



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



PATRÍCIA GERALDA GONÇALVES

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA AS ATIVIDADES DE
DECAPEAMENTO E LAVRA DE UMA MINA DE BAUXITA COM O *SOFTWARE* ARENA

OURO PRETO

2019

PATRÍCIA GERALDA GONÇALVES

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA AS ATIVIDADES DE
DECAPEAMENTO E LAVRA DE UMA MINA DE BAUXITA COM O *SOFTWARE* ARENA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia de Minas da
Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos
requisitos para obtenção do título de bacharel em
Engenharia de Minas.

Área de concentração: Pesquisa operacional

Orientador: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral

OURO PRETO

2019

G635d

Gonçalves, Patrícia Geralda.

Desenvolvimento de modelos de simulação para as atividades de decapeamento e lavra de uma mina de bauxita com o software Arena [manuscrito] / Patrícia Geralda Gonçalves. - 2019.

78f.: il.: color; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral.

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

1. Lavra de minas. 2. Métodos de simulação. 3. Planejamento de produção - Alocação dinâmica. I. Cabral, Ivo Eyer. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.6

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

Aos 25 dias do mês de julho de 2019, às 09h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DE MIN/EM, foi realizada a defesa da monografia de final de curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA AS ATIVIDADES DE DECAPEAMENTO E LAVRA DE UMA MINA DE BAUXITA COM O SOFTWARE ARENA”** pela aluna Patricia Geralda Gonçalves, sendo a comissão avaliadora formada pela **Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral** (orientador), **Prof. Dr. Elton Destro** e **Eng.º de Minas Rafael Antônio de Moraes Ferreira**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela9,5..... da candidata, com a nota concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

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

Ivo Eyer Cabral

Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador

Elton Destro

Prof. Dr. Elton Destro
Membro da Comissão Avaliadora

Rafael Antônio de Moraes Ferreira

Eng.º de Minas Rafael Antônio de Moraes Ferreira
Membro da Comissão Avaliadora

Patricia Geralda Gonçalves

Patricia Geralda Gonçalves

José Fernando Miranda

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

A Deus, por toda a benção
aos meus pais José e Sirley por todo esforço,
apoio e confiança aplicados em mim
e à minha avó Maria (em memória) por todo o incentivo.

AGRADECIMENTOS

À Alcoa pela oportunidade de realização do estágio. À toda equipe da supressão vegetal e lavra, por todo o empenho, auxílio e comprometimento com esse projeto. Em especial ao Rhaymá, João, Gabriela e Cissa. Ao professor Dr. Ivo Eyer Cabral por toda paciência e disponibilidade para a conclusão desse projeto. À todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O projeto surgiu diante da necessidade de criação de um recurso que auxiliasse nas tomadas de decisões referentes à alocação das frotas de equipamentos de uma mina de bauxita localizada no Estado do Pará e que previsse em quanto tempo uma dada tira seria decapeada ou uma dada produção seria alcançada. A redução do tempo para se atingir uma dada produção pode ser obtida fazendo uma alocação de equipamentos mais eficiente. O principal objetivo do presente trabalho foi reproduzir as operações do decapeamento e lavra da mina em questão, no software Arena, através da construção de dois modelos de simulação. Para isso, foi necessário acompanhar as atividades, conhecer a mina, coletar e tratar dados para alimentar os dois modelos. Após a construção dos modelos, estes foram alimentados com valores dos volumes planejados de material, bem como tipo de material e número de escavadeiras utilizadas. As simulações foram realizadas fazendo a variação do número de caminhões utilizados no transporte de material (3, 5 e 10 caminhões) e para cada valor do número de caminhões o modelo foi rodado 30 vezes. Após as simulações concluiu-se que os modelos estão validados e que 30 simulações foram suficientes para a análise estatística, uma vez que, há coerência dos resultados em relação à variação dos parâmetros e os erros percentuais ficaram abaixo de 5%. No modelo de decapeamento foi observado que é possível aumentar o número de caminhões alocados, uma vez que praticamente não houve fila para carregamento e esse aumento de caminhões consequentemente teria um maior impacto na diminuição do tempo de decapeamento da tira. Já no modelo de lavra, foi verificado que a partir de 5 caminhões, não adianta alocar mais caminhões para diminuir o tempo de lavra da tira, uma vez que, a partir deste número o tempo de lavra da tira praticamente não diminui e a alocação de mais caminhões só aumentaria o tempo de fila para carregamento. Nas simulações com o modelo de lavra, também foi verificado que não existem problemas em relação à descarga de minério lavado ou bruto no britador ou na pilha pulmão, pois praticamente não há formação de filas.

Palavras-chave: Alocação dinâmica, Simulação, Arena.

ABSTRACT

The project arose in view of the need to create a resource that would aid in the decision making regarding the allocation of equipment fleets from a bauxite mine located in the State of Pará and which predicted how long a given strip would be deformed or a given production would be achieved. The reduction of the time to reach a given production can be obtained by making a more efficient allocation of the equipments. The main objective of this work was to reproduce the mine operations in the Arena software through the construction of two simulation models. For this, it was necessary to follow the activities, to know the mine, to collect and treat data to feed the two models. After the construction of the models, they were fed with planned material volume values, as well as type of material and number of excavators used. The simulations were carried out by varying the number of trucks used in material transport (3, 5 and 10 trucks) and for each number of trucks the model was run 30 times. After the simulations, it was concluded that the models are validated and that 30 simulations were enough for the statistical analysis, since there is consistency of the results in relation to the variation of the parameters and the percentage errors were below 5%. In the overburden removal model is possible increases the number of trucks allocated, since there was practically no queue for loading and consequently would have a greater impact in the reduction of the overburden removal time of the strip. In the mining model, it was verified that from 5 trucks, it is useless to allocate more trucks to reduce the mining time, since, from 5 trucks, the mining time practically does not decrease and the allocation of more trucks would only increase the loading queue time. In the simulations with the mining model it was also verified that there are no problems in relation to the discharge of washed or crude ore in the crusher or in the buffer pile because there is practically no queue formation.

Keywords: Dynamic allocation, Simulation, Arena

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Cadeia produtiva da indústria de alumínio.	17
Figura 2: Ranking mundial de reservas e produção de bauxita e seus derivados.....	18
Figura 3: Principais empresas na mineração de bauxita no Brasil.	18
Figura 4: Localização geográfica do município de Juruti – PA.	20
Figura 5: Perfil litológico típico dos platôs Capiranga, Mauari e Guaraná – Juruti/PA.....	21
Figura 6: Operações de lavra no método strip mining.....	24
Figura 7: Operações unitárias do método de lavra por tiras.	24
Figura 8: Remoção de estéril feita por trator de esteira.....	27
Figura 9: Escarificadores.	27
Figura 10: Metodologia de simulação.	31
Figura 11: Fluxograma do modelo de simulação computacional do Decapeamento.	47
Figura 12: Fluxograma do modelo de simulação computacional da Lavra.....	52
Figura 13: Tempo de decapeamento da tira.....	58
Figura 14: Tempo médio de fila para carregamento de estéril.	59
Figura 15: Tempo de lavra das tiras de minério.	62
Figura 16: Tempo médio de fila para carregamento de minério.	63
Figura 17: Tempo médio de fila para basculamento no britador.....	64
Figura 18: Tempo médio de fila para basculamento na pilha pulmão.....	64
Figura 19: Quadro de variáveis e outros elementos do modelo de decapeamento.....	75
Figura 20: Quadro de variáveis e outros elementos do modelo de lavra.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados do modelo de Decapeamento.	39
Tabela 2: Dados do modelo de Lavra.	40
Tabela 3: MTBF e MTTR do modelo de Decapeamento.	41
Tabela 4: MTBF e MTTR do modelo de Lavra.	41
Tabela 5: Curvas de distribuições de probabilidade das atividade do modelo do decapeamento.	42
Tabela 6: Curvas de distribuições de probabilidade das atividades do modelo de lavra.	43
Tabela 7: Tiras a serem decapeadas.	44
Tabela 8: Informações referentes aos caminhões basculantes e tratores da frota de transporte de estéril.	44
Tabela 9: Tiras de minério lavado a serem lavradas.	45
Tabela 10: Tiras de minério bruta a serem lavradas.	45
Tabela 11: Informações referentes aos equipamentos da frota de transporte de minério.	45
Tabela 12: Parâmetros das simulações de decapeamento.	56
Tabela 13: Tempo de decapeamento da tira com rebaixamento.	57
Tabela 14: Tempo de decapeamento da tira sem rebaixamento.	57
Tabela 15: Tempo médio de fila para carregamento de estéril das tiras com rebaixamento.	58
Tabela 16: Parâmetros das simulações de lavra.	60
Tabela 17: Tempo de lavra das tiras de lavado.	60
Tabela 18: Tempo de lavra da tira de bruta.	61
Tabela 19: Tempo médio de fila para carregamento de lavado.	62
Tabela 20: Tempo médio de fila para carregamento de bruta.	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	A BAUXITA.....	15
3.2	A BAUXITA NO MERCADO MINERAL.....	16
3.3	A EMPRESA	19
3.4	PROJETO JURUTI.....	19
3.5	GEOLOGIA LOCAL	21
3.6	MÉTODO DE LAVRA EM TIRAS (<i>STRIP MINING</i>)	23
3.7	DECAPEAMENTO E LAVRA EM JURUTI.....	26
3.7.1	DECAPEAMENTO	26
3.7.2	LAVRA	27
3.8	PESQUISA OPERACIONAL	28
3.9	SIMULAÇÃO.....	30
3.10	SOFTWARE ARENA	34
3.11	DETERMINAÇÃO DE INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA INDICADORES DE DESEMPENHO	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	COLETA DE DADOS.....	38
4.2	TRATAMENTO DOS DADOS	39
4.3	PREMISSAS DE SIMULAÇÃO.....	43
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
5.1	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO DO DECAPEAMENTO	46
5.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO DA LAVRA.....	51
5.3	SIMULAÇÕES DE DECAPEAMENTO	56
5.4	SIMULAÇÕES DE LAVRA.....	59
6	CONCLUSÃO	66
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
	APÊNDICES	75

1 INTRODUÇÃO

A lavra é o processo de extração de minerais que se concentram naturalmente na terra. É uma atividade essencial para a vida moderna, pois através dela é possível obter bens que são indispensáveis ao nosso cotidiano, como moedas, eletrodomésticos, celulares e computadores. Além disso, a mineração é fundamental para o desenvolvimento de diversos setores, como tecnologia, telecomunicação, construção civil e transporte. Por estar tão presente na vida da sociedade, tem grande participação no desenvolvimento econômico de muitas das principais nações do mundo, entre elas estão o Brasil, China, Chile, Canadá, Austrália e os Estados Unidos. No Brasil, está ligada a fatores de crescimento e desenvolvimento econômico através da geração de emprego, renda, consumo e investimento.

Desde que seja operada com responsabilidade social e desenvolvimento sustentável, a mineração contribui de forma decisiva para o bem estar e melhoria da qualidade de vida das presentes e futuras gerações. Para que seja realizada com sucesso, primeiramente é necessária a execução de pesquisas com o objetivo de descobrir novas jazidas e, em seguida explorá-las, ou seja, fazer estudos na área onde foi encontrada a reserva mineral. A próxima etapa é o desenvolvimento, que é responsável pelos serviços necessários à preparação da jazida para a retirada do minério. Depois da área “pronta”, é feita a lavra, fase de extração dos bens minerais de seus locais de origem, que pode ser realizada de duas formas: a céu aberto ou subterrânea – dependendo se sua execução for feita na superfície ou no interior dos terrenos, respectivamente. Por último é realizado o beneficiamento para mudar as características do bem mineral, como granulometria, concentração de determinada espécie mineral e forma.

Esse trabalho irá abordar a fase de lavra, mais especificamente a alocação dinâmica da frota de caminhões em uma mina a céu aberto. Na alocação dinâmica, a frente a ser atendida por cada caminhão e o seu ponto de descarga são definidos ao término de cada viagem. Sendo assim, para a alocação ser efetiva, o controle deve ser realizado por um sistema automático de despacho.

A funcionalidade do sistema automático de despacho, de acordo com Araújo (2011), é realizar o roteamento de veículos de transporte de carga de minérios em uma mina, levando em consideração restrições em tempo real. Como exemplos dessas restrições, temos a quantidade de material a ser retirado de cada frente de lavra, e o número de veículos e rotas disponíveis. Para que

isso seja viável, é necessária uma frota de equipamentos de carga e transporte, cuja alocação depende da sua disponibilidade, da produtividade e da compatibilidade entre os mesmos.

Segundo Alarie e Gamache (2002), o maior custo em minas a céu aberto é o de transporte, podendo chegar a 60 por cento dos custos de operação, fazendo com que pequenas reduções percentuais nos custos resultem em economias relevantes. Portanto, os estudos sobre alocação dinâmica de frota de caminhões devem ser constantemente aperfeiçoados, visto que é muito importante que as melhores técnicas para tomada de decisões sejam empregadas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo do presente trabalho foi construir dois modelos de simulação das atividades de decapeamento e lavra, da mina estudada, no software Arena (utilizando a versão de estudante disponibilizada pela Paragon Tecnologia Ltda. Os modelos tem o objetivo de auxiliar na previsão do tempo necessário para o decapeamento e lavra de uma dada área e auxiliar na alocação dos caminhões rodoviários.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Descrever o funcionamento da mina em termos de operações;
- Realizar coleta e tratamento de dados para alimentar os modelos de simulação;
- Construir os modelos de simulação e realizar as suas validações de acordo com a análise considerando um intervalo de confiança de 95%;
- Estimar os tempos de decapeamento e lavra das tiras estudadas através dos modelos;
- Analisar a influência da variação do número de caminhões basculantes, alocados para o transporte de estéril e de minério, nos tempos de carregamento e de filas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A BAUXITA

O alumínio, metal tão amplamente usado nos dias de hoje, é o terceiro elemento em maior abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e silício. Apesar de sua abundância, o alumínio não é encontrado na forma metálica na natureza, mas principalmente associado a outros elementos como o oxigênio com o qual forma a alumina (ABAL, 2017; SAMPAIO *et al*, 2008).

A bauxita é uma rocha-minério e a principal fonte de alumínio existente. Foi descoberta pelo geólogo francês Pierre Berthier, em 1821 no sul da França. É formada por minerais oxi-hidróxidos de alumínio como a gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, diásporo $\text{AlO}(\text{OH})$ e boehmita $\text{AlO}(\text{OH})$. O teor mínimo para que a bauxita seja aproveitável deve ser 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3), no entanto, grande parte das bauxitas economicamente aproveitáveis possuem um conteúdo de alumina entre 50 e 55% (ABAL, 2017; SAMPAIO *et al*, 2008).

A bauxita possui uma coloração avermelhada e essa coloração é devido à quantidade de óxido de ferro contido nela. A bauxita branca contém de 2 a 4% de óxidos de ferro e já a vermelha pode atingir 25% de óxidos de ferro. Além do óxido de ferro, a bauxita pode apresentar outras impurezas como sílica, titânio e aluminossilicatos (SAMPALIO *et al*, 2008; CONSTANTINO *et al*, 2002).

As jazidas de bauxitas ao redor do mundo estão localizadas em regiões tropicais e subtropicais e a formação de depósitos ocorrem principalmente em locais de clima tropical (temperatura média de 20°C) no qual há alternância de estações secas e úmidas (MOURA, 2008). Tais condições climáticas favorecem o processo natural de lixiviação onde os silicatos e argilominerais são decompostos, a maior parte da sílica é removida e os óxidos de alumínio e ferro são concentrados. (SAMPALIO *et al*, 2008; HABASHI, 1993). Além do fator climático, outros fatores são importantes para uma alta taxa de formação de bauxita como elevada porosidade na rocha, cobertura vegetal com adequada atividade bacteriológica e topografia pouco acidentada que permita o mínimo de erosão (HABASHI, 1993).

Segundo Sampaio *et al* (2008), os processos que formam os minerais silicatados de alumínio e que estão presentes na rocha de bauxita são a caulinitização, lateritização e bauxitização. A caulinitização é o processo natural de formação do caulim. Consiste na decomposição via intemperismo dos feldspatos (KAlSi_3O_8) e formação de minerais de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e quartzo. A laterita é

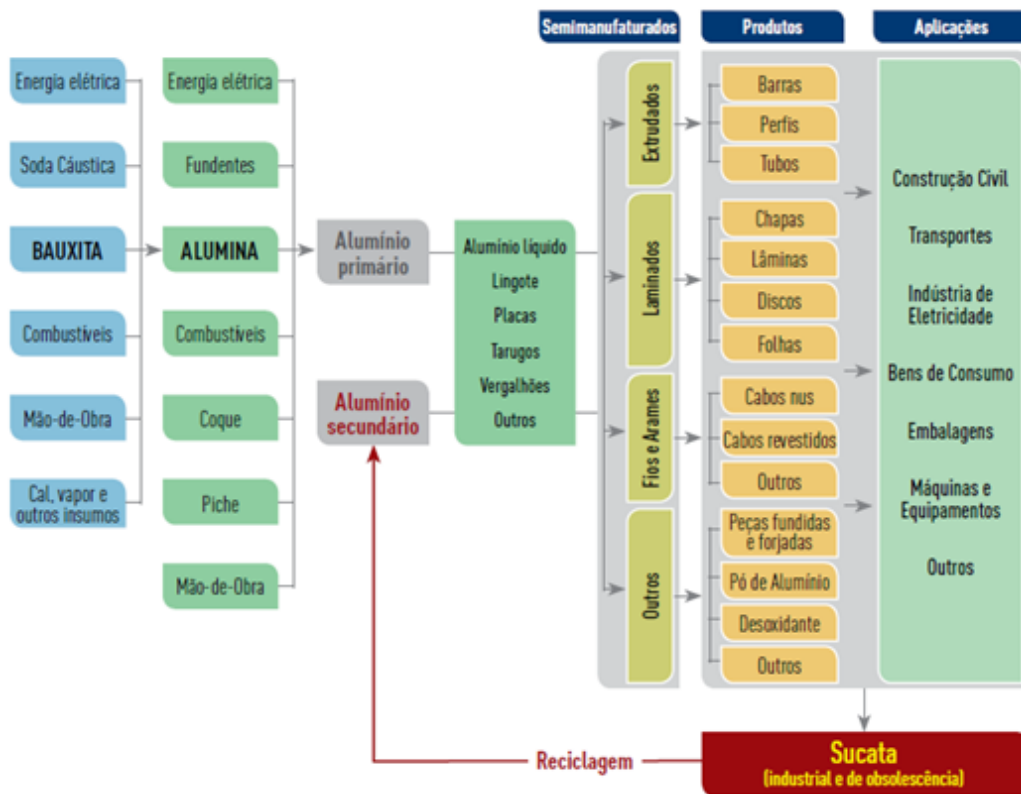
um termo empregado para solos constituídos principalmente de hidróxidos de alumínio e ferro, onde houve a remoção de sílica e outros cátions pelas águas pluviais. Logo, a laterização consiste em um processo de diagênese que resulta no aumento do caráter eletropositivo dos colóides do solo. A laterização da rocha rica em alumina forma a bauxita. Por fim, tem-se a bauxitização que é o processo de formação da bauxita dessilicatada e que se caracteriza pela predominância de óxido hidratado de alumínio associado ao óxido de ferro, sílica e outras impurezas (SAMPAIO *et al*, 2008).

A espessura total do capeamento em um depósito de bauxita é formado pela argila e laterita e, quanto maior essa espessura, maiores serão os investimentos e custos operacionais. A espessura da camada de minério varia conforme a região e o minério pode ser bauxita maciça ou bauxita nodular a qual possui um teor de sílica mais elevado. Quando falamos em teor, é necessário levar em conta a alumina aproveitável (Al-av) e a sílica reativa (re-Si). A alumina aproveitável é o teor de metal que poderá ser extraído da bauxita e que poderá ser realmente utilizado na produção de alumínio. Logo, para que seja economicamente viável a alumina aproveitável dever possuir teor próximo a 50%. Já a sílica reativa pode causar problemas no processo Bayer caso seu teor seja muito elevado. Portanto, o teor de sílica reativa não deve ultrapassar 5% (SAMPAIO, 2008; BRETAS, 2014).

3.2 A BAUXITA NO MERCADO MINERAL

A bauxita é o primeiro elo da cadeia produtiva da indústria de alumínio, conforme ilustrado na Figura 1. É usada para a produção de alumina, alumínio e produtos semimanufaturados e acabados. Seus principais produtos são ligas metálicas, materiais refratários (calcinada), abrasivos (calcinada), cimento argiloso, sulfato de alumínio para a indústria química, dentre outros (antiderrapante, retardador de chama, soldas, etc.) (ABAL, 2017).

Figura 1: Cadeia produtiva da indústria de alumínio.



Fonte: ABAL, 2017.

Segundo Farias e Monteiro (2016), as reservas mundiais de bauxita somaram 28,0 bilhões de toneladas em 2015. Na Figura 2 é possível perceber a relação mundial de reservas e produção de bauxita no ano de 2015. O Brasil possui 2,6 bilhões de toneladas de bauxita em reservas sendo o terceiro no ranking mundial (atrás da Guiné e Austrália). O país ocupa também o terceiro lugar no ranking mundial de produção de bauxita com cerca de 37 milhões de toneladas anuais (atrás da Austrália e China) (FARIAS & MONTEIRO, 2016; ABAL, 2017).

Figura 2: Ranking mundial de reservas e produção de bauxita e seus derivados.

Ranking	Reservas de Bauxita Em milhões de toneladas		Produção Em mil toneladas					
	Países	Volume	Bauxita	Volume	Alumina	Volume	Alumínio Primário	Volume
1º	Guiné	7 400	Austrália	81 741	China	58 978	China	31 870
2º	Austrália	6 200	China	65 000	Austrália	20 097	Rússia	3 454
3º	Brasil	2 600	Brasil	37 057	Brasil	10 452	Canadá	3 209
4º	Vietnã	2 100	Guiné	27 605	Índia	5 000	Emirados Árabes	2 471
5º	Jamaica	2 000	Índia	24 219	Estados Unidos	4 541	Índia	1 909
6º	Indonésia	1 000	Jamaica	8 540	Rússia	2 593	Austrália	1 646
7º	China	980	Malásia	7 664	Jamaica	1 865	Noruega	1 231
8º	Guiana	850	Rússia	5 432	Canadá	1 561	Bahrain	971
9º	Índia	590	Cazaquistão	4 802	Ucrânia	1 481	Estados Unidos	818
10º	Suriname	580	Grécia	2 100	Cazaquistão	1 448	Brasil	793
11º	Arábia Saudita	210	Arábia Saudita	1 660	Espanha	1 400	Islândia	764
	Outros	3 490	Outros	4 672	Outros	7 284	Outros	8 421
	Total	28 000		270 492		116 700		57 557

Fonte: ABAL, 2017.

A China é o maior produtor de alumínio primário do mundo produzindo mais da metade do total mundial. Devido ao aumento da demanda por bauxita associada à diminuição de suas reservas, a China precisou buscar outros fornecedores e atualmente é o principal parceiro comercial com Brasil na exportação de bauxita (ABAL, 2017; FARIAS & MONTEIRO, 2016). De maneira geral, as exportações de bauxita, alumínio e seus produtos representam 2,5% das vendas externas brasileiras no comércio exterior (SILVA, 2014).

Na Figura 3 pode-se observar a relação das principais empresas que atuam na mineração de bauxita no Brasil para fins de uso metálico. O estado do Pará concentra 91% da produção nacional de bauxita para esse fim (ABAL, 2017).

Figura 3: Principais empresas na mineração de bauxita no Brasil.

Empresa	Volume - 2015 (milhões tpa, base úmida)	%	Localização
MRN – Mineração Rio do Norte S.A.	17,82	48	Trombetas (PA)
Mineração Paragominas S.A. (Hydro)	10,06	27	Paragominas (PA)
Alcoa Alumínio S.A.	5,73	15	Juruti (PA) e Poços de Caldas (MG)
Companhia Brasileira de Alumínio -CBA	2,12	6	Itamarati**, Cataguases e Mirai (MG)
Outros *	1,33	4	
Total	37,06	100	

Fonte: ABAL, 2017.

3.3 A EMPRESA

Com a descoberta da forma de redução eletrolítica do alumínio em 1886, Charles Martin Hall iniciou um processo industrial e economicamente viável de produção de alumínio que é utilizado ainda hoje. Essa descoberta retirou o alumínio da categoria de metais semipreciosos e viabilizou sua utilização em diversos setores (ALCOA,2005).

A ALCOA Inc. foi fundada por Hall e um grupo de investidores em 1888, nos Estados Unidos e hoje é uma das líderes mundiais em fabricação de alumina, alumínio primário e fabricados (CELSON,2014). A fábrica de Poços de Caldas (MG), fundada em 1965, foi a primeira unidade da Alcoa no Brasil e recebeu o nome de Alcominas. As atividades tiveram início em 1970 e após 10 anos a unidade passou a se chamar Alcoa Alumínio S.A (ALCOA,2005).

Em novembro de 2016, a Alcoa Inc. foi separada em duas empresas independentes de capital aberto, listada na Bolsa de Valores de Nova Iorque. A Arconic Inc. passou a ser líder global em inovação de multimateriais e uma das principais fornecedoras para setores como aeroespacial e automotivo enquanto a Alcoa Corporation manteve sua atuação em produtos de bauxita, alumina e alumínio (ABAL,2016; ALCOA,2017).

A Alcoa Corporation possui 14 mil funcionários, propriedade em 7 minas de bauxita ao redor do mundo e opera integralmente as minas de Huntly e Willowdale na Austrália ocidental e a de Juruti no norte do Brasil (ALCOA, 2019). Em 2018, essas três minas alcançaram um recorde anual combinado de produção de 39,3 milhões toneladas métricas secas de bauxita, reflexo da estratégia de crescimento do negócio e da conclusão da expansão da mina de Juruti, que teve sua capacidade anual aumentada para 7,5 milhões de toneladas métricas (ALCOA, 2019).

3.4 PROJETO JURUTI

Em 2000, a Alcoa adquiriu os direitos de pesquisa na região de Juruti, no oeste do Pará. Foram então iniciados estudos aprofundados nos platôs Capianga, Guaraná e Mauari, localizados nos limites municipais de Juruti. A unidade de Juruti é dedicada à mineração e beneficiamento primário de bauxita e deu início às operações em setembro de 2009 sob uma reserva de cerca de 700 milhões de toneladas métricas de minério, um dos maiores depósitos de bauxita do mundo. A capacidade produtiva inicial era de 2,6 milhões de toneladas métricas anuais e atualmente produz cerca de 5,6 milhões de toneladas métricas/ano (ALCOA, 2005; CELSON, 2014).

A mina e a unidade de beneficiamento se localizam a aproximadamente 56 quilômetros do município de Juruti (Figura 4) no Oeste do Estado do Pará, distante este cerca de 840 km da capital, Belém.

Figura 4: Localização geográfica do município de Juruti – PA.



Fonte: ABREU, 2006.

A Alcoa buscou um novo modelo de implantação para a mina de Juruti com uma proposta de operações integradas ao município e que fosse capaz de impulsionar o desenvolvimento local. Em parceria com o Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas (GVces) e o Fundo Brasileiro para a Biodiversidade (Funbio) foi criado o projeto Juruti Sustentável que se baseia na criação e articulação de um espaço de mobilização social, a construção de indicadores para monitorar as transformações sociais, ambientais e econômicas de Juruti e região, e a formação de um fundo de apoio a projetos de desenvolvimento local (CELISO, 2014; BRETAS, 2014).

O empreendimento implantado pela Alcoa é composto pela mina, beneficiamento, ferrovia (escoamento da produção), rodovia (suporte à produção) e porto. A ferrovia possui aproximadamente 55 quilômetros de extensão e opera geralmente com composições de 34 vagões, cada um com capacidade para transportar aproximadamente 80 toneladas cada. O Porto se localiza há dois quilômetros do centro do município, às margens do rio Amazonas, e possui capacidade

para acomodar navios de até 75 mil toneladas, similares aos que navegam no Canal do Panamá (ALCOA, 2005; ALCOA, 2006).

A mina é lavrada a céu aberto pelo Método de Lavra em Tiras onde a remoção do estéril (decapeamento) é realizada por tratores de grande porte e escavadeiras hidráulicas, conjugadas com caminhões rodoviários com capacidade de até 35 toneladas (ALCOA, 2005; ALCOA, 2006).

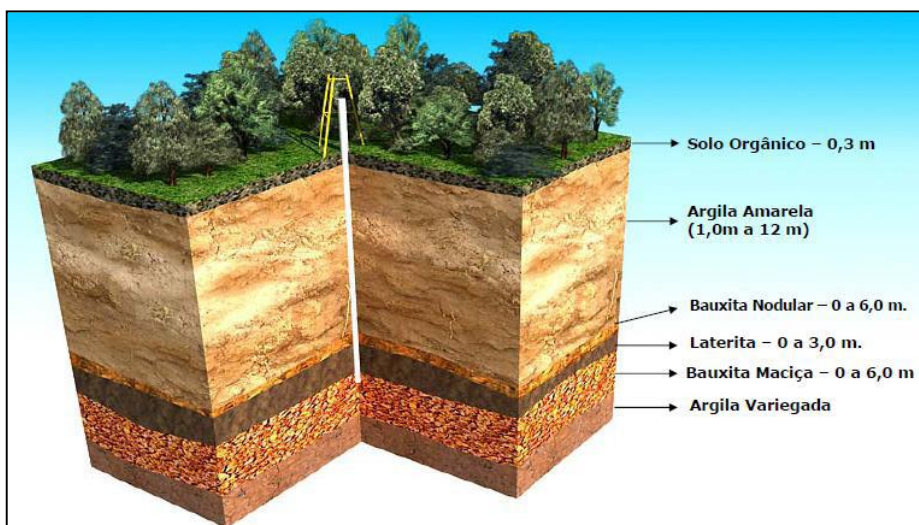
3.5 GEOLOGIA LOCAL

Os depósitos de bauxita da Amazônia Oriental foram formados a partir do intemperismo de rochas sedimentares da formação Alter do Chão. São depósitos do tipo “blanket” e apresentam espessura da ordem de 10 metros e também acentuadas variações laterais nos teores de Al, Si e Fe (ALCOA, 2005; CELSO, 2014; BRETAS, 2014).

Na macro área Juruti, o depósito de bauxita, correspondente aos platôs Mauari, Guaraná, Capiranga e Central, apresenta um topo aplainado, com cotas da ordem de 130 metros a 140 metros, com encostas abruptas e bastante ravinadas, recortadas por inúmeras drenagens. Em geral, o desnível pode atingir mais de 80 metros em relação ao nível do Lago Grande do Juruti. O perfil geológico apresenta horizontes de bauxita relativamente bem definidos e contínuos (ALCOA, 2005).

O perfil litológico típico do depósito de Juruti é apresentado na Figura 5.

Figura 5: Perfil litológico típico dos platôs Capiranga, Mauari e Guaraná – Juruti/PA.



Fonte: ALCOA, 2005.

O depósito de Juruti corresponde a um horizonte laterítico posicionado no topo dessa sequência, o qual pode ser dividido em três zonas distintas: argila bel-terra, zona de laterita concrecionária e argila variegada (argilito metamorfisado). Por sua vez a zona de laterita pode ser subdividida em três subzonas: Bauxita Nodular, Laterita Ferruginosa e Bauxita Maciça (ALCOA, 2005).

O perfil litológico da área da mina de Juruti (Figura 5) pode ser descrito partindo-se do topo para a base como (ALCOA, 2005; BRETAS, 2014):

- Solo orgânico: Formado por material decomposto, apresentando uma espessura média de 30 cm.
- Argila amarela: Também chamada de Argila Belterra, consiste em uma cobertura de argila caulinítica, amarelada, bem uniforme e permeável, cuja espessura varia de 1 a 12 metros.
- Bauxita Nodular: É um horizonte descontínuo pode chegar a uma espessura de 6m. Formado por nódulos de gibbsita de tamanhos variados dentro de uma matriz caulinítica. São comuns neste horizonte nódulos ferruginosos que conferem elevados teores nas análises de Fe_2O_3 e esse conteúdo de ferro tende a aumentar com a profundidade. Como regra geral, os pequenos nódulos apresentam, após o processo de lavagem do material, um teor mais elevado em SiO_2 do que os maiores nódulos, devido a sua maior superfície relativa exposta à contaminação de argila.
- Laterita: Corresponde a um horizonte de baixo teor de sílica e com espessura que varia de 0 a 3 metros. Possui consideráveis variações de dureza, textura, cor, relação ferro-alumina e conteúdo de sílica. Em alguns locais, esse material pode ser classificado como bauxita ferruginosa, face ao seu alto teor em Al_2O_3 . No entanto esse horizonte é bem característico por causa da presença de altas concentrações de Fe_2O_3 .
- Bauxita Maciça: É o principal horizonte mineralizado e de valor econômico. A espessura varia de 0 a 6 metros e é constituído principalmente de gibbsita (45% a 85%), hematita (6% a 40%) e caulinita (6% a 32%) e contém, em menores proporções, noselita do grupo da sodalita, quartzo e anatásio. Sempre apresenta uma substituição gradativa com o horizonte superior do Fe_2O_3 por SiO_2 . A dureza, textura e coloração variam com o teor de ferro e conteúdo em argila.
- Argila Variegada: É composto de argilas cauliníticas de cores variegadas, em geral avermelhadas e arroxeadas. Pode conter eventualmente gibbsita.

3.6 MÉTODO DE LAVRA EM TIRAS (*STRIP MINING*)

Os métodos de lavra dos minérios variam de acordo com a forma, estrutura e profundidade do corpo mineralizado (SAMPAIO *et al.*, 2008). Os métodos tradicionais dividem-se em duas grandes categorias: a céu aberto ou subterrâneo. A lavra a céu aberto ocorre em superfície e inclui os métodos mecânicos, tais como lavra por bancadas e por tiras, e métodos hidráulicos, tais como lavra com soluções e de placers (SOUZA, 1994).

A lavra por tiras (*strip mining*) é realizada principalmente em jazidas de camadas horizontais (*stratabound*), com espessura de minério menor que as grandes dimensões laterais (SOUZA, 1994). A lavra de bauxita é feita, na maior parte, por esse método. Menos de 20% das lavras de bauxita é feita por métodos subterrâneos (SAMPAIO *et al.*, 2008; RÖHRLICH *et al.*, 2001).

O método de lavra por tiras é semelhante às operações de lavra por bancadas mas se diferenciam principalmente pelo fato de o capeamento não ser transportado para uma pilha de estéril mas ser depositado diretamente nas áreas adjacentes já lavradas (HARTMAN & MUTMANSKY, 2002).

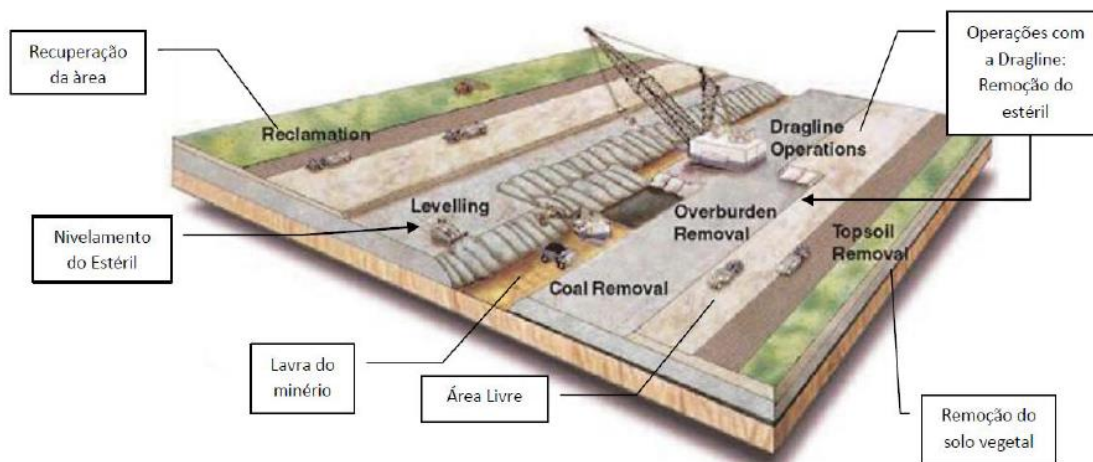
De acordo com Hartman e Mutmanský (2002), as condições para a aplicação do método de lavra por tiras são:

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

A lavra em tiras ocorre por meio de uma série de cortes longos e paralelos com alta relação comprimento/largura. A largura dos cortes é função do tamanho do equipamento usado e pelo fato do manuseio do material estéril ser feito por apenas um tipo de equipamento faz deste método o de maior produtividade e menor custo unitário dentre os de métodos a céu aberto (HARTMAN, 1992; PERONI, 2007).

A remoção de estéril ocorre sequencialmente até que a camada de minério seja exposta com o volume de material movimentado em cada corte sendo depositado na tira anterior na qual a remoção do minério já foi concluída, como mostra a Figura 6.

Figura 6: Operações de lavra no método strip mining.



Fonte: SILVA, 2014.

Por conciliar as operações de extração mineral e disposição de estéril evitando a ocupação de novas áreas e os impactos ambientais decorrentes, o método de lavra em tiras é considerado um dos mais corretos sob a óptica ambiental (ALCOA, 2005).

As operações unitárias da lavra por tiras são supressão vegetal, remoção do solo orgânico, decapeamento, perfuração, desmonte de rocha (com ou sem explosivo), carregamento e transporte (HARTMAN & MUTMANSKY, 2002). Não necessariamente todas as jazidas utilizam todas essas etapas. Na Figura 7 podemos ver algumas das operações unitárias da lavra em tiras.

Figura 7: Operações unitárias do método de lavra por tiras.



Fonte: RODOVALHO, 2014.

Segundo Hartman e Mutmanský (2002) algumas vantagens da lavra por tiras são:

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

E entre as desvantagens do método é possível citar:

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

3.7 DECAPEAMENTO E LAVRA EM JURUTI

3.7.1 DECAPEAMENTO

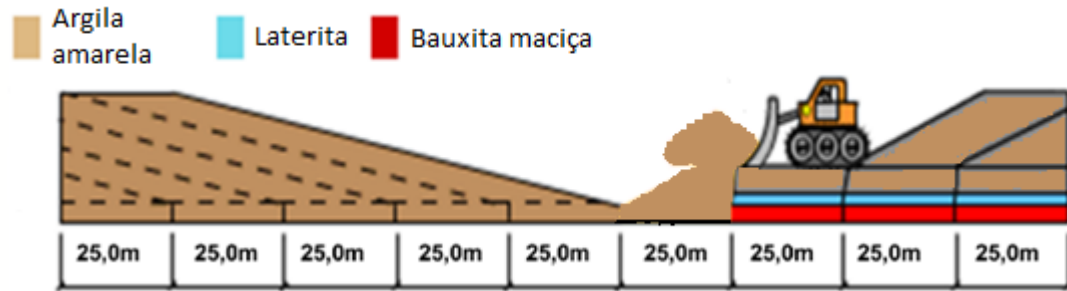
O decapeamento tem por objetivo a liberação da camada de minério que se encontra abaixo da camada de estéril. No caso da lavra de bauxita, o estéril é composto de um solo argiloso e laterita. Na mina de Juruti entende-se como estéril as camadas de bauxita belterra e laterita e em alguns casos especiais também a bauxita nodular (ALCOA, 2006; ALCOA, 2014).

Eventualmente, a bauxita nodular e a laterita podem ser incorporadas ao ROM (*run of mine*). A bauxita nodular apresenta um alto teor de alumina mas também um elevado teor de sílica tornando necessário a blendagem para evitar uma qualidade insatisfatória ou problemas operacionais no beneficiamento. Já a laterita, que é um material ferruginoso, é incorporado ao ROM com a vantagem de aumentar a reserva da mina ou corrigir teores de ferro e alumina, no entanto, na mina de Juruti, é necessário aprovação das gerências de planejamento e beneficiamento para tal feito (ALCOA, 2014; BRETAS, 2014).

Nos casos em que a bauxita nodular e a laterita não são incorporadas ao ROM elas são utilizadas na construção de pavimentos seguros e aderentes nas estradas e rampas da mina. De modo geral, todos os materiais que são considerados estéril na mina possuem alguma finalidade. A argila belterra pode ser utilizada em leiras de proteção e no nivelamento das futuras áreas de revegetação (ALCOA, 2009).

Na atividade de decapeamento podem ser utilizados equipamentos de médio a grande porte, como draglines, tratores de esteira e escavadeiras hidráulicas. Na mina de Juruti, para essa etapa, são utilizados bulldozers e escavadeiras hidráulicas. Tudo depende da espessura da camada de argila no local. Caso esta seja maior que 12m, haverá um rebaixe utilizando escavadeiras e caminhões para a remoção da argila. Quando a altura da tira atinge 12m, utiliza-se os bulldozers. Os tratores cortam o material estéril num ângulo pré-determinado e o empurram para a tira imediatamente anterior, de onde já foi removido o minério como mostra o esquema da Figura 8. As dimensões das tiras são 25 metros de largura e 200 metros de comprimento. Após o fechamento da tira inicia-se a construção do depósito de estéril e para isso o trator constrói seu próprio pavimento, à medida que transporta o material e inicia uma leve subida no sentido contrário ao avanço da lavra, construindo o depósito de estéril (ALCOA, 2006; ALCOA, 2007; ALCOA, 2014).

Figura 8: Remoção de estéril feita por trator de esteira.



Após a remoção de toda argila belterra pode haver bauxita nodular ou laterita dependendo da região da mina. Ambos materiais possuem uma dureza mais acentuada e necessitam de desmonte. O desmonte mecânico é realizado pelos próprios tratores, que são equipados com um conjunto de shank e ripper (Figura 9) posicionados na parte posterior do mesmo. O ripper é a estrutura metálica que recebe e sustenta o shank que por sua vez, é a superfície cortante propriamente dita que promove o desmonte mecânico. Esse desmonte mecânico é denominado como Escarificação. Após ser escarificada e empilhada por tratores de esteiras, parte da laterita será transportada pelas escavadeiras hidráulicas para a tira anteriormente lavrada e, o restante, utilizada para a infraestrutura da mina (ALCOA, 2005; ALCOA, 2014; CELSO, 2014).

Figura 9: Escarificadores.



Fonte: ABREU, 2017.

3.7.2 LAVRA

Com a camada de bauxita maciça exposta é realizada a escarificação do minério, a qual também é realizada com tratores de esteira. Após a escarificação a área é nivelada para a entrada das escavadeiras hidráulicas e caminhões rodoviários que irão fazer o carregamento e transporte

do minério. As escavadeiras são posicionadas na parte superior da tira enquanto os caminhões podem se posicionar paralelamente. Essa técnica possui três vantagens: a primeira é a maior segurança da mina e dos operadores por não haver lançamento de projéteis, uma vez que os equipamentos estão na mesma cota; a segunda, é a melhor seletividade, pois o operador consegue ver o contato entre a bauxita maciça e a argila variegada e, a terceira, é facilidade de drenagem das frentes de escavação garantindo uma boa operacionalidade mesmo no período chuvoso (ALCOA, 2005; ALCOA, 2016).

Os caminhões carregados se dirigem pelas estradas de acesso até o britador ou até as pilhas pulmões. É válido frisar que as empresas buscam reduzir o percurso à menor distância média de transporte (DMT) e, conseqüentemente, reduzir o consumo de combustível e desgaste dos equipamentos. Todas as estradas da mina de Juruti possuem seu piso na cota do minério, com exceção daquelas que dão acesso às frentes no piso inferior. As dimensões das estradas variam sendo a estrada principal com largura 30 m e as de acesso às frentes de lavra com largura de 25m. A unidade de Juruti apresenta uma DMT média entre 5km e 6km e, por enquanto, apenas um sistema fixo de britagem (ALCOA, 2005; SOUZA, 2013).

O minério pode ser basculado diretamente na moega do britador primário ou então em pilhas pulmões no pátio ao lado deste. O minério só é basculado nas pilhas pulmões caso o britador esteja parado por alguma razão e, posteriormente, esse material é retomado por carregadeiras de pneus.

O beneficiamento da bauxita é composto apenas das etapas de britagem primária, britagem secundária, deslamagem, peneiramento, ciclonagem, filtragem e pilhas de estocagem. O processo é relativamente simples quando comparado a outros minérios, como o de ferro, e isso é devido ao alto teor dos minérios de alumínio fazendo com que o processo de beneficiamento da bauxita seja basicamente uma lavagem eficiente do material para se retirar a argila e ultrafinos, o que garante teores e granulometria necessária para a etapa seguinte de digestão com soda cáustica (ALCOA, 2005; LACERDA, 2014).

3.8 PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional (PO) surgiu no século XX, na Inglaterra, durante a Segunda Guerra Mundial, quando cientistas foram convocados para estudar problemas de estratégias e táticas militares com o objetivo de tomar as melhores decisões sobre a utilização de recursos limitados.

Após o fim da guerra, essa metodologia de abordagem de problemas foi transferida para as empresas que sofriam com problemas de grande complexidade resultado do crescimento econômico da época. Com a evolução da informática foi criada condições para a criação de algoritmos e maior velocidade de processamento adaptados aos problemas que surgiam (PEREIRA, 2016).

A Pesquisa Operacional abrange ciências como economia, estatística, matemática e computação e é uma ciência aplicada que tem por objetivo fornecer ferramentas quantitativas para melhorar o desempenho de organizações auxiliando na tomada de decisões através da formulação de modelos matemáticos que podem ser resolvidos com o auxílio de computadores (ANDRADE, 2004; DÁVALOS, 2002).

Um estudo de PO consiste na construção de um modelo de um sistema real e a posterior análise e compreensão de seu comportamento, objetivando a geração de cenários alternativos que auxiliarão na tomada de decisão (NETO & PINTO, 2004; COSTA *et al*, 2005).

A criação de um modelo exige o desenvolvimento de uma capacidade de interação com o problema, com seus agentes, com a escassez de recursos e com seu meio ambiente (RAO, 1996). A complexidade de um sistema real é devido ao fato de seu comportamento ser influenciado por um grande número de variáveis, no entanto, mesmo um sistema que envolva um grande número de variáveis, tem seu comportamento influenciado por uma quantidade reduzida de variáveis principais (PEREIRA, 2016). A identificação dessas variáveis principais é o primeiro passo para a construção de um modelo.

A modelagem de um problema de PO pode ser realizada seguindo etapas que podem ou não serem seguidas de forma rígida. A primeira etapa é a definição do problema de interesse e coletar dados que consiste na definição dos objetivos a serem atingidos, as variáveis envolvidas no problema, e as principais restrições. A segunda etapa é a construção do modelo matemático que melhor representa o problema real. A terceira etapa é a solução do modelo onde são realizadas experimentações a fim de encontrar soluções para o problema a partir do modelo criado. Ao se encontrar a solução, é dado início a quarta etapa, na qual o modelo é testado com intuito de verificar se a solução obtida é condizente com o problema estudado. Um modelo é considerado válido se for capaz de representar de forma aceitável o comportamento do sistema e que contribua para a qualidade da tomada de decisão. Um método comum para validar um modelo é analisar o seu desempenho com dados passados do sistema e verificar se este reproduz ou não o comportamento

que o sistema manifestou na realidade. E por fim, tem-se a etapa de implementação da solução onde serão criadas regras operacionais para a solução do problema real. Quando levados à prática, os valores da nova solução podem necessitar de correções exigindo a reformulação de partes do modelo (HILLIER & LIEBERMAN, 2010; PEREIRA, 2016; SANTOS, 2008).

Para os problemas de PO, os modelos mais usuais são os de otimização e de simulação. Os modelos de otimização não permitem flexibilidade na escolha da alternativa, uma vez que são construídos para indicarem apenas uma solução que poderá ser considerada ótima segundo algum critério. Já os modelos de simulação possuem um maior grau de liberdade e flexibilidade com relação à escolha da ação e possibilitam a análise de diversos cenários para o processo de decisão (PEREIRA, 2016).

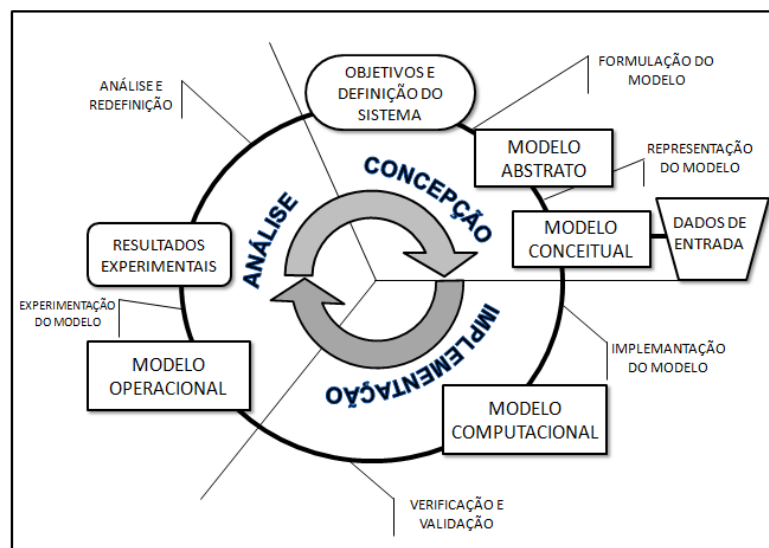
3.9 SIMULAÇÃO

A simulação é uma ferramenta importante que busca emular o funcionamento de sistemas reais, usando distribuições de probabilidade, com a finalidade de observar seu comportamento em diversos cenários diferentes (DUARTE, 2003). Ou seja, um modelo de simulação sintetiza o sistema construindo-o parte por parte e em seguida faz a execução do sistema simulado para obter observações estatísticas do desempenho do mesmo (HILLIER & LIEBERMAN, 2010). Logo, a simulação é uma importante ferramenta para obtenção de respostas de perguntas do tipo: “o que ocorre se...” (CHWIF & MEDINA, 2015).

De acordo com Chwif e Medina (2015) a simulação pode ser dividida em duas categorias: a simulação computacional e a simulação não computacional. A simulação computacional é aquela que necessita de computador para ser realizada devido à complexidade dos cálculos, enquanto a não computacional não necessita desta ferramenta.

O desenvolvimento de um modelo de simulação é composto de 3 etapas: concepção, implementação e análise dos resultados, como mostra a Figura 10.

Figura 10: Metodologia de simulação.



Fonte: CHWIF & MEDINA, 2015.

Na primeira etapa, a de concepção, o analista deve entender o sistema a ser simulado e deve definir os objetivos do projeto, bem como o escopo do estudo, suas hipóteses e nível de detalhamento (RODOVALHO, 2013; COSTA *et al*, 2009). Nessa primeira etapa é criado um modelo conceitual que deve ser uma descrição do modelo computacional que se deseja construir. É nessa etapa também que os dados de entrada são coletados mas é importante salientar que o modelo é que deve dirigir a coleta de dados, e não o contrário (ANDRADE, 2011). O modelo conceitual criado deve ser representado com alguma técnica que ajude as outras pessoas envolvidas no projeto a entendê-lo como fluxogramas e mapa de processos (COSTA *et al*, 2009).

Na segunda etapa, a de implementação, é criado o modelo computacional utilizando alguma linguagem de simulação ou software. Após a criação o modelo computacional deve ser verificado e validado e para isso é comparado frente ao modelo conceitual para verificar se a sua operação atende ao que foi estabelecido na etapa anterior e sua validação ocorre observando-se se o modelo é uma representação precisa da realidade dentro dos objetivos já estipulados (COSTA *et al*, 2009; RODOVALHO, 2013).

Na terceira etapa, a análise, o modelo computacional está pronto para a realização dos experimentos os quais consistem na criação de cenários visando a obtenção de valores quantitativos que justifiquem as tomadas de decisão experimentadas. Em outras palavras, o modelo computacional dá origem ao modelo experimental que, ao ser executado, gera resultados que

possibilitam prever mudanças de comportamento do sistema analisado, auxiliando assim nas tomadas de decisões (RODOVALHO, 2013).

A simulação é uma ferramenta eficiente e que pode ser aplicada em todos os seguimentos industriais incluindo a mineração na qual seu uso é uma tendência. Neto e Pinto (2004) apontam pontos positivos do uso da simulação no setor mineral como:

- Permitir ao Engenheiro de minas ou administrador tirar conclusões sobre novos sistemas sem sua experimentação direta e/ou fazer mudanças ou testes de novas políticas nos sistemas já existentes sem perturbações da produção e sem implementá-los efetivamente.
- Melhorar a percepção geral da natureza de um processo, através da animação de sistema no computador.
- Identificar gargalos na produção.
- Estudar o dimensionamento e seleção de equipamentos utilizados nas operações da mina, como caminhões e equipamentos de carga.
- Determinar um local ótimo para o britador primário em relação a cava da mina.
- Testar a viabilidade de implantação de um sistema de alocação dinâmica de caminhões.
- Dimensionar a capacidade de silos, britadores e pilhas de estoque.
- Determinar o impacto, na produção da mina, do uso de um britador com descargas simultâneas de caminhões.
- Dimensionar sistemas para escoamento da produção usando trens e navios.
- Determinar a influência da disponibilidade de equipamentos e outros índices mecânicos, na produção da mina.

A seguir estão descritos os elementos básicos para que uma modelagem possa representar o que acontece na realidade:

- Entidades: As entidades são itens, que se movem, mudam de *status*, afetam e são afetados por outras entidades e pelo próprio sistema e que necessariamente, interferem nas respostas (*output*) do mesmo. As entidades representam objetos reais (clientes, documentos, equipamentos) ou abstratos (informação) e podem ser temporárias ou permanentes. As entidades temporárias são objetos dinâmicos na simulação que geralmente são criados, deslocam-se por um tempo e depois são descartados do sistema, já as entidades permanentes se mantêm circulando no sistema durante todo tempo de simulação. No entanto, todas as entidades precisam ser “criadas” no modelo. É

possível existirem vários tipos de entidades em um mesmo modelo de simulação e cada tipo de entidade pode possuir várias ações. Cada entidade possui características próprias que as definem e estas características são denominadas atributos (KELTON *et al*, 2010; RABELO, 2006).

- **Atributos:** Os atributos são como “etiquetas” que são estampados nas entidades e que podem ser usados na hora de tomadas de decisões durante a simulação. Os atributos individualizam as entidades, ou seja, um atributo é como uma etiqueta fixada a cada entidade, mas o que está escrito sobre esta etiqueta pode ser diferente para cada entidade caracterizando-as individualmente (RABELO, 2006). De modo geral, o mesmo atributo geralmente tem valores diferentes para diferentes entidades e estes podem ser alterados durante o percurso da entidade no fluxo, no entanto, a mudança é referente apenas àquela entidade específica (FREITAS FILHO, 2008). Para realizar alterações em valores de utilização global no sistema deve ser utilizado as “variáveis” e não os atributos (KELTON *et al*, 2010).

- **Variáveis:** Diferentemente de um atributo que pertence exclusivamente a uma única entidade que se move pelo sistema, as variáveis são acessíveis para qualquer entidade, ou seja, se referem ao sistema como um todo e muitas das variáveis podem ser alteradas por qualquer uma das entidades (COSTA & PEREIRA, 2009; FREITAS FILHO, 2008). Variáveis são partículas de informação que refletem alguma característica do sistema e independem do número ou tipo de entidades que o modelo possui. Podem existir muitas variáveis em um dado modelo, mas cada uma é única e podem ser de dois tipos: variáveis embutida, as quais são geradas pelo próprio sistemas ou variáveis definidas pelo usuário (KELTON *et al*, 2010).

- **Recursos:** Os recursos são elementos que não se movem no sistema (entidade estática) e sim são alocados para as entidades (entidades dinâmicas) (FREITAS FILHO, 2008). Não são necessariamente um objeto imóvel, mas é que este não se movimenta pelo “fluxo lógico” do modelo. Possuem uma capacidade finita que pode ou não variar com o tempo e possuem um conjunto de estados (ocupado, em espera, inativo, em falha, etc.) que se alteram com o decorrer da simulação e de acordo com a lógica do sistema modelado (KELTON *et al*, 2010; COSTA & PEREIRA, 2009). A capacidade de um recurso refere-se ao número de entidades que podem reservá-lo ao mesmo tempo (capacidade define processamento em paralelo), enquanto que a quantidade de um recurso refere-se ao número de recursos que serão empregados (quantidade representa processamento em série) (RABELO, 2006).

- **Filas:** As entidades que não podem continuar seguindo normalmente no fluxo do modelo ficam armazenadas nas filas. Estas funcionam como um reservatório de entidades que entram e saem conforme o status do sistema associado a elas muda. As entidades entram em uma fila quando esta precisa utilizar uma unidade de um recurso para realizar uma dada atividade e este está sendo utilizado por outra entidade (recurso está ocupado ou indisponível) (KELTON *et al*, 2010; RABELO, 2006).

- **Acumuladores estatísticos:** Para começar a mensurar o desempenho dos dados de saída é necessário acompanhar várias variáveis com a ajuda de um acumulador estatístico conforme o andamento da simulação. Em uma mina, por exemplo, podemos acompanhar variáveis como: produção acumulada de ROM, remoção acumulada de estéril, tempo total de espera na fila de carregamento, etc. No entanto, todos esses acumuladores devem ser inicializados com 0 e quando algo acontecer na simulação, é necessário atualizar os acumuladores afetados da maneira apropriada (KELTON *et al*, 2010).

- **Eventos:** Um evento é um acontecimento ou ocorrência, programados ou não, que acontece em um determinado instante e que pode alterar ou não os atributos, variáveis, ou acumuladores estatísticos do sistema (FREITAS FILHO, 2008). Essencialmente, os eventos ocupam uma posição central nos modelos de simulação e no caso de uma mina é possível citar como exemplos de eventos que podem acontecer: a chegada de um caminhão na praça de carregamento, a partida deste (conclusão da carga) e por fim o basculamento. No caso de um modelo discreto, as variáveis não se alteram entre eventos sucessivos. De modo geral, a maioria do trabalho em simulação consiste em perceber a lógica correta de acontecimento dos eventos (KELTON *et al*, 2010).

- **Relógio de simulação:** Na simulação, o tempo é uma variável chamada de relógio de simulação e este, ao contrário do tempo real, não flui continuamente mas, pode sofrer grandes mudanças seguindo a ordem de acontecimento dos eventos do modelo. Acompanhar e observar o relógio de simulação são extremamente importantes para qualquer simulação dinâmica (KELTON *et al*, 2010).

3.10 SOFTWARE ARENA

O software Arena surgiu em 1993 pela junção de dois outros softwares chamados SIMAN e CINEMA. O SIMAN é uma linguagem de simulação que em 1983 deu nome ao primeiro software

de simulação para computadores pessoais e já o CINEMA surgiu em 1984 e foi o primeiro software de animação de simulação para computadores pessoais (PRADO, 1999). No Brasil, o Arena é representado pela Paragon Tecnologia Ltda. e, de acordo com a empresa, ele é um ambiente gráfico integrado de simulação, que contém todos os recursos para modelagem, animação, análise estatística e análise de resultados. O software também trabalha com a abordagem por processos para execução da simulação, ou seja, uma situação onde elementos estáticos, formando um ambiente bem definido com suas regras e propriedades, interagem com elementos dinâmicos, que fluem dentro desse ambiente (NETO & PINTO, 2004; PRADO, 1999).

O Arena segue os padrões MS Office®, com comandos, botões e menus que agregam funções semelhantes às encontradas em outros softwares Windows®. A construção do modelo de simulação no Arena é feita através dos elementos disponibilizados nos templates e estes elementos são denominados módulos. Os módulos podem ser de dois tipos:

- **Módulos de Fluxograma:** são usados para construir o fluxograma dentro da área de trabalho do software e cada módulo pode ser usado quantas vezes se fizerem necessárias para a construção do modelo. Estes módulos possuem pontos de entrada e saída que são usados para estabelecer interconexões e criar o fluxo do processo. Um duplo clique neste módulo abre uma janela que permite configurar as ações referentes a ele mas é possível também editar estes dados na janela de planilha, que fica logo abaixo da área de trabalho (COSTA & PEREIRA, 2009; RABELO, 2006).
- **Módulos de Dados:** estes módulos não são colocados na área de trabalho. Ao serem selecionados, apresentam sua lista de dados na área de planilha, onde podem ser editadas, excluídas ou inseridas novas informações (COSTA & PEREIRA, 2009; RABELO, 2006).

A seguir são apresentados alguns dos módulos utilizados no desenvolvimento dos modelos deste trabalho:

- *Create:* Este módulo de fluxograma serve para introduzir as entidades no modelo segundo intervalos de tempo definidos.
- *Process:* Esse módulo de fluxograma tem a função de representar qualquer ação dentro do sistema que leve um tempo para ser cumprida. Também é capaz de representar a ocupação de um recurso.
- *Assign:* Esse módulo serve para definir, alterar ou associar valores às variáveis, aos atributos de entidades, alterar a figura das entidades e outros parâmetros ou variáveis do sistema.

- *Hold*: Nesse módulo a entidade aguarda que uma determinada condição se torne verdadeira para prosseguir no fluxo de simulação.
- *Decide*: Esse módulo representa uma ramificação no fluxo do processo. Permite a modelagem de tomada de decisões no sistema.
- *Record*: Esse módulo é usado para coletar informações estatísticas que vão além daquelas que são mostradas no relatório padrão que surge depois da simulação. Essas informações podem ser volume de minério ou estéril extraído ou número de viagens realizadas pelos caminhões.
- *Dispose*: Esse módulo é o fim do fluxo do processo para as entidades, onde as entidades são removidas da simulação.

3.11 DETERMINAÇÃO DE INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA INDICADORES DE DESEMPENHO

Segundo Taha (2008), a simulação imita o comportamento aleatório de um sistema real utilizando modelos para estimar as medidas de seus indicadores de desempenho. Os intervalos de confiança para médias populacionais podem ser utilizados para realizar interferências estatísticas sobre um determinado parâmetros (indicador de desempenho) do sistema (DESTRO, 2015). Portanto, os resultados emitidos pelos relatórios de uma simulação devem ser vistos como uma amostra em um experimento estatístico e, por isso, devem ser expressos na forma de intervalos de confiança (TAHA, 1988; DESTRO, 2015). Neste trabalho, a simulação foi repetida 30 vezes e, ao final de cada replicação, os valores das três medidas de desempenho eram armazenados. Desta forma, os dados armazenados constituíram uma amostra aleatória simples para cada medida de desempenho, condição necessária avaliação destas através dos limites do intervalo de confiança (DESTRO, 2015). Os limites do intervalo de confiança bilateral para o valor verdadeiro da média do indicador de desempenho do sistema podem ser calculados através da relação (DESTRO, 2015):

$$\bar{x} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \theta \leq \bar{x} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Sendo:

θ :valor verdadeiro da média do parâmetro de interesse (média populacional);

$\bar{x}$: média amostral do par metro que está sendo estimado;

s : desvio padrão amostral;

$t_{\alpha/2, n-1}$: valor crítico (ou escore t crítico) da Distribuição t de Student para um nível de significância α e $n - 1$ graus de liberdade (notação $\alpha/2$ para intervalo de confiança bilateral);

n : tamanho amostral;

α : nível de significância.

O *software* Arena realiza o cálculo desses limites do intervalo de confiança e o apresenta através da meia largura (*half width*) emitida nos relatórios finais de simulação (DESTRO, 2015). Outro fator considerado para a análise estatística dos resultados deste trabalho foi o erro percentual. O erro percentual ou relativo é o erro que afeta a grandeza medida, expresso como porcentagem do valor medido da grandeza (CRUZ, 1997). O erro percentual é calculado de acordo com o valor da meia largura encontrado nos relatórios de simulação e através da expressão:

$$(\Delta \bar{x})_r = \frac{\Delta \bar{x}}{\bar{x}} \times 100 \%$$

Onde:

$\Delta \bar{x}$: erro absoluto ou meia largura;

$\bar{x}$: valor média da medida de desempenho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho envolveu as seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica sobre os principais assuntos abordados;
- Descrição das características da mina;
- Coleta de dados de tempos dos equipamentos do decapeamento e lavra de mina;
- Coleta de informações referentes às manutenções dos equipamentos;
- Tratamento dos dados coletados;
- Construção dos modelos de simulação do decapeamento e lavra no software Arena;
- Identificação e correção de erros de programação;
- Análise dos relatórios gerados pelo programa de simulação.

4.1 COLETA DE DADOS

Os tempos de ciclo dos tratores, caminhões basculantes e escavadeiras foram coletados através do sistema Mining Control da empresa Fast2mine. O Mining Control é um software de controle operacional e gerenciamento de equipamentos aplicado a mineração (FAST2MINE, 2019). Com esse software é possível gerenciar de forma online os tempos unitários que envolvem os ciclos das atividades, indicadores operacionais de disponibilidade física, utilização, produtividade e outros (FAST2MINE, 2019).

Foi realizado um teste, com duração de um mês, utilizando o Mining Control, onde foram instalados tablets nos equipamentos (tratores, caminhões e escavadeiras) para o monitoramento das atividades dos mesmos. A frota dos equipamentos do estéril é composta por 19 caminhões basculantes, 5 tratores D11R e 7 tratores D11T_CD além de 3 escavadeiras 365C. Já a frota dos equipamentos do minério é composta por 30 caminhões basculantes, 2 tratores D11, 3 escavadeiras 336D e 3 escavadeiras 349D. No entanto, os tablets foram instalados em apenas 1 escavadeira do estéril, 1 escavadeira do minério, 1 caminhão do estéril, 1 caminhão do minério, 1 trator do minério e 1 trator do estéril e os parâmetros operacionais coletados foram apenas referentes à estes equipamentos. Os dados coletados por esses tablets foram utilizados para o desenvolvimento das curvas de distribuição utilizadas nos modelos de simulação.

Os dados de manutenção foram extraídos de relatórios diários enviados pela equipe de manutenção e foram utilizados para os cálculos de MTBF (Tempo médio entre falhas) e MTTR (Tempo médio de falha) das frotas de tratores D11 e escavadeiras hidráulicas.

4.2 TRATAMENTO DOS DADOS

Após a análise dos relatórios do teste realizado pelo Fast2Mine, os dados referentes aos tempos de ciclo operacionais dos equipamentos de carga e transporte foram processados e organizados em planilhas no Microsoft Excel.

Como a coleta de dados do Fast2Mine se procedeu apenas durante 30 dias e em apenas alguns equipamentos, os tempos de ciclo do equipamento monitorado foi generalizado para os demais equipamentos da frota correspondente.

As variáveis utilizadas e definidas durante a construção dos modelos estão descritas no quadro que se encontra nos APÊNDICES.

Nas Tabelas 1 e 2 foram colocadas o nome das entidades, variáveis, atributos e recursos/set utilizados nos modelos do decapeamento e da lavra, respectivamente.

Tabela 1: Dados do modelo de Decapeamento.

Entidades	Nº máximo
Frente	1
Caminhão de estéril	19
Variáveis	Unidade
Prod_laterita_plan	m ³
Prod_argila_rebaixe_plan	m ³
Prod_argila_plan	m ³
Altura da camada de argila	m
Tipo de D11 na argila	-
Tipo de D11 na laterita	-
Atributos	Unidade
Capacidade dos caminhões de estéril	21 m ³

Capacidade dos tratores D11T_CD	40,4 m ³
Capacidade dos tratores D11R	43,6 m ³
Recursos/Set	Unidades Disponíveis
Set_D11R	5
Set_D11T_CD	7
Set_EH_365C	3
Equipe de topografia	1

Tabela 2: Dados do modelo de Lavra.

Entidades	Nº máximo
Frente	1
Caminhão de minério	30
Variáveis	Unidade
Prod_minério_plan	m ³
Tipo de minério	-
Tipo de EH	-
Atributos	Unidade
Capacidade dos caminhões de minério	37t / 23m ³
Recursos/Set	Unidades Disponíveis
Britador	1
Equipe de topografia	1
Set_EH_336D	3
Set_EH_349D	3
Set_D11	2

A análise do comportamento dos dados de tempo de escarificação, decapeamento, carregamento, basculamento e deslocamento foi realizada utilizando o Input Analyzer que é o

analisador de dados do ARENA. Dessa forma, foi possível identificar uma distribuição teórica de probabilidade que se ajusta a cada conjunto de dados.

Quando nenhuma distribuição teórica se ajustava aos dados foi utilizada a distribuição empírica CONT que nada mais é do que o histograma acumulado crescente dos dados da variável. Quando não se tinha um número suficiente de dados para se obter um ajuste ou a distribuição empírica com representatividade estatística, definiu-se um valor fixo, normalmente, uma média dos dados.

Já os dados de tempo de levantamento topográfico, foram inseridos no próprio módulo process da atividade, pois não havia dados suficientes para realizar a análise no software Arena. Foi arbitrado um tempo constante de 15 minutos como uma aproximação para representar a duração dessa atividade.

Os dados de MTBF e MTTR foram calculados de acordo com os relatórios da equipe de manutenção e para os tratores D11 e escavadeiras do estéril, foram determinados uma curva de distribuição para o MTBF e outra para o MTTR que foram utilizadas para toda a frota (Tabela 3). Já para as escavadeiras do minério não havia dados suficientes para a determinação de uma curva de distribuição, por isso foram calculados um valor para o MTBF e outro para MTTR das escavadeiras do minério (Tabela 4).

Tabela 3: MTBF e MTTR do modelo de Decapeamento.

Falhas	Curva MTBF (h)	Curva MTTR (h)
Frota_D11	$-0.001 + 239 * \text{BETA}(0.781, 1.34)$	$2 + \text{WEIB}(4.98, 2.19)$
Frota_EH	$-0.001 + \text{EXPO}(29.3)$	$\text{TRIA}(0, 8, 16)$

Tabela 4: MTBF e MTTR do modelo de Lavra.

Falhas	MTBF (h)	MTTR (h)
D11	69.068	5.131587
EH 336D	128.3508	5.681935
EH 349D	152.8308	5.648817
Britador	23,94552632	1,480263158

Na Tabela 5 são apresentados os tipos, expressões, médias e desvios padrão das distribuições de probabilidade dos tempos de ciclo inseridos no modelo do decapeamento.

Tabela 5: Curvas de distribuições de probabilidade das atividade do modelo do decapeamento.

Atividade	Curva	Recurso utilizado
Levantamento do primitivo	Constante = 15 min	Equipe de topografia
Manobra vazio de argila	CONT(0.000, ... , 0.030)	-
Carregamento de argila com EH365C	CONT(0.000, ... , 0.060)	Set_EH_365C
Transporte de argila	CONT(0.000, ... , 0.140)	-
Manobra cheio de argila	CONT(0.000, ... , 0.030)	-
Basculamento de argila	CONT(0.000, ... , 0.040)	-
Volta para frente de rebaixe	CONT(0.000, ... , 0.140)	-
Deslocamento do D11 T_CD	CONT(0.000, ... , 2.490)	Set_D11T_CD
Deslocamento do D11R	CONT(0.000, ... , 2.490)	Set_D11R
Remoção da argila com D11T_CD	CONT(0.000, ... , 0.340)	Set_D11T_CD
Remoção da argila com D11R	CONT(0.000, ... , 0.340)	Set_D11R
Escarificação da laterita com D11T_CD	0.06 + GAMM(0.00396, 7.82)	Set_D11T_CD
Escarificação da laterita com D11R	0.06 + GAMM(0.00396, 7.82)	Set_D11R
Remoção de laterita com D11T_CD	LOGN(0.0452, 0.0328)	Set_D11T_CD
Remoção de laterita com D11R	LOGN(0.0452, 0.0328)	Set_D11R

Na Tabela 6 são apresentados os tipos, expressões, médias e desvios padrão das distribuições de probabilidade dos tempos de ciclo inseridos no modelo da lavra.

Tabela 6: Curvas de distribuições de probabilidade das atividades do modelo de lavra.

Atividade	Curva	Recurso utilizado
Levantamento do topo do minério	CONT(0.000, ... , 0.830)	Equipe de topografia
Escarificação do minério	0.06 + GAMM(0.00396, 7.82)	Set_D11
Manobra vazio de minério	CONT(0.000, ... , 0.140)	-
Carregamento com EH_336D	CONT(0.000, ... , 0.130)	Set_EH_336D
Carregamento com EH_349D	CONT(0.000, ... , 0.110)	Set_EH_349D
Transporte do minério	0.05 + 0.27 * BETA(0, 0)	-
Manobra cheio de minério	CONT(0.000, ... , 0.080)	-
Basculamento de bruta no britador	0.01 + ERLA(0, 0)	Britador
Basculamento de bruta no pulmão de bruta	0.01 + ERLA(0, 0)	Britador
Basculamento de lavado no britador	0.01 + ERLA(0, 0)	Britador
Basculamento de lavado no pulmão de lavado	0.01 + ERLA(0, 0)	Britador
Volta para a frente de carregamento	CONT(0.000, ... , 0.140)	-
Levantamento do fundo de cava	CONT(0.000, ... , 0.970)	Equipe de topografia

4.3 PREMISSAS DE SIMULAÇÃO

O presente trabalho, analisou a movimentação de estéril nas tiras indicadas na Tabela 7. A movimentação de material é realizada por tratores de esteira D11T CD ou D11 R e o desmonte mecânico da laterita é realizado através de escarificadores presentes nos tratores. A movimentação

de estéril, também, é feita por caminhões rodoviários e escavadeiras hidráulicas 365C. Para as simulações de decapeamento foi considerado apenas os tratores D11T_CD. Para as simulações com tiras que necessitam de rebaixamento, foi considerada a alocação máxima de 2 escavadeiras possíveis de trabalharem ao mesmo tempo na tira. As informações dos equipamentos estão indicadas na Tabela 8.

Tabela 7: Tiras a serem decapeadas.

Estéril						
Dados do local			Volumes planejados			
Frente	blocos	Tira	Argila total (m³)	Argila com D11 (m³)	Argila para rebaixe (m³)	Laterita (m³)
8	8	P67	70.390	58.658	11.732	3.639
8	8	Q67	66.508	57.417	9.091	3.745
9	8	F58	25.590	25.590	0	10.835
3	8	P115	24.115	24.115	0	5.933

Tabela 8: Informações referentes aos caminhões basculantes e tratores da frota de transporte de estéril.

Equipamento	Quantidade	Capacidade (m³)
Caminhão basculante	3, 5 ou 10	21
Tratores D11 T_CD	7	40,4
Tratores D11 R	5	43,6
Escavadeira hidráulica	Máx 2 por tira	-

Foi analisado, também, a movimentação de minério lavado ou bruta nas tiras indicadas nas Tabela 9 e 10. A movimentação de minério é realizada por escavadeiras hidráulicas 336D ou 349D e caminhões basculantes e o desmonte mecânico do minério é realizado através de escarificadores presentes nos tratores D11. Para as simulações de lavra das tiras, foi considerada a alocação máxima de 1 escavadeira, ou seja, apenas 1 escavadeira pode trabalhar ao mesmo tempo na tira. Foi considerada apenas a escavadeira 336D para as simulações de lavra. As informações dos equipamentos de transporte de minério estão indicadas na Tabela 11.

Tabela 9: Tiras de minério lavado a serem lavradas.

Lavado			
Frente	Blocos	Tira	Volume
8	8	Q67	10.949
9	8	F58	15.354
3	8	P115	10.749

Tabela 10: Tiras de minério bruta a serem lavradas.

Bruta			
Frente	Blocos	Tira	Volume
8	8	P67	10.964

Tabela 11: Informações referentes aos equipamentos da frota de transporte de minério.

Equipamento	Quantidade	Capacidade (m³)
Caminhão basculante	3, 5 ou 10	23
Escavadeira hidráulica 336D	Máx 1 por tira	-
Escavadeira hidráulica 349D	Máx 1 por tira	-

O abastecimento das escavadeiras hidráulicas e tratores é realizado nas frentes de lavra durante a operação ou durante a manutenção corretiva e preventiva. No entanto, devido à falta de dados, os tempos improdutivos referentes aos abastecimentos não estão sendo considerados neste trabalho. Os caminhões são abastecidos por oportunidade, uma vez por turno, no posto da empresa e durante as manutenções, logo, seu abastecimento não é contabilizado como atraso operacional, uma vez que, não afeta a produção. Outros atrasos operacionais devido às trocas de turno e paradas para atender as necessidades fisiológicas dos operadores são realizadas de forma programada através de revezamento de equipes, de modo a minimizar os tempos improdutivos, portanto, também não estão sendo considerados neste estudo.

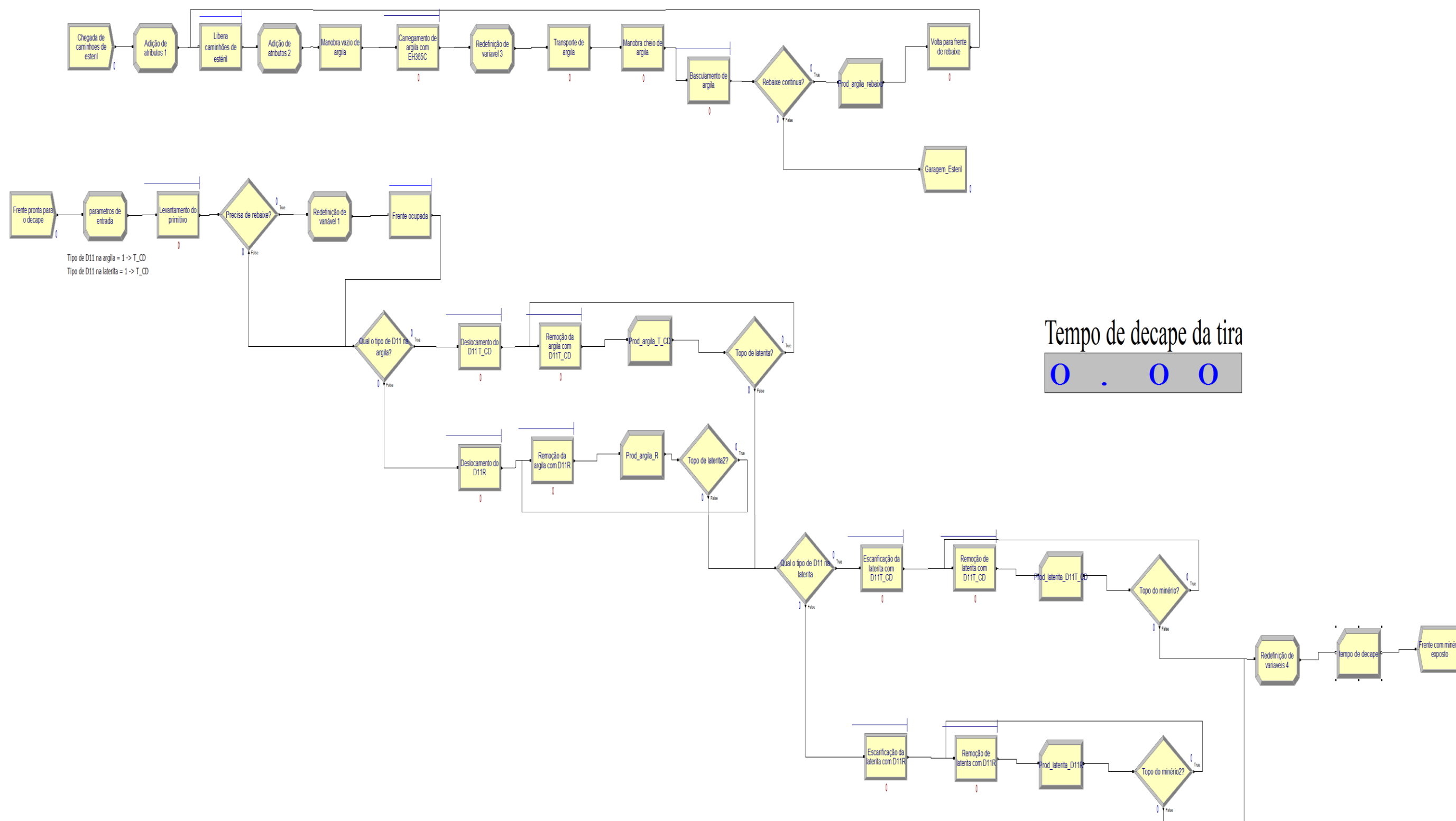
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO DO DECAPEAMENTO

A Figura 11 ilustra o fluxograma do modelo de simulação computacional do Decapeamento que será descrito adiante.

Figura 11: Fluxograma do modelo de simulação computacional do Decapeamento.

Decapeamento



O modelo de simulação do Decapeamento inicia-se com a criação da entidade “Frente” através do módulo *create* “FRENTE PRONTA PARA O DECAPE”.

O módulo seguinte, *assign* “PARÂMETROS DE ENTRADA”, foi utilizado para a criação das variáveis “nEH”, “Argila para rebaixe”, “Altura da camada de argila”, “Prod_argila_rebaixe_plan”, “Prod_argila_plan”, “Prod_laterita_plan”. A variável “nEH” indica o número de escavadeiras que serão utilizadas para o rebaixamento da tira caso ela necessite de rebaixe. A variável “Argila para rebaixe” é definida como 0 no início do sistema. Ela é uma variável binária que vai indicar a necessidade ou não do rebaixamento de argila. Para a variável “Altura da camada de argila” é determinado a altura da camada de argila no início do sistema. Para as variáveis “Prod_argila_rebaixe_plan”, “Prod_argila_plan” e “Prod_laterita_plan” são inseridos os volumes planejados de remoção de argila para rebaixe, remoção de argila e laterita com D11. As variáveis “Tipo de D11 na argila” e “Tipo de D11 na laterita” são definidos como 1 caso o modelo do D11 que será usado para a remoção de argila e laterita for o T_CD, caso o modelo for o R as variáveis serão definidas como 0.

A primeira atividade, pela qual a entidade “Frente” passa, é o levantamento topográfico antes de dar início ao decapeamento. Para realização dessa atividade foi utilizado o módulo *process* “LEVANTAMENTO DO PRIMITIVO”. Essa atividade é realizada pela “Equipe de topografia” que no modelo é considerada como um recurso.

Em seguida, a entidade “Frente” irá passar pelo módulo *decide* “PRECISA DE REBAIXE?”, que possibilita a tomada de decisão sobre como a argila será removida levando-se em conta a altura de sua camada. Se a expressão $[(\text{Altura da camada de argila}) > 12]$ for satisfeita, a entidade “Frente” segue em direção ao módulo *assing* “REDEFINIÇÃO DE VARIÁVEL 1” caso contrário, a entidade “Frente” segue em direção aos módulos *process* “DESLOCAMENTO DO D11”.

Caso a frente necessite de rebaixamento, a entidade “Frente” passa pelo módulo *assign* “REDEFINIÇÃO DE VARIÁVEL 1” onde a variável “Argila para rebaixe” é redefinida como 1. Em seguida, a entidade “Frente” entra no módulo *hold* “FRENTE OCUPADA” onde permanecerá até que a condição $[\text{NC (Produção de argila de rebaixamento)} \geq \text{Prod_argila_rebaixe_plan}]$ seja verdadeira.

Após a variável “Argila para rebaixe” ser redefinida como 1, há a criação de uma nova entidade chamada “Caminhão de estéril” que entra no sistema pelo módulo *create* “CHEGADA

DE CAMINHÕES DE ESTÉRIL”, no segundo circuito do modelo de simulação. A entidade “Caminhão de estéril” passa pelo módulo *hold* “LIBERA CAMINHÕES DE ESTÉRIL” e só é liberada se a variável “Argila para rebaixe” atinge o valor 1 e se a expressão $[n_aloc_EH \leq nEH]$ é satisfeita. A variável “Argila para rebaixe” só atinge o valor 1 caso a entidade “Frente” necessite de rebaixe. A variável “ n_aloc_EH ” da expressão $[n_aloc_EH \leq nEH]$ representa o número de escavadeiras que será alocada mas esta não poderá ultrapassar o limite máximo atribuído pela variável “ nEH ”. A expressão $[n_aloc_EH \leq nEH]$ significa que as escavadeiras serão alocadas e os caminhões só serão liberados para carregamento nelas após essa alocação sendo que o número de escavadeiras alocadas não poderá ultrapassar o número previamente estabelecido.

Em sequência, a entidade “Caminhão de estéril” segue para o módulo *assign* “ADIÇÃO DE ATRIBUTOS 1” onde o atributo “Capacidade dos caminhões de estéril” é atribuído à entidade. Nesse mesmo módulo, a variável “ n_aloc_EH ” é redefinida (anteriormente era definida como zero) para $[n_aloc_EH + 1]$, ou seja, uma escavadeira é alocada. Em seguida, a entidade “Caminhão de estéril” pelo módulo *process* “MANOBRA VAZIO DE ARGILA” e segue para o módulo *process* “CARREGAMENTO DE ARGILA” onde a atividade depende das escavadeiras hidráulicas alocadas e que funcionam como recursos. Após o carregamento, a entidade passa pelo módulo *assing* “REDEFINIÇÃO DE VARIÁVEL 3” onde a variável “ n_aloc_EH ” é redefinida para $[n_aloc_EH - 1]$, significando que o recurso escavadeira foi liberado, e portanto, diminuindo-se o número de escavadeiras alocadas. Em sequência, a entidade “Caminhão de estéril” passa pelos módulos *process* “TRANSPORTE DE ARGILA”, “MANOBRA CHEIO DE ARGILA” e “BASCULAMENTO DE ARGILA”.

Observa-se aqui que todos os recursos de escavadeiras ou tratores foram definidos em conjuntos ou SETs, como já mencionado anteriormente. Na realização de atividades que necessitam destes recursos, a seleção da unidade de um determinado recurso pertencente a um SET que será selecionado para a realização da atividade deve seguir uma regra. A regra escolhida em todos os casos, foi *cyclical*, ou seja, cíclica. Dessa forma, vai haver um rodízio entre os equipamentos que podem ser alocados.

Após o basculamento, a entidade passa pelo módulo *record* “PROD_ARGILA_REBAIXE” que funciona simplesmente como um contador, ou seja, cada vez que a entidade passa pelo módulo é adicionado o valor da capacidade do caminhão de estéril (21 m^3) aos contadores “Produção total de argila” e “Produção de argila de rebaixamento”.

A entidade “Caminhão de estéril” segue para o módulo *process* “VOLTA PARA A FRENTE DE REBAIXE” e depois para o módulo *decide* “REBAIXAMENTO CONTINUA?” que possibilita a decisão sobre a continuação da remoção da argila com escavadeira hidráulica ou se já é possível a remoção com D11. Para que o rebaixamento continue a expressão [NC (Produção de argila de rebaixamento) < Prod_argila_rebaixe_plan] deve ser satisfeita e a entidade “Caminhão de estéril” retorna para o módulo *process* “MANOBRA VAZIO DE ARGILA”. Caso a expressão não seja satisfeita, a entidade sai do sistema pelo módulo *dispose* “GARAGEM_ESTÉRIL”.

Se [NC (Produção de argila de rebaixamento) >= Prod_argila_rebaixe_plan] então significa que não há mais necessidade de rebaixe da argila, o que acarreta na liberação da entidade “Frente” do módulo *hold* “FRENTE OCUPADA”.

Em seguida, a entidade “Frente” passa pelo módulo *decide* “QUAL O TIPO DE D11 NA ARGILA?”. Caso a entidade “Frente” não necessite de rebaixe seguirá pelo outro fluxo do módulo *decide* “PRECISA DE REBAIXE?” e em direção ao módulo *decide* “QUAL O TIPO DE D11 NA ARGILA?”.

No módulo *decide* “QUAL O TIPO DE D11 NA ARGILA?” é decidido se a entidade “Frente” seguirá pelo fluxo do D11T_CD caso a variável “Tipo de D11 na argila” for 1 ou pelo D11R na remoção de argila, caso a variável “Tipo de D11 na argila” for 0.

Supondo que a variável “Tipo de D11 na argila” seja definida como 1, então a entidade “Frente” passa pelos módulos *process* “DESLOCAMENTO DO D11 T_CD” e “REMOÇÃO DE ARGILA COM D11 T_CD”, atividades que dependem da disponibilidade de um dos tratores D11T_CD que são definidos como recursos para essas atividades.

A entidade segue então para o módulo *record* “PROD_ARGILA” que funciona como um contador, ou seja, cada vez que a entidade passa pelo módulo é adicionado o valor da capacidade do D11T_CD (40,4m³) ao contador “Produção total de argila” e “Produção de argila com D11”.

Em seguida, a entidade chega ao módulo *decide* “TOPO DA LATERITA?” que possibilita a decisão entre a continuação da remoção da argila com D11 ou se o topo da camada de laterita já está exposta. Para que a remoção de argila continue a expressão [NC (Produção de argila com D11) <= Prod_argila_plan] deve ser satisfeita e a entidade “Frente” retornará para o módulo *process* “REMOÇÃO DE ARGILA COM D11T_CD”.

Caso a expressão não seja satisfeita, ou seja, o topo da laterita está exposto e portanto, pode-se começar a sua remoção, a entidade “Frente” segue em direção ao módulo *decide* “QUAL TIPO

DE D11 NA LATERITA?”, onde é decidido se a entidade “Frente” seguirá pelo fluxo do D11T_CD caso a variável “Tipo de D11 na laterita” for 1 ou pelo D11R, caso a variável “Tipo de D11 na laterita” for 0.

Supondo que a variável “Tipo de D11 na laterita” seja definida como 1, então a entidade “Frente” passa pelos módulos *process* “ESCARIFICAÇÃO DA LATERITA COM D11 T_CD” e “REMOÇÃO DE LATERITA COM D11 T_CD”, atividades que dependem da disponibilidade de um dos tratores D11T_CD que são definidos como recursos para essas atividades.

A entidade segue então para o módulo *record* “PROD_LATERITA” que funciona como um contador, ou seja, cada vez que a entidade passa pelo módulo é adicionado o valor da capacidade do D11T_CD (40,4m³) ao contador “Produção total de laterita”.

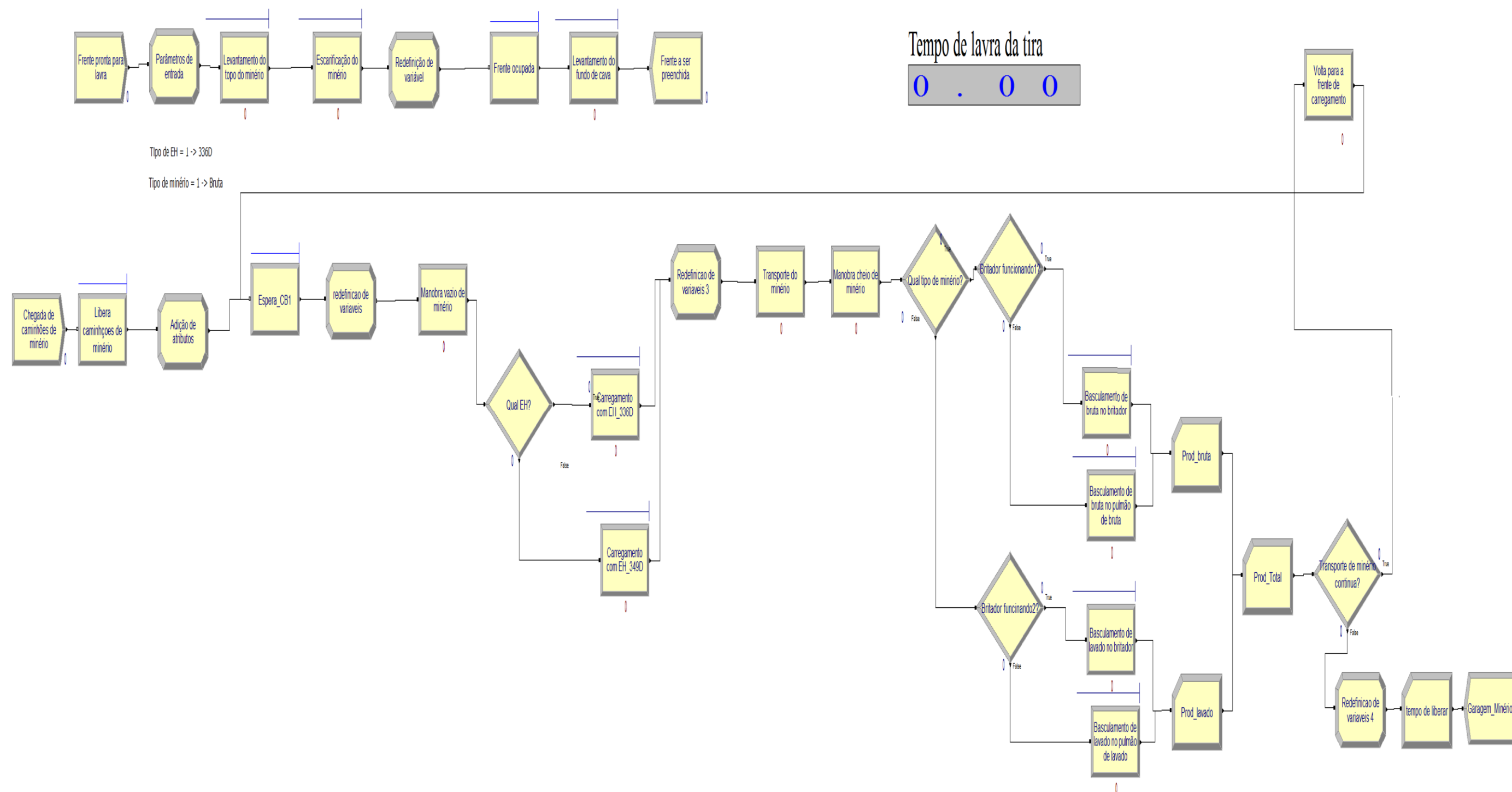
Em seguida, a entidade chega ao módulo *decide* “TOPO DO MINÉRIO?” que possibilita a decisão entre a continuação da remoção da laterita com D11 ou se o topo da camada de minério já está exposta. Para que a remoção de laterita continue a expressão [NC (Produção de total de laterita) <= Prod_laterita_plan] deve ser satisfeita e a entidade “Frente” retornará para o módulo *process* “REMOÇÃO DE LATERITA COM D11T_CD”. Caso a expressão não seja satisfeita, a entidade “Frente” segue para o módulo *assing* “REDEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS 4”, onde a variável “termino” é definida como 1 e será utilizada para finalizar a simulação. Depois a entidade “Frente” passa pelo módulo *record* “TEMPO DE DECAPE” que funciona como um contador, ou seja, cada vez que a entidade passa pelo módulo é adicionado o valor da variável “tempo de decape” no contador “Tempo de decape da tira”. Como para cada réplica da simulação, a entidade frente passa somente uma vez por este módulo, ele é utilizado simplesmente para registrar o tempo que se levou para liberar a camada de minério. Por fim, a entidade “Frente” segue em direção ao módulo *dispose* “FRENTE COM MINÉRIO EXPOSTO” e sai do sistema.

5.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO DA LAVRA

A Figura 12 ilustra o fluxograma do modelo de simulação computacional da Lavra que será descrito adiante.

Figura 12: Fluxograma do modelo de simulação computacional da Lavra.

Lavra de Minério



O modelo de simulação do Carregamento de Minério inicia-se com a criação da entidade “Frente” através do módulo *create* “FRENTE PRONTA PARA LAVRA”.

O módulo seguinte, *assign* “PARÂMETROS DE ENTRADA”, foi utilizado para a criação das variáveis “nEH”, “Minério liberado”, “Prod_minério_plan”, “Tipo de minério” e “Tipo de EH”. A variável “nEH” indica o número de escavadeiras que serão utilizadas para lavar a tira. A variável “Minério liberado” é definida como 0 no início do sistema. Para a variável “Prod_minério_plan” é inserido o volume planejado de produção de minério. As variáveis “Tipo de minério” e “Tipo de EH” são definidas como 1 caso o tipo de minério for Bruta e o modelo de escavadeira usada for 336D. Caso o tipo de minério for lavado e o modelo de escavadeira utilizada for 349D, então ambas as variáveis serão definidas como 0.

A primeira atividade, pela qual a entidade “Frente” passa, é o levantamento topográfico antes de dar início ao decapeamento. Para realização dessa atividade foi utilizado o módulo *process* “LEVANTAMENTO DO TOPO DO MINÉRIO”. Essa atividade é realizada pela “Equipe de topografia” que no modelo é considerada como um recurso.

Em seguida, a entidade “Frente” irá passar pelo módulo *process* “ESCARIFICAÇÃO DO MINÉRIO” que depende da disponibilidade de um dos tratores do minério que são definidos como recursos para essa atividade. Depois a entidade seguirá para o módulo *assign* “REDEFINIÇÃO DE VARIÁVEL” onde a variável “Minério liberado” será redefinida para 1 e que portanto, sua remoção. Em seguida, a entidade “Frente” entra no módulo *hold* “FRENTE OCUPADA” onde permanecerá até que a condição $[NC \text{ (Produção total de minério)} > \text{Prod_minério_plan}]$ seja verdadeira.

A entidade “Caminhão de minério” entra no sistema através do módulo *create* “CHEGADA DE CAMINHÕES DE MINÉRIO”, no segundo circuito do modelo de simulação. Em seguida, as entidades “Caminhão de minério” ficam retidas no módulo *hold* “LIBERA CAMINHÕES DE MINÉRIO” e só são liberadas após a redefinição da variável “Minério liberado” para 1. Após a liberação da entidade “Caminhão de minério” esta passa pelo módulo *assign* “ADIÇÃO DE ATRIBUTOS” onde o atributo “Capacidade dos caminhões de minério” é definido como 23m³.

A entidade “Caminhão de minério” passa pelo módulo *hold* “ESPERA CB_1” e só é liberada se a expressão $[n_aloc_EH \leq nEH]$ é satisfeita. A variável “n_aloc_EH” da expressão $[n_aloc_EH \leq nEH]$ representa o número de escavadeiras que será alocada mas esta não poderá ultrapassar o limite máximo atribuído pela variável “nEH”. A expressão $[n_aloc_EH \leq nEH]$ significa que as

escavadeiras serão alocadas e os caminhões só serão liberados para carregamento nelas após essa alocação sendo que o número de escavadeiras alocadas não poderá ultrapassar o número previamente estabelecido.

Em sequência, a entidade “Caminhão de minério” segue para o módulo *assign* “REDEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS” onde a variável “n_aloc_EH” é redefinida (anteriormente era definida como zero) para $[n_aloc_EH + 1]$, ou seja, uma escavadeira é alocada. Em seguida, a “Caminhão de minério” segue para o módulo *process* “MANOBRA VAZIO DE MINÉRIO” e depois para o módulo *decide* “QUAL EH?” onde é decidido se a entidade seguirá pelo fluxo da EH336D caso a variável “Tipo de EH” for 1 ou pelo EH349D, caso a variável for 0.

Supondo que a variável “Tipo de EH” seja definida como 1, então a entidade passa pelo módulo *process* “CARREGAMENTO COM EH336D” que depende da disponibilidade de uma das EH 336D que são definidos como recursos para essa atividade.

Observa-se aqui que, assim como no modelo de Decapeamento, todos os recursos de escavadeiras ou tratores foram definidos em conjuntos ou SETs, como já mencionado anteriormente. Na realização de atividades que necessitam destes recursos, a seleção da unidade de um determinado recurso pertencente a um SET que será selecionado para a realização da atividade deve seguir uma regra. A regra escolhida em todos os casos, foi cyclical, ou seja, cíclica. Dessa forma, vai haver um rodízio entre os equipamentos que podem ser alocados.

Após o carregamento, a entidade passa pelo módulo *assign* “REDEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS 3” onde a variável “n_aloc_EH” é redefinida para $[n_aloc_EH - 1]$, significando que o recurso escavadeira foi liberado, e portanto, diminuindo-se o número de escavadeiras alocadas. Em seguida, a entidade passa pelos módulos *process* “TRANSPORTE DO MINÉRIO” e “MANOBRA CHEIO DE MINÉRIO”.

A entidade “Caminhão de minério” segue então para o módulo *decide* “QUAL TIPO DE MINÉRIO?” onde é decidido se seguirá pelo fluxo de Bruta caso a variável “Tipo de minério” for 1 ou pelo de Lavado, caso a variável for 0. Supondo que a variável “Tipo de minério” seja definida como 1, então a entidade passa pelo módulo *decide* “SITUAÇÃO DO BRITADOR 1” onde é verificado a situação do britador através da variável “Situação do britador” caso esta for 1 então o britador estará funcionando e os caminhões irão para o módulo *process* “BASCULAMENTO DE BRUTA NO BRITADOR” mas caso a variável não for 1 então as entidades seguem para o módulo *process* “BASCULAMENTO DE BRUTA NO PULMÃO DE BRUTA”.

Após o basculamento, a entidade “Caminhão de minério” passa pelo módulo *record* “PROD_BRUTA” ou “PROD_LAVADO” e pelo “PROD_TOTAL” que funcionam como um contador, ou seja, cada vez que a entidade passa pelo módulo é adicionado o valor da capacidade do caminhão de minério (23m³) ao contador “Produção de bruta”, “Produção de lavado” e “Produção total de minério”, respectivamente.

Em seguida, a entidade chega ao módulo *decide* “TRANSPORTE DE MINÉRIO CONTNUA?” que possibilita a decisão entre a continuação do carregamento de minério. Para que o carregamento de minério continue a expressão [NC (Produção total de minério) <= Prod_minério_plan] deve ser satisfeita e a entidade “Caminhão de minério” irá para o módulo *process* “VOLTA PARA A FRENTE DE CARREGAMENTO” e retornará ao módulo *hold* “ESPERA CB_1”. Caso a expressão [NC (Produção total de minério) <= Prod_minério_plan] não for satisfeita a entidade “Caminhão de minério” segue para o módulo *assing* “REDEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS 4”, onde a variável “termino” é definida como 1 e será utilizada para finalizar a simulação e a variável “Tempo de liberação” é definida como TNOW que é o tempo final da simulação e este irá aparecer no mostrador numérico inserido com o nome “Tempo de lavra da tira”.

Depois a entidade “Caminhões de minério” passa pelo módulo *record* “TEMPO DE LAVRA” que funciona como um contador, ou seja, cada vez que a entidade passa pelo módulo é adicionado o valor da variável “tempo de lavra” no contador “Tempo de lavra da tira”. Como para cada réplica da simulação, a entidade frente passa somente uma vez por este módulo, ele é utilizado simplesmente para registrar o tempo que se levou para lavar a camada de minério. Por fim, a entidade “Caminhão de minério” segue em direção ao módulo *dispose* “GARAGEM_MINÉRIO” e sai do sistema.

Se a expressão [NC (Produção total de minério) <= Prod_minério_plan] não foi satisfeita significa que a expressão [NC (Produção total de minério) > Prod_minério_plan] foi satisfeita o que acarreta na liberação da entidade “Frente” do módulo *hold* “FRENTE OCUPADA”.

A entidade “Frente” segue para o módulo *process* “LEVANTAMENTO DO FUNDO DE CAVA” e sai do sistema pelo módulo *dispose* “FRENTE A SER PREENCHIDA”.

5.3 SIMULAÇÕES DE DECAPEAMENTO

O modelo de simulação do Decapeamento foi alimentado com os volumes planejados de laterita, argila com D11 e argila para rebaixe, além da altura da camada de argila (sendo 15 para tiras que possuem rebaixe e 10 para tiras sem rebaixe), tipo de D11 que irá atuar na argila e na laterita que foi definido como sendo o D1T_CD e por fim, o número máximo de escavadeiras que podem atuar no rebaixamento da tira ao mesmo tempo e que no caso será 2. Essas informações foram inseridos nas variáveis Prod_laterita_plan, Prod_argila_plan, Prod_argila_rebaixe_plan, Altura da camada de argila, Tipo de D11 na argila, Tipo de D11 na laterita e nEH, respectivamente.

Os modelos de simulação foram rodados 90 vezes fazendo a variação de número de caminhões utilizados no transporte de argila proveniente do rebaixamento das tiras (30 vezes para cada número de caminhões e para cada tira). As simulações seguiram os parâmetros indicados na Tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros das simulações de decapeamento.

Estéril				
Argila + Laterita				
Frente	F8	F8	F9	F3
Tira	P67	Q67	F58	P115
Nº de caminhões basculantes	3	3	3	3
	5	5	5	5
	10	10	10	10

Nas simulações com o modelo do Decapeamento, foram analisados, em cada uma das tiras, o tempo de decapeamento (dado pelo contador “TEMPO DE DECAPE”) e o tempo de fila de carregamento (dado pela fila do módulo *hold* “LIBERA CAMINHÕES DE ESTÉRIL”). Após rodar o modelo, os relatórios emitidos foram analisados. Na Tabela 13 e 14 podemos ver os tempos médios de decapeamento de cada uma das tiras analisadas, a meia largura, o intervalo de confiança (95%), bem como o erro percentual.

Tabela 13: Tempo de decapeamento da tira com rebaixamento.

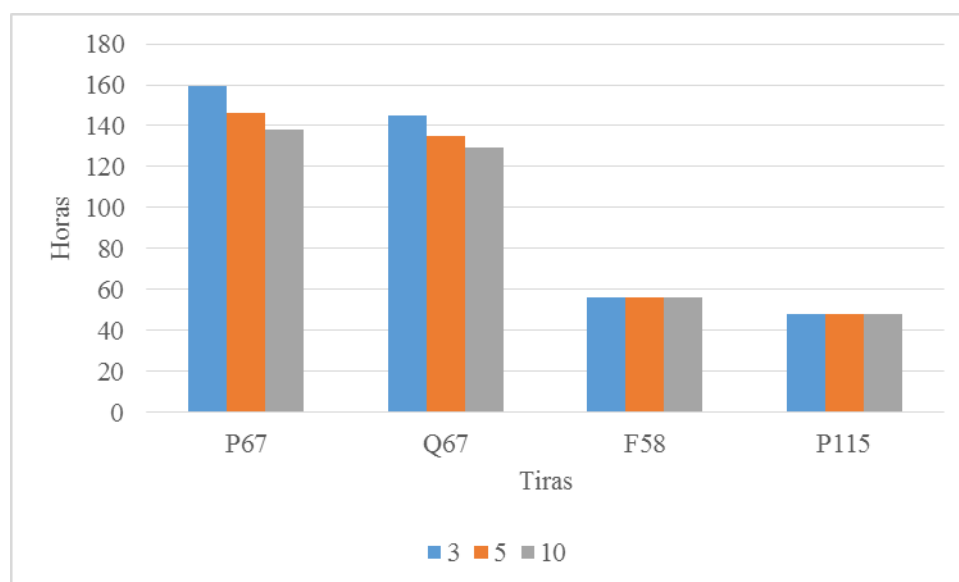
Tempo de decapeamento das tiras com rebaixamento (horas)									
Frente		F8				F8			
Tira		P67				Q67			
		Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)	Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)
Nº de caminhões basculantes	3	159,57	0,73	(159,57±0,73)	0,46	144,97	0,75	(144,97±0,75)	0,52
	5	146,23	0,88	(146,23±0,88)	0,6	135,03	0,89	(135,03±0,89)	0,66
	10	138,17	0,95	(138,17±0,95)	0,69	129,3	0,9	(129,3±0,9)	0,7

Tabela 14: Tempo de decapeamento da tira sem rebaixamento.

Tempo de decapeamento das tiras sem rebaixamento (horas)									
Frente		F9				F3			
Tira		F58				P115			
		Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)	Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)
Nº de caminhões basculantes	3	56	0,55	(56±0,55)	0,98	48,27	0,54	(48,27±0,54)	1,12
	5	56,03	0,55	(56,03±0,55)	0,98	48,27	0,54	(48,27±0,54)	1,12
	10	56,13	0,56	(56,13±0,56)	1	48,17	0,55	(48,17±0,55)	1,14

Como pode ser observado no gráfico da Figura 13, na movimentação de estéril a variação do número de caminhões afeta apenas o tempo das tiras que necessitam de rebaixamento, uma vez que, são apenas elas que utilizam o transporte com a frota de caminhões do estéril. Nas tiras que precisam de rebaixamento, há uma redução média de 7,61% do tempo de decapeamento da tira quando alteramos o número caminhões de 3 para 5 e quando alteramos de 5 para 10 caminhões esse tempo reduz em média 4,88%.

Figura 13: Tempo de decapeamento da tira.



Na Tabela 15 podemos ver o tempo médio de fila para o carregamento dos caminhões basculantes da frota do estéril nas tiras com rebaixamento, além da meia largura, o intervalo de confiança (95%) e o erro percentual.

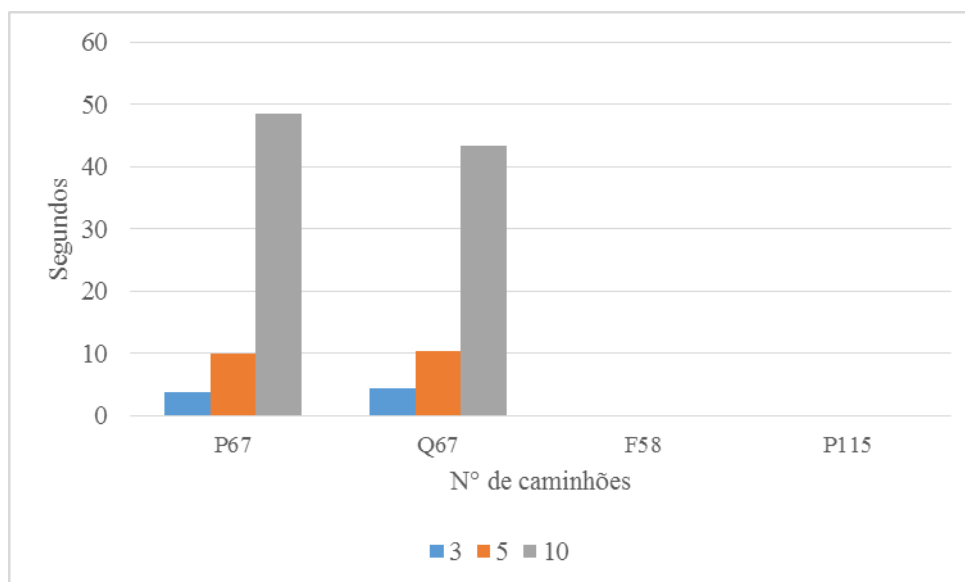
Tabela 15: Tempo médio de fila para carregamento de estéril das tiras com rebaixamento.

Tempo médio de fila para carregamento de estéril das tiras com rebaixamento (segundos)									
Frente		F8				F8			
Tira		P67				Q67			
		Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)	Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)
Nº de caminhões basculantes	3	3,83	0,38	(3,83±0,38)	9,92	4,32	0,47	(4,32±0,47)	10,88
	5	9,92	0,57	(9,92±0,57)	5,76	10,45	0,62	(10,45±0,62)	5,93
	10	48,61	3,22	(48,61±3,22)	6,62	43,29	2,01	(43,29±2,01)	4,64

Como as tiras que não necessitam de rebaixe não utilizam caminhões, logo, o tempo de fila para carregamento destas é zero. Já nas tiras que necessitam de rebaixamento o tempo de fila de carregamento sofre um aumento quando aumentamos o número de caminhões. Como pode ser observado no gráfico da Figura 14, quando aumentamos o número de caminhões de 3 para 5 o tempo de fila para carregamento aumenta, em média, 150,43% e quando aumentamos o número de caminhões de 5 para 10 o tempo de fila aumenta, em média, 352,13%. No entanto, nas simulações

realizadas, os tempos de fila encontrados foram na casa dos segundos, ou seja, valores muito pequenos que indicam que praticamente não houve fila em nenhuma das simulações.

Figura 14: Tempo médio de fila para carregamento de estéril.



5.4 SIMULAÇÕES DE LAVRA

O modelo de simulação da Lavra foi alimentado com o volume planejado de minério, além do tipo de minério (1 se for bruta e 2 se for lavado) e do tipo de EH que será usada para a extração do minério e o número máximo de escavadeiras que podem atuar na lavra daquela tira ao mesmo tempo e que no caso será 1. Essas informações foram inseridos nas variáveis Prod_minério_plan, Tipo de minério, Tipo de EH e nEH, respectivamente.

Os modelos de simulação foram rodados 90 vezes fazendo a variação de número de caminhões utilizados no transporte de minério lavado e bruta (30 vezes para cada número de caminhões e cada tipo de minério). As simulações seguiram os parâmetros indicados na Tabela 16.

Tabela 16: Parâmetros das simulações de lavra.

Minério				
Lavado				Bruta
Frente	F8	F9	F3	F8
Tira	Q67	F58	P115	P67
N° de caminhões basculantes	3	3	3	3
	5	5	5	5
	10	10	10	10

Nas simulações com o modelo da Lavra, foram analisados, em cada uma das tiras, o tempo de lavra e os tempos de fila de carregamento, basculamento no britador e basculamento na pilha pulmão. Após rodar o modelo os relatórios emitidos foram analisados. Na Tabela 17 e 18 podemos ver os tempos médios de lavra de cada uma das tiras de lavado e bruta analisadas, a meia largura, o intervalo de confiança (95%), bem como o erro percentual.

Tabela 17: Tempo de lavra das tiras de lavado.

Tempo de lavra das tiras de lavado (horas)									
Frente		F8				F9			
Tira		Q67				F58			
		Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)	Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)
N° de caminhões basculantes	3	29,93	0,31	(29,93±0,31)	1,04	41,73	0,31	(41,73±0,31)	0,74
	5	22,57	0,39	(22,57±0,39)	1,73	31,1	0,38	(31,1±0,38)	1,22
	10	22,37	0,37	(22,37±0,37)	1,65	30,77	0,48	(30,77±0,48)	1,56
Frente		F3							
Tira		P115							
		Tempo médio		Meia largura	Intervalo de confiança (95%)		Erro percentual (%)		
N° de caminhões basculantes	3	29,43		0,31	(29,43±0,31)		1,05		
	5	22,3		0,39	(22,3±0,39)		1,75		
	10	22,07		0,45	(22,07±0,45)		2,04		

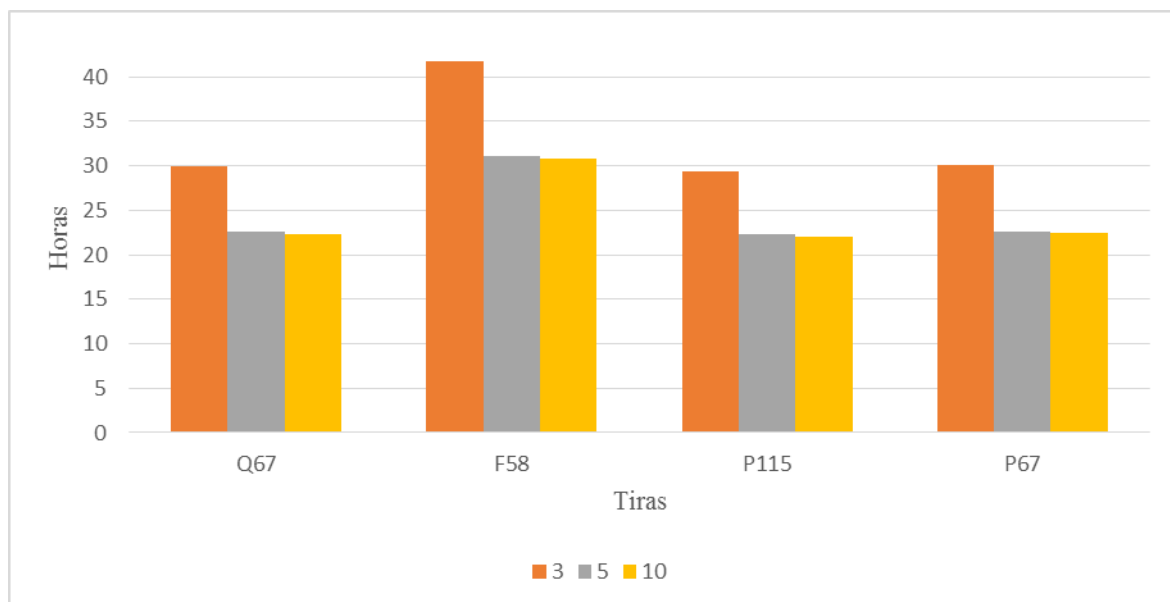
Tabela 18: Tempo de lavra da tira de bruta.

Tempo de lavra da tira de bruta (horas)					
Frente			F8		
Tira			P67		
		Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)
Nº de caminhões basculantes	3	30,03	0,33	(30,03±0,33)	1,1
	5	22,6	0,39	(22,6±0,39)	1,72
	10	22,43	0,36	(22,43±0,36)	1,6

A partir das simulações realizadas, foi observado que a variação do número de caminhões basculantes na movimentação de minério lavado afeta o tempo médio de lavra da tira principalmente quando variamos os caminhões de 3 para 5. Como pode ser observado no gráfico da Figura 15, para as tiras de minério lavado (Q67, F58 e P115), quando realizamos o aumento de número de caminhões de 3 para 5 o tempo médio de lavra reduz em média 24,77%. Quando variamos o número de caminhões de 5 para 10 foi observada uma redução de apenas 1% no tempo médio de lavra das tiras.

Para a tira de bruta (P67) analisada, o tempo médio de lavra também sofreu a mesma lógica de variação observada nas tiras de minério lavrado. Quando realizamos o aumento do número de caminhões de 3 para 5 o tempo médio de lavra reduz, em média, 24,75%. No entanto, quando variamos o número de caminhões de 5 para 10 foi observada uma redução de apenas 0,74% no tempo médio de lavra da tira.

Figura 15: Tempo de lavra das tiras de minério.



Nas Tabelas 19 e 20 podemos ver o tempo médio de fila para o carregamento dos caminhões basculantes da frota do minério no transporte de minério lavado e bruto, além de tempos máximo e mínimo, a meia largura do intervalo de confiança (95%) e o erro percentual.

Tabela 19: Tempo médio de fila para carregamento de lavado.

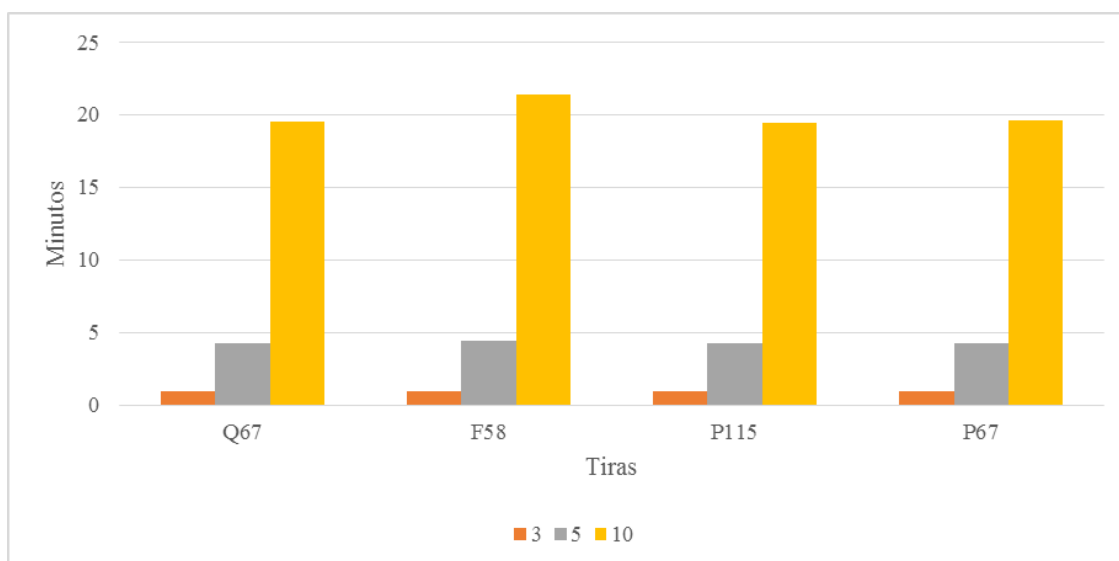
Tempo médio de fila para carregamento de lavado (minutos)									
Frente		F8				F9			
Tira		Q67				F58			
N° de caminhões basculantes		Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)	Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)
	3	0,98	0,04	(0,98±0,04)	4,08	1	0,03	(1±0,03)	0,03
	5	4,3	0,14	(4,3±0,14)	3,25	4,42	0,11	(4,42±0,11)	2,49
	10	19,56	0,92	(19,56±0,92)	4,7	21,36	0,67	(21,36±0,67)	3,14
Frente		F3							
Tira		P115							
N° de caminhões basculantes		Tempo médio		Meia largura		Intervalo de confiança (95%)		Erro percentual (%)	
	3	0,98		0,04		(0,98±0,04)		4,08	
	5	4,3		0,14		(4,3±0,14)		3,25	
	10	19,45		0,94		(19,45±0,94)		4,83	

Tabela 20: Tempo médio de fila para carregamento de bruta.

Tempo médio de fila para carregamento de bruta (minutos)					
Frente			F8		
Tira			P67		
		Tempo médio	Meia largura	Intervalo de confiança (95%)	Erro percentual (%)
N° de caminhões basculantes	3	0,98	0,04	(0,98±0,04)	4,08
	5	4,3	0,14	(4,3±0,14)	3,56
	10	19,58	0,92	(19,58±0,92)	4,7

Nas tiras de minério também pôde ser observado que, com o aumento do número caminhões houve aumento no tempo médio de fila para carregamento. Os percentuais de aumento do tempo médio de fila para carregamento, quando variamos o número de caminhões de 3 para 5 ou de 5 para 10, ficaram muito próximos. Como pode ser observado no gráfico da Figura 16, para as tiras de lavado (Q67, F58 e P115), quando aumentamos o número de caminhões de 3 para 5 o tempo médio de fila para carregamento aumenta, em média, 340,42% e quando aumentamos o número de caminhões de 5 para 10 o tempo médio de fila aumenta, em média, 363,70%. Já para a tira de bruta (P67), quando aumentamos o número de caminhões de 3 para 5, o tempo médio de fila para carregamento aumenta 339,04% e, quando aumentamos o número de caminhões de 5 para 10, o tempo médio de fila aumenta 355,17%.

Figura 16: Tempo médio de fila para carregamento de minério.



Para a movimentação de minério lavado e bruta, foram analisados também o tempo de fila de basculamento no britador e na pilha pulmão que podem ser observados nos gráficos das Figuras 17 e 18.

Figura 17: Tempo médio de fila para basculamento no britador.

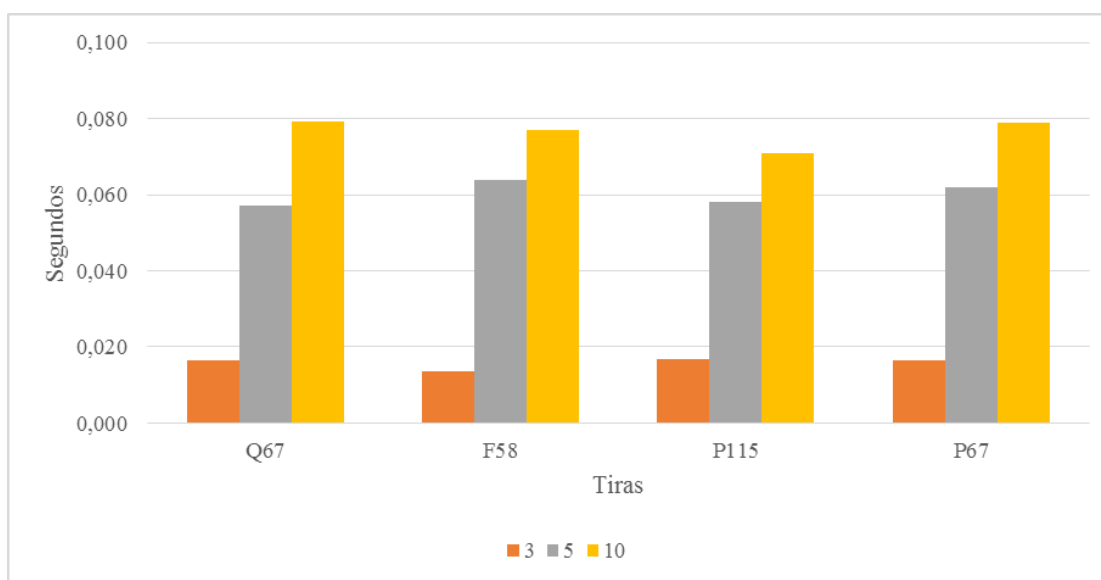
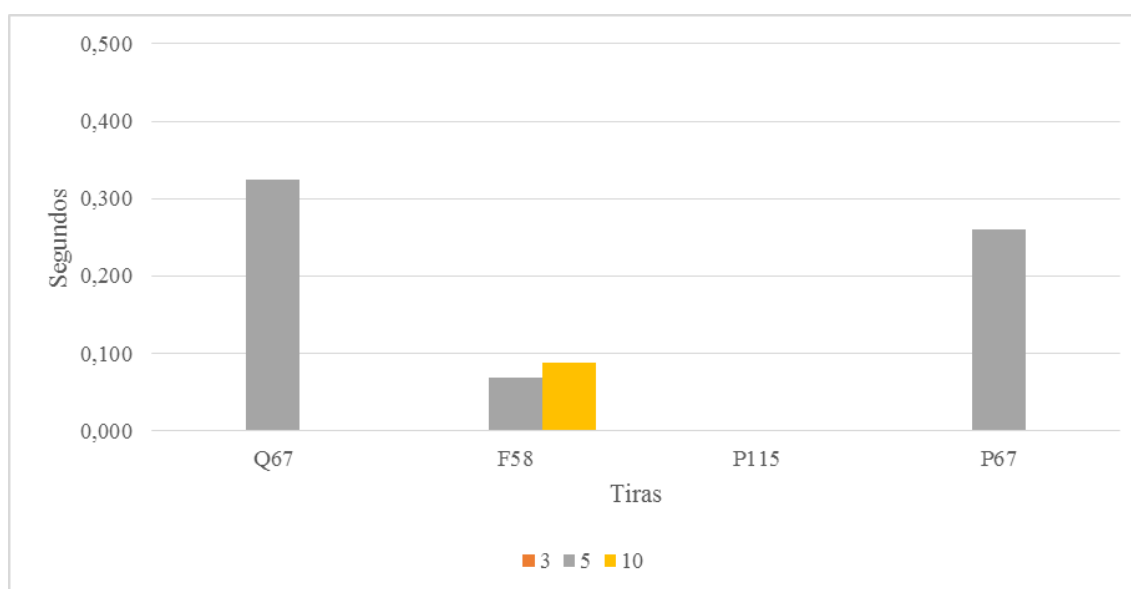


Figura 18: Tempo médio de fila para basculamento na pilha pulmão.



Através das simulações, foi observado que os tempos médios de fila para basculamento no britador ou no pulmão também sofrem aumento conforme o aumento do número de caminhões. No

entanto, o tempo médio de fila para basculamento no britador que foram observados nas simulações foram muito baixos, na casa de centésimos de segundos para o lavado e na casa de milésimos de segundo para a bruta. Já alguns dos tempos médios de basculamento na pilha pulmão de lavado e de bruta foram zerados, uma vez que, o basculamento na pilha pulmão só ocorre caso ocorra alguma parada operacional ou de manutenção do britador. No modelo de simulação essas paradas para manutenção são determinadas pelo MTBF e MTTR inseridos.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho descreveu o funcionamento da mina estudada e os modelos de simulação das atividades de decapeamento e lavra foram construídos e permitindo a previsão dos tempos de decapemaneto e lavra das tiras estudadas.

A aderência dos modelos de Decapeamento e Lavra à realidade não pode ser calculada, uma vez que, o tempo de decapeamento, lavra das tiras e o tempo de fila não são monitorados. Esse fato reforça a importância da construção dos modelos para previsão dos tempos e monitoramento das filas que possam se formar durante a operação.

Analizando os resultados das simulações com os modelos de Decapeamento e Lavra concluímos que os modelos estão validados e que 30 simulações foram suficientes para a análise estatística, uma vez que, há coerência dos resultados em relação à variação dos parâmetros e os erros percentuais ficaram abaixo de 5%. Os dados que apresentaram erros percentuais maiores que 5%, como os tempos de fila para carregamento dos caminhões de estéril, podem ser desconsiderados, uma vez que, a unidade em que se encontram é segundos, o que indica que os tempos de fila para carregamento são desprezíveis.

Foi analisada a influência da variação do número de caminhões basculantes, alocados para o transporte de estéril e de minério, nos tempos de carregamento e de filas. No modelo de Decapeamento, concluímos que praticamente não houve fila para carregamento, ou seja, é possível aumentar o número de caminhões alocados e conseqüentemente ter um maior impacto na diminuição do tempo de decapeamento da tira. Já no modelo de Lavra, foi verificado que a partir de 5 caminhões a diminuição do tempo de lavra da tira praticamente não ocorre e, conseqüentemente, o aumento do número de caminhões só servirá para aumentar o tempo de fila para carregamento, ou seja, concluímos que, a partir de 5 caminhões, não adianta acrescentar mais caminhões para diminuir o tempo de lavra da tira.

Nas simulações com o modelo de Lavra também foi verificado que não existem problemas em relação à descarga de minério lavado ou bruta no britador ou na pilha pulmão pois praticamente não há formação de filas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar um aprimoramento dos modelos e também a realização de simulações em outras tiras, bem como, uma maior variação no número de caminhões basculantes alocados.

Sugere-se realizar também simulações em tiras de outras frentes de lavra, uma vez que neste trabalho foram analisadas tiras de apenas 3 frentes de lavra (Frente 3, Frente 8 e Frente 9).

Há também a possibilidade de se analisar o decapeamento ou lavra de tiras simultâneas, fazendo algumas alterações nos modelos de simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Arconic Inc. inicia suas operações.** Novembro/2016. Disponível em: < <http://abal.org.br/noticia/arconic-inc-inicia-suas-operacoes/>>. Acessado em: 16/11/2018.

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade.** São Paulo. Abril/2017.

ABREU, G. F. **Estudo da produtividade de tratores D11T CD no método de lavra por tiras variando os ângulos do pit em uma mina de bauxita.** Trabalho de conclusão de curso. UFOP. Ouro Preto. 2017.

ABREU, R. L. **Imagem do município de Juruti – PA.** Mapa do estado do Pará. Abril/2006. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Juruti>>. Acessado em: 17/11/2018.

ALARIE, S.; GAMACHE, M. **Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines.** International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, v. 16, p. 59-76, 2002.

ALCOA WORLD ALUMINA (ALCOA). **Plano Integrado de Aproveitamento Econômico.** Projeto Juruti. 2005.

ALCOA WORLD ALUMINA (ALCOA). **Relatório socioeconômico 2005.** Disponível em: <http://www.alcoa.com/brazil/pt/news/releases/2009_04_13.asp>. Acessado em: 17/11/2018.

ALCOA WORLD ALUMINA (ALCOA). **Relatório do projeto de lavra - J26-RT-604B-00-0001.** Juruti. Fevereiro/2006.

ALCOA WORLD ALUMINA (ALCOA). **Relatório técnico de lavra – J26-MC-604B-00-CON-0003**. Juruti. Agosto/2007.

ALCOA WORLD ALUMINA (ALCOA). **Procedimento de Mina – Infraestrutura da mina – PGI –OPE-930Y-0006**. Juruti. Janeiro/2009.

ALCOA WORLD ALUMINA (ALCOA). **Procedimento de Mina – Decapeamento– PGI – OPE-930Y-0001**. Juruti. Julho/2014.

ALCOA WORLD ALUMINA (ALCOA). **Procedimento de Mina – Lavra do minério– PGI – OPE-930Y-0002**. Juruti. Maio/2016.

ALCOA WORLD ALUMINA (ALCOA). **Relatório de sustentabilidade 2016**. Poços de Caldas. Junho/2017.

ALCOA WORLD ALUMINA (ALCOA). **Annual Report 2018**. Alcoa Corporation. Pittsburgh, PA. Fevereiro/2019.

ANDRADE, E. L. **Introdução a pesquisa operacional: métodos e modelos para a análise de decisão**. 3 ed. Rio de Janeiro. 2004.

ANDRADE, R. Q.; GOLOBOVANTE, A. F. M.; PRAZERES, I. P.; OLIVEIRA, L. M.; MARTINS, L. L. **Aplicação de simulação de processos em um sistema de carregamento e pesagem de caminhões em uma mina**. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Belo Horizonte. Outubro/2011.

ARAÚJO, F. C. R., SOUZA, M. J. F. **Uma heurística para o planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões**. REM - Revista Escola de Minas, v. 64, n. 1, p. 69-76, 2011.

BRETAS, V. L. **Diagnóstico do consumo de água no beneficiamento de bauxita em Juruti-PA.** Trabalho de conclusão de curso. UFOP. Ouro Preto. 2014.

CELSO, T. B. **Estudo comparativo entre os métodos de decapeamento tradicional e wave com auxílio do software Dozsim®.** Trabalho de conclusão de curso. UNIFESSPA. Marabá. Julho/2014.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações.** 4ª edição. Editora Elsevier Ltda. 2015.

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.

COSTA, F. P.; SOUZA, M. J. F.; PINTO, R. L. **Um modelo de programação matemática para alocação estática de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade.** Revista Escola de Minas (REM). Ouro Preto. 2005. p. 77-81.

COSTA, M. A. B.; PEREIRA, C. R. Apostila Arena 11.0. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Engenharia de Produção. 2009.

COSTA, R. F. S.; MONTEVECHI, J. A. B.; SANTOS, M. J.; SANTOS, A. C. O. **Avaliação Econômica de cenários para uma célula de manufatura por simulação a eventos discretos.** Anais do XXIX ENEGEP. ABEPRO. Salvador. 2009.

CRUZ, C. H. B.; FRAGNITO, H. L.; COSTA, I. F.; MELLO, B. A. **Guia para Física Experimental: caderno de laboratório, gráficos e erros.** Instituto de Física, IFGW/UNICAMP. Versão 1.1, revista por CHBC e HLF em Setembro de 1997.

DÁVALOS, R. V. **Uma abordagem do ensino de simulação discreta baseada no uso de recursos computacionais.** Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP. 2002.

DESTRO, E. **Software para Planejamento Operacional de Lavra, Simulação e Despacho de Caminhões Visando ao Atendimento das Metas de Produção e Qualidade da Mistura de Minérios**. Tese de mestrado. REDEMAT/UFOP. Ouro Preto, 2015.

DUARTE, R. N. **Simulação Computacional: Análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de auto-peças**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Itajubá. 2003.

FARIAS, V. M.; MONTEIRO, C. C. **Alumínio**. DNPM. 2016.

FAST2MINE. **A solução**. Disponível em: < http://www.fast2mine.com/mining_control/>. Acessado em: 15/07/2019.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena**. 2 ed. Florianópolis: Visual Books. 2008.

HABASHI, F. **A Textbook of Hydrometallurgy. Published by: Métallurgie Extractive Québec, Enr.** 800, rue Alain, #504. Sainte Foy, Quebec. Canada G1X 4E7. 1993.

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

HARTMAN, H. L. **SME Mining Engineering Handbook**. 2ª ed. ed. Littleton. v. 2. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SMME). Colorado. 1992.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introdução à pesquisa operacional**. The McGraw-Hill Porto Companies. 2006. 8 ed. p. 2.

KELTON, D. W.; SARDOWSKY, R. P.; SARDOWSKY, D. A. **Simulation with ARENA**. 5ª Edição. McGraw-Hill. 2010.

LACERDA, A. L. S. **Fechamento de mina – Estudo de caso mina de Juruti**. UFOP. Ouro Preto. Maio/2014.

MOURA, S, R, A; FERREIRA, F, H, E; FUKUSHIMA, K, F; NETO, A, M, T; MOUTINHO, P. M. T.; COSTA, V. T. **Processo de obtenção do alumínio**. Universidade Federal do Pará (UFPA). 2008. p. 5, 10 e 11.

NETO, A. N. R.; PINTO, L. R. **Template do programa ARENA para simulação das operações de carregamento e transporte em mina a céu aberto**. Revista Escola de Minas (REM). Ouro Preto. Jan-Mar/2004. p. 52.

PEREIRA, R. M. **O uso da simulação na análise de cenários em operações de carregamento e transporte na Mineração Usiminas S.A.** Dissertação de Mestrado. UFOP. Fevereiro/2016.

PERONI, R. **Lavra a céu aberto – ENG05007, trabalho de teoria e prática, versão 01**. UFRGS. 2007. p. 9,10 e 11.

PRADO, D. **Usando o ARENA em simulação**. Belo Horizonte (MG): Desenvolvimento Gerencial. V.3. 1999.

PROJETO RADAM BRASIL (PRB). **Folha SA.21-Santarém**. Levantamento de recursos naturais. MME/DNPM. Rio de Janeiro. 1976. v.10.

RABELO, R. J. **Manual do ARENA versão 9.0**. Apostila. Departamento de Automação e Sistemas - Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

RAO, S. S. **Optimization: theory and practice**. 4. ed. John Willey & Sons. New York. 2009.

REIS, A.; BOURSCHEID, K., REIS, M. S. **A nucleação em restaurações ambientais de minas a céu aberto**. Restauração Ambiental Sistêmica (RAS). 3ª Oficina da Rede Brasileira de Restauração Ambiental (REBRE). Antonina/PR. 2014.

RODOVALHO, E. C. **Aplicações de ferramentas de simulação em operações mineiras para determinação de índices operacionais utilizados em planos de lavra adaptados ao estudo de caso da Mineração Casa de Pedra – CSN (Congonhas/MG)**. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto. Agosto/2013.

RODOVALHO, E. C.; TOMI, G. **Relação entre aspectos geométricos do método de lavra por tiras e a produtividade das operações de decapeamento**. VIII Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto. Rio de Janeiro. 2014.

RÖHRLICH, M.; MISTRY, M.; RUHRBERG, M. e MARTENS, P. N. **Bauxite mining in Brazil, different viewpoints concerning environmental and sustainable development**. VI SMMT/XVIII ENTMM – Rio de Janeiro. 2001. p. 507-513.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B. **Bauxita**. Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações. 2.ed. Rio de Janeiro. CETEM/MCTI. 2008. c.14, p. 311-337.

SANTOS, R. **Pesquisa Operacional, Introdução, Histórico e Conceitos Básicos**. 2008. Disponível em: < www.facom.ufms.br/~ricardo/Courses/OP-2008/Lectures/Lec01.pdf>. Acessado em: 18/11/2018.

SILVA, É. L. **Análise da produtividade do trator de esteira D11 em função do ângulo de corte com software DOZSIM durante o decapeamento da camada de estéril da mina de bauxita da Mineração Paragominas S. A**. Trabalho de conclusão de curso. UNIFESSPA. Marabá. Julho/2014.

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

SOUZA, W. T. **Notas de aula da disciplina MIN113 – Lavra a céu aberto**. UFOP. Ouro Preto. 2013.

TAHA, H. A. **Simulation Modeling and SIMNET**. Prentice Hall International, Inc., London, 1988.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional: uma visão geral**. 8a ed., São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2008.

APÊNDICES

Figura 19: Quadro de variáveis e outros elementos do modelo de decapeamento.

Tipo	Definição	Valor	Função
Entidade	Frente	1	Representa a tira e entra no sistema pelo <i>create</i> “frente pronta para o decape”
Entidade	Caminhão de estéril	3, 5 ou 10	São os caminhões que farão o transporte de argila de rebaixamento e entra no sistema pelo <i>create</i> “chegada de caminhões de estéril”
Variável	Prod_laterita_plan		Volume planejado de laterita
Variável	Prod_argila_rebaixe_plan		Volume planejado de argila para rebaixamento
Variável	Prod_argila_plan		Volume total planejado de argila (com e sem rebaixamento)
Variável	nEH	2	Número máximo de escavadeiras que podem operar ao mesmo tempo na tira
Variável	n_aloc_EH	[n_aloc_EH + 1] ou [n_aloc_EH – 1]	Utilizada para indicar se á ou não disponibilidade de escavadeira para carregamento de um caminhão
Variável	Altura da camada de argila	< ou > que 12m	Utilizada para decisão se irá ou não ocorrer rebaixamento
Variável	Argila para rebaixe	1 ou 0	Variável binária que indicará a necessidade ou não do rebaixamento de argila
Variável	Tipo de D11 na argila	1 ou 0	É definida como 1 se o tipo de D11 na argila for D11T_CD e é definida como 0 se o o tipo de D11 na argila for D11R

Variável	Tipo de D11 na laterita		É definida como 1 se o tipo de D11 na argila for D11T_CD e é definida como 0 se o tipo de D11 na argila for D11R
Variável	termino	1	Utilizada para finalizar a simulação
Variável	Tempo de decape	TNOW	Seu valor atribuído corresponde ao tempo de simulação no momento que a entidade passa pelo modulo onde a variável é definida. Utilizada no contador “tempo de decape da tira”.
Atributo	Capacidade dos caminhões de estéril	21 m ³	Característica atribuída às entidades caminhões e que será utilizada pelos contadores de produção de argila: “Produção de argila de rebaixamento” e “Produção total de argila”
-	Capacidade dos tratores D11T_CD	40,4 m ³	Utilizada pelos contadores de produção de argila e laterita nos circuitos com D11T_CD: “Prod_argila_T_CD” “Produção de argila com D11” “Produção de laterita com D11” “Prod_laterita_T_CD” “Produção total de argila” “Produção total de laterita”
-	Capacidade dos tratores D11R	43,6 m ³	Utilizada pelos contadores de produção de argila e laterita nos circuitos com D11R: “Prod_argila_R” “Produção de laterita com D11” “Produção de argila com D11” “Prod_laterita_R” “Produção total de argila” “Produção total de laterita”
Set	Set_D11R	5 tratores D11R definidos como recursos	Conjunto dos recursos D11R utilizados para remoção de argila ou laterita
Set	Set_D11T_CD	7 tratores D11T_CD definidos como recursos	Conjunto dos recursos D11T_CD utilizados para remoção de argila ou laterita

Set	Set_EH_365C	3 escavadeiras 365C definidas como recursos	Conjunto dos recursos de escavadeiras 365C utilizados para remoção de argila de rebaixamento
Recurso	Equipe de topografia	-	Utilizada nas atividades de levantamento topográfico

Figura 20: Quadro de variáveis e outros elementos do modelo de lavra.

Tipo	Definição	Valor	Função
Entidade	Frente	1	Representa a tira e entra no sistema pelo <i>create</i> “frente pronta para lavra”
Entidade	Caminhão de minério	3, 5 ou 10	São os caminhões que farão o transporte de minério lavado ou bruta e entra no sistema pelo <i>create</i> “chegada de caminhões de minério”
Variável	Prod_minério_plan		Volume planejado de minério podendo ser de lavado ou bruta dependendo da tira analisada.
Variável	Tipo de minério	1 ou 0	Definido como 1 se o minério for bruta e 0 se o minério for lavado
Variável	Tipo de EH	1 ou 0	Definido como 1 se o tipo de escavadeira usada é 336D e 0 se for a escavadeira 349D
Variável	nEH	1	Número máximo de escavadeiras que podem operar ao mesmo tempo na tira
Variável	n_aloc_EH	[n_aloc_EH + 1] ou [n_aloc_EH – 1]	Utilizada para indicar se á ou não disponibilidade de escavadeira para

			carregamento de um caminhão
Variável	Minério liberado	1 ou 0	Variável binária que indicará se a escarificação do minério terminou e se está pronto para o carregamento e transporte
Variável	termino	1	Utilizada para finalizar a simulação
Variável	Tempo de liberação	TNOW	Seu valor atribuído corresponde ao tempo de simulação no momento que a entidade passa pelo modulo onde a variável é definida. Utilizada no contador “tempo de lavra da tira”.
Atributo	Capacidade dos caminhões de minério	23 m ³	Característica atribuída às entidades caminhões e que será utilizada pelos contadores de produção: “Produção total de minério”, “Produção de bruta” e “Produção de lavado”
Set	Set_D11	2 tratores D11 definidos como recursos	Conjunto dos recursos D11 utilizados para escarificação do minério
Set	Set_EH_336D	3 escavadeiras 336D definidas como recursos	Conjunto dos recursos EH 336D utilizados para remoção de minério
Set	Set_EH_349D	3 escavadeiras 349D definidas como recursos	Conjunto dos recursos EH 349D utilizados para remoção de minério
Recurso	Equipe de topografia	-	Utilizada nas atividades de levantamento topográfico
Recurso	Britador	-	Utilizada nas atividades de basculamento