



MINISTERIO DA DEFESA
EXERCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIENCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
(Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho, 1792)

**DIMENSIONAMENTO DE EQUIPES DE TERRAPLANAGEM UTILIZANDO
SIMULAÇÃO**

CAROLINA GOMES RODRIGUES – 1º Ten
ISAAC ARAGÃO DO NASCIMENTO - AL

Rio de Janeiro

2016

DIMENSIONAMENTO DE EQUIPES DE TERRAPLANAGEM UTILIZANDO SIMULAÇÃO

Projeto de fim de curso apresentada ao Curso de Engenharia de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia.

Orientador: Silveira Lopes, DSc

Rio de Janeiro

2016

c2016

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

| | |
|-------|--|
| 624.1 | Rodrigues, Carolina Gomes |
| R696d | Dimensionamento de equipes de terraplanagem utilizando simulação / Carolina Gomes Rodrigues, Isaac Aragão do Nascimento; orientados por Luiz Antônio Silveira Lopes – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2016. |
| | 57p. : il. |
| | Projeto de Fim de Curso (PROFIC) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016. |
| | 1. Curso de Engenharia de Fortificação e Construção – Projeto de Fim de Curso. 2. Terraplanagem. 3. Software Anylogic. I. Nascimento, Isaac Aragão do. II. Lopes, Luiz Antonio Silveira. III. Título. IV. Instituto Militar de Engenharia. |

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

CAROLINA GOMES RODRIGUES – 1º Ten

ISAAC ARAGÃO DO NASCIMENTO – AI

**DIMENSIONAMENTO DE EQUIPES DE TERRAPLANAGEM UTILIZANDO
SIMULAÇÃO**

Projeto Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Fortificação e Construção.

Orientador: Luiz Antônio Silveira Lopes, Dsc-Cel R1 QEM/FC

Aprovado em 30 de Setembro de 2016 pela seguinte Banca Examinadora:

Maria Esther Soares Marques - D. Sc.

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães - D.Sc.- Maj QEM/FC

Luiz Antônio Silveira Lopes – D.Sc.-Cel R1 QEM/FC

RIO DE JANEIRO

2016

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| SUMÁRIO..... | 1 |
| LISTA DE TABELAS..... | 3 |
| LISTA DE GRÁFICOS | 3 |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | 4 |
| LISTA DE SIGLAS..... | 5 |
| 1. Introdução | 8 |
| 1.1 Justificativa..... | 8 |
| 1.2 Objetivos gerais..... | 9 |
| 1.3 Objetivos específicos..... | 10 |
| 2. Revisão Bibliográfica | 10 |
| 2.1 Modelagem e modelos de simulação | 10 |
| 2.2 Sistema, modelos e simulações | 11 |
| 2.2.1 Estática vs. Dinâmica | 12 |
| 2.2.2 Contínua vs. Discreta..... | 12 |
| 2.2.3 Determinístico vs. Não determinístico..... | 13 |
| 2.3 Métodos de simulação de modelos | 13 |
| 2.4 Alguns softwares que podem ser utilizados para dimensionamento de equipes de Terraplanagem | 15 |
| 2.4.1 Ururau | 15 |
| 2.4.2 Arena | 16 |
| 2.4.3 Anylogic..... | 17 |
| 2.5 Processo De Terraplanagem | 18 |
| 2.6 Método De Dimensionamento De Equipes De Terraplanagem..... | 20 |
| 2.7.1 Custo horário de um equipamento | 23 |
| 2.7.1.1 Tipos de Custos..... | 23 |
| 2.7.2 Comparação de compra e locação | 30 |
| 2.7.3 Custo Unitário de Serviço de Terraplanagem | 32 |
| 2.7.4 Custo do Momento de Transporte para distâncias longas, utilizando caminhão basculante | 32 |
| 3. Simulação: Metodologia | 32 |
| 3.1 Anylogic..... | 33 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.2 | Cálculo de custos..... | 39 |
| 4. | Resultados e discussões | 42 |
| 4.1 | Anylogic..... | 42 |
| 4.2 | Análise de Custos a partir da planilha elaborada..... | 48 |
| 4.3 | Análise de obra em execução..... | 51 |
| 5. | Conclusão | 53 |
| 6. | Referências Bibliográficas | 54 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------|--|-----|
| Figura 2.1: | Modelagem em ambientes complexos. Fonte: Ilya Grigoryev. | 11 |
| Figura 2.2: | Formas de se estudar um sistema. Fonte: Bank et. al, 2004. | 12 |
| Figura 2.3: | Níveis de abstração e métodos de simulação de modelos. Fonte: Grigoryev et al. (2004)..... | 14 |
| Figura 2.4: | Interface do Software Ururau. | 16 |
| Figura 2.5: | Interface do Software Arena. | 17 |
| Figura 2.6: | Interface do Software Anylogic..... | 18 |
| Figura 2.7: | Trator de Esteira Komatsu..... | 18 |
| Figura 2.8: | Pá-Carregadeira de Esteira 963D. Fonte: trucktrailers.com.br. | 19 |
| Figura 2.9: | Caminhão Fora-de-Estrada CAT 769B. Fonte: br.minutemachine.com. | 19 |
| Figura 3.1– | Modelo de eventos discretos de uma operação de terraplanagem. | 34 |
| Figura 3.2– | Agentes e variáveis utilizados para o processo..... | 35 |
| Figura 3.3: | Ação à ser executada ao final do “service” | 36 |
| Figura 3.4 – | Ambiente do Anylogic após o início da simulação. | 36 |
| Figura 3.5: | Execução bidimensional da simulação..... | 37 |
| Figura 3.6: | Execução tridimensional da simulação | 37 |
| Figura 3.7: | Tempo de Execução da simulação. | 39 |
| Figura 3.8: | Ferramenta de cálculo de custo para equipamentos de terraplanagem..... | 39 |
| Figura 3.9: | Cálculo do custo de propriedade. | 40 |
| Figura 3.10: | Preenchimento da ferramenta de custos por planilha | 39 |
| Figura 3.11: | Análise do custo com caminhões..... | 420 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1: Vida útil de cada equipamento..... | 23 |
| Tabela 2.2: Tabela com fator de carga por equipamento..... | 26 |
| Tabela 2.3: Consumo médio de lubrificantes por alguns equipamentos..... | 26 |
| Tabela 2.4: Consumo de Graxa por equipamento..... | 27 |
| Tabela 2.5: Exemplo de tabela fornecendo dados para o cálculo do consumo de filtros. Fonte: “Manual de Produção Cartepillar’ | 27 |
| Tabela 2.6: Estimativa de vida útil dos pneus..... | 28 |
| Tabela 2.7: Valores do coeficiente de reparo K..... | 29 |
| Tabela 3.1: Lista de funções usadas no AnyLogic..... | 33 |
| Tabela 3.2: Tabela dos recursos disponíveis e as respectivas saídas diárias..... | 34 |
| Tabela 3.3: Tempo de entrada de agentes no processo..... | 37 |
| Tabela 4.1: Comportamento do modelo variando-se o número de pás-carregadeiras..... | 41 |
| Tabela 4.2: Comportamento do modelo considerando diferentes volumes de terra..... | 43 |
| Tabela 4.3: Custo total com caminhões..... | 47 |
| Tabela 4.4: Custos de obra para diferentes tipos de volume de terra..... | 48 |
| Tabela 4.5: Média e desvio padrão do custo para diferentes volumes de terra..... | 49 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 2.1: Tendência da vida útil x custos do equipamento..... | 23 |
| Gráfico 4.1: Comportamento do modelo variando-se o número de pás-carregadeiras..... | 42 |
| Gráfico 4.2: Nº de caminhões x Nº de pás-carregadeiras..... | 42 |
| Gráfico 4.3: Quantidade de horas executadas para a execução do serviço..... | 44 |
| Gráfico 4.4: Redução percentual do tempo em função do número de caminhões..... | 45 |
| Gráfico 4.5: Desvio Padrão em função do número de caminhões..... | 45 |
| Gráfico 4.6: Quantidade de horas de serviço em função do número de caminhões..... | 47 |
| Gráfico 4.7: Custo total em função do número de caminhões..... | 48 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 4.8: Custo de obra para diferentes volumes de terra..... | 49 |
| Gráfico 4.9: Análise para obra corrente..... | 50 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------|---|
| Q | Produção da pá-carregadeira |
| C | Capacidade da pá-carregadeira |
| ω | Fator de empolamento do material escavado |
| E | Fator de eficiência da operação da máquina |
| k | Fator de eficiência da caçamba |
| T | Tempo de ciclo pá-carregadeira |
| n | Número de operações de carga |
| q | Capacidade do caminhão |
| C | Capacidade da pá-carregadeira |
| n | Número de operações de carga |
| t_b | Tempo de ciclo do caminhão |
| t_c | Tempo para a carregadeira completar a carga do caminhão |
| d_m | Distância média de transporte |
| v_{ida} | Velocidade do veículo carregado |
| v_{volta} | Velocidade do veículo descarregado |
| t_D | Tempo de descarga do caminhão |
| t_M | Tempo de manobra do caminhão |
| N | Número de caminhões a ser atendido por uma carregadeira |
| D_h | Depreciação horária |
| V_o | Valor inicial do equipamento |
| V_r | Valor residual do equipamento |
| H | Vida útil do equipamento |
| J_h | Juros de investimento |
| j | Taxa anual de juros anual do mercado |
| I_m | Investimento médio anual |
| n | Vida útil em anos |
| a | Horas de emprego do equipamento por ano |

| | |
|-------------|--|
| C | Consumo de combustível |
| P | Potência do equipamento |
| M_h | Custo de manutenção horária |
| K' | Coefficiente de reparo |
| C_{prop} | Custo de Produtividade |
| C_{mnt} | Custo de Manutenção |
| L | Custo horário do equipamento |
| $\sum CT_h$ | Soma dos custos horários dos equipamentos empregados |
| $\sum Q_h$ | Produção horária da equipe |
| C | Custo unitário do serviço |
| C_t | Custo do momento de transporte |
| C_h | Custo horário do equipamento de transporte |
| P_h | Produção horária do equipamento de transporte |
| d | Distância de transporte |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| CRO | Comissão Regional de Obras |
| IME | Instituto Militar de Engenharia |
| SED | Simulação de Eventos Discretos |

RESUMO

Operações com equipamentos de terraplanagem podem ser interpretados pela teoria dos sistemas como eventos discretos, proporcionando a criação de modelos matemáticos eficientes para a análise desse tipo de processo. Atualmente, os métodos e ferramentas para simulação de processos reais estão cada vez mais desenvolvidos, servindo de parâmetro para implantação, correção e acompanhamento de projetos. O objetivo desse projeto de fim de curso é apresentar um procedimento de terraplanagem, a partir de um simulador, com o objetivo de avaliar a economia do método empregado. A ferramenta utilizada para este processo foi o software Anylogic.

PALAVRAS CHAVE: Terraplanagem, simulação, Anylogic.

ABSTRACT

Operations with earthmoving equipment can be interpreted by the theory of discrete event's systems, providing the creation of efficient mathematical models for the analysis of such process. Currently, methods and tools for simulation of a real world processes are increasingly developed, serving as a parameter for implementation, patch and monitoring of projects. This work aimed to present a project earthwork procedure, from a simulation software, in order to evaluate the method employed economy. The tool used for this process was the Anylogic software.

Keywords: Earthmoving, simulation, Anylogic.

1. Introdução

A atividade muito importante nos projetos de engenharia é a terraplanagem, que tem por objetivo o nivelamento do terreno para a execução de obras. Nessa atividade, algumas operações são realizadas, dentre elas: escavação, carregamento, transporte, espalhamento e formatação de solos. Cada etapa utiliza um equipamento distinto, o que vem a possibilitar um dimensionamento de frota para cada fase de projeto.

Existem diversos programas disponíveis para análise de projetos de projetos de engenharia, muitos deles com enfoque em processos de logística. Cada um deles apresenta características específicas envolvendo graus de complexidade e funcionalidades distintos.

Em obras que envolvem movimentação de terra, a tendência é utilizar a quantidade de equipamentos disponível, de forma determinística, sem uma análise mais objetiva do número ideal de máquinas que realmente devem ser empregadas no decorrer do processo. Informações dos materiais utilizados, suas características, procedimentos de transporte, entre outros, implementados em um modelo de simulação, podem determinar a produção e o tempo esperado para uma determinada atividade, a partir de uma equipe de máquinas (Jayawardane e Price, 1994).

O dimensionamento de equipes de forma determinística acaba acarretando em um dimensionamento deficiente, com equipamentos ociosos ou em número inadequado.

1.1 Justificativa

Em um projeto, quanto menos modelado for o terreno, mais horas de trabalho na concepção de projeto serão necessárias para sua conclusão. A maneira como muitas vezes se organiza o terreno leva inevitavelmente a custos altos, áreas instáveis e destruição ecológica devido à necessidade de renovação da cobertura vegetal. O serviço de terraplanagem é essencial as obras de engenharia, por isso ter uma ferramenta que permita

uma visualização do processo pode ser fundamental para uma estimativa de gastos e cumprimento de prazos.

De acordo com Hare *et al.* (2011), os custos em terraplanagem equivalem em torno de 25% do total em construção de estradas, e esse fator pode ter um considerável aumento quando é avaliado o local onde a estrada será construída. Além disso, Lima (2003) atesta em seus estudos que os custos relacionados a terraplanagem representam a maior parcela do custo total das obras rodoviárias. Logo, a terraplanagem é uma etapa de relevante impacto econômico dentro de um projeto de engenharia.

Segundo Cristóbal (2009), tempo, custo e qualidade são os três fatores que desempenham um papel relevante no planejamento e controle de projetos de construção. Por conta disso, um dimensionamento adequado do projeto de terraplanagem pode ter um impacto positivo em relação aos custos totais da obra.

Diferentes tipos de abordagens de simulação têm sido utilizadas para reproduzir as operações de construção, dentre eles pode-se destacar modelos de simulação discreta e modelos baseados em agentes. Cada tipo de simulação tem vantagens e desvantagens, fazendo com que a escolha do modelo dependa de fatores como o tipo de problema e o cenário a ser modelado.

O software Anylogic foi uma ferramenta escolhida neste trabalho para construção de uma modelagem desse processo. Ele apresenta aplicações diversas, que vão desde ciclos de produção em uma manufatura à processos logísticos. Assim, considerando o cenário introduzido e a existência de um software versátil, compreende-se a necessidade de adaptar essa ferramenta para aperfeiçoar o trabalho de engenheiros, garantindo maior entendimento e eficiência nas obras de terraplanagem.

1.2 Objetivos gerais

Este trabalho teve por objetivo estudar sobre uma das etapas do processo de terraplanagem, responsável pelo transporte do solo coletado pelos caminhões utilizados, além de mostrar como esse tipo de processo pode ser otimizado por meio do uso de uma ferramenta computacional, o software Anylogic.

1.3 Objetivos específicos

Explicar o funcionamento de um simulador e como ele será aplicado em uma das etapas do processo de terraplanagem, listando as atividades envolvidas durante o processo e determinando os recursos necessários para cada atividade desenvolvida. A etapa seguinte consiste no desenvolvimento de um modelo de simulação para uma atividade de terraplanagem, acompanhada de uma animação em 3D. Depois desta etapa serão analisados os resultados da simulação para diferentes parâmetros. Por fim, uma análise de custos será realizada para, em conjunto com os resultados de horas de serviço fornecidos pela simulação, possa auxiliar na escolha do dimensionamento ideal da quantidade de caminhões em uma equipe de terraplanagem.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Modelagem e modelos de simulação

Para Kelton *et al.* (2000), simulação é uma gama variada de métodos e aplicações que reproduzem o comportamento de sistemas reais, usualmente utilizando-se ferramentas computacionais. As modelagens são ferramentas utilizadas para resolver problemas do mundo real onde, em muitos casos, não é possível realizar experimentos com objetos reais para se definir a melhor solução. Fazer tais experimentos pode ser muitas vezes bastante custoso, perigoso ou até impossível em um espaço de tempo aceitável.



Figura 2.1: Modelagem em ambientes complexos. Fonte: Ilya Grigoryev (2014).

Assim, um modelo de simulação pode ser definido como uma interpretação de um sistema real (ou hipotético) e a sua consequente análise através da condução de experimentos feitos com a finalidade de se entender o comportamento do sistema.

Segundo Banks *et al.* (2004), modelos de simulação podem ser usados tanto como uma ferramenta de análise para prever o efeito de mudanças em sistema existente, como também, podem servir de ferramenta de design para prever a performance de novos sistemas sobre circunstâncias variáveis.

2.2 Sistema, modelos e simulações

Um sistema é definido como um grupo de entidades, por exemplo pessoas ou máquinas, que agem e interagem juntas com o objetivo de atingir algum fim lógico (Schmidt e Taylor 1970). Na prática, isso significa que um sistema depende dos objetivos de um estudo em particular. O grupo de entidades que compreendem um sistema para um estudo podem somente ser um grupo representativo de tal sistema e não de outros similares. (Banks *et al.*, 2004).

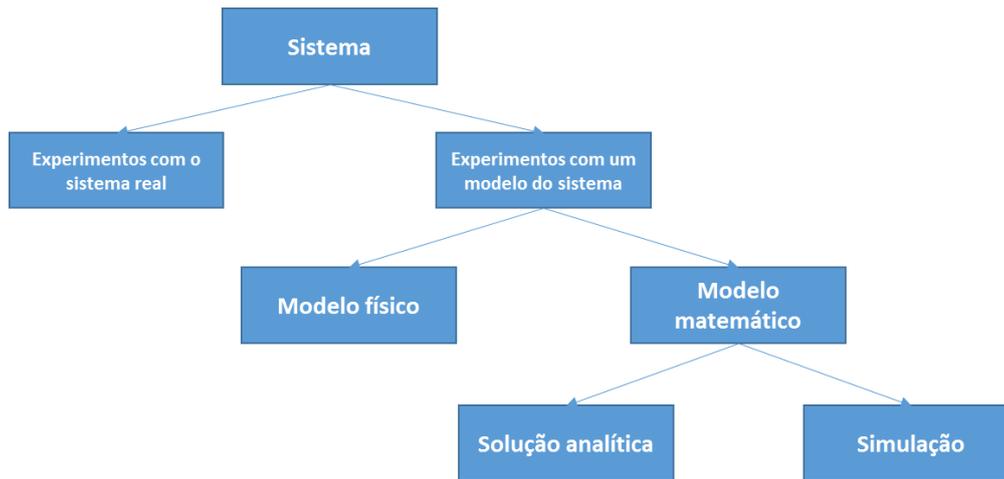


Figura 2.2: Formas de se estudar um sistema. Fonte: Banks *et al.*, 2004.

Entretanto, devido à grande complexidade dos sistemas de interesse e modelos necessários, muitas dos problemas caem na categoria de simulação.

Existem vários tipos de modelos de simulação, incluindo modelos mentais que pessoas usam para entender como certas coisas funcionam no mundo real: os carros, a economia, o esporte e a política. Todas nossas decisões são baseadas em modelos mentais (Grigoryev 2004). Modelos de simulação normalmente são classificados em três diferentes dimensões:

2.2.1 Estática vs. Dinâmica

Simulação estática representa modelos de simulação que recriam o comportamento de um sistema em um ponto específico no tempo ou onde o tempo representa um papel simples. Por outro lado, modelos dinâmicos de simulação representam como um sistema se comporta com o tempo (Law e Kelton 2000).

2.2.2 Contínua vs. Discreta

Numa simulação com elementos contínuos, o modelo fornece uma representação contínua do comportamento do que está sendo modelado como, por exemplo, a temperatura em um canteiro de obras. Em uma simulação com elementos discretos, o sistema é analisado à medida que este evolui no tempo por uma representação em que as variáveis mudam instantaneamente em pontos separados de tempo (Banks *et al.* 2004).

Ainda segundo Banks *et al.*(2004), algumas simulações podem conter tanto elementos contínuos quanto discretos, sendo chamados de “mixedcontinuous-discretmodels” e são utilizados para a representação de modelos mais complexos.

2.2.3 Determinístico vs. Não determinístico

Um modelo é dito determinístico quando todos os dados inseridos no sistema são exatos, não possuindo caráter aleatório entre eles. Em sistemas determinísticos, o resultado é exato uma vez que a quantidade de entradas e os relacionamentos de entidades no modelo são bem especificadas. Como a realidade é não determinística, o dimensionamento baseado em métodos determinísticos promove resultados que podem apresentar erros consideráveis.

Um exemplo desse tipo de modelo é a operações de carga e descarga. No entanto, um grande número de modelos deve ser modelado considerando-se pelo menos algum nível de aleatoriedade entre as entradas do sistema. Tais sistemas são chamados não determinísticos. Um exemplo de modelo não determinístico é a movimentação de pessoas em um terminal de transporte.

2.3 Métodos de simulação de modelos

Modelos de simulação modernos são divididos em três métodos: métodos baseados em eventos discretos, métodos baseados em agentes e métodos baseados em sistemas dinâmicos. Tais métodos são um framework usado para mapear o mundo real em um modelo. (Grigoryev, 2004).

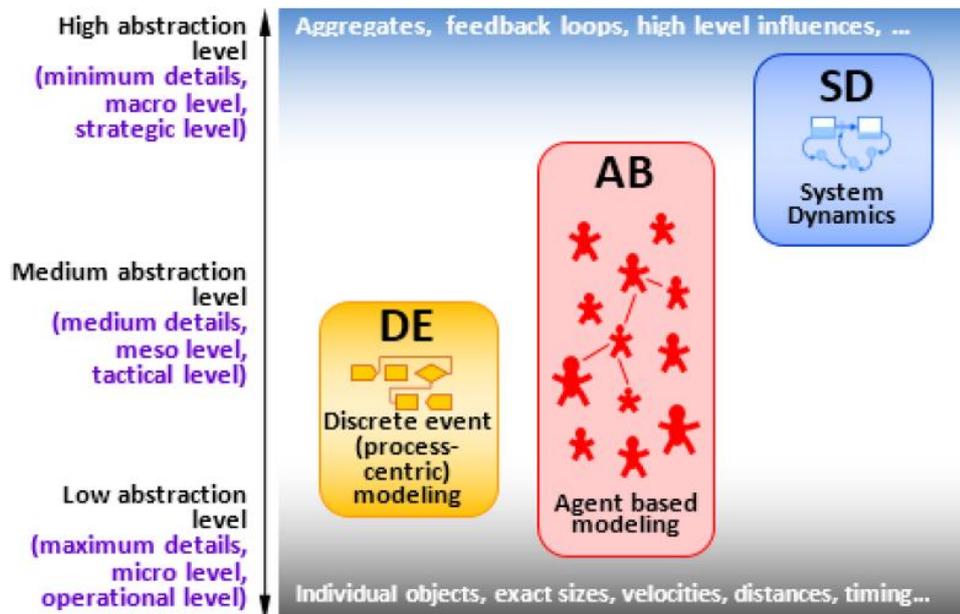


Figura 2.3: Níveis de abstração e métodos de simulação. Fonte: Grigoryev, 2004)

Modelagem por eventos discretos é um método de modelagem baseado no conceito de entidades, recursos e processos representados por blocos descrevendo o fluxo de uma entidade e compartilhamento de recursos.

Sistemas dinâmicos podem ser utilizados para o estudo de informações de feedback de alguma característica de uma atividade industrial que mostram como uma estrutura organizacional, atividades determinadas e atrasos em geral interagem para influenciar o sucesso de uma empresa (Forrester, 1961). Como visto na figura 3, sistemas dinâmicos são normalmente utilizados em modelos de alto nível de abstração.

Segundo Boshchev (2004), modelos baseados em agentes definem o comportamento em um nível de indivíduo e o comportamento global emerge do resultado de muitos (dezenas, centenas, milhares, milhões) de indivíduos, cada um seguindo seu próprio comportamento, vivendo no mesmo ambiente e comunicando um com o outro e com o ambiente em si.

Além disso, segundo Grigoryev (2004), modelos de simulação possuem seis vantagens chave:

1. Modelos de simulação permitem analisar sistemas e achar soluções onde métodos como cálculos analíticos e programação linear falham;
2. Uma vez definido o nível de abstração, é mais fácil desenvolver um modelo de simulação que um modelo analítico. Aquele normalmente requer menos raciocínio, e o seu processo de desenvolvimento é escalável, incremental e modular;
3. A estrutura de um modelo de simulação naturalmente reflete a estrutura do sistema;
4. Em um modelo de simulação é possível medir valores e caminhos dentro do nível de abstração e pode-se adicionar pontos de medida e análises estatísticas em qualquer tempo;
5. A habilidade de executar e animar o comportamento do sistema no tempo é uma das grandes vantagens da simulação. Animações são úteis para demonstrações, verificações e debugging;
6. Modelos de simulação são muito mais convincentes que planilhas de Excel. Usando-se simulação como suporte para uma proposta é possível ter-se uma vantagem sobre aqueles apenas com números.

2.4 Alguns softwares que podem ser utilizados para dimensionamento de equipes de Terraplanagem

É possível utilizar linguagem de programação ou até planilhas eletrônicas para otimizar o estudo. Além disso, a tecnologia está cada vez mais presente, e diversos modelos de software, que utilizam sistemas com processos discretos podem ser encontrados no mercado. Pode-se destacar programas simples, mas que podem atender as necessidades básicas de análise do processo de transporte de terra, dentre eles: Ururau, Arena e Anylogic.

2.4.1 Ururau

O Ururau é um software de código aberto que utiliza linguagem Java. O software pode ser utilizado na construção de modelos de simulação a eventos discretos (SED). Assim como no exemplo de terraplanagem em questão. Sua interface e funcionalidades são bastante simplificadas, podendo ser utilizado com um software secundário, pois não apresenta grandes recursos. A figura a seguir mostra a interface do programa.

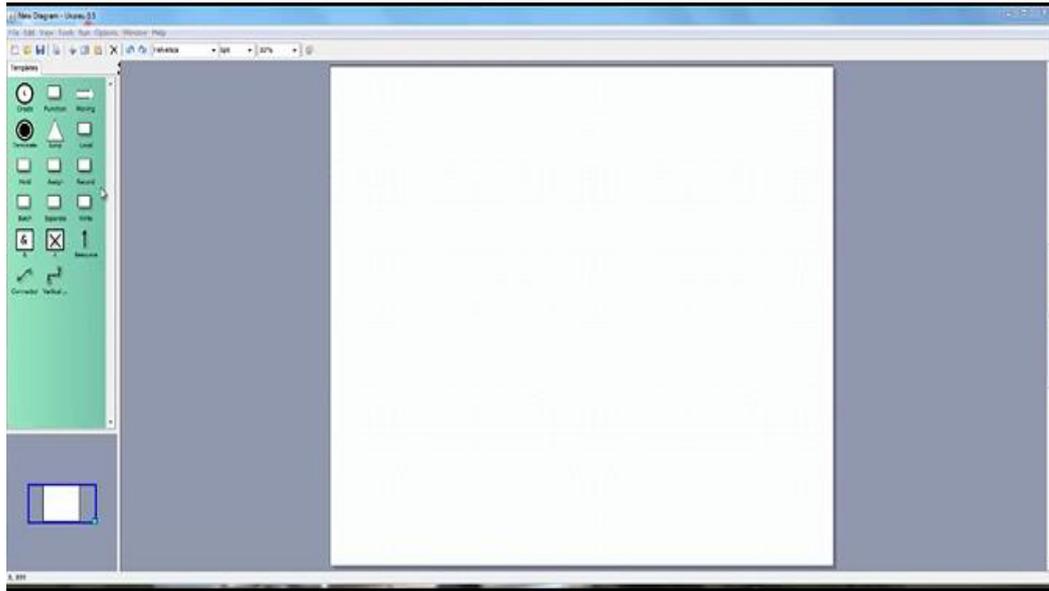


Figura 2.4: Interface do Software Ururau.

2.4.2 Arena

O software ARENA apresenta um ambiente gráfico de simulação bastante intuitivo. Ele contém recursos para modelagem de processos, desenho e animação, análise estatística e análise de resultados. Utilizando templates simples, o software ARENA pode ser utilizado como simulador em diversas aplicações, inclusive obras de engenharia.

Normalmente, o software utiliza modelos lógico-matemáticos para representar a dinâmica do sistema em estudo. Este modelo normalmente incorpora valores para tempos, distâncias, o que facilita a representação de uma situação real. A modelagem é feita visualmente com objetos orientados à lógica de programação. Ao modelo são anexados dados sobre o sistema. Neste ponto da simulação são utilizadas distribuições estatísticas geradas a partir de uma coleção de dados sobre o parâmetro a ser inserido. Somando-se

os dados e o modelo lógico-matemático, teremos uma representação do sistema. A figura 2, a seguir, representa a interface do Software Arena. (PRADO, 2004)

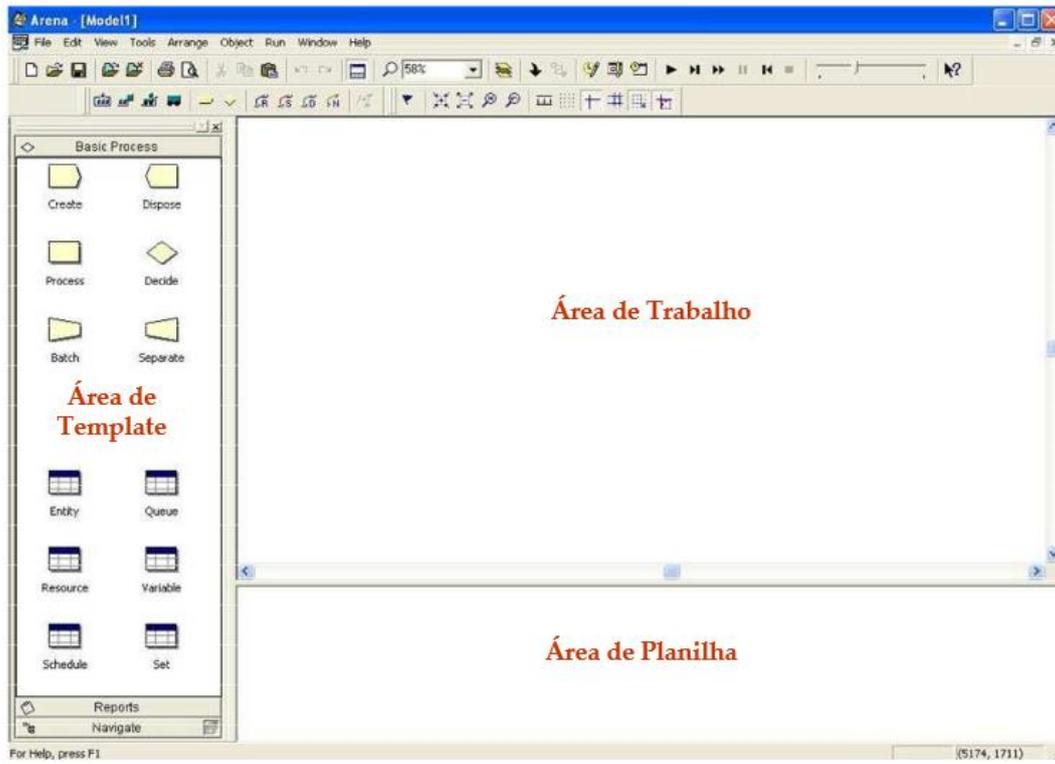


Figura 2.5: Interface do Software Arena.

2.4.3 Anylogic

Anylogic suporta metodologias como dinâmica de sistemas, processos baseados em eventos discretos e modelagens baseadas em agentes. A flexibilidade permite níveis maiores de detalhes. A interface gráfica, as ferramentas e objetos de biblioteca do Anylogic permitem a criação de um modelo mais completo do processo em questão. Por conta disso, o software foi escolhido para simular a etapa de transporte do processo de terraplanagem. A figura 6 mostra a interface do Anylogic. (Gregoryex 2014)

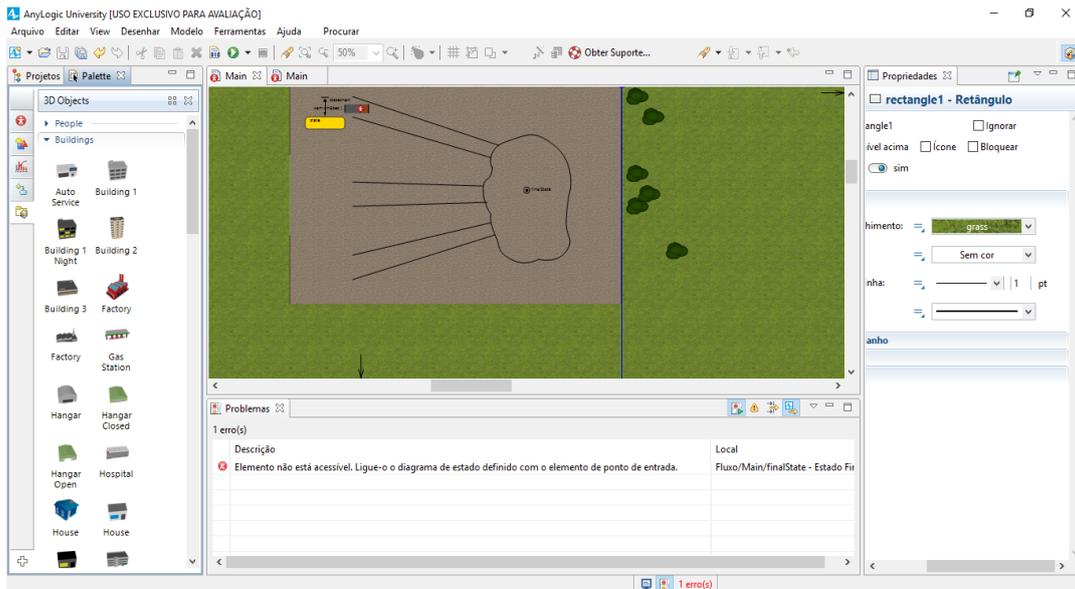


Figura 2.6: Interface do Software Anylogic.

2.5 Processo de Terraplanagem

O processo de terraplanagem é constituído de diversas etapas que envolvem escavação carregamento e transporte de solo. Os principais equipamentos utilizados na movimentação de terra são os seguintes:

1. Trator de esteira – utilizado durante a escavação:



Figura 2.7: Trator de Esteira Komatsu.

2. Pá carregadeira – utilizada durante no processo de carregamento:



Figura 2.8: Pá-Carregadeira de Esteira 963D. Fonte: truckstrailers.com.br.

3. Caminhão – utilizado no transporte de material:



Figura 2.9: Caminhão Fora-de-Estrada CAT 769B. Fonte: br.minutemachine.com.

2.6 Método de dimensionamento de equipes de terraplanagem

O método tradicional de dimensionamento de equipes que utilizam pá-carregadeira e caminhão basculante, abordado por Ricardo e Catalani (1990), visa determinar a quantidade de unidades de transporte a ser utilizada em conjunto com uma carregadeira. O processo de cálculo é apresentado a seguir:

Inicialmente, calcula-se o rendimento ou produção de uma pá-carregadeira, utilizando a equação 1.

$$Q = \frac{C \cdot \omega \cdot E \cdot k}{T} \text{(Equação 1)}$$

Onde:

Q - Produção da pá-carregadeira (m³/h);

C - Capacidade da pá-carregadeira (m³);

ω - Fator de empolamento do material escavado;

E - Fator de eficiência da operação da máquina;

k - Fator de eficiência da caçamba;

T - tempo de ciclo pá-carregadeira (h).

Em seguida, deve-se determinar o número de viagens requeridas para o carregamento do caminhão por parte da pá-carregadeira. Esse passo pode ser representado pela equação 2:

$$n = \frac{q}{C \cdot k} \text{(Equação 2)}$$

Onde:

n - Número de operações de carga;

q - Capacidade do caminhão (m³);

C - Capacidade da pá-carregadeira (m³);

k - Fator de eficiência da caçamba.

O próximo passo, é a determinação do tempo necessário para a carregadeira completar a carga da unidade de transporte. A expressão para o cálculo é dada pela equação 3:

$$t_c = n \times T \text{ (Equação 3)}$$

Onde:

t_c - Tempo para a carregadeira completar a carga do caminhão (h);

n - Número de operações de carga;

t - Tempo de ciclo pá-carregadeira (h).

O tempo de ciclo da unidade de transporte é calculado pela equação 4:

$$t_b = t_c + d_m \left(\frac{1}{v_{ida}} + \frac{1}{v_{volta}} \right) + t_d + t_m \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

t_b - Tempo de ciclo do caminhão (h);

t_c - Tempo para a carregadeira completar a carga do caminhão (h);

d_m - Distância média de transporte (km);

v_{ida} - Velocidade do veículo carregado (km/h);

v_{volta} - Velocidade do veículo descarregado (km/h);

t_D - Tempo de descarga do caminhão (h);

t_M - Tempo de manobra do caminhão (h).

Finalmente, é possível obter o número de caminhões a ser atendido por uma carregadeira pela equação 5:

$$N = \frac{t_B}{t_c} \text{ (Equação 5)}$$

Onde:

N - Número de caminhões a ser atendido por uma carregadeira;

t_B - Tempo de ciclo do caminhão (h);

t_C - Tempo para a carregadeira completar a carga do caminhão (h).

Como o número de equipamentos a ser alocado para a movimentação de terra em um trecho de via deve corresponder a um valor discreto, opta-se pelo uso do número inteiro imediatamente inferior ou superior, conforme o ilustrado nas equações 6 e 7 abaixo:

$$N > \frac{t_B}{t_C} \text{ (Equação 6)}$$

$$N < \frac{t_B}{t_C} \text{ (Equação 7)}$$

Adotando-se um número inteiro imediatamente inferior, haverá um número menor de pás-carregadeiras e os caminhões basculantes irão governar a produção. Caso contrário, haverá um número menor de caminhões basculantes e a carregadeira irá governar a produção. Usualmente, o segundo caso é mais recomendado, pois tal hipótese permite uma maior fluidez na dinâmica da obra. De fato, caminhões basculantes são geralmente os equipamentos críticos, pois normalmente são adquiridos por meio de contrato, diferentemente das carregadeiras que normalmente já se encontram na obra. Isso pode resultar em uma ociosidade maior das carregadeiras por conta da dependência da aquisição de equipamentos.

O método corrente de dimensionamento de equipes de pá-carregadeira e caminhão basculante pode apresentar algumas limitações: por exemplo, dependendo do valor de N haverá ociosidade na operação de equipamentos. Além disso, não é levado em questão as variações nos tempos de ciclo das operações das máquinas devido às incertezas, por ser um modelo determinístico.

2.7 Análise de Custos

A determinação do custo horário de equipamentos é difícil, pois vários fatores podem influenciar no cálculo, principalmente fatores relacionados a ações externas, como

por exemplo, a inutilização de um equipamento por falha ou devido a condições climáticas que possam interferir no seu funcionamento.

É preciso trabalhar os cálculos estimativos com relativa margem de segurança, tentando assimilar as variáveis presentes na vida cotidiana de uma obra para uma maior aproximação com um custo adequado.

2.7.1 Custo horário de um equipamento

2.7.1.1 Tipos de Custos

Segundo Ricardo et al (1990), pode-se dividir a análise de custos em três tipos pré-definidos. Custos de propriedade, custos de Operação e custos de Manutenção. A análise feita por tais autores pode ser vista resumidamente a seguir:

2.7.1.1.1 Custos de Propriedade

Os custos de propriedade englobamos Custos de Depreciação e os Custos dos Juros do Investimento.

2.7.1.1.1.1 Os Custos de Depreciação

A depreciação é o conjunto de despesas provenientes de fatores, como a ação do tempo e do desgaste do equipamento. O gráfico 1 (Ricardo et al. 1990) mostra como o conceito econômico está ligado à vida útil do equipamento. A vida útil do equipamento pode ser entendida como o tempo de retorno do capital investido. Na tabela 1 (Ricardo et al. 1990) é possível observar a vida útil provável de um equipamento, admitindo-se uma utilização média de 2000h no ano.

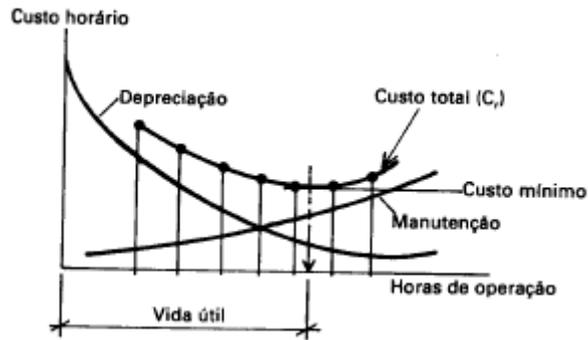


Gráfico 2.1: Tendência da vida útil x custos do equipamento.

| Vida Útil Provável | | | | | |
|--------------------------|----------|-------------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|
| Equipamento | Tipo | Chave | Condições favoráveis (h) | Condições médias (h) | Condições severas (h) |
| Trator de esteira | D3 - D7 | Trator de esteira D3 - D7 | 12.000 | 10.000 | 8.000 |
| Trator de esteira | D8 - D11 | Trator de esteira D8 - D11 | 22.000 | 18.000 | 12.000 |
| Motoniveladora | - | Motoniveladora | 20.000 | 15.000 | 12.000 |
| Caminhão fora de estrada | - | Caminhão fora de estrada | 25.000 | 20.000 | 15.000 |
| Motoescraper | 613/615 | Motoescraper 613/615 | 12.000 | 10.000 | 8.000 |
| Motoescraper | Outros | Motoescraper Outros | 20.000 | 15.000 | 10.000 |
| Carregadeira de pneus | 910/966 | Carregadeira de pneus 910/966 | 12.000 | 10.000 | 8.000 |
| Carregadeira de pneus | 980/992 | Carregadeira de pneus 980/992 | 15.000 | 15.000 | 10.000 |
| Carregadeira de esteira | - | Carregadeira de esteira | 12.000 | 10.000 | 8.000 |
| Compactadores | - | Compactadores | 15.000 | 12.000 | 8.000 |
| Escavadores frontais | - | Escavadores frontais | 18.000 | 15.000 | 10.000 |

Tabela 2.1: Vida útil de cada equipamento.

A depreciação pode ser obtida pela equação 8:

$$D_h = \frac{V_o - V_r}{H} \text{ (Equação 8)}$$

Onde:

D_h -Depreciação horária (R\$/h)

V_o -Valor inicial do equipamento (R\$) (todas as despesas)

V_r - Valor residual do equipamento (R\$) (de 10% a 15% de V_o) ou valor da sucata

H -Vida útil do equipamento (h) .

É possível definir H como $H = a \times n$, assumindo que a é o número de horas de utilização efetiva da máquina por ano.Quando o equipamento for de pneus, V_o deverá ser substituído por: $V'_o = V_o - \text{Custo dos pneus}$.

2.7.1.1.1.2 Os Custos de Investimento

Já os custos de investimento, ou Juros de Investimento, podem ser entendidos como a taxa de retorno mínima que deve apresentar a aplicação do capital inicial. Esses juros são avaliados segunda as equações 9 e 10 a seguir:

$$J_h = \frac{I_m \times j}{a} \text{ (Equação 9)}$$

$$I_m = (V_o - V_r) \frac{n+1}{2n} + V_r \text{ (Equação 10)}$$

Onde:

J_h - Juros de investimento (h)

j - Taxa anual de juros anual do mercado (%)

I_m - Investimento médio anual (R\$/ano)

n - Vida útil em anos

a - Horas de emprego do equipamento por ano (normalmente assume-se o valor de 2000h/ano para as principais máquinas de terraplanagem)

2.7.1.1.2 Custos de Operação (ou variáveis)

Os custos de operação atuam quando os equipamentos estão em pleno funcionamento. Envolvem custos com combustíveis, lubrificantes, graxas, mão-de-obra e leis sociais, pneus e filtros. A seguir serão mostradas como são calculadas cada uma das parcelas que compõem os custos de operação segundo Ricardo e Catalani (1990).

2.7.1.1.2.1 Custos de Combustíveis

Devem ser calculados com precisão, pois têm grande impacto nos custos. Podem ser obtidos diretamente em função da potência, quando não estão disponíveis dados mais precisos, utilizando-se a equação 11:

$$C = 0,267 \times P \text{ (Equação 11)}$$

Onde:

C – Consumo de combustível (l/h)

P – Potência do equipamento (HP) (Motores de quatro tempos)

Além disso, os valores podem ser retirados de tabelas fornecidas pelos fabricantes através do fator f, como mostra a tabela 2, retirada do “Manual de Produção Caterpillar”. A partir de f, temos a equação 12, a qual pode ser verificada a seguir:

$$C = f \times P \text{ (Equação 12)}$$

Onde:

C – Consumo de combustível (l/h)

P – Potência do equipamento (HP)

| Equipamento | Fator de Carga ou Utilização de Potência | | |
|-------------|--|-------|-------|
| | f ~40% | f~55% | f~75% |
| | Baixo | Médio | Alto |

| | | | |
|-----------------------------|------|-------|------|
| Compactadores | 0,10 | 0,130 | 0,15 |
| Tratores de Esteira | 0,11 | 0,150 | 0,18 |
| Carregadeiras de Esteira | 0,11 | 0,160 | 0,20 |
| Carregadeiras de Rodas | 0,10 | 0,140 | 0,19 |
| Motoescreiper | 0,10 | 0,140 | 0,17 |
| Motoniveladoras | 0,10 | 0,140 | 0,19 |
| Caminhões "fora de estrada" | 0,05 | 0,075 | 0,11 |
| Escavadores frontais | 0,10 | 0,150 | 0,20 |

Tabela 1.2: Tabela com fator de carga por equipamento.

2.7.1.1.2.2 Custos de Lubrificantes

Os lubrificantes são usados no Motor, na Transmissão, no Comando Final e no Sistema Hidráulico. Seu consumo é estimado com mais precisão com o uso de tabelas fornecidas por fabricantes. A seguir, estão listados alguns exemplos de equipamentos com seus respectivos consumos médios, tendo por base o “Manual de Produção Cartepillar”:

| Equipamento | Lubrificantes l/h x HP |
|---------------------------------|------------------------|
| Trator de esteira | 0,0014 |
| Motoniveladora | 0,0017 |
| Motoescreiper | 0,0011 |
| Carregadeira de esteiras | 0,0012 |
| Carregadeira de pneus | 0,0013 |
| Motoescrescreiper com 2 motores | 0,001 |
| Caminhão fora de estrada | 0,0013 |

Tabela 2.2: Consumo médio de lubrificantes por alguns equipamentos.

Em muitos casos as condições de trabalho são severas como, por exemplo, operações em ambientes com muita poeira. Nesses casos esses consumos devem ser aumentados em 25%.

2.7.1.1.2.3 Custos de Graxa

O consumo estimado é fornecido por tabelas fornecidas pelos fabricantes. A tabela 4 a seguir é um exemplo desses valores (Ricardo et al. 1990):

| Equipamento | Consumo de graxa (kg/h) |
|--------------------------|-------------------------|
| Trator de esteira | 0,002 |
| Carregadeira de esteira | 0,01 |
| Carregadeira de pneus | 0,015 |
| Motoescreipers | 0,01 |
| Motoniveladora | 0,01 |
| Caminhão fora de estrada | 0,05 |
| Escavadores frontais | 0,02 |
| Motoescreipers | 0,05 |

Tabela 2.4: Consumo de Graxa por equipamento.

2.7.1.1.2.4 Custos de Filtros

Este consumo depende do número das unidades existentes no equipamento e o período de suas trocas. São, em geral, fornecidos pelos fabricantes. A tabela 5 mostra um exemplo de como esses valores podem vir representados:

| Filtros | Custo por unidade | Nº de filtros por 2000h | Total |
|----------------------|-------------------|-------------------------|------------|
| Motor | R\$ 100,00 | 8 | R\$ 800,00 |
| Transmissões | R\$ 40,00 | 4 | R\$ 160,00 |
| Sistema hidráulico | R\$ 60,00 | 4 | R\$ 240,00 |
| Combustível final | R\$ 20,00 | 4 | R\$ 80,00 |
| Combustível primário | R\$ 30,00 | 1 | R\$ 30,00 |
| Ar primário | R\$ 30,00 | 1 | R\$ 30,00 |
| Ar secundário | R\$ 40,00 | 2 | R\$ 80,00 |

Tabela 2.5: Exemplo de tabela fornecendo dados para o cálculo do consumo de filtros.

Fonte: “Manual de Produção Cartepillar”.

2.7.1.1.2.5 Custos de mão-de-obra e Leis Sociais

Na análise de rendimento, a proporção normalmente utilizada é que para cada equipamento necessita-se da dedicação de 1,0 operador e 0,5 ajudante (Ricardo et al.

1990). Os encargos sociais são estimados em 135% sobre o custo da mão-de-obra. Essa é uma despesa que ocorre mesmo com a máquina parada.

2.7.1.1.2.6 Custos de Pneus

Devido ao desgaste rápido por conta das horas de operação, é um custo incluído dentro das despesas operacionais. Sendo assim, o custo desse item deve ser subtraído do valor inicial, para não ser contabilizado na depreciação.

Os custos relacionados a vida útil dos pneus podem ser estimados a partir da tabela 6 (Ricardo et al. 1990). Em geral, são aceitas três zonas de aplicação: A, B e C:

| Equipamento | Zona A | | Zona B | | Zona C | |
|--------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Máx (h) | Mín(h) | Máx(h) | Mín(h) | Máx(h) | Mín(h) |
| Motoniveladora | 6000 | 4000 | 4000 | 2500 | 2500 | 1500 |
| Carregadeira | 4000 | 3000 | 3000 | 2000 | 2000 | 1000 |
| Motoescraper | 5000 | 4000 | 4000 | 3000 | 3000 | 2000 |
| Caminhão fora de estrada | 4000 | 3000 | 3000 | 2000 | 2000 | 1000 |

Tabela 2.3: Estimativa de vida útil dos pneus.

2.7.1.2 Custos de Manutenção

O custo de manutenção mecânica leva em conta o tempo pois, com o passar do tempo, o risco de defeitos mecânicos e diminuição de produtividade tendem a aumentar. Segundo o “Manual de Produção Caterpillar” o custo de manutenção é estimado pela equação 13:

$$M_h = K' \frac{V_o - V_r}{n \times a} \text{ (Equação 13)}$$

Onde:

M_h – Custo de manutenção horária

K– Coeficiente de reparo

V_0 – Valor inicial do equipamento

V_r – Valor residual do equipamento

Para tratores o valor de K' é tabelado. Alguns valores de K' para trator esteira são apresentados a seguir:

Zona A: $K'=0,7$

Zona B: $K'=0,9$

Zona C: $K'=1,3$

Normalmente, adota-se $K'=10K$ e $V_r=0$. Os valores normalmente adotados para K estão apresentados na tabela 7 (Ricardo et al. 1990). Assim, levando-se em conta as considerações anteriores, tem-se:

$$M_h = K' \frac{V_0}{n \times a} \text{ (Equação 14)}$$

Ou

$$M_h = 10K \frac{V_0}{n \times a} \text{ (Equação 15)}$$

| Equipamento | Condições de operação | | |
|--------------------------|-----------------------|--------|--------|
| | Zona A | Zona B | Zona C |
| Trator de esteira | 0,07 | 0,09 | 0,13 |
| Motoescraper | 0,03 | 0,04 | 0,06 |
| Caminhão fora de estrada | 0,02 | 0,09 | 0,13 |
| Carregadeira de esteira | 0,06 | 0,08 | 0,11 |
| Carregadeira de roda | 0,04 | 0,06 | 0,09 |
| Motoniveladora | 0,04 | 0,06 | 0,09 |
| Compactadores | - | 0,075 | - |

Tabela 2.4: Valores do coeficiente de reparo K.

2.7.2 Comparação de compra e locação

A compra de um equipamento poderá ser recomendada quando o custo de sua hora produtiva for inferior ao custo da hora de seu aluguel. Considerando que o Custo

Operacional seja o mesmo para o equipamento alugado ou comprado e chamando L o custo horário do aluguel, tem-se:

$$C_{prop} + C_{mnt} \leq L \text{ (Equação 16)}$$

Onde:

C_{prop} – Custo de Produtividade

C_{mnt} – Custo de Manutenção

L – Custo horário do equipamento

Os juros de investimento e o investimento médio anual foram apresentados nas equações 9 e 10:

$$J_h = \frac{I_m \times j}{a} J_h = \frac{I_m \times j}{a} \text{ (Equação 9) (Equação 9)}$$

$$I_m = (V_o - V_r) \frac{n+1}{2n} + V_r \text{ (Equação 10)}$$

Assim, sendo os custos de propriedade dados pela soma das parcelas de depreciação e dos juros de investimento, pode-se chegar a seguinte equação 17:

$$C_{prop} = D_h + J_h \text{ (Equação 17)}$$

$$C_{prop} = \frac{V_o - V_r}{H} + [(V_o - V_r) \frac{n+1}{2n} + V_r] \frac{j}{a} \text{ (Equação 18)}$$

Para atender a recomendação dada pela equação 16, é preciso agrupar as equações 13 e 18:

$$C_{prop} + C_{mnt} \leq L$$

$$\frac{V_o - V_r}{H} + [(V_o - V_r) \frac{n+1}{2n} + V_r] \frac{j}{a} + K' \frac{V_o - V_r}{n \times a} \leq L \text{ (Equação 19)}$$

2.7.3 Custo Unitário de Serviço de Terraplanagem

O custo unitário pode ser expresso pela equação 20:

$$C = \frac{\sum CT_h}{\sum Q_h} \text{ (Equação 20)}$$

onde:

$\sum CT_h$: Soma dos custos horários dos equipamentos empregados

$\sum Q_h$: Produção horária da equipe

C: Custo unitário do serviço em R\$ / m^3

2.7.4 Custo do Momento de Transporte para distâncias longas, utilizando caminhão basculante

O custo unitário do momento de transporte é dado de forma aproximada pela equação 21:

$$C_t = \frac{C_h}{P_h \times d} \text{ (Equação 21)}$$

Onde:

C_t : Custo do momento de transporte (R\$/ $m^3 \times km$)

C_h : Custo horário do equipamento de transporte

P_h : Produção horária do equipamento de transporte

d: Distância de transporte

3. Simulação: Metodologia

O processo envolve o preenchimento e corte de volumes. As principais atividades envolvem escavação, carregamento e transporte. Os recursos necessários basicamente

são: escavadeira, carregadeira e caminhão. Durante o processo, a escavadeira escava as áreas de corte, enquanto o carregador enche as áreas de preenchimento. A escavadeira despeja o solo de corte no caminhão, enquanto o carregador utiliza o solo trazido pelo caminhão para preencher a terra onde for necessário. Desse modo, os caminhões ficam indo e voltando da escavadeira para o carregador. Nesse caso, quando há mais caminhões disponíveis existe um tempo de espera maior que o necessário. No caso em que há menos caminhões do que o necessário, a escavadeira ou o carregador ficarão ociosos, configurando um desperdício de dinheiro devido à alocação ineficiente de recursos. Um outro caso importante é quando o corte e o aterro têm dimensões diferentes. Quando o volume de corte é maior do que o volume de aterro, o corte adicional precisa ser transportado para um determinado local de despejo especificado, dependendo do projeto. No caso contrário, quando o volume de aterro é maior do que o volume de corte, há necessidade de se adquirir material para ser trazido para o local e cobrir o restante volume de aterro. Nessa situação, uma atividade adicional faz-se necessária.

No modelo analisado mais adiante, foi analisada a seguinte situação:

- Há diferença entre o número de caminhões e escavadeiras ou carregadeiras: equipamentos ficam ociosos. Desperdício de recursos, devido ao emprego ineficiente de equipamentos;

Nota-se que o equipamento fundamental para o desempenho do processo: caminhão.

3.1 Anylogic

O processo de terraplanagem foi modelado utilizando o modelo de eventos discretos que, conforme apresentado anteriormente, consiste em uma quebra do sistema em partes discretizadas e que, em conjunto, representam integralmente o sistema. Os elementos de eventos discretos do Anylogic, utilizados para a modelagem, como também suas funções, estão apresentados abaixo:

| Elemento de eventos discretos | Função |
|-------------------------------|--------|
|-------------------------------|--------|

| | |
|----------------------|--|
| Source | Gera as entidades que serão utilizadas no processo. Aqui é definida a taxa em que tais entidades serão inseridas, como também, a maneira em que as mesmas serão introduzidas deterministicamente ou estocasticamente; |
| Service | Representa atividades que são desempenhadas durante o processo. Aqui é definido quais recursos são consumidos durante a execução da atividade, como também, qual tempo tal atividade leva para ser executada. Além disso, esse tempo pode ser definido de maneira determinística ou estocástica; |
| Resource pool | Representa quantos elementos de cada recurso temos disponível para o processo. Aqui pode ser definido se os elementos são destruídos ao final do processo ou retornam para o seu respectivo “Resource pool”; |
| Sink | Representa o fim do processo e dispensa os recursos utilizados que ainda estejam no processo; |
| Seize/Release | Insere ou retira, respectivamente, recursos do processo. |

Tabela 3.1: Lista de funções usadas no AnyLogic

Fazendo uso dos elementos citados anteriormente, foi desenhado o seguinte processo:

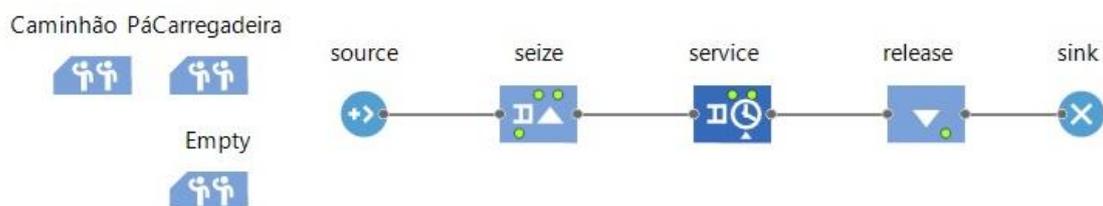


Figura 3.1– Modelo de eventos discretos de uma operação de terraplanagem.

Para tal, os agentes e variáveis utilizados foram os seguintes:

-  camião
-  páCarregadeira
-  EmptyNb

Figura 3.1– Agentes e variáveis utilizados para o processo.

Como é possível notar nas figuras 11 e 12, foi inserido no processo tanto um “Resource pool” para caminhões como para pás-carregadeiras. Da mesma forma, há agentes representando os dois maquinários. Isso foi feito para possibilitar a análise do comportamento do processo, variando-se também o número de pás-carregadeiras.

No caminho mostrado na Figura 11, cada entidade inserida representa um volume de 9m³ de terra que foi retirado do aterro. Esse valor corresponde à capacidade do caminhão utilizado no modelo. O atraso do elemento “service” foi calculado baseado na produtividade diária de cada equipamento seguindo a tabela abaixo (Zankoul et. al, 2015):

| Activity | Resource | Daily Output |
|----------------|----------------|--------------------------|
| Excavating | Dozer (410 HP) | 489 bank m ³ |
| Filling | Dozer (200 HP) | 765 loose m ³ |
| Hauling Full | Dump Truck | - |
| Hauling Empty | Dump Truck | - |
| Loading Borrow | Dozer (200 HP) | 917 loose m ³ |

Tabela 3.2: Tabela dos recursos disponíveis e as respectivas saídas diárias

O número de caminhões e pás-carregadeiras foi definido estaticamente no início do processo e mantido constante durante o tempo de simulação. Como podemos ver na figura 12, foi inserida também uma variável “EmptyNB” que tem valor dinâmico. Tal variável tem valor inicial igual à quantidade descarregamentos em caminhões de 9m³, necessários para se executar o serviço e diminui toda vez que um agente “caminhão” passa pelo elemento “service”. As linhas de código abaixo foram adicionadas como ação ao final de toda execução do “service”:

```
EmptyNb--;
```

```
Empty.set_capacity(EmptyNb);
```



Figura 3.3: Ação à ser executada ao final do “service”

A adição das linhas de código acima significa que a variável “EmptyNB” terá seu valor reduzido de uma unidade toda vez que um agente passar pelo “service”, representando que um caminhão foi carregado e 9m³ foram retirados do aterro.

Utilizando a representação gráfica de modelos, foram adicionados elementos gráficos à cada um dos agentes e, em seguida, foram inseridos elementos ao sistema onde ocorreu a simulação. O ambiente final do Anylogic está representado nas figuras 14,15 e 16, abaixo:

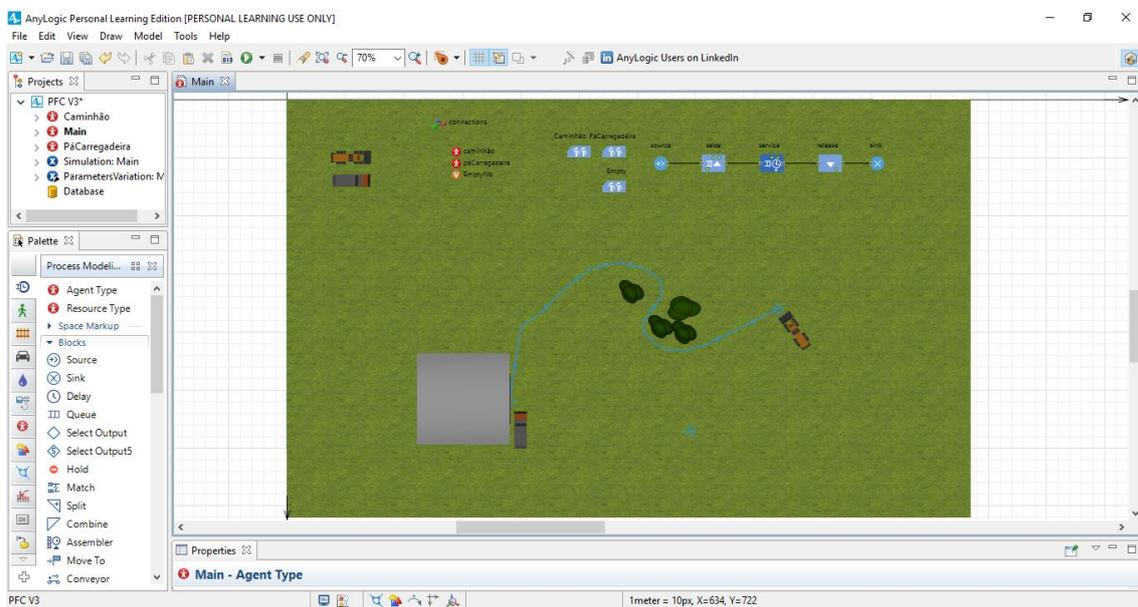


Figura 3.4 – Ambiente do Anylogic após o início da simulação.

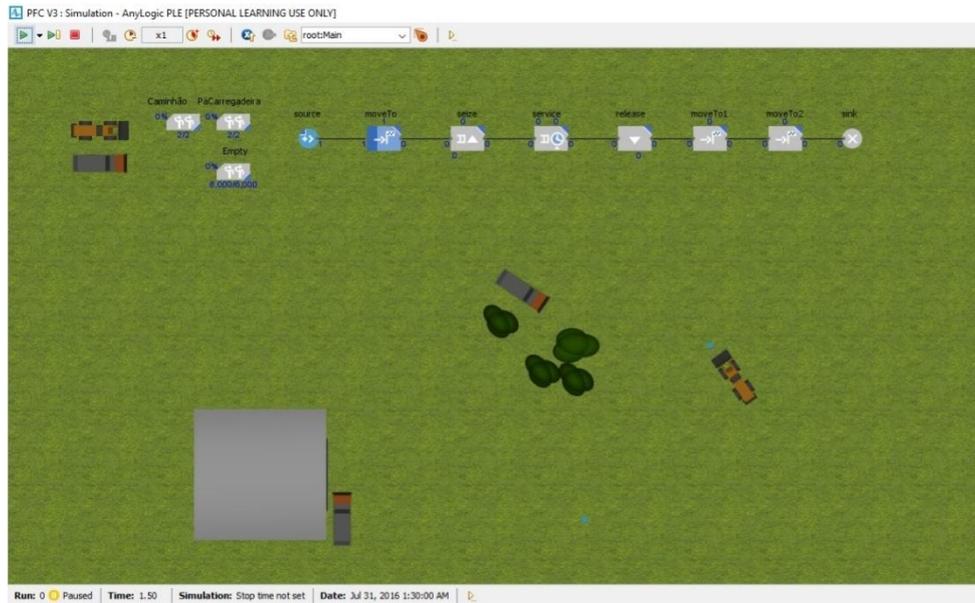


Figura 3.2: Execução bidimensional da simulação.

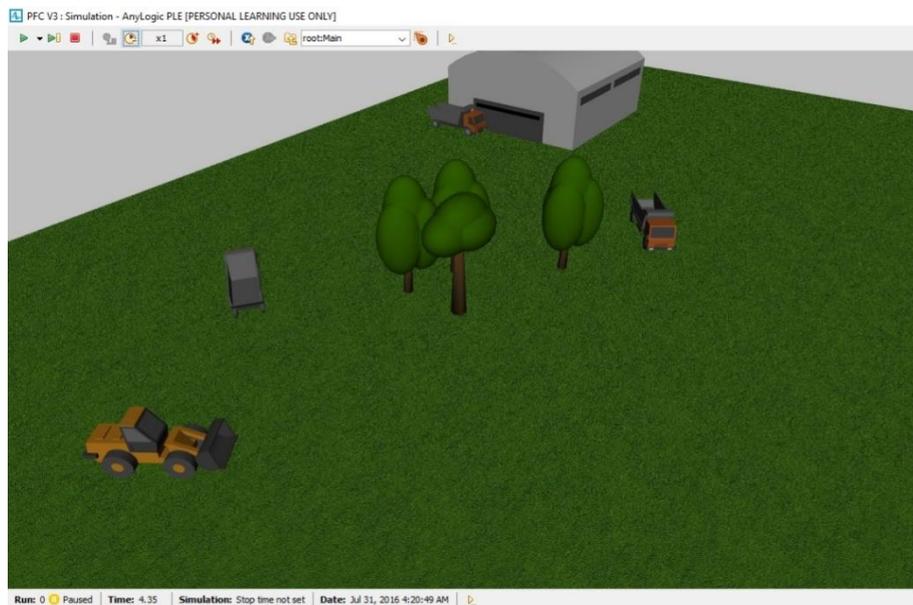


Figura 3.3: Execução tridimensional da simulação

Para a execução de cada simulação foi definido previamente a quantidade de terra a ser aterrada (definido em “EmptyNB” como quantidade de caminhões de necessários para se realizar o serviço), a quantidade de caminhões disponível (Definido em “Resource pool caminhões”) e quantidade de pás-carregadeiras (Definido em “Resource pool páCarregadeira”).

Outra alteração que precisou ser feita antes da execução da simulação foi em relação da taxa de entrada de agentes no processo, definido no “source”. Tal ajuste foi feito por dois motivos: primeiro, para garantir que houvessem agentes suficientes para a execução do serviço sem que o elemento “service” ficasse ocioso; segundo, para que não houvesse uma enorme quantidade de agentes no processo. O último motivo decorre do fato de que muitos agentes inseridos geram um grande consumo de memória por parte do computador, ocasionando lentidão e, às vezes, travamento do programa. Os tempos de entrada de agentes foram definidos de acordo com a tabela 10 abaixo, tomando por base a quantidade de caminhões na “Resource pool caminhões”:

| Número de caminhões | Tempo de entrada de agentes (agentes/hora) |
|---------------------|--|
| 1 | 0,20 |
| 2 | 0,10 |
| 3 | 0,08 |
| 4 | 0,05 |
| 5 | 0,04 |
| 6 | 0,04 |
| 7 | 0,03 |
| 8 | 0,03 |
| 9 | 0,02 |
| 10 | 0,02 |

Tabela 3.3: Tempo de entrada de agentes no processo

Assim, executando-se o modelo, temos o tempo de execução medido no canto inferior da tela:

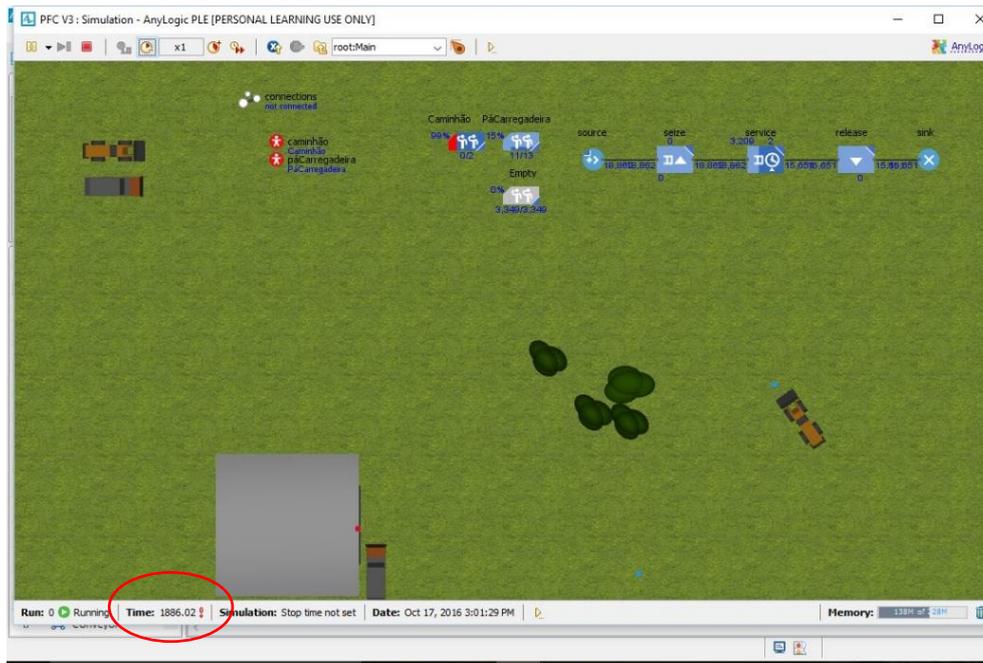


Figura 3.4: Tempo de Execução da simulação.

3.2 Cálculo de custos

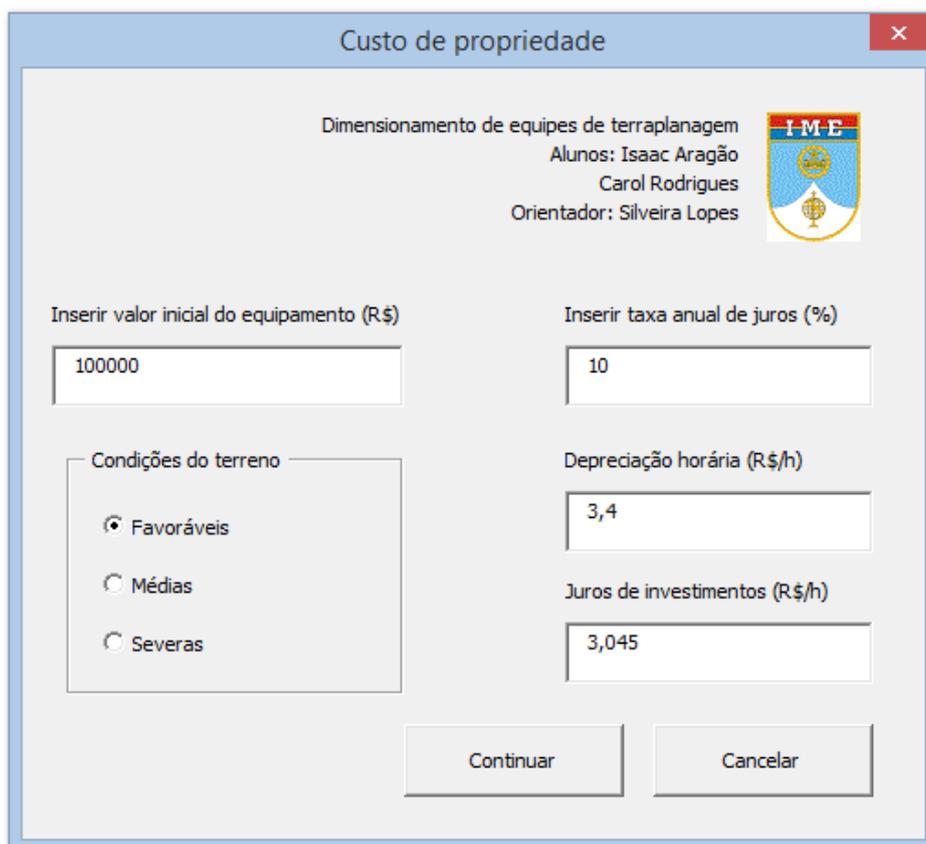
Uma interface no Excel foi criada para um usuário realizar o planejamento da equipe de terraplanagem de sua obra. A planilha foi elaborada para cálculo de custo com maquinário pesado.



Figura 3.8: Ferramenta de cálculo de custo para equipamentos de terraplanagem.

O objetivo da ferramenta é otimizar o cálculo da estimativa dos custos com equipamentos e foi baseada no cálculo de custos apresentados anteriormente. A partir dela, é possível analisar os custos de um caminhão fora-de-estrada.

O preenchimento da planilha pode ser feito por meio de formulário ou do preenchimento na própria planilha. Apenas os campos não hachurados devem ser preenchidos. Abaixo, está representado um exemplo do formulário que a ferramenta apresenta ao usuário, requisitando dados para o cálculo final de custos.



The image shows a software window titled "Custo de propriedade" (Property Cost). The window contains the following information and input fields:

- Title:** Custo de propriedade
- Header:** Dimensionamento de equipes de terraplanagem
- Students:** Alunos: Isaac Aragão, Carol Rodrigues
- Advisor:** Orientador: Silveira Lopes
- Logo:** I-M-E logo with a globe icon.
- Input Fields:**
 - Inserir valor inicial do equipamento (R\$): 100000
 - Inserir taxa anual de juros (%): 10
 - Depreciação horária (R\$/h): 3,4
 - Juros de investimentos (R\$/h): 3,045
- Radio Buttons (Condições do terreno):**
 - Favoráveis
 - Médias
 - Severas
- Buttons:** Continuar, Cancelar

Figura 3.9: Cálculo do custo de propriedade.

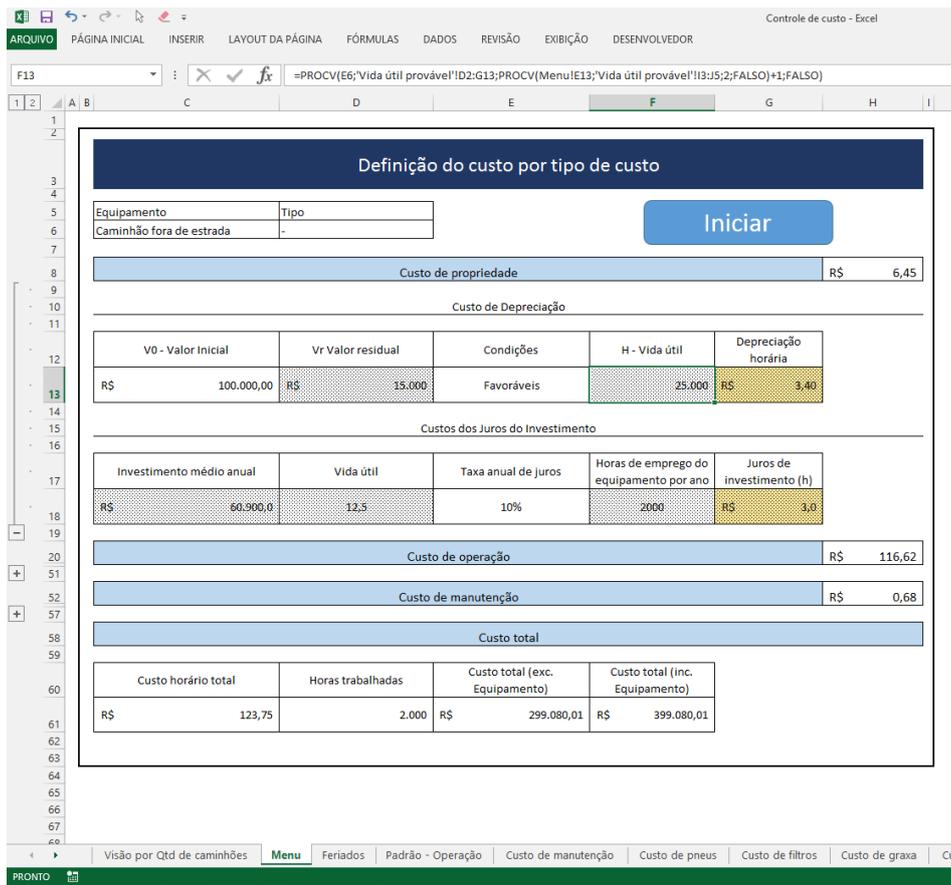


Figura 3.10: Preenchimento da ferramenta de custos por planilha

Após o preenchimento dos dados, obtém-se os valores de custo de propriedade, custo de operação e custo de manutenção. De posse desses dados, o usuário poderá ter uma visão por quantidade de caminhões na aba “Visão por Qtd. De caminhões”. Lá, inserindo-se os resultados obtidos no Anylogic, obtém-se o custo exclusivo de caminhões da obra para diferentes números de caminhões.

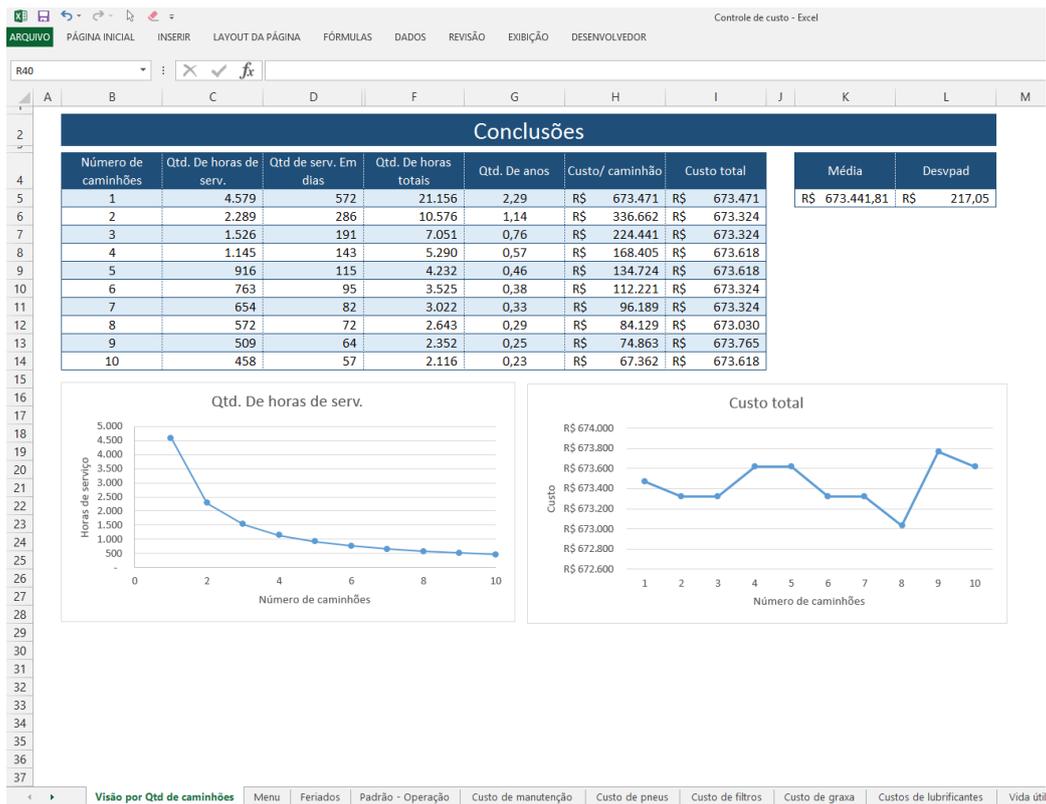


Figura 3.11: Análise do custo com caminhões.

Conforme mencionado anteriormente, o custo total da obra é calculado através da soma de custo total de propriedade, custo total de operação e custo total de manutenção. O custo total de operação é calculado através da multiplicação do custo horário de operação pela quantidade de horas em operação do equipamento. Os outros dois custos são calculados pela multiplicação dos seus custos horários pela quantidade de horas de posse do equipamento.

A ferramenta possui valores pré-definidos de consumo de insumos por tempo de serviço. Esses valores podem ser ajustados nas abas referentes. A ferramenta também possui um banco de dados de feriados para o cálculo da quantidade de dias de posse de equipamento à partir da quantidade de horas de serviço.

4. Resultados e discussões

4.1 Anylogic

A partir da execução da simulação para diferentes números de pás-carregadeiras e um volume de terra de 171.000 m³, obteve-se os seguintes resultados:

| Qtd. De pás-carregadeiras | | | | |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Qtd. De pás-carregadeiras - 171000m ³ | | | | |
| Número de caminhões | Qtd. De pás-carregadeiras = 2 | Qtd. De pás-carregadeiras = 4 | Qtd. De pás-carregadeiras = 7 | Qtd. De pás-carregadeiras = 10 |
| 1 | 4579 | 4579 | 4579 | 4579 |
| 2 | 2289 | 2289 | 2289 | 2289 |
| 3 | 2289 | 1526 | 1526 | 1526 |
| 4 | 2289 | 1145 | 1145 | 1145 |
| 5 | 2289 | 1145 | 916 | 916 |
| 6 | 2289 | 1145 | 763 | 763 |
| 7 | 2289 | 1145 | 654 | 654 |
| 8 | 2289 | 1145 | 654 | 572 |
| 9 | 2289 | 1145 | 654 | 509 |
| 10 | 2289 | 1145 | 654 | 458 |

Tabela 4.1: Comportamento do modelo variando-se o número de pás-carregadeiras

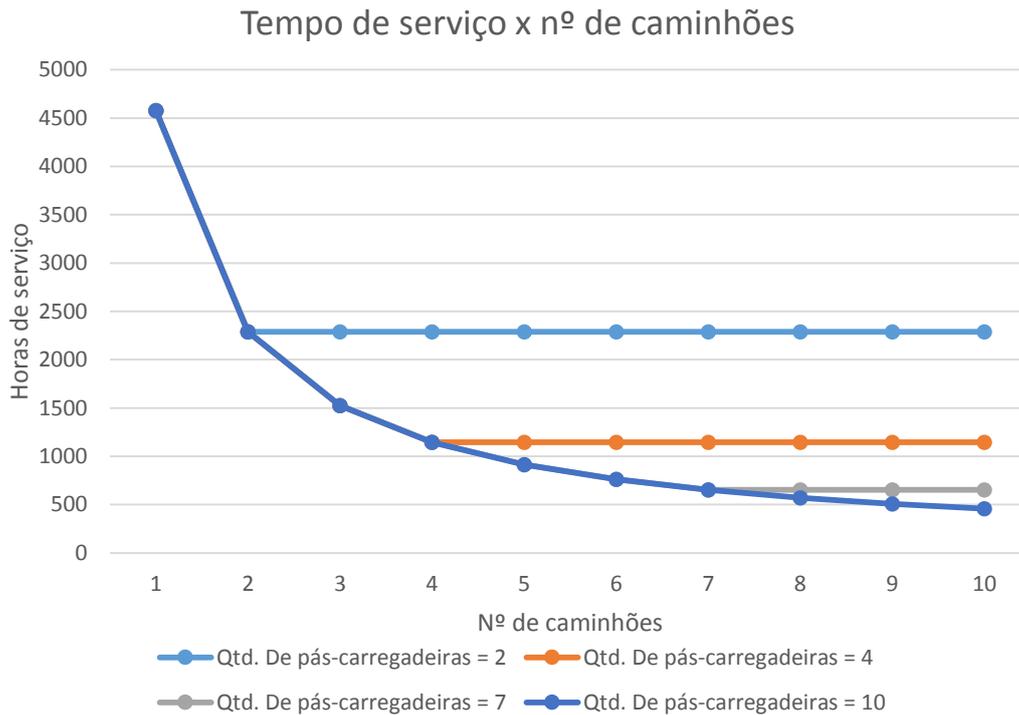


Gráfico 4.1: Comportamento do modelo variando-se o número de pás-carregadeiras

Tal distribuição ocorreu porque a partir de certo momento, a quantidade de pás-carregadeiras passa a ser o fator limitante ao invés do nº de caminhões, ditando, dessa forma, o comportamento do modelo. Essa evolução está representada no gráfico abaixo:

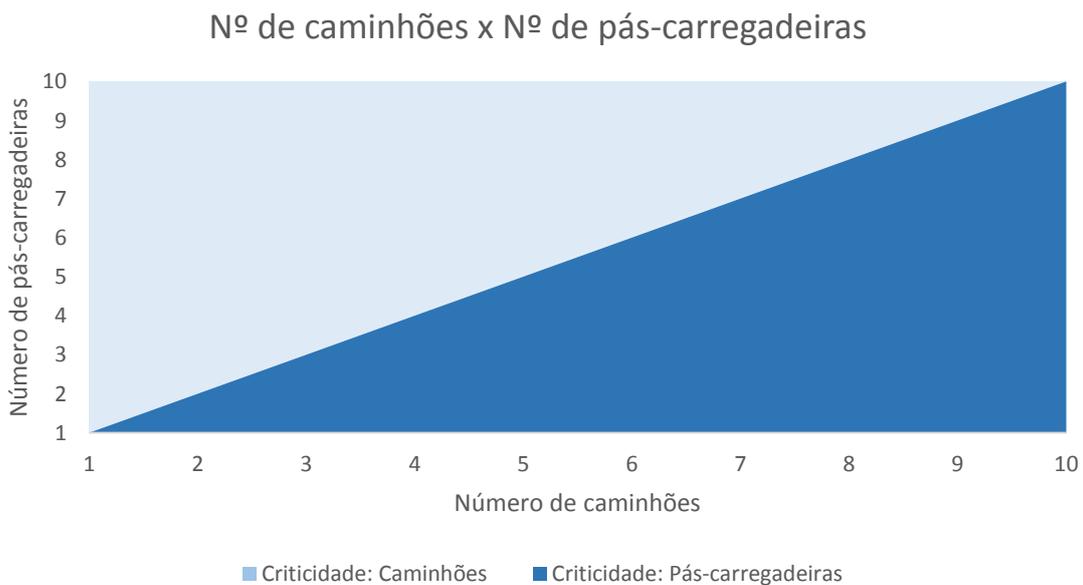


Gráfico 4.2: Nº de caminhões x Nº de pás-carregadeiras.

Para análise exclusiva da influência dos caminhões no comportamento do sistema, foi fixado um valor elevado de pás-carregadeiras, de forma que a criticidade do sistema fosse definida apenas pela quantidade de caminhões. Dessa forma, fixando-se o número de pás-carregadeiras em 10 e de posse dos dados de tempo de entrada de agentes da tabela 10, temos abaixo o comportamento do modelo para diferentes volumes de terra:

| Quantidade de terra | | | | |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Número de caminhões | Qtd. De horas de serv. | | | |
| | Vol. de terra = 171000m ³ | Vol. de terra = 135000m ³ | Vol. de terra = 90000m ³ | Vol. de terra = 63000m ³ |
| 1 | 4579 | 3615 | 2410 | 1687 |
| 2 | 2289 | 1807 | 1205 | 843 |
| 3 | 1526 | 1205 | 803 | 562 |
| 4 | 1145 | 904 | 602 | 422 |
| 5 | 916 | 723 | 482 | 337 |
| 6 | 763 | 603 | 401 | 281 |
| 7 | 654 | 516 | 344 | 241 |
| 8 | 572 | 452 | 301 | 211 |
| 9 | 509 | 401 | 268 | 187 |
| 10 | 458 | 361 | 241 | 168 |

Tabela 4.2: Comportamento do modelo considerando diferentes volumes de terra.

Quantidade de horas para execução do serviço

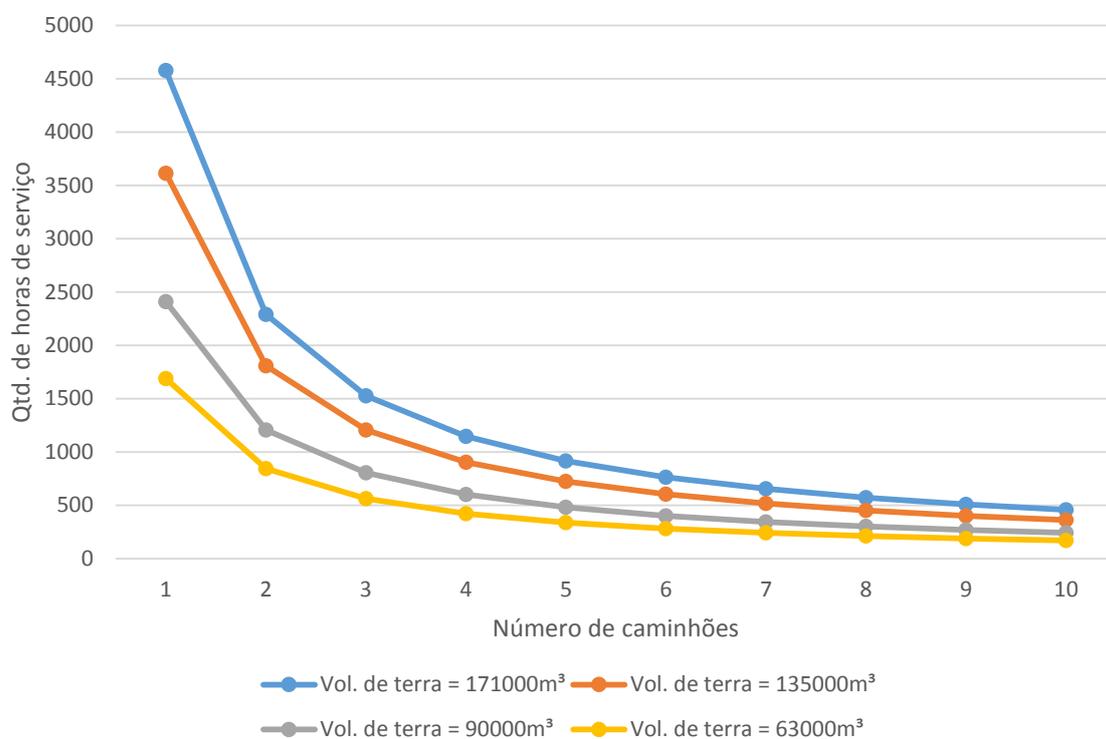


Gráfico 4.3: Quantidade de horas executadas para a execução do serviço.

Os resultados obtidos nas simulações permitiram avaliar criticamente o planejamento da obra. Observando, por exemplo, os resultados encontrados para um volume de terra de 171.000 m³, nota-se que é possível ter uma redução percentual de até 90% do tempo para execução da obra. Em situações em que a rapidez da obra é um fator crítico, números mais elevados de caminhões são recomendados.

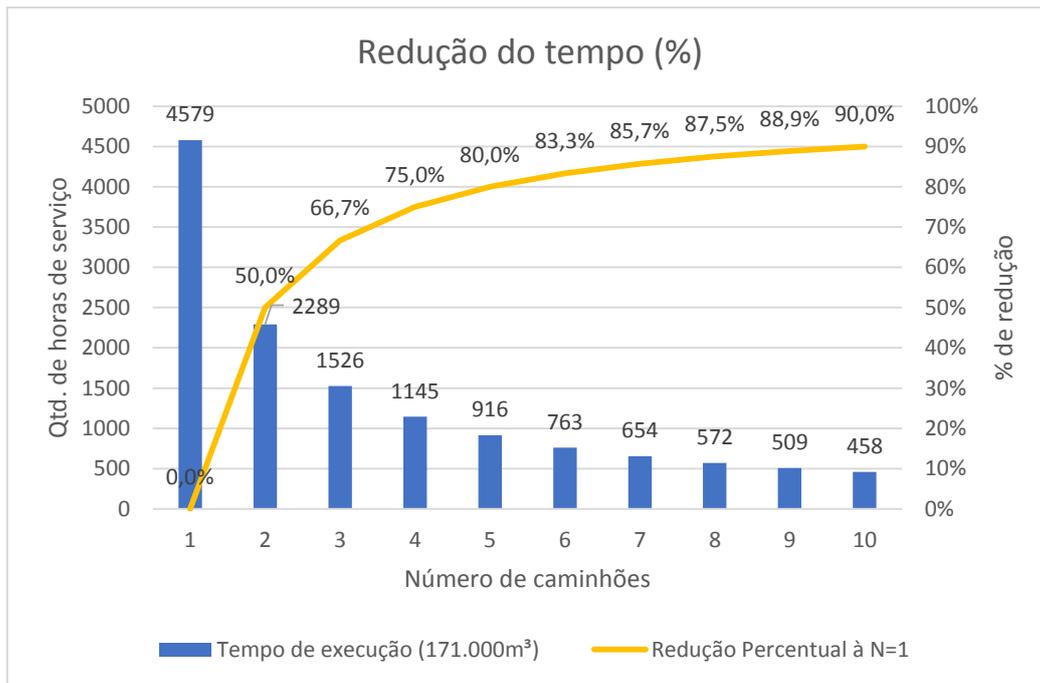


Gráfico 4.4: Redução percentual do tempo em função do número de caminhões.

Além disso, para diferentes volumes de terra, o desvio padrão entre os tempos de execução de serviço tende a diminuir a medida em que se aumenta o número de caminhões. Isso significa que, para diferentes obras, o tempo de execução do serviço é expressivamente diferente caso sejam utilizados poucos caminhões, mas tende a se aproximar caso seja utilizado um número elevado de caminhões.

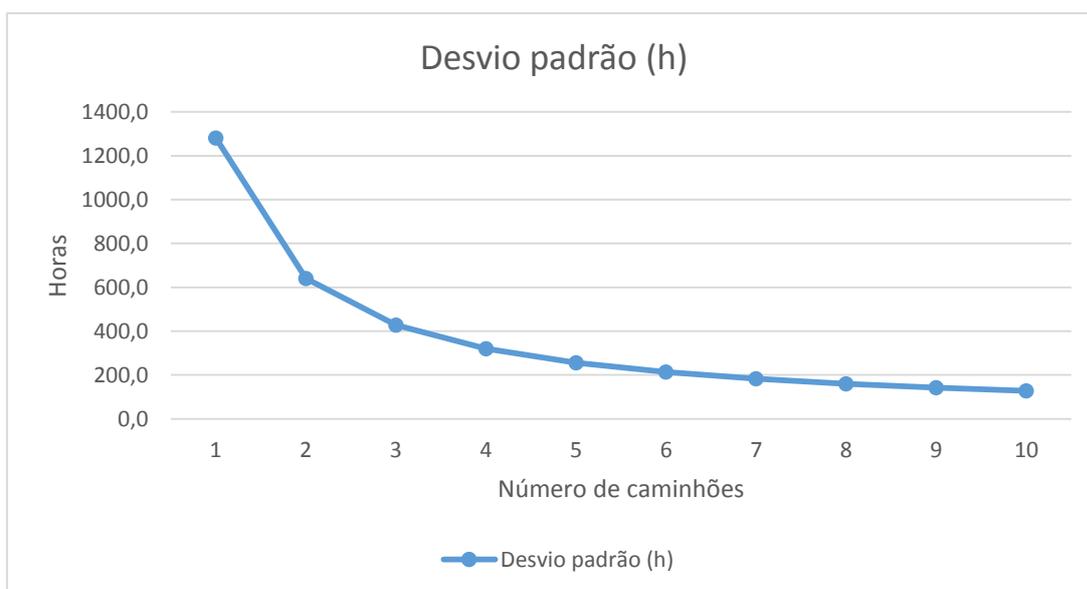


Gráfico 4.5: Desvio Padrão em função do número de caminhões.

4.2 Análise de Custos a partir da planilha elaborada

Os parâmetros inseridos na planilha de cálculo de custos foram os seguintes:

- Custo de propriedade:
 - Valor inicial: R\$ 100.000;
 - Condições: Favoráveis;
 - Taxa anual de juros: 10%.

- Custo de operação:
 - Potência do equipamento: 270 HP;
 - Fator de carga: 50%
 - Preço do combustível: R\$ 1,30;
 - Preço do lubrificante: R\$ 8,70;
 - Preço do kg de graxa: R\$ 30,30;
 - Custo horário do operador: R\$ 5,00;
 - Custo horário do ajudante: R\$ 3,00;
 - Custo do pneu: R\$ 7.000,00/unidade;
 - Quantidade de pneus: 4;
 - Zona A

- Custo de manutenção:
 - Zona A;

Foi possível obter os seguintes valores de custo:

- Custo de propriedade: R\$ 6,45/h
- Custo de operação: R\$ 57,23/h
- Custo de manutenção: R\$ 0,68/h

Para o exemplo utilizado na sessão de simulação, onde há escavação de 171.000 m³, o cálculo do custo com caminhões foi feito multiplicando-se o custo de propriedade e de manutenção pelo tempo de posse do equipamento e o custo de operação pelo tempo de operação do equipamento. Dessa forma obteve-se os seguintes resultados:

| Número de caminhões | Qtd. De horas de serv. | Qtd. De horas totais | Custo/ caminhão | Custo total |
|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------|-------------|
| 1 | 4.579 | 21.156 | R\$ 401.515 | R\$ 401.515 |
| 2 | 2.289 | 10.576 | R\$ 200.714 | R\$ 401.428 |
| 3 | 1.526 | 7.051 | R\$ 133.809 | R\$ 401.428 |
| 4 | 1.145 | 5.290 | R\$ 100.401 | R\$ 401.603 |
| 5 | 916 | 4.232 | R\$ 80.321 | R\$ 401.603 |
| 6 | 763 | 3.525 | R\$ 66.905 | R\$ 401.428 |
| 7 | 654 | 3.022 | R\$ 57.347 | R\$ 401.428 |
| 8 | 572 | 2.643 | R\$ 50.157 | R\$ 401.252 |
| 9 | 509 | 2.352 | R\$ 44.632 | R\$ 401.691 |
| 10 | 458 | 2.116 | R\$ 40.160 | R\$ 401.603 |

Tabela 5: Custo total com caminhões para um volume de 171.000 m³.

O fato de a simulação ter sido implementada deterministicamente gerou uma baixa variação no custo total da obra. Para os diferentes valores de custo total apresentados na tabela 13 acima, temos uma média de R\$ 401.497,72 e um desvio padrão de apenas R\$ 129,40.

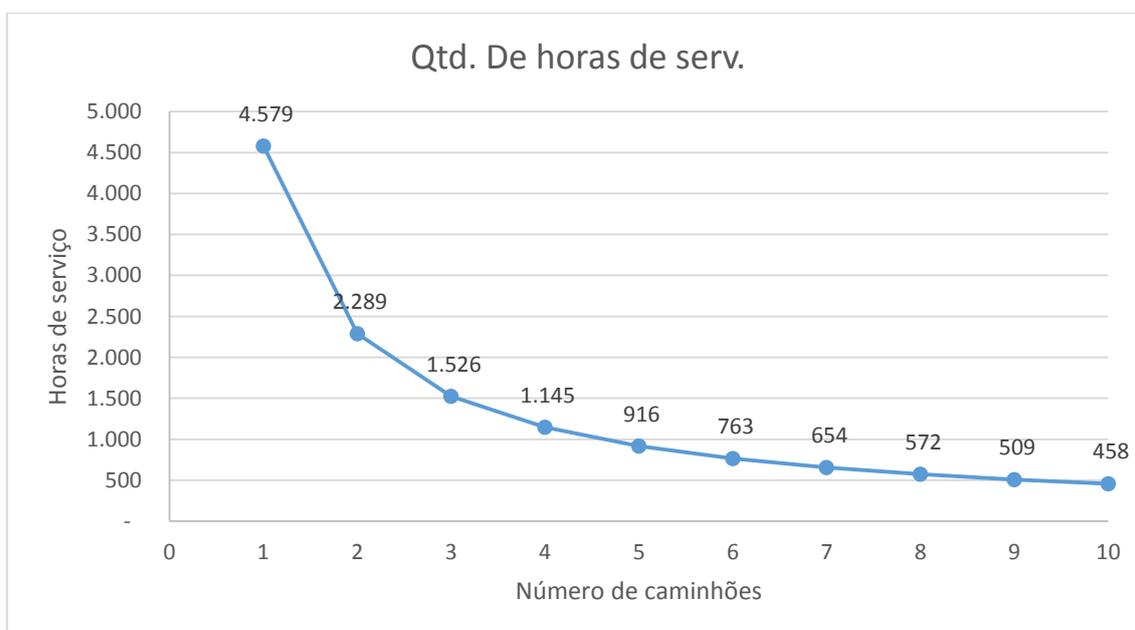


Gráfico 4.6: Quantidade de horas de serviço em função do número de caminhões para um volume de 171.000 m³.

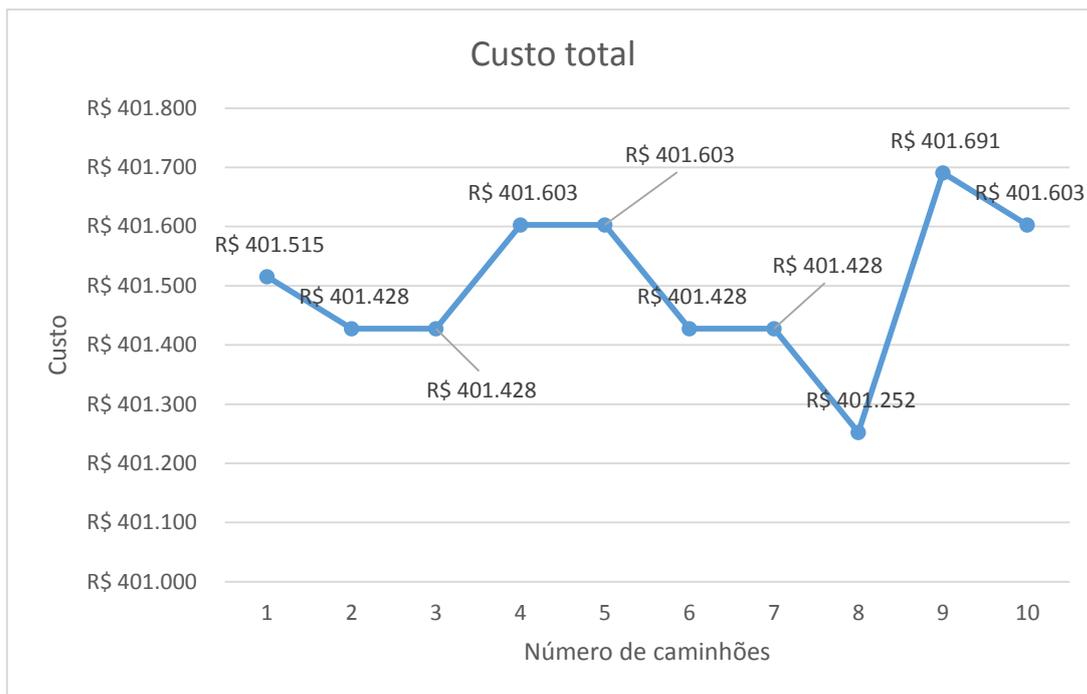


Gráfico 4.7: Custo total em função do número de caminhões.

Replicando-se o mesmo procedimento para os outros valores de tempo de serviço para os aterros de 135.000 m³, 90.000 m³ e 63.000 m³, chegou-se ao seguinte resultado:

| Número de caminhões | 171.000 m ³ | 135.000 m ³ | 90.000 m ³ | 63.000 m ³ |
|---------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | R\$ 401.515 | R\$ 316.986 | R\$ 211.324 | R\$ 147.927 |
| 2 | R\$ 401.428 | R\$ 316.898 | R\$ 211.324 | R\$ 147.839 |
| 3 | R\$ 401.428 | R\$ 316.986 | R\$ 211.236 | R\$ 147.839 |
| 4 | R\$ 401.603 | R\$ 317.073 | R\$ 211.148 | R\$ 148.014 |
| 5 | R\$ 401.603 | R\$ 316.986 | R\$ 211.324 | R\$ 147.751 |
| 6 | R\$ 401.428 | R\$ 317.249 | R\$ 210.973 | R\$ 147.839 |
| 7 | R\$ 401.428 | R\$ 316.723 | R\$ 211.148 | R\$ 147.927 |
| 8 | R\$ 401.252 | R\$ 317.073 | R\$ 211.148 | R\$ 148.014 |
| 9 | R\$ 401.691 | R\$ 316.460 | R\$ 211.499 | R\$ 147.576 |
| 10 | R\$ 401.603 | R\$ 316.547 | R\$ 211.324 | R\$ 147.313 |

Tabela 6: Custos de obra para diferentes tipos de volume de terra.

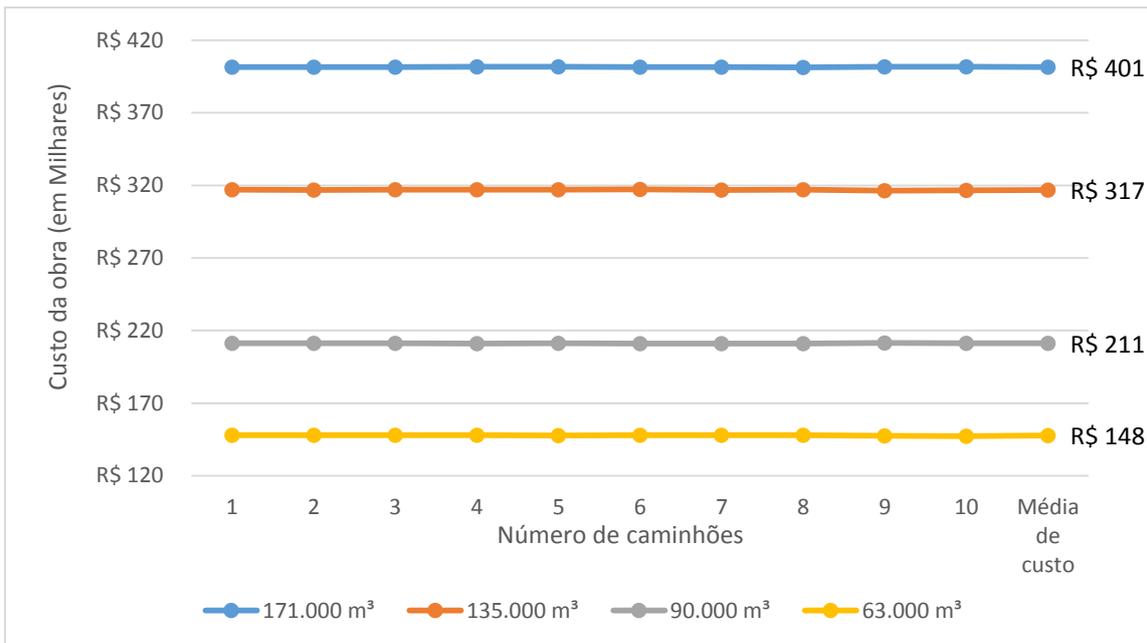


Gráfico 4.8: Custo de obra para diferentes volumes de terra.

| Número de caminhões | 171.000 m³ | 135.000 m³ | 90.000 m³ | 63.000 m³ |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Média de custo | R\$ 401.498 | R\$ 316.898 | R\$ 211.245 | R\$ 147.804 |
| Desvio padrão | R\$ 129 | R\$ 248 | R\$ 146 | R\$ 216 |

Tabela 7: Média e desvio padrão do custo para diferentes volumes de terra.

Observando-se os valores da média de custos para os diferentes volumes de terra, notou-se que o desvio padrão é muito inferior à média. Isso decorre do fato da simulação ter sido executada de forma determinística, onde é esperado um desvio padrão nulo. Porém, como o tempo de execução de obra, obtido pela simulação, possui apenas duas casas decimais, temos um desvio padrão residual.

4.3 Análise de obra em execução

O gráfico abaixo mostra um exemplo de uma obra em que o tempo previsto de execução foi de 1526h e de um volume de terra de 171.000 m³ resultando em 3 caminhões a serem utilizados:

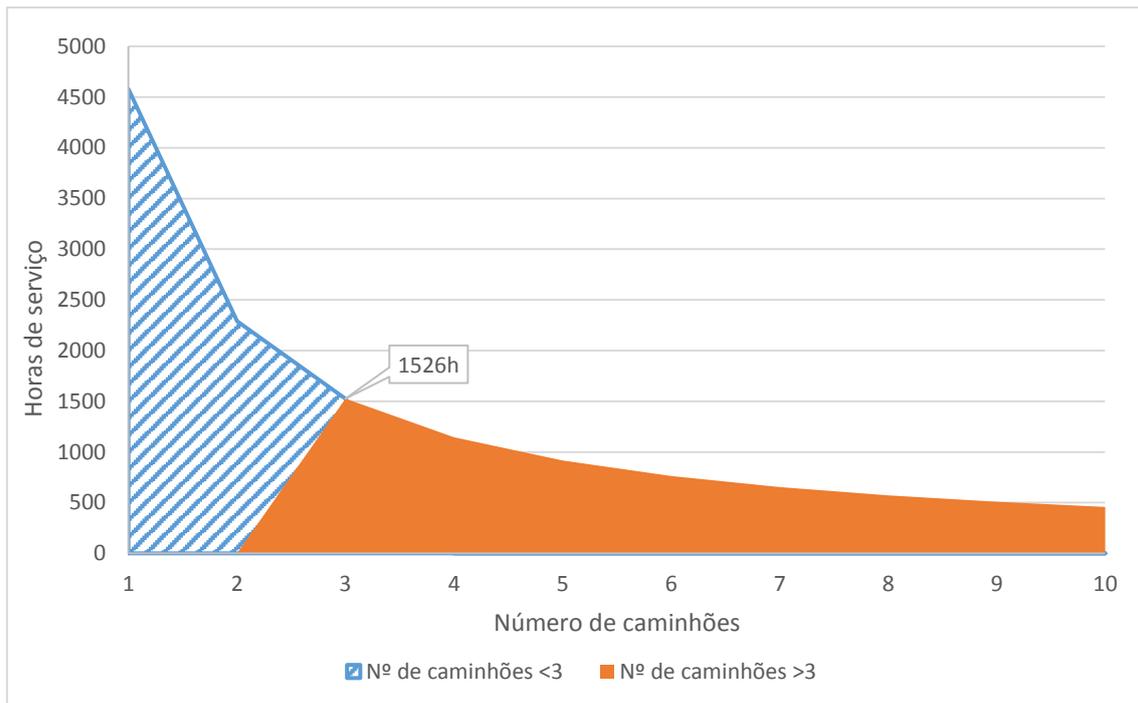


Gráfico 4.9: Análise para obra corrente.

Caso a situação real esteja na zona não hachurada, ou seja, mais caminhões do que o necessário para atingir o prazo previsto, há um gasto maior do que o necessário, já que esses caminhões poderiam estar sendo utilizados em outra obra ou ser dispensados sem afetar o prazo. Caso a situação real esteja na zona hachurada, há na obra uma quantidade de caminhões menor do que a necessária para o atingir o prazo.

Na análise dos custos com caminhões, de posse do tempo de execução do serviço e do número de caminhões, é possível prever quanto será gasto com os caminhões na obra.

Os resultados obtidos deterministicamente geraram análises bastante relevantes para o planejamento de obras de terraplanagem. No entanto, o fato de tais números terem sido gerados por um modelo determinístico faz com que ele não seja totalmente representativo da realidade, possuindo erros pois não considera a estocasticidade do sistema. É possível futuramente realizar um levantamento formal dos dados, que poderão servir como base para um estudo da estocasticidade do processo de terraplanagem.

5. Conclusão

Esse projeto de fim de curso teve por finalidade abordar o tema de dimensionamento de equipes de terraplanagem focada em caminhões. Esse dimensionamento é usualmente feito sem estudos mais detalhados, tomando por base dados com pouca precisão, levando a possíveis desperdícios de recursos pela falta de um dimensionamento adequado previsto para o projeto.

A utilização de modelos de simulação permite análises mais criteriosas e maior embasamento para tomada de decisões em uma etapa de projeto que necessita de grande parte dos recursos. Ela pode ser utilizada não só na etapa de planejamento, em que é possível se determinar a quantidade de caminhões a ser alocada para a obra à partir do tempo previsto de execução, como também, na análise e na correção em uma obra corrente.

Embora o Anylogic permita a utilização de simulações estocásticas, estas não foram abordadas neste trabalho. Como sugestão para futuros estudos, é sugerido o mapeamento de quais são os principais fatores geradores de estocasticidade em caminhões que trabalham em processos de terraplanagem e a implementação de tais fatores em um modelo de simulação. Tais ajustes trariam um enriquecimento ao trabalho e serviriam como fonte de consulta para a comparação com resultados reais.

6. Referências Bibliográficas

A. BORSHCHEV AND A. FILIPPOV. **From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools**. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society, Oxford, England, 2004.

BANKS, JERRY; II, JOHN S. CARSON; NELSON, BARRY L. **Discrete-Event system simulation**. 3. ed. Boston: Pearson, 2004.

BORSHCHEV, A..**The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod modeling withAnyLogic 6**. AnyLogicNorth America, 2003.

CRISTÓBAL, J. R. S. **Time, Cost, and Quality in a Road Building Project**.J. Constr. Eng. Manage. 2009.135:1271-1274, 2009.

FORRESTER, Jay Wright. **Principles of Systems**. 2. ed.: Pegasus Communications, 1961.

GRIGORYEV, ILYA. Anylogic 7 in Three Days: **A Quick Course in Simulation Modeling**. 3. ed. Oxford: Createspace Independent Publishing Platform, 2014.

JAYAWARDANE, A. K. W., E PRICE, A. D. F. **A New Approach for Optimizing Earth Moving Operations, Parts I and II**, Proc. Instn. Civ. Engrs Transp., 105, pp. 195-207, 1994.

HARE, L. W., KOCH, V. R. ANDLUCET, Y. **Models and Algorithms to Improve Earthwork Operations in Road Design Using Mixed Integer Linear Programming**. European Journal of Operational Research, 215, 470-480, 2011.

LAW, AVERILL M.; KELTON, W. DAVID. **Simulation Modeling and Analysis**. 3. ed. New York: Mcgraw-hill, 2000.

LIMA, R. X. **.Logística da Distribuição de Materiais em Pavimentação Rodoviária – Uma Modelagem em Programação Matemática**. Dissertação de Mestrado – Programa]de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 288 fl, 2003

PRADO, D. **Usando o Arena em Simulação**. Editora O Lutador. 2. Ed. Belo Horizonte, 2004.

RICARDO, H.S. E CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação – Terraplanagem e Escavação de Rocha**. Editora Pini, 3. ed. São Paulo, 1990.

SCHMIDT, Joseph William; TAYLOR, Robert Edward. **Simulation and Analysis of Industrial Systems**: Richard D. Irwin, 1970.

The Anylogic Company. Disponível em: <http://www.anylogic.com/> . Acesso em: 08 de Mai 2016.

Ururau. Disponível em: <http://pep.ucam-campos.br/index.php/mais-noticias/67-software-ururau>.> Acesso em: 10 de Mai. 2016.

Manual de Produção Caterpillar. <Disponível em: https://dl.dropboxusercontent.com/u/5842073/LIVRARIA/M%C3%A1quinas%20Industriais/Manual%20de%20Produ%C3%A7%C3%A3o%20Caterpillar%20-%20Edu%C3%A7%C3%A3o%2031.pdf?TB_iframe=true&width=900&height=500&keepThis=true> Acesso em: 15 de Set. 2016.

ZANKOUL, E.; KHOURY, E.; AWWAD, R. **Evaluation of Agent-Based and Discrete-Event Simulation for Modeling Construction Earthmoving Operation**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/278673546_Evaluation_of_Agent-Based_and_Discrete-Event_Simulation_for_Modeling_Construction_Earthmoving_Operations> . Acesso em: 20 de Jul. 2016.