### 4.11.3 Rejeito

O sistema de gestão de rejeitos do minério de bauxita na mina de Juruti ocorre com o auxílio da lagoa de espessamento e das lagoas de deposição. O material descartado pela usina de lavagem e classificação é destinado para a lagoa de espessamento, a qual tem por objetivo oferecer a polpa de rejeito o tempo necessário para sua sedimentação. Em seguida, com auxílio do equipamento draga, o fundo da lagoa de espessamento, ou seja, grande parte dos sólidos dessa polpa, é capturado e bombeado para uma das lagoas de deposição.

Os níveis de fluido nas lagoas são controlados para otimização do processo, além de permitir a reutilização da água de processo para diversas atividades como: lavagem de minério, alimentação da tubulação de emergência, alimentação dos caminhões-pipa que despejam sprays de água nos acessos para evitar o lançamento de material particulado no meio-ambiente.

É importante ressaltar que nas atividades de beneficiamento da bauxita em Juruti não é utilizado nenhum tratamento químico, portanto não é gerada nenhuma solução química com potencial poluidor. Dessa forma, quando as lagoas de deposição atingem o máximo de sua vida útil são recobertas por uma camada de solo orgânico fértil e são incluídas nas áreas a serem reflorestadas naquele determinado período. Assim, dentro de alguns anos, aquela área que auxiliou no controle do rejeito de bauxita será novamente área verde, com as mesmas espécies de fauna e flora típicas da região.

#### 4.12 CARREGAMENTO DE VAGÕES E NAVIOS

O transporte do minério do beneficiamento até o porto de embarque é realizado através da ferrovia, com auxílio de trens compostos por locomotivas e vagões. As composições possuem em média 42 vagões cada, com capacidade total aproximada de 2 mil toneladas/viagem.

O carregamento dos vagões é executado por um conjunto de pás carregadeiras as quais trabalham em paralelo e em sistema de *looping* transportando o minério da pilha do lavado até o vagão desejado. A composição se movimenta alguns metros quando os vagões que estavam sendo carregados são preenchidos, com o objetivo de posicionar outros vagões, ainda vazios, em frente a linha de movimentação das pás carregadeiras.

Quando a composição chega ao porto, depois de percorrer os 56 km, os vagões são direcionados para o virador de vagões, retirando o minério do interior dos vagões. A bauxita então é destinada ao conjunto de correias transportadoras e em seguida alimenta a empilhadeira, a qual é responsável pela construção das pilhas. As pilhas com capacidade de 50 mil toneladas são três: uma em formação, uma em drenagem e outra pronta para ser retomada para o embarque no navio. Em seguida, a retomadora captura o minério de bauxita nas pilhas e alimenta novamente o conjunto de correias transportadoras que, por sua vez, destina o minério para outro equipamento similar a empilhadeira que deposita o minério no interior dos navios.

## 5 METODOLOGIA DE ESTUDO

O estudo foi realizado de forma conjunta pelas equipes da Alcoa e Sotreq, com o objetivo de realizar dois testes em blocos de parâmetros similares, aplicando o método tradicional no primeiro bloco e o método *wave* no segundo bloco. Em seguida, efetuar uma comparação com outros testes realizados em outra mina de bauxita localizada também no oeste do estado do Pará.

De forma prévia, o *software* DozSim da Caterpillar® foi utilizado para simular as situações em que os testes foram realizados. Este *software* tem por objetivo simular operações de tratores de esteiras na execução de atividades de decapeamento, dessa forma, após o *input* dos dados gerais, o *software* apresenta informações como produtividade e distância média de transporte (DMT) do trator. Após a realização dos testes é possível também uma análise do desempenho do *software*, já que teremos em mãos os valores esperados e reais de produtividade e DMT, podendo compará-los.

Para o estudo, foram considerados os testes realizados em dois empreendimentos de bauxita na região oeste do estado do Pará. O primeiro deles, por motivo de força maior, será chamado de Mina Alfa e o segundo foi realizado na mina de bauxita de Juruti. Os testes realizados na Mina Alfa ocorreram em setembro/2012, enquanto que na mina de Juruti ocorreram em maio/2014.

Os dois métodos de decapeamento demonstrados neste estudo utilizam os mesmos equipamentos, no entanto, a forma como a atividade é executada varia. A principal diferença está na angulação de corte do trator de esteiras, já que no método tradicional o trator corta em rampa (aproximadamente 17° rampa *in-situ*), descendo carregado até a cava com auxílio da componente da gravidade, conforme figura 20. Entretanto, no retorno em marcha ré, a mesma componente da gravidade dificulta a subida do trator.

No caso do método *wave*, o trator corta em camadas horizontais, sem auxílio nem prejuízo da componente da gravidade, depositando material no final de sua linha horizontal, de acordo com a figura 21. Dessa maneira, durante o início da metodologia *wave*, todas as vezes que o trator se aproxima do final da linha horizontal carregado, o material presente na lâmina neste ciclo atual empurrará o material movimentado no ciclo anterior do trator. A partir de certo ponto, o material começa a rolar por gravidade em direção a cava, sem que o trator necessite descer até a mesma. O que por sua vez promove um ganho para a atividade, visto que a quantidade de movimentação do trator em marcha ré será reduzida. O esperado da

metodologia *wave*, quando comparado à metodologia tradicional, é que apresente: i) uma menor distância média de transporte, ii) menor consumo de combustível e iii) maior produtividade. Tais expectativas são explicadas por: i) o trator necessita executar um menor recuo, ii) o recuo executado além de menor é no plano horizontal, ao invés de subida, o que proporciona um menor esforço para o trator e iii) já que a atividade requer menos espaço percorrido, será executada em menor tempo, respectivamente.



Figura 20 – Trator de esteiras D11 executando decapeamento através do método tradicional.  
Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 21 – Trator de esteiras D11 executando decapeamento através do método *wave*.  
Fonte: Arquivo pessoal.

Para os testes, se faz necessário o apoio da equipe de topografia e planejamento de mina, pois inicialmente se deve escolher a tira para realização dos testes. Em seguida, deve-se executar a delimitação dos blocos, marcação de pé e recuo para o trator de esteiras. Essas marcações são feitas através da utilização de bandeirolas de fácil visualização para o operador do trator de esteiras, conforme figura 22.



Figura 22 – Marcações topográficas de apoio aos operadores para realização dos testes.  
Fonte: Arquivo pessoal.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos testes realizados na mina Alfa e mina de Juruti foram consideravelmente diferentes. Tais resultados foram indicados previamente pelo *software* DozSim da Caterpillar®. Os resultados podem ser justificados pelos ambientes em que os testes foram realizados, isto é, completamente distintos, em condições favoráveis na mina Alfa e desfavoráveis na mina de Juruti. Os parâmetros favoráveis dos testes realizados na mina Alfa foram:

- Estação do ano Verão;
- Altura de capeamento de argila menor que 10 metros;
- Altura da cava a ser preenchida maior que 5 metros.

Enquanto que na mina de bauxita de Juruti os testes foram realizados em um ambiente composto por um conjunto de características negativas, com o objetivo de avaliar como a metodologia *wave* se comportava em tal situação. Os parâmetros foram:

- Estação do ano Inverno;
- Altura de capeamento de argila maior que 10 metros;
- Altura da cava a ser preenchida menor que 5 metros.

### 6.1 MINA ALFA

#### 6.1.1 Simulações DozSim

A simulação da operação de decapeamento através do método tradicional, levando em conta os parâmetros geométricos da Mina Alfa, apresentou uma produtividade de 914m<sup>3</sup>/h, de acordo com a figura 23.

Slice 1	<b>Blast Totals</b>				
Slice 2	Total Moved	5,392	BCM	7,052	LCM
Slice 3	Avg \$ per CM	1.000	BCM	0.765	LCM
Overall	Total \$	5,392			
	<b>Dozing Totals</b>				
	Total Moved			7,052	LCM
	Carried On			1,792	LCM
	Avg CM per Hour			914	LCM
	Total Hours	8			
	Avg \$ per CM	135			
	Total \$	1,042			

Figura 23 – Resultados no final da simulação do método tradicional com o *software* DozSim.  
Fonte: Arquivo pessoal.

Enquanto que na simulação realizada com os mesmos parâmetros geométricos, alterando o ângulo de corte, ou seja, aplicando o método *wave*, apresentou uma produtividade de 1119m<sup>3</sup>/h, conforme a figura 24.

Slice 1	<b>Blast Totals</b>				
Slice 2	Total Moved	5,392	BCM	7,052	LCM
Slice 3	Avg \$ per CM	1.000	BCM	0.765	LCM
Overall	Total \$	5,392			
	<b>Dozing Totals</b>				
	Total Moved			7,134	LCM
	Carried On			82	LCM
	Avg CM per Hour			1,119	LCM
	Total Hours	6			
	Avg \$ per CM	135			
	Total \$	861			

Figura 24 – Resultados no final da simulação do método *wave* com o *software* DozSim.  
Fonte: Arquivo pessoal.

### 6.1.2 Resultados testes práticos

Para efeito comparativo foram colhidos os dados dos testes realizados na Mina Alfa, localizada na região oeste do estado do Pará. A mina Alfa possui nome fictício, por razões de sigilo de informações. No entanto, todos os dados aqui apresentados são reais e obtidos através de testes práticos executados em setembro/2012.

Na mina Alfa, os testes foram realizados no chamado “verão amazônico”, época do ano com chuvas pouco frequentes. Dessa forma, o fator saturação do material, promovendo dificuldade de locomoção do trator e uso excessivo de combustível/material rodante, não foi observado. Além disso, os parâmetros geométricos nos quais os testes foram realizados na mina Alfa apresentaram-se favoráveis à aplicação da metodologia *wave*, ou seja, a altura de capeamento menor que 10m, altura da cava maior que 5 metros, etc.

Parâmetros métricos do teste na mina Alfa:

- Altura do capeamento de argila: 7,19 m;
- Altura da cava a ser preenchida: 5,19 m;
- 17° ângulo de corte do *in-situ*;
- 10° ângulo do depósito de estéril controlado.

Dessa maneira, os resultados provenientes da metodologia *wave* foram consideravelmente positivos, conforme o gráfico 1.

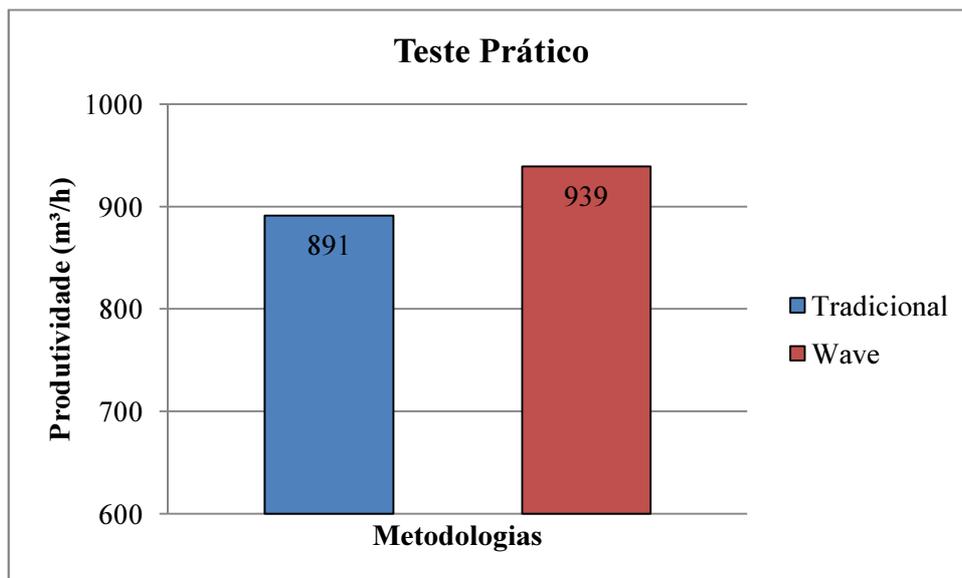


Gráfico 1 – Produtividade dos testes tradicional na mina Alfa - PA.

Agora, podemos efetuar a comparação dos resultados previstos pelo *software* DozSim com os resultados obtidos pelos testes de decapeamento, identificando em qual das metodologias o programa conseguiu se aproximar mais do resultado real alcançado. Como podemos perceber no gráfico 2, o *software* DozSim aproximou-se consideravelmente do resultado real obtido pelo teste na mina Alfa, já na metodologia tradicional a aproximação não foi tão latente. Se levarmos em conta que o programa de computador oferece os resultados de uma forma ótima ou ideal, pode-se aceitar que existe uma possibilidade de melhoria na realização da metodologia *wave* na mina Alfa. Tal afirmação pode ser ainda mais solidificada pelo fato de que o método tradicional é o método consagrado e utilizado há anos pelos operadores, ou seja, os mesmos já o fazem de maneira consideravelmente boa. De outra maneira, o método *wave* é uma metodologia nova, conseqüentemente os operadores não possuem alto grau de habilidade nesta forma de trabalho, o que foi refletido na comparação dos resultados entre simulações DozSim e resultados dos testes práticos.

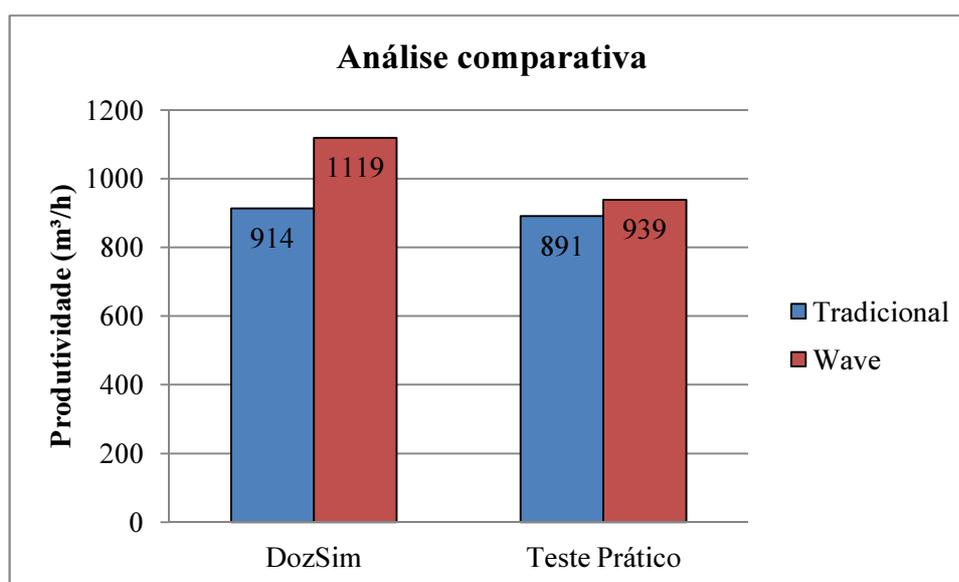


Gráfico 2 – Comparativo entre os resultados DozSim e testes práticos.

Podemos perceber também, efetuando comparações com os resultados no próximo subtópico demonstrados, que os resultados de produtividade tradicional na mina Alfa são maiores que os resultados de produtividade também tradicional na mina de Juruti. Isso é explicado pela altura de capeamento de argila e altura da cava a ser preenchida. De forma mais explícita, a situação ideal é: depositar o máximo de material o mais perto possível. Se o ambiente nos permitir atingir esta meta, então a produtividade será ótima, pois enquanto o trator trabalha movimentando a argila para a cava recém-aberta, o tempo de ciclo é curto (o menor em todo o processo); se o tempo de ciclo é curto então a quantidade de ciclos será

maior. Se a quantidade de ciclos for maior, a quantidade de material transportado também será maior.

A partir do momento que a cava está preenchida, deve-se proceder ao transporte até o depósito localizado mais a frente. No entanto, o depósito está localizado mais distante em relação a cava. Dessa maneira, o tempo de ciclo para deposição de argila para o depósito é maior. Assim, a quantidade de ciclos de transporte para o depósito será menor e, conseqüentemente, menos material será transportado no período de tempo de análise.

Então, quanto mais material for depositado na cava melhor para o processo. Além disso, quanto menos material restar após o preenchimento da cava melhor para o processo também. Dessa forma, os parâmetros geométricos que auxiliam ou prejudicam a etapa de decapeamento são: altura do capeamento em argila, altura da cava a ser preenchida e os ângulos do *in-situ* e depósito de estéril controlado.

## 6.2 MINA JURUTI

### 6.2.1 Simulações DozSim

A simulação da operação de decapeamento através do método tradicional levando em conta os parâmetros geométricos da Mina de Juruti apresentou uma produtividade de 614m<sup>3</sup>/h, de acordo com a Figura 25.

Já na Figura 26, percebe-se que a simulação realizada com os mesmos parâmetros geométricos alterando o ângulo de corte, ou seja, aplicando a metodologia *wave* apresentou uma produtividade de 981m<sup>3</sup>/h, conforme a Figura 26.

É importante citar que as simulações são geradas em *Loose cubic meters*, do inglês, metros cúbicos desagregados. Dessa forma para os resultados está sendo considerado o fator de empolamento da argila, o qual é aproximadamente 31%.

Slice 1	Blast Totals				
Slice 2	Total Moved	8,794	BCM	11,500	LCM
Slice 3	Avg \$ per CM	1.000	BCM	0.765	LCM
Overall	Total \$	8,794			
	Dozing Totals				
	Total Moved			11,500	LCM
	Carried On			2,805	LCM
	Avg CM per Hour			614	LCM
	Total Hours	19			
	Avg \$ per CM	135			
	Total \$	2,528			

Figura 25 – Tela final da simulação realizada pelo *software* DozSim Caterpillar®.  
Fonte: Arquivo pessoal.

Slice 1	Blast Totals				
Slice 2	Total Moved	8,794	BCM	11,500	LCM
Slice 3	Avg \$ per CM	1.000	BCM	0.765	LCM
Overall	Total \$	8,794			
	Dozing Totals				
	Total Moved			14,897	LCM
	Carried On			4,746	LCM
	Avg CM per Hour			981	LCM
	Total Hours	15			
	Avg \$ per CM	135			
	Total \$	2,049			

Figura 26 – Tela final da simulação realizada pelo *software* DozSim Caterpillar®.  
Fonte: Arquivo pessoal.

## 6.2.2 Resultados testes práticos

Inicialmente foi realizado um levantamento, com apoio da equipe de geologia da Alcoa, focado em analisar dados de sondagens e poços de pesquisa realizados no Platô Capiranga. Dentre os mais de 2500 dados litológicos analisados pode-se notar que a maioria destes dados possui uma altura de argila belterra maior que 10m. Dessa forma, se considerarmos como condição negativa para a aplicação do método *wave* camadas litológicas

de argila maiores que 10m, então teremos aproximadamente 60% do Platô Capiranga nesta situação. Já que a maioria da mina de Bauxita de Juruti apresenta esta configuração, optou-se por realizar o teste na tira N 248 da Frente 1, a qual representa a realidade da maior parte dos dados analisados e um dos cenários menos favoráveis para a realização do teste.

Parâmetros métricos do teste na mina de Juruti:

- 14,08m (altura do capeamento de argila);
- 2,57m (altura da cava a ser preenchida);
- 17° ângulo de corte do *in-situ*;
- 10° ângulo do depósito de estéril controlado.

Foram selecionados quatro operadores experientes e a metodologia *wave* foi explicada previamente pelo instrutor da Sotreq. Quanto à metodologia tradicional não foi necessária explicação, visto que é a metodologia normal de trabalho dos mesmos.

Como uma das principais vantagens teóricas que o método *wave* apresenta sobre o método tradicional é o menor recuo do trator e conseqüentemente uma menor DMT, foi implantado um aparelho GPS (*Global Position System*) no trator 6004 enquanto este realizava ambos os testes, de forma a verificar quantos quilômetros cada um de movimentou.

Os testes das metodologias tradicional e *wave* foram realizados nos dias 14 e 15/maio, respectivamente. Conforme o gráfico 3, nota-se considerável precipitação pluviométrica no dia 14/maio, mas tal precipitação ocorreu no final do teste tradicional, de forma a não afetá-lo.

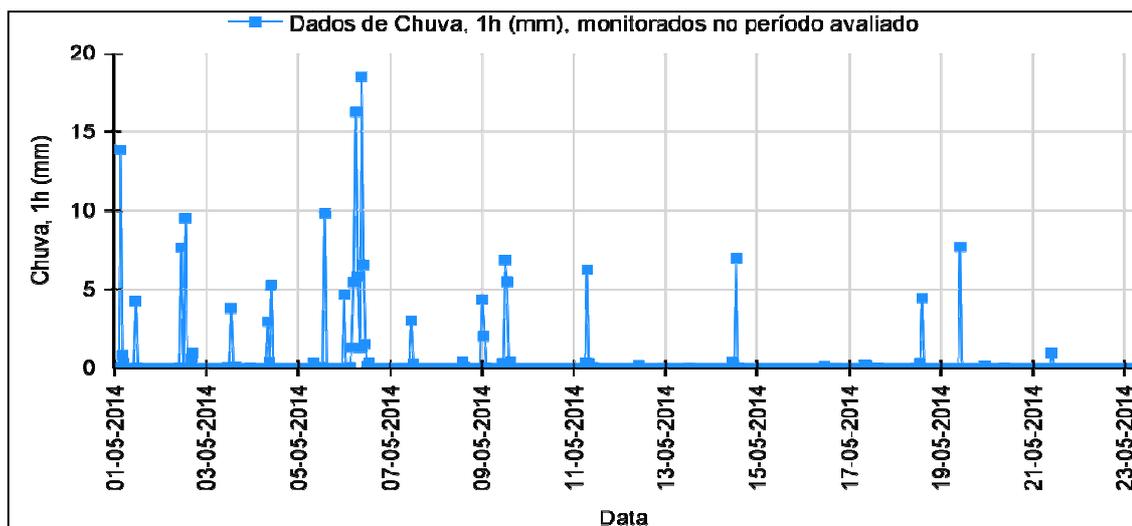


Gráfico 3 – Pluviometria detalhada do mês de maio/2014 na mina de Juruti – PA.

No entanto, no dia seguinte, 15/maio, mesmo sem chuva, o teste *wave* foi duramente afetado devido às condições que o terreno apresentou para a inicialização do teste. Dessa

forma, somou-se o fator chuva a todos os parâmetros geométricos não favoráveis ao teste, o qual também influenciou negativamente nos resultados.

O gráfico 4 demonstra a quantidade de horas trabalhadas por trator nas duas metodologias. Pode-se notar que os tratores quando realizaram o teste *wave* trabalharam aproximadamente 23% a mais se comparado à metodologia tradicional.

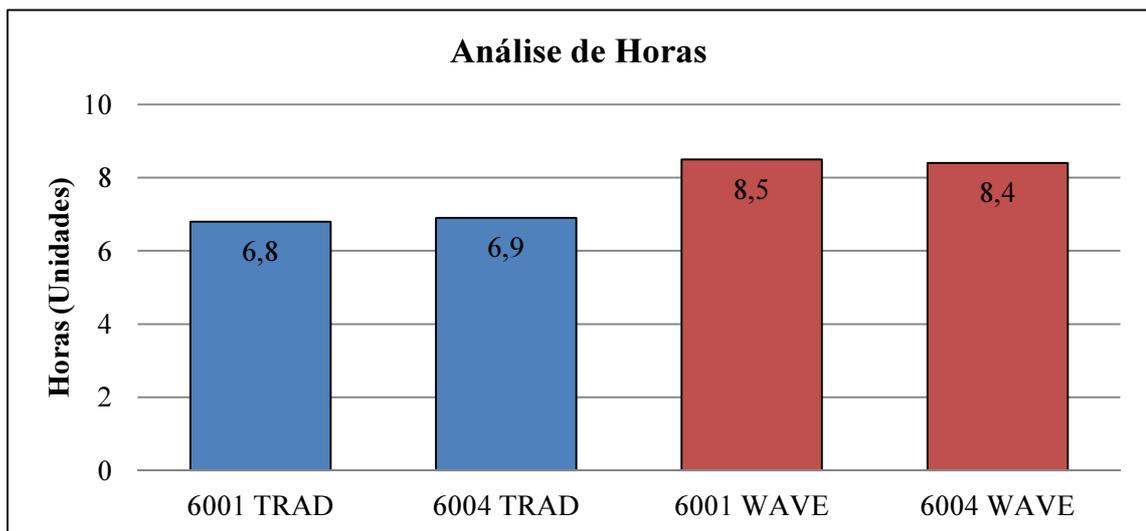


Gráfico 4 – Horas trabalhadas pelos tratores de esteiras utilizados nos testes.

O gráfico 5 expõe que os volumes movimentados foram muito similares, ambos com aproximadamente 8.000 m<sup>3</sup>, com uma variação de 4% para mais no bloco o qual foi utilizado para o teste *wave*.

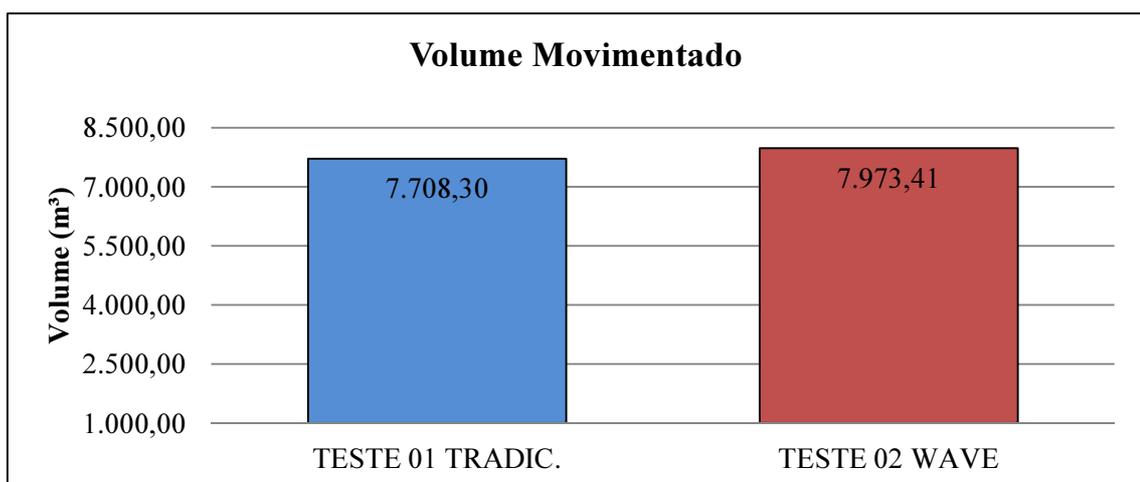


Gráfico 5 - Volume movimentado nos blocos de ambos os testes realizados.

O teste realizado demonstrou que, levando em conta todo o contexto negativo em que os testes foram aplicados, a produtividade resultante do método tradicional foi maior que a

produtividade geral resultante do método *wave*, conforme demonstrado pelo gráfico 6. O método tradicional apresentou uma produtividade 16% maior que a produtividade do método *wave*.

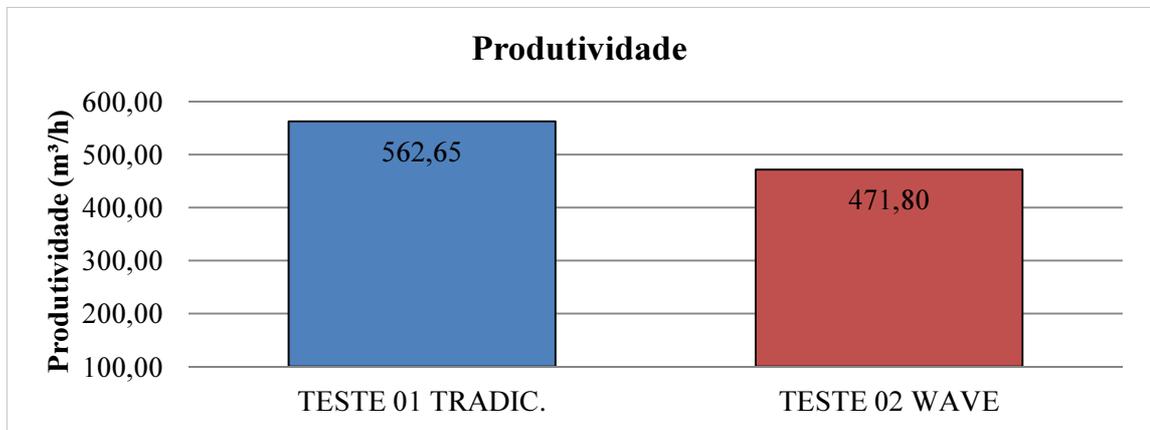


Gráfico 6 – Produtividades gerais dos testes das metodologias tradicional e *wave*.

Os dados do GPS colhidos após as realizações dos testes demonstraram o inverso do que a metodologia *wave* propunha, ou seja, um menor recuo do trator e conseqüentemente uma menor DMT, de acordo com o gráfico 6. Vale a pena ressaltar que durante os testes pode-se perceber que o trator 6004 (trator que recebeu o aparelho GPS) trabalhou em uma trincheira mais afetada pela água, dessa forma foi obrigado a gastar algumas horas limpando a área e se movimentando sobre uma mistura de argila e solo orgânico muito saturada com risco de atolamento, dessa forma foi observado diversas vezes o deslizamento da esteira, o que promove um consumo de combustível excessivo e um desgaste prematuro do material rodante do trator.

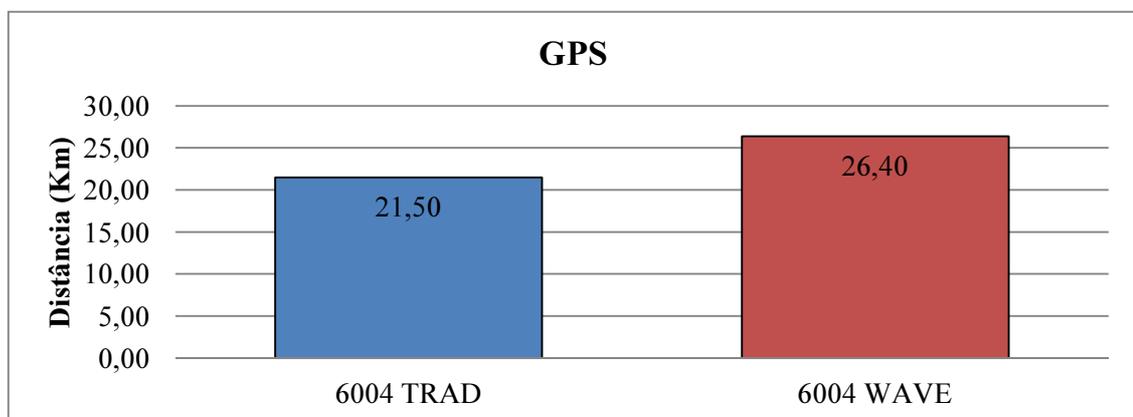


Gráfico 7 – Distância total percorrida pelo trator 6004 em ambos os testes.

Pode-se perceber no gráfico 8 que a quantidade de combustível utilizada nos dois tratores enquanto realizavam o decapeamento através do método *wave* foi maior que a

quantidade de combustível utilizada pelos mesmos dois tratores enquanto realizavam o decapeamento através do método tradicional, sendo que o volume decapeado foi similar. Essa constatação pode ser explicada pelo maior esforço desempenhado pelo trator durante o método *wave*, devido à necessidade de movimentação de material saturado em água. Além disso, os tratores se movimentaram mais em quilômetros durante o método *wave* (gráfico 7), o que também promoveu um maior consumo de combustível, afinal passaram mais horas com o equipamento trabalhando (gráfico 4).

No entanto, é possível perceber também no gráfico 8 que o consumo específico em litros por hora do trator 6001 durante a realização do teste *wave* foi o menor de todos os consumos específicos, independente da metodologia. Tal afirmação pode ser explicada pelo fato de que em campo o trator 6001 trabalhou em uma trincheira que não foi tão afetada pela água, o que permitiu que o trator fosse mais fiel à metodologia *wave*.

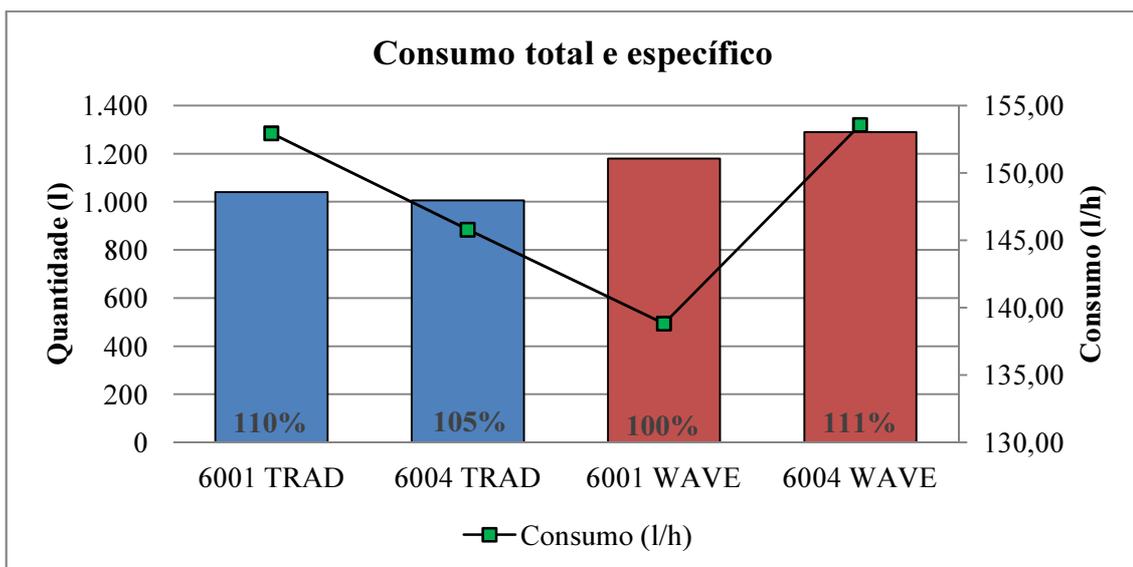


Gráfico 8 – Quantidade de combustível em litros utilizada por cada trator nos testes.

Os gráficos 9 e 10 demonstram consumos específicos em litros por metros cúbicos e em litros por quilômetros, respectivamente. É interessante frisar que para realização da análise presente no gráfico 9 foi necessária a aceitação de que os dois tratores realizadores dos testes transportaram a mesma quantidade de material, no entanto é da ciência do autor que existe um erro estatístico a ser considerado. Entretanto, o erro estatístico não compromete a análise, pois a quantidade de horas de trabalho, nível de habilidade dos operadores, eficiência dos equipamentos são muito similares.

O gráfico 9 demonstra um consumo específico superior do trator enquanto realizava o decapeamento através do método *wave*, este aumento foi de aproximadamente 24%.

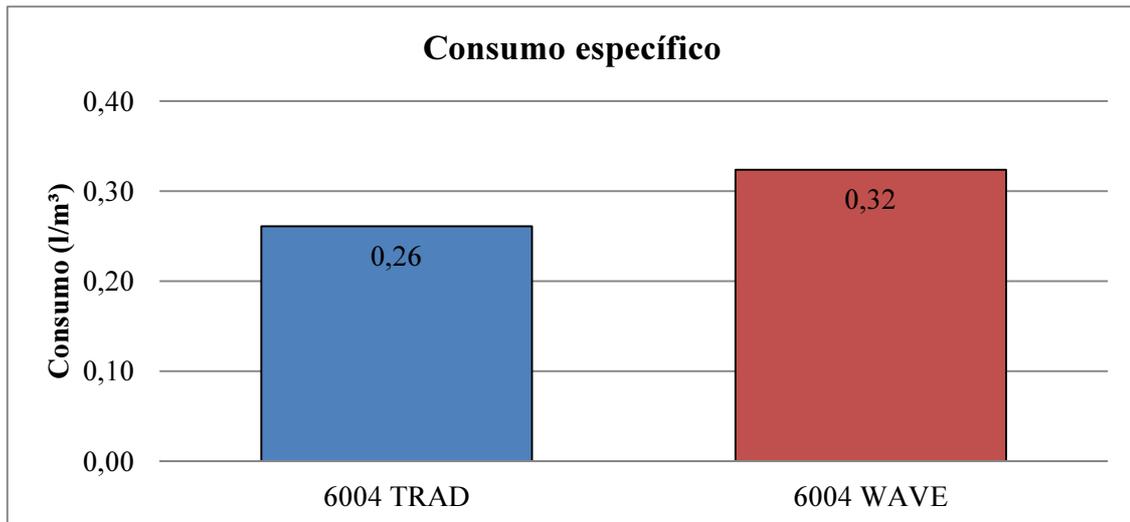


Gráfico 9 – Consumo específico em litros por metros cúbicos

O gráfico 10 demonstra o consumo específico do trator 6004 enquanto realizava ambos os testes. Ao analisar o gráfico abaixo nota-se que o consumo específico em litros por quilômetros foi superior na metodologia *wave*. Esse aumento foi de aproximadamente 4%.

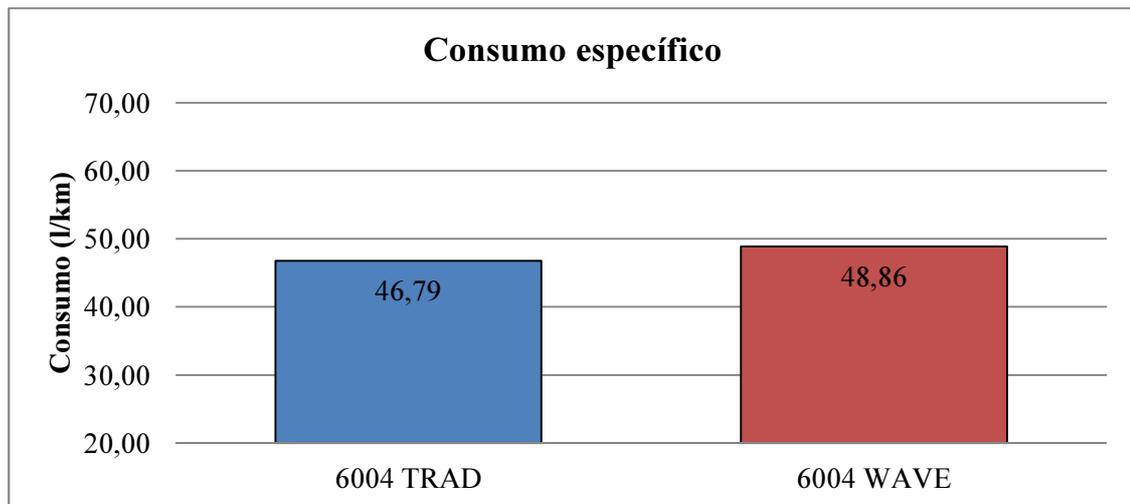


Gráfico 10 – Consumo específico em litros por quilômetros.

A partir deste ponto podemos comparar os resultados oferecidos pelo *software* DozSim® com os testes práticos executados na mina de bauxita de Juruti. De acordo com o gráfico 11, nota-se que a produtividade do teste prático do método tradicional aproximou-se do que o *software* havia previsto. No entanto, o teste prático da metodologia *wave* permaneceu distante da previsão gerada pelo programa DozSim®. Tal constatação pode ser explicada pelo fato de que a metodologia *wave* teve seus resultados duramente afetados pelas chuvas, além disso, os operadores executaram o processo de decapeamento através dessa metodologia pela primeira vez.

Partindo do princípio que o *software* aponta uma condição ótima do processo, podemos inferir que ainda existem algumas melhorias de processo a serem aplicadas na execução da metodologia tradicional. Assim como na metodologia *wave* também existem alguns pontos a serem melhorados. Em ambos os métodos as melhorias possíveis são, por exemplo: reciclagem dos operadores para melhor utilização dos recursos de lâmina do trator, etc.

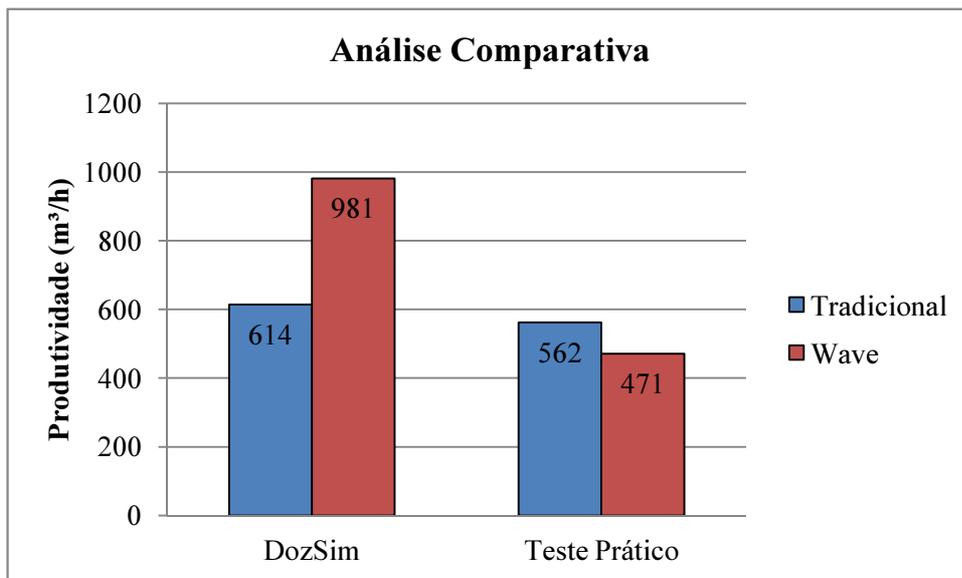


Gráfico 11 – Análise comparativa entre DozSim e testes práticos mina de Juruti.

É interessante salientar as análises quanto as comparações entre DozSim e testes práticos. Em relação à metodologia tradicional, os valores de produtividades simuladas e as produtividades obtidas nos testes práticos apresentaram-se com desvio consideravelmente baixo. Tal afirmação pode ser explicada pelo fato dos operadores já possuírem muita prática na execução desta metodologia, fazendo com que consigam otimizar consideravelmente a operação. De outra forma, em relação à metodologia *wave*, notou-se um desvio maior na comparação entre os dados de produtividade provenientes das simulações e dos testes práticos, conforme gráfico 11.

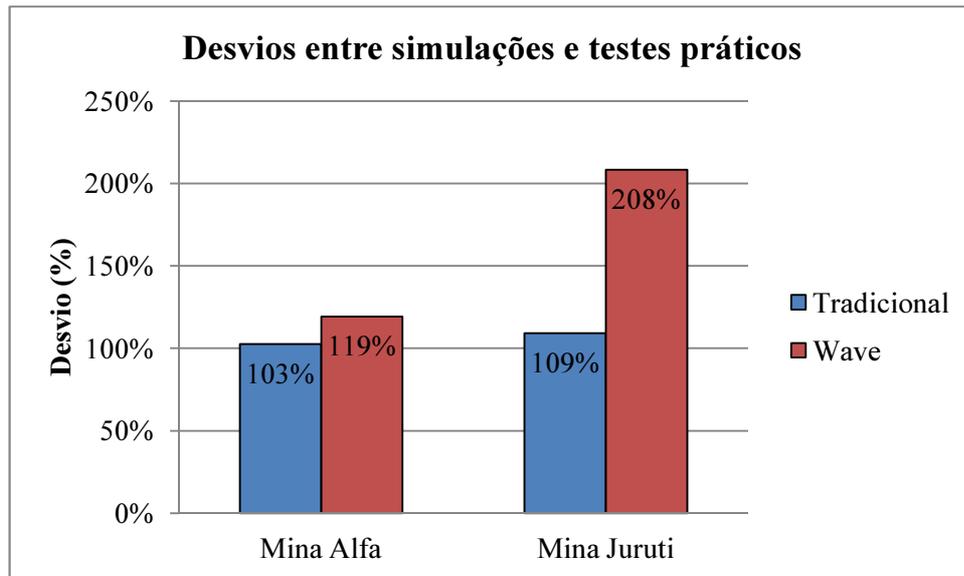


Gráfico 12 – Análise comparativa entre os dados simulados e reais.

Tal fato pode ser explicado pelo fato do pequeno grau de intimidade dos operadores com a metodologia *wave*, já que é uma metodologia nova. Além disso, especificamente no caso do teste na mina de Juruti, soma-se o fator chuva que contribuiu de forma explícita para o incremento no desvio entre os resultados simulados e obtidos através do teste prático.

## 7 CONCLUSÕES

De acordo com os testes realizados pode-se afirmar que a produtividade é inversamente proporcional a altura da camada litológica de argila belterra. Tal afirmação é baseada no fato de que, quanto maior for a altura de decapeamento, maior será a quantidade de material que deverá ser transportado após o preenchimento total da cava, sendo que o material que é transportado após o preenchimento da cava, ou seja, transportado para o depósito, exige um ciclo de tempo maior, o que por sua vez prejudica duramente a produtividade geral de todo o processo de decapeamento. A produtividade também apresenta uma relação com a altura da cava a ser preenchida, pois quanto mais alta a cava, quanto maior for sua capacidade de recepção volumétrica, maior será também a produtividade do processo. Isto pode ser embasado pelo fato de que quanto maior a cava, menos material deverá ser transportado para o depósito, de forma a prejudicar o mínimo possível a produtividade geral do processo de decapeamento.

Além disso, notou-se que o procedimento de decapeamento é composto por etapas e cada uma delas possui um tempo de ciclo e produtividade característica. O processo é iniciado com o trator depositando material na cava, com distância média de transporte pequena, tempo de ciclo consideravelmente curto e, conseqüentemente, produtividade alta. No decorrer do processo, o trator preenche a cava e começa a depositar o material no início do depósito, com distância intermediária, tempo de ciclo intermediário e, conseqüentemente, produtividade intermediária. Por fim, o trator começa a depositar material no depósito propriamente dito, com distância média de transporte consideravelmente alta, tempo de ciclo excessivo e, conseqüentemente, produtividade muito baixa. As análises, normalmente, são feitas levando-se em conta a produtividade total do processo. Dessa forma, a produtividade da última fase faz com que a produtividade geral seja duramente reduzida.

Os testes realizados indicaram que para cada ambiente existe um método ideal, no sentido de adequação do método aos parâmetros oferecidos pelo ambiente. No caso do método mais adequado ser utilizado obtém-se melhores resultados através da utilização ótima do método. No caso da não utilização do método ideal para determinado ambiente, isso não implica na execução da atividade, ou seja, a atividade será cumprida, porém com perdas de processo. Entre estas estão: baixa produtividade, gasto excessivo de combustível, diminuição da vida útil dos componentes rodantes do trator, etc. Os testes indicam que o método *wave* apresenta um desempenho considerável nos ambientes com camadas litológicas de argila

belterra menores que 10 metros, cava a ser preenchida maiores que 5 metros e para procedimentos executados no verão.

O método *wave* mostrou-se sensível as chuvas, pois as principais manobras, que o diferenciam do método tradicional, são executadas nas primeiras horas de serviço. O agravante é que justamente as primeiras horas de serviço são as mais afetadas pelas chuvas, devido à saturação com água das camadas mais superficiais. Quanto ao método tradicional notou-se que o coeficiente de afundamento da esteira prejudica de forma considerável também a subida em marcha ré. Em ambos os métodos, percebeu-se que o pavimento úmido apresenta vantagem em relação ao desgaste das sapatas, no sentido de aumento de vida útil destas.

No decorrer das análises, pode-se perceber também que as simulações geradas pelo *software* DozSim da Caterpillar® ofereceram resultados sempre superiores aos resultados encontrados nos testes práticos, indicando que o programa simula uma situação ótima e que na prática buscamos alcançá-la. Dessa forma, os resultados das simulações podem ser utilizados como medidores de eficiência do processo e, além disso, quantificar a possibilidade de melhoria do processo.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Efetuar o estudo comparativo em ambientes favoráveis ao método *wave* e proceder a todas as análises feitas nos testes de Juruti.

Efetuar novos testes de decapeamento com variações nas dimensões do bloco a ser decapeado. Por exemplo, os blocos de Juruti possuem dimensões no plano horizontal de 25 metros por 25 metros. Pode-se variar para 20 metros por 30 metros, 40 metros por 40 metros, etc.

Analisar o desgaste do material rodante dos tratores de esteira proveniente das diferentes metodologias. Esta análise pode ser otimizada juntamente com a variação do ângulo de trabalho do trator, tanto no corte da argila *in-situ* como na deposição no depósito de estéril controlado. Definindo, assim, qual ângulo máximo que o trator suporta subir carregado no depósito de estéril controlado.

Efetuar estudo geral, inclusive financeiro, sobre o pré-corte de rebaixamento da camada litológica de argila belterra efetuado com escavadeiras hidráulicas e caminhões basculantes. Para que após o pré-corte os tratores de esteiras iniciem o trabalho, finalizando o decapeamento.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUMINIUM COMPANY OF AMERICAN - ALCOA. *Avaliação de recursos: Platô Capiiranga*. Juruti. 2010.

ALUMINIUM COMPANY OF AMERICAN - ALCOA. *Histórico da empresa*. Acesso em: 23/03/2014. Disponível em: <<http://www.alcoa.com.br/>>.

ALUMINIUM COMPANY OF AMERICAN - ALCOA. *Plano Integrado de Aproveitamento Econômico*. Projeto Juruti. 2009.

ANJOS, F. V.; SILVA, J. B. *As usinas de produção de alumínio da ALCAN no Brasil – processo Bayer para produção de alumina e os processos eletrolíticos para a produção de alumínio*. In: *As usinas brasileiras de metalurgia extrativa dos metais não-ferrosos*. ABM, São Paulo. 1983.

ANODIZAÇÃO E REVESTIMENTO METÁLICOS EM ALUMÍNIO - ANODIMINAS. Acesso em 26/03/2014. Disponível em <<http://www.anodiminas.com.br/>>.

CONSTANTINO, V.R.L., ARAKI, K., SILVA, D.O., OLIVEIRA, W. *Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático*. Quim. Nova, Vol. 25, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL – DNPM; SERVIÇOS GEOLÓGICOS DO PARANÁ – MINEROPAR. *Planejamento na mineração*. Curitiba. C. 6, 2003. p. 148

HARTMAN, H. L. *Introductory mining engineering*. New York, 1987. p. 633.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Mapa das Unidades do relevo do Brasil*. Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro, 1993.

KIRK-OHTMER. *Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons; New York, 4a ed., 1992, vol. 2, 255-267.

OMNIA MINÉRIOS LTDA. *Plano de aproveitamento econômico*. Juruti, 2005.

PAGIN, S.; CERA, D. e ÉRRICO, J. C. D. *Alumínio do minério ao lingote*. In: *As usinas brasileiras de metalurgia extrativa dos metais nãoferrosos*. ABM, São Paulo, 1983.

PATTERSON, S.H. *Bauxite reserves and potential aluminum resources of the world*. United States of American: Geological Survey Bulletin, 1967. p 1228.

PIMENTEL, E. N. *Aspectos gerais da mina de bauxita de Paragominas: Estudo comparativo e elaboração de modelos ótimos de logística operacional – troca de turnos*. (Trabalho de conclusão de curso). 2010. 40p. Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2010.

RICARDO, H. S. *Manual prático de escavação: terraplenagem e escavação de rocha*. – 3. ed. rev. e ampl. – São Paulo: Pini, 2007.

SAMPAIO, J; ANDRADE, M; DUTRA A. *Bauxita*. CETEM, Rio de Janeiro: 2005.

SAMPAIO, J. A. *Bauxita. Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações*. CETEM. Rio de Janeiro, c.14, p. 311-337, 2008.

SOUZA, W. T. *Compatibilidade entre equipamentos e tecnologias de escavação a céu aberto*. Ouro Preto: UFOP, 1994.

ULLMANN'S Encyclopedia. *Industrial Inorganic chemistry and Products*, Willey-VCH: Weiheim, 1998, v.1, 25-83.